

**Diseño de una Metodología para Análisis de Falla en Elementos de Motores de Combustión
Interna**

Lennyn Alfonso Gutierrez Ortiz, Oscar Mauricio Fonseca Arango

**Trabajo De Grado Para Optar Al Título De
Ingeniero Mecánico**

Director

Jorge Luis Chacon Velasco

Ingeniero Mecánico, Ph.D

Codirector

Alberto David Pertuz Comas

Ingeniero Mecánico, Phd En Ciencia De Los Materiales

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela De Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2018

Dedicatoria

Agradezco a Dios por darme fortaleza para superar las adversidades de la vida, a mi madre Omaira Ortiz por su apoyo incondicional, a mi padre Jorge Alberto Gutiérrez por su sabiduría.

A todas las personas que constantemente creyeron en mi capacidad y que de alguna u otra manera contribuyeron a que lograra esta gran meta, por su tiempo, dedicación y confianza.

A todos los profesores de la escuela de Ingeniería Mecánica quienes me han aportado todos los conocimientos profesionales y personales para llegar a finalizar con éxito esta gran meta.

Lennyn Alfonso Gutierrez Ortiz

Dedicatoria

Dedico este logro en primera parte a Dios por darme la salud, la sabiduría y la tenacidad, las cuales me permitieron desarrollar esta linda carrera y culminar con éxito superando pruebas a lo largo de estos cinco años.

A mi padre Pedro Fonseca, por interminables días y noches en frente de un volante, con un deseo incansable en la superación de sus hijos. Y por que siempre fue refugio en los momentos difíciles.

A mi madre por su enorme apoyo durante todos estos años, y brindarme la paz y tranquilidad que se requieren en un hogar. Mujer incomparablemente luchadora.

A las personas que de una u otra manera intervinieron en mi vida y que ayudaron a formar la persona y el ingeniero que soy hoy en día.

Oscar Mauricio Fonseca Arango

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	18
1. Descripción del proyecto	19
1.1 Planteamiento del problema	19
1.2 Justificación para solucionar el problema	20
1.3 Objetivos del trabajo de grado	22
1.3.1 Objetivo general.	22
1.3.2 Objetivos específicos.	22
1.4 Justificación de la solución	23
2. Fallos en pistón, biela y cigüeñal	24
2.1 Fallo	25
2.2 Determinación de criticidad de fallos	26
2.2.1 Elaboración de Pareto para análisis de criticidad en elementos de motores de combustión interna.	27
2.3 Modos de fallo en el pistón, biela y cigüeñal	29
2.4 Análisis de confiabilidad en el pistón, la biela y el cigüeñal	32
2.4.2 Análisis de confiabilidad en la biela.	37
2.4.3 Análisis de confiabilidad del cigüeñal.	39
3. Método de análisis de fallo	41
3.1 Contextualización del fallo	42
3.2 Inspección de la pieza	43

3.3 Generación de hipótesis de fallo	44
3.4 Aplicación de ensayos de técnicas de laboratorio	44
3.4.1 Ensayo de dureza.	45
3.4.2 Análisis metalográfico.	47
3.4.3 Inspección mediante tintas penetrantes.	50
3.4.4 Inspección mediante microscopio electrónico de barrido.	51
4. Análisis de fallo en pistón	52
4.1 Contextualización de fallo en pistón	52
4.2 Descripción de características físicas del fallo pistón	54
4.3 Elaboración de diagrama ishikawa para el análisis del fallo	59
4.3.1 Fallos de diseño.	60
4.3.2 Fallos de material.	61
4.3.3 Fallos de manufactura.	61
4.3.4 Fallos por condiciones de operación.	61
4.3.5 Fallos por mala operación.	63
4.4 Aplicación de técnicas avanzadas	66
4.4.1 Inspección por líquidos penetrantes a pistón.	66
4.4.2 Aplicación de microscopía electrónica al pistón.	67
Figura 30. Deslizamiento de material en superficie del pistón	69
Figura 31. Punto de análisis de composición elemental	70
Figura 32. Gráfico de emisiones de energía	70
4.5 Generación de hipótesis de fallo	71
5. Análisis de fallo en cigüeñal	72

5.1 Contextualización del fallo	72
5.2 Descripción física del fallo en el cigüeñal	74
5.3 Elaboración De Diagrama De Ishikawa	75
5.3.1 Fallos de diseño en cigüeñal.	77
5.3.2 Fallos del material.	77
5.3.3 Fallos de manufactura en la fabricación del cigüeñal.	77
5.3.4 Fallos de condiciones de operación.	78
5.3.5 Fallo por operación del vehículo.	78
5.4 Aplicación de ensayo de dureza	79
5.5 Inspección de las superficies mediante el uso de microscopio electronico de barrido	81
5.6 Análisis metalografico	89
5.7 Generación de hipótesis de fallo	97
6. Análisis de fallo en biela	98
6.1 Contextualización del fallo	98
6.2 Descripción física del fallo en la biela	101
6.3 Elaboración de diagrama de ishikawa	101
6.3.1 Fallos de diseño en la biela.	103
6.3.2 Fallos del material.	103
6.3.3 Fallo por errores de manufactura en la fabricación de la biela	103
6.3.4 Fallos de condiciones de operación.	104
6.3.5 Fallos por operación del vehículo.	104
6.4 Generación de hipotesis de fallo	104
7. Conclusiones	105

Bibliografía	108
Anexos	109

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Diagrama de flujo metodología de análisis de fallo en elementos de motor de combustión interna.</i>	24
Figura 2. <i>Curva de la bañera para fallas en motores</i>	26
Figura 3. <i>Pareto de fallos</i>	29
Figura 4. <i>Ecuaciones distribución Weibull</i>	32
Figura 5. <i>Curva de probabilidad</i>	33
Figura 6. <i>Regresión de probabilidad</i>	34
Figura 7. <i>Curva de confiabilidad del pistón</i>	36
Figura 8. <i>Regresión de probabilidad de la biela</i>	38
Figura 9. <i>Curva de confiabilidad de la biela</i>	39
Figura 10. <i>Regresión de confiabilidad del cigüeñal</i>	40
Figura 11. <i>Curva de confiabilidad del cigüeñal</i>	41
Figura 12. <i>Prueba de dureza Rockwell</i>	46
Figura 13. <i>Análisis metalográfico</i>	48
Figura 14. <i>Microscopio</i>	49
Figura 15. <i>Ensayo de tintas penetrantes</i>	51
Figura 16. <i>Microscopio electrónico de barrido</i>	52
Figura 17. <i>Formato de análisis de fallo</i>	53
Figura 18. <i>Pistón en estudio fallo superficie superior de anillos</i>	54
Figura 19. <i>Pistón con marcas de ataque</i>	54

Figura 20. <i>Marca en lado contrario a marca principal</i>	55
Figura 21. <i>Evidencias de depósitos de carbón en los anillos y marcas en la cabeza</i>	55
Figura 22. <i>Evidencias de presencia de posibles grietas en alojamiento de anillos</i>	56
Figura 23. <i>Cabeza del Pistón</i>	56
Figura 24. <i>Desgaste abrasivo entre dos superficies</i>	57
Figura 25. <i>Metrología del Pistón</i>	58
Figura 26. <i>Diagrama de Ishikawa fallo en pistón</i>	65
Figura 27. <i>Aplicación del penetrante rojo en pistón</i>	66
Figura 28. <i>Aplicación del revelador en pistón</i>	67
Figura 29. <i>Fotografía de fallo en pistón toma 1</i>	68
Figura 33. <i>Formato inspección de cigüeñal</i>	73
Figura 34. <i>Marca en muñón de biela.</i>	74
Figura 35. <i>Deslizamiento de la superficie del muñón de biela</i>	74
Figura 36. <i>Diagrama de Ishikawa fallo en cigüeñal</i>	76
Figura 37. <i>Montaje de ensayo de dureza 1.</i>	79
Figura 38. <i>Aplicación de ensayo de dureza en superficie fallada</i>	80
Figura 39. <i>Superficie con fallo</i>	80
Figura 40. <i>Superficie sin afectación de fallo</i>	81
Figura 41. <i>Microscopio electrónico de barrido</i>	82
Figura 42. <i>Superficie con deslizamiento del casquete</i>	83
Figura 43. <i>Superficie con marcas de deslizamiento por contacto con aluminio</i>	84
Figura 44. <i>Superficie con marcas de deslizamiento por contacto</i>	85
Figura 45. <i>Nivel de energía de electrones</i>	86

Figura 46. <i>Análisis de composición elemental en zona libre de huellas</i>	87
Figura 47. <i>Energía emitida por cada átomo</i>	88
Figura 50. <i>Estructura metalográfica del muñón de biela toma 1</i>	89
Figura 51. <i>Estructura metalográfica del muñón de biela toma 2. Ataque Nital. 500X . Grafito nodular tamaño 6. Matriz perlítica</i>	90
Figura 52. <i>Estructura metalográfica del muñón de biela toma 3</i>	91
Figura 53. <i>Estructura metalográfica de la biela toma 1</i>	92
Figura 54. <i>Estructura metalográfica de la biela toma 2</i>	93
Figura 55. <i>Estructura metalográfica de la biela toma 3</i>	94
Figura 56. <i>Estructura metalográfica del pistón toma 1</i>	95
Figura 57. <i>Estructura metalográfica del pistón toma 2</i>	96
Figura 58. <i>Estructura metalográfica del pistón toma 3</i>	97
Figura 59. <i>Formato de inspección biela</i>	100
Figura 60. <i>Fallo por pandeo en biela</i>	101
Figura 61. <i>Diagrama de Ishikawa fallo en biela.</i>	102

Listado de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Reporte técnico de reparaciones en taller.</i>	27
Tabla 2. <i>Frecuencia de fallos en elementos de motores de combustión interna</i>	28
Tabla 3. <i>Fallo en el pistón, biela y cigüeñal</i>	31
Tabla. 4 <i>Cálculo de parámetros distribución Weibull</i>	34
Tabla 5. <i>Cálculo de parámetros distribución Weibull de la biela</i>	37
Tabla 6. <i>Cálculo de parámetros distribución Weibull para el cigüeñal</i>	40
Tabla 7. <i>Formato de contextualización del fallo</i>	43
Tabla 8. <i>Escala del ensayo de dureza Rockwell</i>	47
Tabla 9. <i>Reactivos más utilizados en análisis metalográfico</i>	50
Tabla 10. <i>Propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio</i>	62
Tabla 11. <i>Coeficientes de expansión térmica</i>	62
Tabla 12. <i>Composición elemental del pistón</i>	71
Tabla 13. <i>Resultados ensayo de dureza</i>	81
Tabla 14. <i>Composición elemental de la superficie</i>	86
Tabla 15. <i>Composición elemental de la superficie</i>	88

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo 1. Análisis Metalográfico	110
Anexo 2. Análisis Por Microscopio Electrónico De Barrido Piston	110
Anexo 3. Análisis Por Microscopio Electrónico De Barrido Cigüeñal	110
Anexo 4. Compendio-De-Fallos	110
Anexo 5. Diagrama De Flujo	110
Anexo 6. Formato Contextualización Del Fallo Y Pareto	110
Anexo 7. Marco Teórico	111

RESUMEN

TITULO DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS DE FALLA EN ELEMENTOS DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA*

AUTORES: LENNYN ALFONSO GUTIERREZ ORTIZ, OSCAR MAURICIO FONSECA ARANGO**

PALABRAS CLAVE: Motores de combustión interna, modo de fallos, pareto, análisis, diagrama Ishikawa, dureza rockwell

DESCRIPCION

El objetivo de este proyecto de grado es contribuir a la universidad industrial de Santander con la fomentación de la investigación en el campo de la industria automotriz, diseñando una metodología en el análisis de falla de elementos de motores de combustión interna.

La carencia de identificar los fallos y sus causas en elementos de motores de combustión interna hacen que el mantenimiento o la intervención de un motor de este tipo se limiten únicamente al recambio de dichos componentes, estos no permite la solución definitiva de la problemática que este ocasionando el fallo y tomar decisiones para garantizar la confiabilidad y durabilidad del motor.

La creación de formatos para realizar la recopilación de la información permite establecer los requerimientos necesarios para realizar el análisis, siendo concretos en la recolección de la información lo cual permitirá un panorama más claro para realizar el análisis del fallo en cuestión, poderlo caracterizar de forma correcta y establecer las causas. Se realizó una investigación en la cual se caracterizaron los diferentes modos de fallo que pueden ocurrir en el pistón, la biela y el cigüeñal, estableciendo una relación entre estos y las causas. Esto permite a la hora de analizar un fallo familiarizar las características físicas del fallo observado con un modo de fallo en especial y unas causas específicas.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Jorge Luis Chacón Velasco, Codirector: Alberto David Pertuz Comas

SUMMARY

TITLE: DESIGN OF A METHODOLOGY FOR ANALYSIS OF FAILURE IN ELEMENTS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES*

AUTHORS: LENNYN ALFONSO GUTIERREZ ORTIZ, OSCAR MAURICIO FONSECA ARANGO**

KEYWORDS: Internal combustion engines, failure mode, pareto, analysis, Ishikawa diagram, rockwell hardness

DESCRIPTION

The objective of this degree project is to contribute to the industrial university of Santander with the promotion of research in the field of the automotive industry, designing a methodology in the analysis of failure of elements of internal combustion engines.

The lack of identifying failures and their causes in internal combustion engine elements mean that the maintenance or intervention of a motor of this type are limited only to the replacement of these components, these do not allow the definitive solution of the problem that is causing failure and make decisions to ensure the reliability and durability of the engine.

The creation of formats to perform the collection of information allows to establish the necessary requirements to perform the analysis, being specific in the collection of information which will allow a clearer picture to perform the analysis of the failure in question, to be able to characterize it correctly and establish the causes. An investigation was carried out in which the different failure modes that could occur in the piston, the connecting rod and the crankshaft were characterized, establishing a relationship between these and the causes. This allows analyzing a failure to familiarize the physical characteristics of the observed failure with a particular failure mode and specific causes.

* Degree work.

** Physicomechanical Faculty of Engineering. Mechanical Engineering Faculty. Director: Jorge Luis Chacón Velasco, co-director: Alberto David Pertuz Comas

Introducción

El presente proyecto plantea el proceso de diseño de una metodología para análisis de fallo en elementos de motores de combustión interna, que busca contribuir con el desarrollo de la investigación en el campo de la industria automotriz de la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Para el desarrollo de esta metodología se parte de un análisis de criticidad mediante Pareto de los diferentes modos de fallo en biela, cigüeñal y pistón. Posteriormente se realizan diagramas de Ishikawa o espina de pescado para relacionar los problemas o modos de fallos con las posibles causas que originaron el fallo.

En este libro se elaborará un marco teórico sobre los elementos de motores de combustión interna, así como también se entregará un estado del arte del desarrollo de los análisis de los diferentes elementos de motores de combustión interna. Además, se hará un estudio detallado mediante técnicas avanzadas como metalografía, ultrasonidos, examen microscópico electrónico, partículas magnéticas, rayos X, etc. de un caso particular de fallo en elementos de motores de combustión interna.

Mediante esta metodología de análisis de fallo se facilitara la identificación de las causas reales de fallo de elementos de motores de combustión interna, buscando desarrollar proyectos que contribuyan al crecimiento del campo automotriz. Esto permitirá crear un precedente en el análisis de fallo de vehículos, mejorando y tecnificando esta actividad.

1. Descripción del proyecto

1.1 Planteamiento del problema

El número de automóviles en el país ha venido aumentando en los últimos 10 años debido al mejoramiento de las autopistas y la necesidad que tienen las personas en reducir los tiempos en los desplazamientos de un lugar a otro. Uno de los medios de transporte que más utilizan las personas son vehículos con motores de combustión interna. Este incremento en el número de automóviles ha hecho que la industria de fabricación de autopartes, compra y venta de vehículos así como la prestación de servicios de mantenimiento de motores de combustión interna principalmente este teniendo un aumento en el medio local.

Principalmente el servicio de mantenimiento de motores de combustión interna ha cobrado un papel relevante debido a la importancia de este en la confiabilidad en el funcionamiento y durabilidad del vehículo.

Actualmente el servicio de mantenimiento de motores de combustión interna se limita a realizar el recambio de partes entre las cuales se encuentran pistones, cigüeñales, bielas, camisas de los cilindros, entre otros; cuando alguno de los componentes nombrados presentan un fallo. Actualmente se carece de una metodología que permita realizar una identificación del caso de fallo que presento el componente así como sus causas.

La carencia de una metodología para la identificación de fallos y sus causas en elementos de motores de combustión interna hacen que el mantenimiento o la intervención de un motor de este tipo se limiten únicamente al recambio de dichos componentes, estos no permite la solución definitiva de la problemática que este ocasionando el fallo y tomar decisiones para garantizar la confiabilidad y durabilidad del motor.

Para efectos de garantías y reclamos en situaciones en las cuales se presente el fallo de un componente de un motor de combustión interna, se hace muy importante la determinación precisa de las causas que precipitaron el fallo, esto para establecer responsabilidades.

Por lo tanto se requiere de metodologías que permitan identificar si el fallo está asociado a defectos técnicos de un componente dentro de los cuales aparecen, errores de diseño, materiales defectuosos, o errores de manufactura; fallos por error de operación entre los cuales pueden aparecer sobre cargas entre otros.

Para poder realizar una completa inspección de la falla de un elemento de motor de combustión interna se debe realizar una recopilación de información, para de esta manera tener claro todos los conceptos que envuelven el entorno de un motor y sus principales componentes, los cuales deben ser plasmados dentro de una metodología que garantice una correcta inspección de un caso particular de fallo en un elemento de motor de combustión interna.

1.2 Justificación para solucionar el problema

El sector automotriz ha venido teniendo un gran crecimiento en el ámbito nacional debido a la necesidad de reducir los tiempos de transporte y desplazamiento. Esto ha aumentado el número de vehículos que se comercializan en el país así como los servicios que se derivan de estos, como los son el mantenimiento de motores de combustión interna, fabricación y comercialización de autopartes.

Actualmente la gestión de mantenimiento de motores de combustión interna en el país, consiste en el recambio de componentes averiados incluyendo manufacturación necesaria para restaurar las condiciones de operación de los motores sin identificar las causas del modo de fallo de los diferentes componentes. Una identificación de las causas de las fallas aplicando una

metodología de análisis de fallo sobre el componente puede contribuir a la identificación del problema, facilitando esto la solución del mismo. En muchos casos el fallo de un elemento de motor de combustión interna envuelve un proceso de garantía o responsabilidad legal para lo cual es necesario tener una metodología establecida para identificar las causas de un fallo y establecer las correspondientes responsabilidades.

En Colombia no se cuenta con metodologías de análisis de falla que permitan identificar las causas reales de fallo de elementos de motores de combustión interna. Un ingeniero mecánico de la universidad industrial de Santander posee un conjunto de habilidades cognitivas, técnicas y personales que le permiten desarrollar proyectos que contribuyan al crecimiento del campo automotriz. La implementación de una metodología para el análisis de fallo en elementos de motores de combustión interna permitirá crear un precedente en el análisis de fallo de vehículos y mejorar y tecnificar esta actividad.

Tomando algunos planes de mantenimientos desarrollados en la escuela de ingeniería mecánica, podemos ver que estos se centran en un mantenimiento correctivo y preventivo.

El mantenimiento de los motores de combustión interna evoluciona hacia la forma del trabajo predictivo, que consiste en la realización de mediciones de diversos parámetros de funcionamiento, utilizando técnicas de diagnóstico de fallos y sistemas de medida cada vez más complejos y fiables, para conocer el estado real de los equipos y actuar en función del mismo. El mantenimiento predictivo utiliza modernas técnicas de termografía infrarroja y endoscopia, análisis de vibraciones y ultrasonido, que generan imágenes del interior del motor para el reconocimiento de averías incipientes en el mismo.

1.3 Objetivos del trabajo de grado

1.3.1 Objetivo general. Contribuir por medio de los objetivos misionales de la universidad industrial de Santander, a la fomentación de la investigación en el campo de la industria automotriz. Poniendo al servicio de esto, las capacidades cognitivas adquiridas durante el desarrollo académico para el diseño de una metodología en el análisis de falla de elementos de motores de combustión interna.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Integridad y confiabilidad operacional de la biela, el cigüeñal y el pistón en motores de combustión interna
 - Análisis de criticidad mediante Paretos de los diferentes modos de fallo en la biela el cigüeñal y el pistón.
 - Aplicación de análisis de fallo mediante el método de causa y efecto (Ishikawa) y árbol de fallo, para los elementos de mayor criticidad en motores de combustión interna.
 - Análisis mediante técnicas avanzadas como metalografía, ultrasonidos, examen microscópico electrónico, partículas magnéticas, rayos X, etc. de un caso particular de fallo en elementos de motores de combustión interna.

1.4 Justificación de la solución

Una metodología adecuada para el análisis de fallo en elementos de motores de combustión interna permitirá contar con un conjunto de procedimientos racionales y secuenciales a través de los cuales se pueda alcanzar o determinar las razones reales por las que se presenta el fallo en el componente. Esto permitirá tomar decisiones y aplicar estrategias sobre la causa real del fallo, haciendo que las actividades de mantenimiento de motores de combustión interna solucionen la problemática real, lo que elevara la confiabilidad y durabilidad del vehículo.

En el establecimiento de responsabilidades con respecto a fallos en componentes de motores de combustión interna aplicar una metodología adecuada permitirá identificar las causas que precipitaron el fallo del componente, relacionándolas con problemas de operación, defectos del material o defectos de manufactura del componente.

Realizar un análisis de un fallo en un componente de motor de combustión interna requiere un panorama claro de todos los conceptos que encierra el funcionamiento del motor así como de las características de cada uno de los fallos y las causas que podrían estar asociados a estos.

La metodología para el análisis de fallo en elementos de motores de combustión interna consiste básicamente en los siguientes pasos:

- Identificación del componente que fallo
- Enumeración de las características que presenta el fallo con el fin de establecer el modo de fallo del componente
- Identificación de las causas y efectos de dicho fallo.
- Aplicación de técnicas avanzadas para validar análisis realizados

2. Fallos en pistón, biela y cigüeñal

En este capítulo se describe y desarrolla el proceso de análisis de fallos en elementos de motores de combustión interna. Posteriormente se realiza un Pareto para establecer que componentes son críticos dando como resultado el pistón, la biela y el cigüeñal.

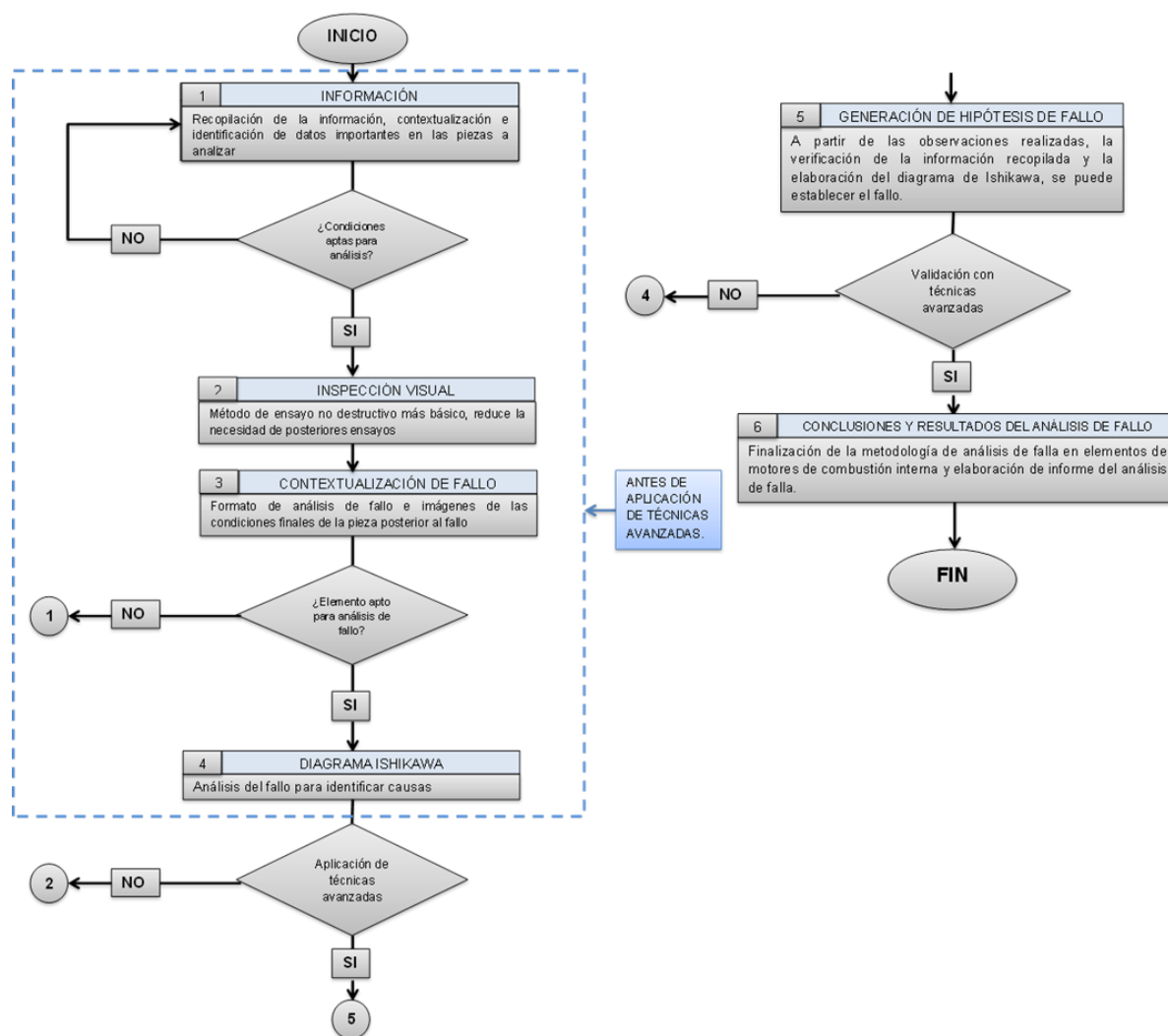


Figura 1. Diagrama de flujo metodología de análisis de fallo en elementos de motor de combustión interna.

En la figura 1 se describe el diagrama de flujo de la metodología de análisis de falla en elementos de motores de combustión interna.

2.1 Fallo

Fallo es una condición en la cual se pierde la posibilidad de realizar una función específica por parte de un componente, entregar la fuerza requerida por un sistema, disminuyendo el rendimiento.

El fallo es el resultado de un proceso de causas que se pueden originar en el componente que entra en fallo y se conoce como un fallo primario, o se puede presentar como consecuencia de fallos en sistemas adyacentes.

Los fallos en un motor se pueden clasificar de acuerdo a la etapa de vida útil del motor en la cual se presente, en la figura 2 se puede observar dicha clasificación. En primera instancia se encuentran los fallos en etapa de asentamiento del motor, estos fallos se deben a defectos en los materiales, errores de manufactura y defectos de ensamble. La siguiente etapa tiene una tasa de fallas constante y se deben a errores de operación, suciedad, problemas de vibraciones o desajuste. En la última etapa la tasa de fallos aumenta debido al envejecimiento de los componentes los cuales fallan por fatiga y desajustes.

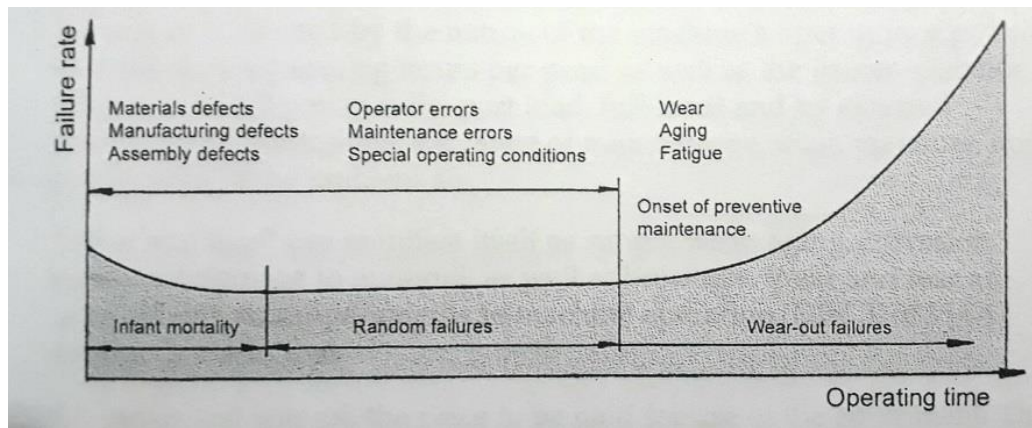


Figura 2. Curva de la bañera para fallas en motores

Fuente: (Greuter & Zima, 2012)

2.2 Determinación de criticidad de fallos

Los componentes de un motor de combustión interna, tienen distintos modos de fallo que dan origen a diferentes consecuencias, algunas afectan el rendimiento del vehículo generando que este tenga un aumento en el consumo de combustible, pero esto no implica que el último pueda seguir realizando su función, otras son catastróficas llegando a causar la inhabilidad del motor para realizar el trabajo para el cual fue diseñado.

La determinación de la criticidad de modos de fallo permite centrar los esfuerzos en una pequeña muestra de situaciones, las cuales son causantes de la mayoría de eventos no deseados en cualquier tipo de maquinaria, para el caso particular, motores de combustión interna.

Existen varias formas de determinar la criticidad de los diferentes modos de fallo, para este caso se utilizará el método de Pareto. El Pareto es un método de análisis de la información que permite identificar qué condiciones son las causantes de la mayoría de fallos en motores de combustión interna con el propósito de centrar el análisis de fallo en los componentes que causan la mayor parte de problemas en dicha maquinaria.

2.2.1 Elaboración de Pareto para análisis de criticidad en elementos de motores de combustión interna. Para la elaboración de los paretos se recolecto la información de servicios prestados por parte de Trienergy y Codiesel, en la cual se relacionaban las intervenciones realizadas y el componente que presento el fallo y por consiguiente la no funcionalidad parcial o total del motor. En la tabla 1 se presenta la información recolectada. Ver anexos

Tabla 1. *Reporte técnico de reparaciones en taller.*

TAG EQUIPO	MODELO MOTOR	HOROMETRO	BLOQUE	CIGÜEÑAL	BIELAS	PISTONES	EJE DE LEVAS	TREN DE BALANCINES	CULATA
GEN-1007	PERKINS 2506	21.582	Se hace necesario circular la bancada, por desalineamiento, en los puestos uno, dos y tres	Registra 2 ml de distorsión en la bancada. Los muñones de bancada tienen un diámetro de 4749 ml y los de biela 3819 ml, por lo tanto, se puede reutilizar al pulirlo,	Cambio de bujes y casquetes por desgaste.	Presenta desgaste en las ranuras de los anillos, no aptos para reusó.	Presenta pérdida de material por marcas profundas en lóbulo. No apto para reusó.	Las marcas profundas en su superficie provocadas por una baja lubricación dejan fuera de servicio estas piezas por lo que se solicita su reemplazo balancines de válvulas.	Se realiza prueba hidrostática y tiene filtración por las camisas, las válvulas, guías y asientos hay que reemplazarlas por desgastes al igual que los bujes del eje de levas.
GEN-1008	PERKINS 2506	21.582,5	Se hace necesario circular la bancada por desalineamiento, en los puestos 3,4 y 5.	Registra 6 milésimas de distorsión en la bancada, se hace necesario enderezarlo para reutilizarlo en STD. Los muñones de bancada tienen un diámetro de 4749 ml y la biela 3819 por lo tanto se pueden pulir	Cambio de bujes y casquetes por desgaste	Presenta desgaste en las ranuras de los anillos, no aptos para reusó.	Presenta pérdida de material por marcas profundas en lóbulo. No apto para reusó.	Las marcas profundas en su superficie provocadas por una baja lubricación dejan fuera de servicio estas piezas por lo que se solicita su reemplazo al igual que los balancines de válvulas.	Se realiza prueba hidrostática y tiene filtración por las camisas, las válvulas, guías y asientos hay que reemplazarlas por desgastes al igual que los bujes del eje de levas.
GEN-1027	PERKINS 2506	15.301	Las camisas del bloque presentan pérdida de brillo con un brillo tipo espejo debido al desgaste, no apta para reutilizar.	El cigüeñal presenta una pérdida de linealidad entre puntos de 0.38 mm, portal motivo se descarta. Se puede enderezar con el riesgo de que fracture debido a la falta de radio que presentan los muñones.	Las bielas no presentan desalineamiento, el círculo se encierra dentro de especificación es técnicas.	presentan desgaste en gap de anillos no aptos para reusó, ciclo de vida cumplido	Reusó.	Flautas de Balancines presentan desgaste excesivo no se recomienda reutilizar.	La culata al tener válvulas torcidas en el cilindro 6 luego de la prueba hidrostática no presenta fisuras internas, pero se hace necesaria su reparación general para reutilizar.

A continuación se organiza la información en forma descendente de acuerdo a la frecuencia de fallos con el objetivo de realizar el cálculo de la frecuencia relativa y frecuencias absolutas. La frecuencia relativa es el porcentaje que ocupa cada componente en la frecuencia de fallos, la frecuencia relativa acumulada es la suma de las mismas la cual debe dar como resultado el 100 por ciento. En la tabla 2 se pueden observar las frecuencias de fallo organizadas de mayor a menor y los resultados de las frecuencias relativas y las frecuencias relativas absolutas.

Tabla 2. *Frecuencia de fallos en elementos de motores de combustión interna*

Universidad Industrial de Santander 	Pareto de frecuencia de fallos en elementos de motores de combustión interna		
Componente	Frecuencia de fallos	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa absoluta
PISTÓN	100	0,265	26%
CIGÜEÑAL	90	0,238	50%
BIELAS	78	0,206	71%
BLOQUE	23	0,061	77%
EJE DE LEVAS	22	0,058	83%
TREN DE BALANCINES	15	0,040	87%
CULATA	15	0,040	91%
ANILLOS DE PISTÓN	15	0,040	95%
BULÓN	10	0,026	97%
VÁLVULAS DE ADMISIÓN	5	0,013	99%
BOMBA DE COMBUSTIBLE	2	0,005	99%
SISTEMA DE LUBRICACIÓN	2	0,005	100%
SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	1	0,003	100%
Total de fallos	378		

La información de la tabla anterior es organizada y representada en la figura 3, en donde en el eje horizontal se encuentra los componentes que causaron fallo y por lo cual se debió realizar la intervención del motor, en el eje vertical de la derecha se encuentra el número de veces que fallo un componente en particular y por último en el eje vertical están las frecuencias relativas. Allí se puede identificar la zona 80-20 en la cual se evidencia que componentes son los causante del 80 por ciento de los fallos en motores de combustión interna.

A partir de esto se estableció que los componentes críticos en los motores de combustión interna son el pistón, la biela y el cigüeñal.

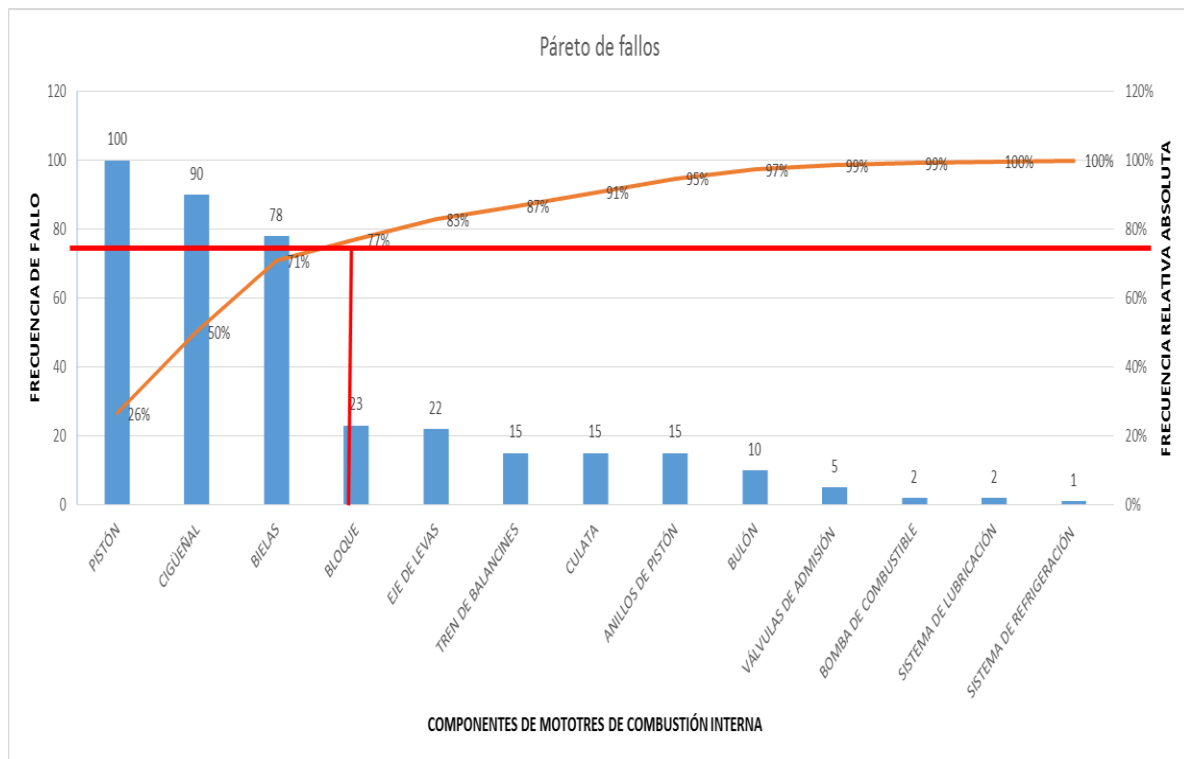


Figura 3. *Pareto de fallos*

2.3 Modos de fallo en el pistón, biela y cigüeña

Un modo de fallo es la forma específica en la cual un componente mecánico presenta una condición que ocasiona que este último no desempeñe la función para la cual fue diseñado de una manera correcta cumpliendo con los estándares de rendimiento, calidad y seguridad, además de generar consecuencias sobre sistemas adyacentes. Un modo de fallo tiene una característica que permite identificarlo, además de unas causas probables de lo que lo ocasiono.

Se realizó una recopilación teórica de los modos de fallos que comúnmente se presentan en el pistón la biela y el cigüeñal. Allí se establecieron las características físicas que permiten identificar cada uno de los modos de fallo. También se establecieron las causas de dichas averías las cuales se pueden separar en tres grupos: fallos debido a defectos técnicos los cuales esta

relacionados con defectos del material empleado en la fabricación, procesos de mecanizado, defectos de diseño entre otros, el siguiente grupo son los fallos debido a errores en la operación que por lo general están conectados por variaciones de parámetros de funcionamiento como lo son la carga, temperatura de operación. Por último, se encuentran los errores humanos en la operación de los vehículos.

A partir de la consulta realizada se creó una matriz en Excel en la cual se presenta esta información, como se muestra en la tabla número 3, esta tabla permite relacionar los diferentes de modos de fallo, sus características físicas, las consecuencias y las posibles causas que los ocasionaron. Ver anexos

Tabla 3. *Fallo en el pistón, biela y cigüeñal*

Fallo en el pistón la biela y el cigüeñal			
Clasificación	Modo de fallo	Características	Causas
Fallas del pistón en la zona de la falda	Agarre a la falda del pistón	La falda del pistón presenta áreas de raspado. Las paredes del cilindro presentan la misma huella. Esta condición de desgastese presenta por debajo de los anillos del pistón	Juego insuficiente entre la falda del pistón y las paredes del cilindro producto de un mal Dimensionamiento durante el diseño o fabricación. Una dilatación en el pistón aumentando aumentando el diametro Suciedad en los pernos que aseguran la culata, pueden tener corrosión, causando que partículas abrasivas entren en el cilindro y el pistón mal funcionamiento del sistema de refrigeración lo que ocasiona u aumento en la temperatura y dilatación del pistón por sobrecarga térmica
	Agarrotamiento del pistón por sobrecalentamiento	Se presentan marcas de rayaduras severas desde la cabeza del pistón hacia la falda, la rayadura es bastante profunda	sobrecalentamiento en los componentes que rodean la camara de combustión problemas en el sistema de enfriamiento.
	Rayadura en un lado de la falda del pistón	La falda del pistón presenta una rayadura severa en uno de los costados, generalmente el lado de empuje principal inmediatamente debajo de la cabeza del pistón. También alcanza el área de la zona de los anillos de retención, presenta en ocasiones grietas	Sobrecalentamiento en esa zona del pistón lo que ocasiona una ruptura de la película de lubricante. Se descarta falta de espacio entre el pistón y el cilindro pues la rayadura solo aparece en una zona del pistón Fallo en la circulación de refrigerante por fenómenos de cavitación u otros Fallo en la bomba de aceite Fallo en la bomba de agua Taponamiento del sistema de refrigeración Ignición incorrecta Defectos en las boquillas del inyector
	marcas de ataque de un lado del pistón producto de la rotura de la película de lubricante	Muestra marcas en el lado principal de empuje del pistón.	En movimiento hacia abajo la parte principal de empuje del pistón no está suficientemente lubricada haciendo que este raspe contra el cilindro. Esto se puede deber a los siguientes aspectos: Bajo nivel de aceite, raspado excesivo de los anillos del pistón o pérdida de viscosidad en el aceite. No lubricación de los anillos por defectos en la bomba de aceite Dilución o falta de aceite Inadecuados anillos de control de aceite Defectos del sistema de enfriamiento (radiador, termostato, bomba de agua). Inundación de combustible u arranque en frío
	Ataque de pistón lado de empuje mayor y lado de empuje menor	La superficie de mayor empuje y la de menor empuje aparecen con una rayadura pronunciada, las superficies se ven pulidas y la zona de los anillos esta intacta	Falla que se presenta en etapa de puesta en marcha del motor debido aun mal diseño en la holgura existente entre el pistón y el cilindro. La diferencia en los coeficientes de expansión del aluminio del pistón y del hierro fundido del bloque del motor Si las marcas están distribuidas por todo el pistón, esto se debió a una contracción del cilindro o deformación del mismo.
	Marcas de ataque cerca a región del bulón	el pistón cerca a la zona del bulón tiene 2 áreas planas en donde se pueden observar las rayaduras	Un motor nuevo o reparado, queda con tolerancias de ajuste inadecuadas entre el bulón y la biela, o el bulón y el pistón. Biela desalineada No lubricación de la zona del bulón
	Pistón quemado - Patrón de contacto asimétrico	Los anillos tienen depósitos de carbón. El pistón presenta marcas de ataque debajo del orificio del bulón	Angularidad del pistón debido al eje del pasador de muñeca no ortogonal a la biela, bielas no paralelas o cojinetes del cigüeñal incorrectos. Bielas desalineadas

2.4 Análisis de confiabilidad en el pistón, la biela y el cigüeñal

La confiabilidad es una característica que permite establecer que probabilidad de que un equipo o componente desempeñe una función específica sin llegar a fallar. Muestra también un poco la distribución de los fallos a lo largo de la vida útil del componente, con este objetivo se puede establecer las estrategias para prevenir el fallo de los componentes.

Existen varios métodos para analizar la distribución de los fallos en un componente, para este caso particular se realizara el estudio mediante distribución Weibull, la cual se adapta muy bien al comportamiento de componentes mecánicos, fatiga y desgaste sufrido por estos. En la figura 4 se pueden observar las ecuaciones necesaria para calcular los parámetros de la distribución. En la figura 5 corresponde a la curva de probabilidad.

$$\begin{aligned}
 \text{CDF: } F(t) &= 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}; \quad t \geq 0 & (1) \\
 \text{Confiabilidad: } R(t) &= e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \\
 \text{PDF: } f(t) &= \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} & (2) \\
 \text{Media: } \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) & & (3) \\
 \text{Mediana: } \eta (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}} & & (4) \\
 \text{Varianza: } \eta^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left[\eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right]^2 & & (5) \\
 \text{Tasa de Falla: } h(t) &= \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} & (6)
 \end{aligned}$$

Figura 4. Ecuaciones distribución Weibull

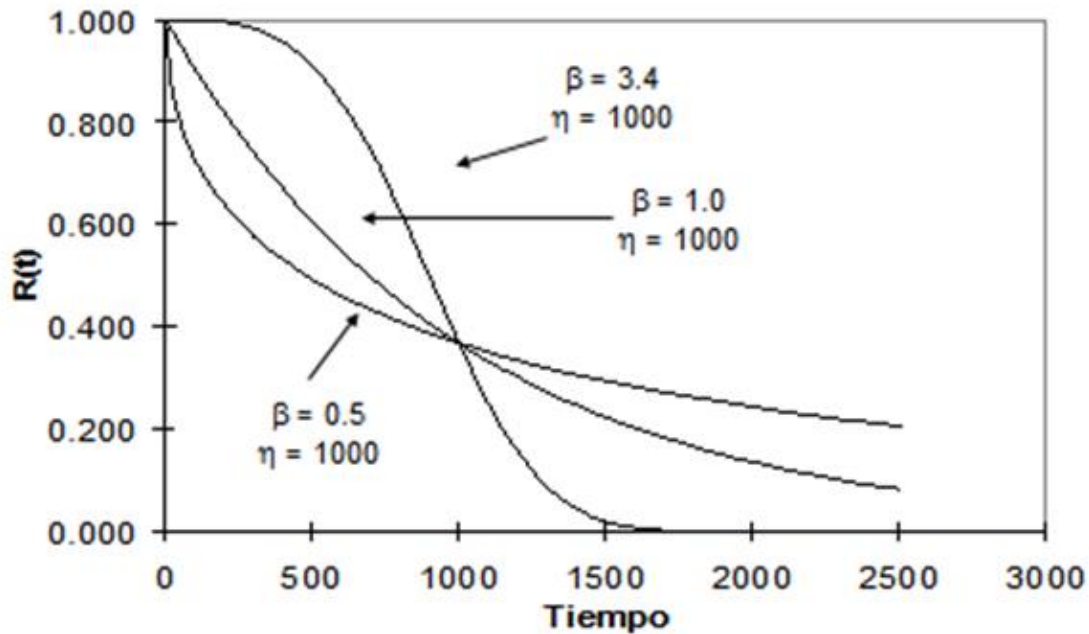


Figura 5. *Curva de probabilidad*

2.4.1 Análisis de confiabilidad en el pistón. A partir de información recolectada del kilometraje del vehículo en el momento de fallo del pistón se realizara la aplicación de la distribución de Weibull para realizar un análisis de confiabilidad operacional del pistón. Para calcular los parámetros de forma y caracterizar la distribución Weibull, se hace uso del método de los mínimos cuadrados. A continuación se muestra en la tabla 4 los resultados de los parámetros calculados, el procedimiento completo de cálculo se encuentra en los anexos.

Tabla. 4 Cálculo de parámetros distribución Weibull

ITEM	COMPONENTE	TMBF	F(T)	Y	LN(T)	R(T)
1	PISTÓN	50000	4,55	-3,068	10,820	4,24E-01
2	PISTÓN	84000	11,04	-2,146	11,339	2,37E-01
3	PISTÓN	88000	17,53	-1,646	11,385	2,21E-01
4	PISTÓN	90000	24,03	-1,292	11,408	2,14E-01
5	PISTÓN	98000	30,52	-1,010	11,493	1,86E-01
6	PISTÓN	100000	37,01	-0,772	11,513	1,80E-01
7	PISTÓN	125000	43,51	-0,560	11,736	1,17E-01
8	PISTÓN	150000	50,00	-0,367	11,918	7,63E-02
9	PISTÓN	155000	56,49	-0,184	11,951	7,01E-02
10	PISTÓN	156000	62,99	-0,006	11,958	6,89E-02
11	PISTÓN	160000	69,48	0,171	11,983	6,43E-02
12	PISTÓN	165000	75,97	0,355	12,014	5,90E-02
13	PISTÓN	180000	82,47	0,555	12,101	4,56E-02
14	PISTÓN	185000	88,96	0,790	12,128	4,19E-02
15	PISTÓN	185200	95,45	1,129	12,129	4,17E-02

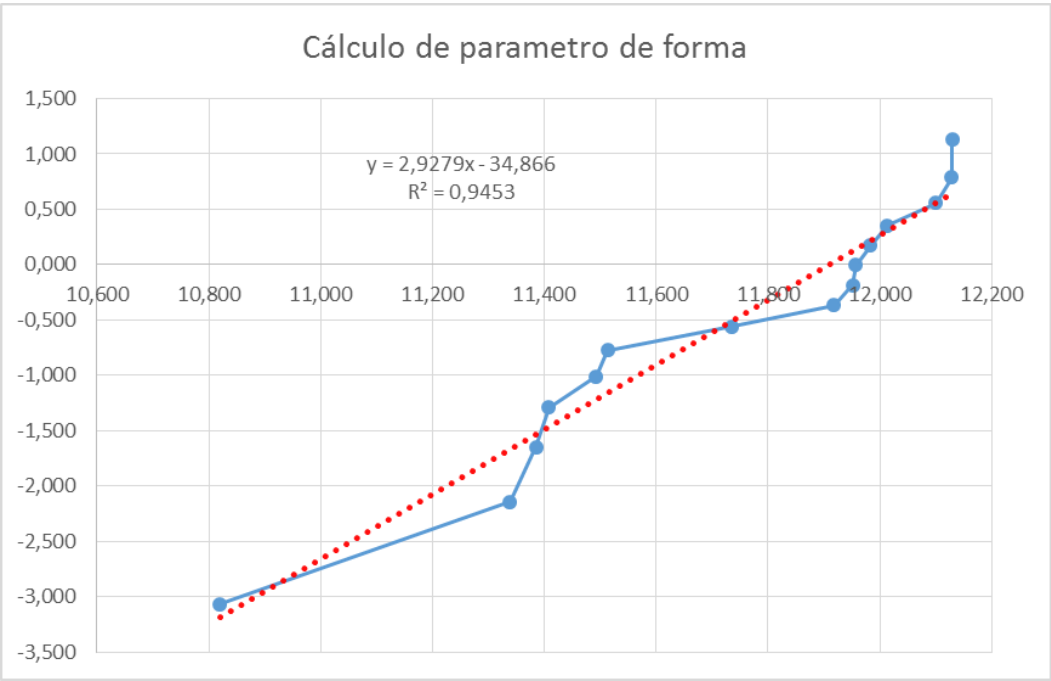


Figura 6. Regresión de probabilidad

La figura 6 corresponde al gráfico de regresión de probabilidad, por medio de este método se calculó el parámetro de forma de la distribución Weibull correspondiente al análisis estadístico de fallos en el pistón.

Deducción de la ecuación lineal de regresión

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\delta}{\theta}\right)^\beta} \quad ; \text{ Función acumulativa de Weibull.}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{e^{\left(\frac{t-\delta}{\theta}\right)^\beta}} = 1 - F(t)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{1 - F(t)} = e^{\left(\frac{t-\delta}{\theta}\right)^\beta}$$

$$\Rightarrow \ln \left[\frac{1}{1 - F(t)} \right] = \ln e^{\left(\frac{t-\delta}{\theta}\right)^\beta} \quad ; \text{ Aplicando logaritmos naturales.}$$

$$\Rightarrow \ln \left[\frac{1}{1 - F(t)} \right] = \left(\frac{t-\delta}{\theta} \right)^\beta \quad ; \text{ Propiedad exponencial de los logaritmos.}$$

$$\Rightarrow \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right] = \beta \ln \left(\frac{t-\delta}{\theta} \right) \quad ; \text{ Aplicando logaritmos naturales.}$$

$$\therefore \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right] = \beta \ln(t - \delta) - \beta \ln \theta \quad (*)$$

$$y = \beta x - b \quad (**)$$

$$y = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right]; \quad x = \ln(t - \delta); \quad b = \beta \ln \theta \quad (***)$$

$$b = -\beta \ln \theta$$

$$\Rightarrow -\frac{b}{\beta} = \ln \theta$$

$$\therefore \theta = e^{-\frac{b}{\beta}} \quad ; (4) \text{ Definición de logaritmo.}$$

Teniendo completos los parámetros de la distribución Weibull, se procede a establecer la ecuación de confiabilidad para el componente particular, en este caso el pistón de un motor de combustión interna. A continuación en la figura 7 se muestra la función de confiabilidad del pistón de la cual se puede establecer la probabilidad de que no se presente el fallo a un intervalo de tiempo específico. En el eje vertical se encuentra graficada la confiabilidad del pistón en función del kilometraje acumulado por el motor.

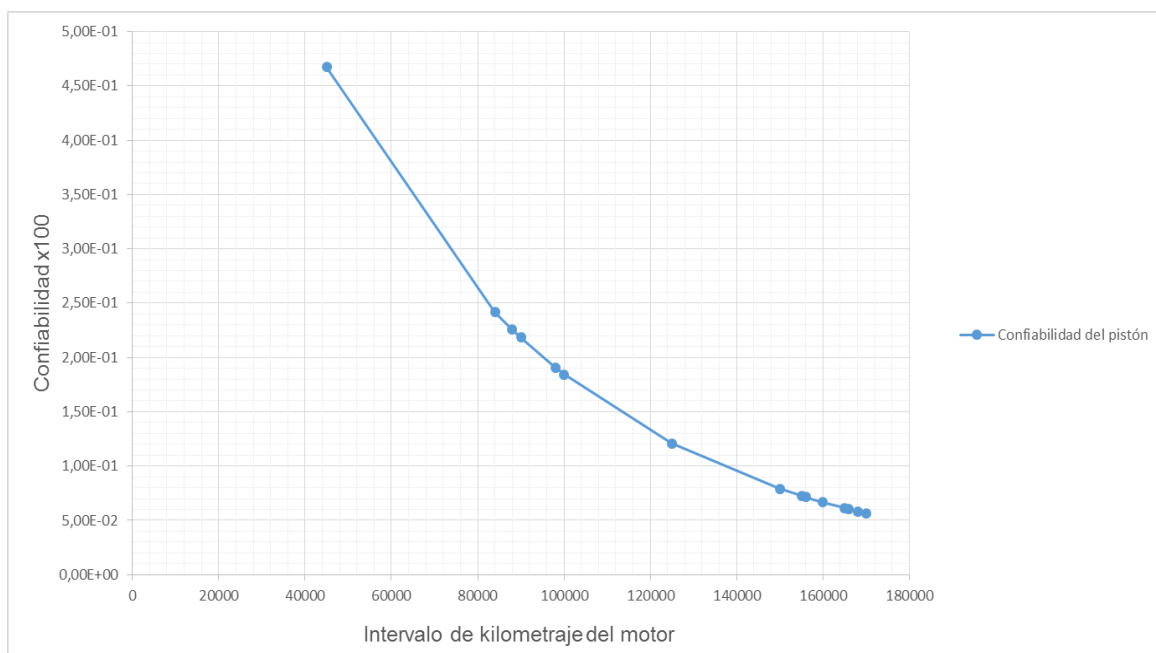


Figura 7. *Curva de confiabilidad del pistón*

De la figura 7 se puede conocer la probabilidad de que el motor del vehículo no falle debido a un evento relacionado con los pistones del motor. En el gráfico se puede observar que la probabilidad de fallo disminuye rápidamente hasta cien mil kilómetros de operación del vehículo, a partir de allí tiene a tener una probabilidad de no fallo en el pistón constante correspondiente al 5%. Esta gráfica permite identificar que la probabilidad de que el equipo no falle en la etapa juvenil es del

45%, a partir de allí disminuye etapa en la cual el vehículo tiene una tasa de fallos constantes, hasta llegar a la etapa de vejez del vehículo en la cual la tasa de fallos aumenta y la probabilidad de que el componente, en este caso el pistón no falle disminuye.

2.4.2 Análisis de confiabilidad en la biela. Para el análisis de confiabilidad de la biela se utilizó la información recolectada de tiempo de fallos desde el momento cero de funcionamiento del motor hasta la aparición del fallo. Esta información se organizó en la tabla 5 para realizar los cálculos de acuerdo a la distribución de probabilidad de Weibull. Se presentan los resultados de los parámetros de la distribución.

Tabla 5. *Cálculo de parámetros distribución Weibull de la biela*

ITEM	COMPONENTE	TMBF	F(T)	Y	LN(T)	R(T)
1	BIELA	45000	4,55	-3,068	10,714	4,67E-01
2	BIELA	84000	11,04	-2,146	11,339	2,42E-01
3	BIELA	88000	17,53	-1,646	11,385	2,26E-01
4	BIELA	90000	24,03	-1,292	11,408	2,18E-01
5	BIELA	98000	30,52	-1,010	11,493	1,91E-01
6	BIELA	100000	37,01	-0,772	11,513	1,84E-01
7	BIELA	125000	43,51	-0,560	11,736	1,21E-01
8	BIELA	150000	50,00	-0,367	11,918	7,91E-02
9	BIELA	155000	56,49	-0,184	11,951	7,27E-02
10	BIELA	156000	62,99	-0,006	11,958	7,15E-02
11	BIELA	160000	69,48	0,171	11,983	6,68E-02
12	BIELA	165000	75,97	0,355	12,014	6,14E-02
13	BIELA	166000	82,47	0,555	12,020	6,04E-02
14	BIELA	168000	88,96	0,790	12,032	5,83E-02
15	BIELA	170000	95,45	1,129	12,044	5,64E-02

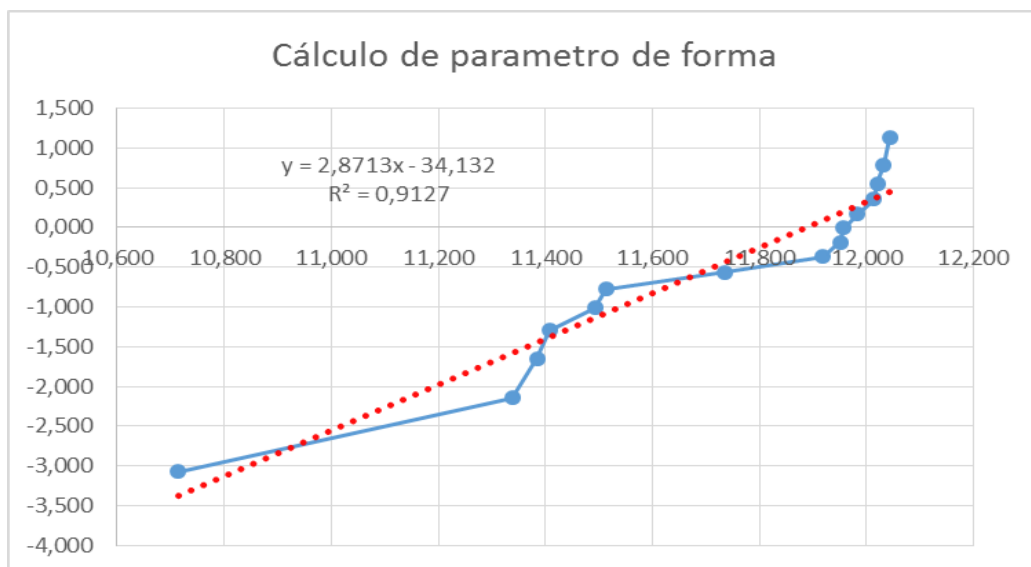


Figura 8. *Regresión de probabilidad de la biela*

A partir de la función de distribución de la probabilidad presentada en la figura 8 se determinaron los parámetros de forma y escala de la distribución, los cuales son utilizados en la determinación de la función de probabilidad de la biela. Las memorias de cálculo de los parámetros están adjuntas en los anexos.

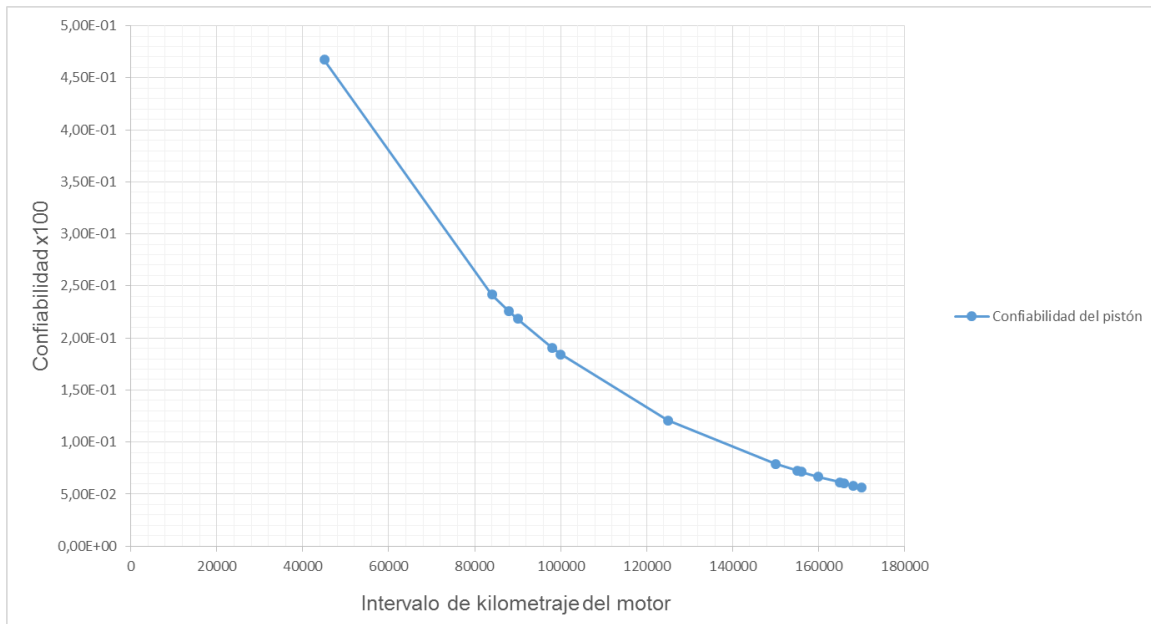


Figura 9. *Curva de confiabilidad de la biela*

En la figura 9 se aprecia la curva de confiabilidad de operación de la biela en los motores de combustión interna, la cual fue determinada a partir de la información recolectada. Allí se puede observar que la probabilidad de no fallo disminuye de manera constante hasta los 80 mil kilómetros de operación del vehículo, posteriormente decrece exponencialmente hasta los 160 mil kilómetros, tiempo de vida a partir del cual la probabilidad de no fallo de la biela se vuelve constante.

2.4.3 Análisis de confiabilidad del cigüeñal. De igual manera que se hizo con el pistón y la biela, se realizó una recolección de tiempos de fallo en el cigüeñal de acuerdo a la bases de datos de las empresas consultadas, estos datos esta registrados y presentados en la tabla 6, adicional se presentan los cálculos de los parámetros necesarios para graficar la curva de distribución de probabilidad a partir de la cual se calculan los parámetros de forma y escala de la curva de probabilidad.

Tabla 6. Cálculo de parámetros distribución Weibull para el cigüeñal

ITEM	COMPONENTE	TMBF	F(T)	Y	LN(T)	R(T)
1	CIGÜEÑAL	120000	4,55	-3,068	11,695	5,75E-05
2	CIGÜEÑAL	135000	11,04	-2,146	11,813	1,70E-05
3	CIGÜEÑAL	140000	17,53	-1,646	11,849	1,13E-05
4	CIGÜEÑAL	142000	24,03	-1,292	11,864	9,61E-06
5	CIGÜEÑAL	143000	30,52	-1,010	11,871	8,86E-06
6	CIGÜEÑAL	144000	37,01	-0,772	11,878	8,16E-06
7	CIGÜEÑAL	148000	43,51	-0,560	11,905	5,90E-06
8	CIGÜEÑAL	150000	50,00	-0,367	11,918	5,01E-06
9	CIGÜEÑAL	155000	56,49	-0,184	11,951	3,34E-06
10	CIGÜEÑAL	156000	62,99	-0,006	11,958	3,07E-06
11	CIGÜEÑAL	160000	69,48	0,171	11,983	2,22E-06
12	CIGÜEÑAL	165000	75,97	0,355	12,014	1,48E-06
13	CIGÜEÑAL	166000	82,47	0,555	12,020	1,36E-06
14	CIGÜEÑAL	168000	88,96	0,790	12,032	1,16E-06
15	CIGÜEÑAL	170000	95,45	1,129	12,044	9,84E-07

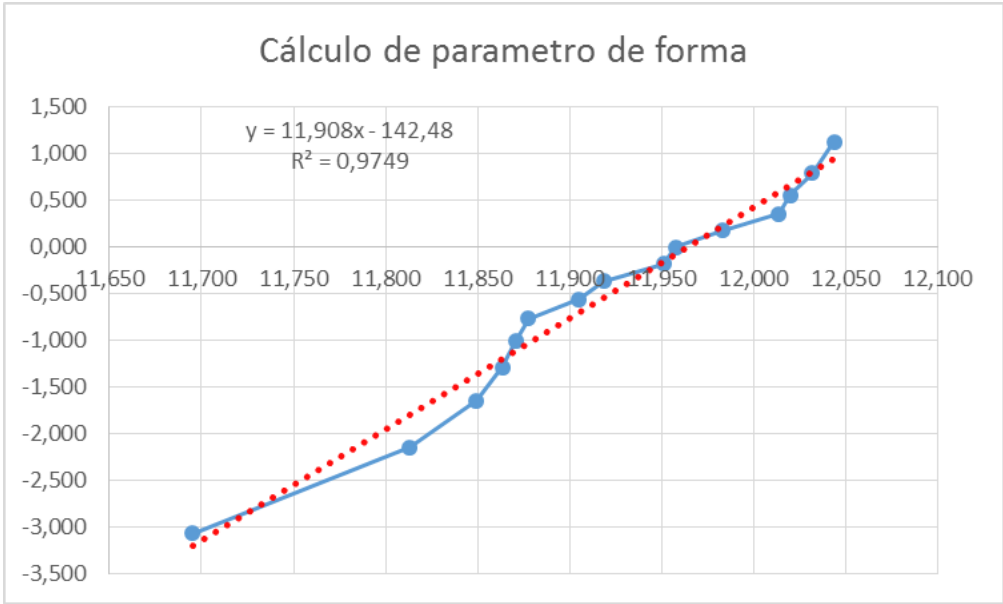


Figura 10. Regresión de confiabilidad del cigüeñal

De la figura 10 se pueden determinar los parámetros de forma necesarios para graficar la curva de probabilidad.

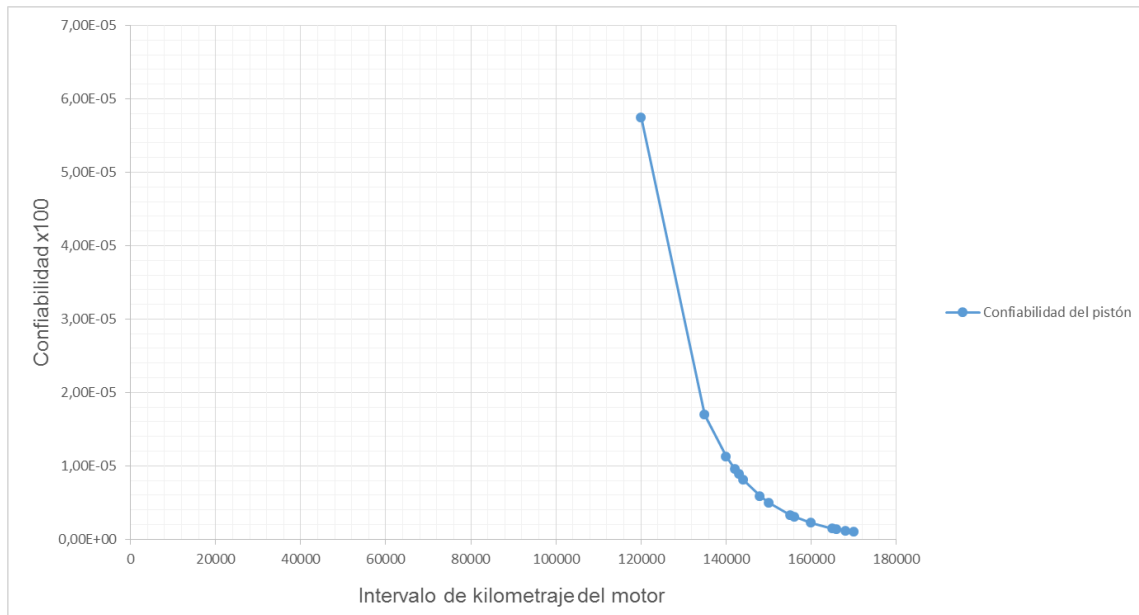


Figura 11. *Curva de confiabilidad del cigüeñal*

En la figura 11 se puede observar la curva de confiabilidad en operación del cigüeñal en motores de combustión interna. De allí se tiene que la probabilidad de no fallo del cigüeñal decrece de forma constante con pendiente negativa hasta los 135 mil kilómetros de vida del motor, a partir de allí decrece exponencialmente hasta los 170 mil kilómetros a partir de lo cual la probabilidad de no fallo se vuelve constante.

3. Método de análisis de fallo

Un método de análisis de fallo es un conjunto de pasos lógicos que permiten realizar el estudio de un modo específico de fallo con el fin de identificar las causas directas o indirectas que están asociadas al mismo, con el propósito de tomar las acciones que permitan evitar que el fallo se presente nuevamente.

3.1 Contextualización del fallo

En esta etapa del análisis se debe realizar la recopilación de la información que define el contexto en el cual se desarrolló un fallo específico en un elemento de motor de combustión interna.

La información que se debe recopilar está compuesta por tres componentes:

- Especificaciones técnicas
- Datos de fallos
- Datos de mantenimiento
- Condiciones de operación

Las especificaciones técnicas consisten en datos de diseño entre los cuales se encuentran potencia nominal, velocidades de operación, dimensiones de componentes, ajustes entre componentes, cargas de diseño y cargas admisibles, composición del material.

Los datos de fallo consisten en el historial de eventos que ocasionaron la pérdida de rendimiento del equipo o la no funcionalidad del mismo. Este historial debe contar con la frecuencia de fallos, y la descripción de cada uno de ellos.

Los datos de mantenimiento son las intervenciones que se han realizado sobre el equipo para corregir cualquier tipo de fallo que se halla presentado, dentro de esta información debe estar la fecha de la intervención, la descripción de la acción tomada y el recambio de piezas.

Las condiciones de operación se refieren al tipo de cargas que actúan sobre los elementos, que son dependientes de los puntos de operación del sistema, como velocidad, potencia de salida, presión de combustión.

Para el caso específico de elementos de motores de combustión interna se creó un formato para la recolección de dicha información. En la tabla 7 se establece el formato a través del cual se realiza la recopilación de información descrita anteriormente.

Tabla 7. *Formato de contextualización del fallo*

Universidad Industrial de Santander 		Formato de contextualización del fallo
Imagen de la pieza en estudio		
Especificaciones Técnicas	Datos del vehículo	
	Potencia y Velocidad	
	Metrología de la pieza	
	Tipo de combustible	
	Condiciones de operación	
	Descripción de la aplicación del vehículo	
	Tipo de refrigerante	
	Cargas de operación	
Datos de mantenimiento	Lubricante utilizado	
	Kilometraje del vehículo	
	Historial de mantenimiento	
	Antecedentes relacionados con el fallo	

3.2 Inspección de la pieza

Se debe realizar una inspección de la pieza para identificar las características físicas que tiene el modo de fallo específico que está en estudio, dentro de las cuales se encuentran tipo de fractura,

marcas superficiales, dimensionamiento de la pieza posterior al fallo, concentradores de esfuerzos etc.

Se realiza una observación visual detallada de cada elemento con el fin de obtener información sobre el estado general y del proceso de fallo en estudio. Se verifican las dimensiones y la geometría para establecer si están dentro de los parámetros del fabricante.

3.3 Generación de hipótesis de fallo

Durante esta etapa se realizara el análisis de la información recolectada con el fin de establecer las causas del modo de fallo en estudio. Para esto se pueden utilizar distintos métodos de análisis de información característica de modos de fallo, como lo son los arboles de fallo, diagrama Ishikawa.

En el siguiente capítulo se describe esta etapa realizando para el pistón, biela y cigüeñal su correspondiente diagrama de Ishikawa.

A partir de las causas de fallo primarias se desprenderán las causas específicas de acuerdo a la situación que se esté analizando.

3.4 Aplicación de ensayos de técnicas de laboratorio

En el análisis de fallos se puede realizar la implementación de técnicas de laboratorio, los cuales permiten medir una propiedad mecánica de la pieza o generar una radiografía del fallo facilitando una descripción física completa del mismo, gracias a esto se pueden visualizar características que no son evidentes al ojo humano, como los planos de corte en la región de la falla, tamaño de grano

del material, características morfológicas del material, determinación de la composición del material, dureza de la superficie etc.

Estos ensayos se realizan para tener una confirmación de las hipótesis de causas de fallos que se generan durante el análisis de causa y efecto, además de tener una mejor descripción del mismo. Dentro de los ensayos más utilizados se encuentran los siguientes:

- Ensayo de dureza
- Análisis metalográfico
- Tintas penetrantes
- Análisis con microscopio electrónico de barrido

3.4.1 Ensayo de dureza. La dureza es la resistencia que presenta un material a presentar alteraciones físicas producto de una interacción con otra superficie dentro de las cuales se encuentran la penetración, rayados o abrasión.

Para los análisis de fallo que se desarrollaran en este proyecto se utilizara la escala Rockwell, el ensayo mediante el cual se mide la dureza de una superficie en esta escala está reglamentado por la norma ISO 6508.

Este ensayo consiste en generar una impronta o huella sobre la superficie a estudiar por medio de dos tipos de penetradores, uno esférico y el otro en forma de cono, el esférico se utiliza para materiales blandos y el penetrador cónico se aplica en materiales duros. La medida se obtiene del indicador del durómetro y esta medida está en función de la profundidad de la huella. En la figura 12 se muestra como se realiza la prueba de dureza Rockwell.

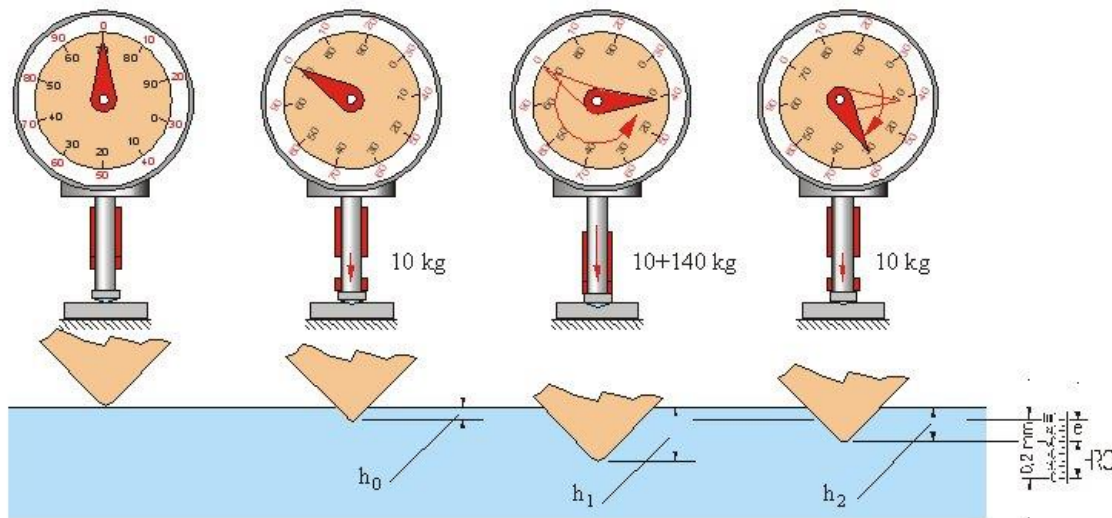


Figura 12. *Prueba de dureza Rockwell*

Fuente: <https://auladetecnologias.blogspot.com/2011/05/prueba-de-dureza-rockwell.html>

Después de montada la pieza a estudiar en el durómetro se procede a poner una carga inicial de 10 kgf la cual genera una huella sobre la superficie, continuación se aplica una segunda fuerza generando una segunda deformación, la dureza de la superficie estará en función de la diferencia de las dos deformaciones. La segunda carga y el penetrador se seleccionan de acuerdo a la escala del ensayo (Universitat Politècnica de València, 2019). En la tabla 8 se puede observar la escala del ensayo de dureza Rockwell.

Tabla 8. *Escala del ensayo de dureza Rockwell*

ESCALA	CARGA (kg)	PENETRADOR	MATERIALES TÍPICOS PROBADOS
A	60	Cono de diamante	Materiales duros en extremo, carburos de wolframio, etc.
B	100	Bola de 1/16"	Materiales de dureza media, aceros al carbono bajos y medios, latón, bronce, etc.
C	150	Cono de diamante	Aceros endurecidos, aleaciones endurecidas y revenidas.
D	100	Cono de diamante	Acero superficialmente cementado.
E	100	Bola de 1/8"	Hierro fundido, aleaciones de aluminio y magnesio.
F	60	Bola de 1/16"	Bronce y cobre recocidos.
G	150	Bola de 1/16"	Cobre al berilio, bronce fosforoso, etc.
H	60	Bola de 1/8"	Placa de aluminio.
K	150	Bola de 1/8"	Hierro fundido, aleaciones de aluminio.
L	60	Bola de 1/4"	Plásticos y metales suaves, como el plomo.

3.4.2 Análisis metalográfico. La metalografía es la ciencia que estudia las propiedades microestructurales de los materiales, y permite relacionarlas con las propiedades químicas, físicas y mecánicas de cada uno. Además, permite visualizar cualquier caracterización evidente en la estructura del material relacionada con un modo de fallo específico. El tamaño de grano determina las propiedades mecánicas de los materiales, así por ejemplo los materiales con tamaños de grano pequeño tendrán mayor resistencia a la tracción que materiales con tamaños de grano grandes.

La determinación del tamaño de grano se da mediante del conteo de grano en una unidad de 1 pulgada con un aumento de 100 veces en el microscopio. En la figura 13 se da un ejemplo de análisis metalográfico.

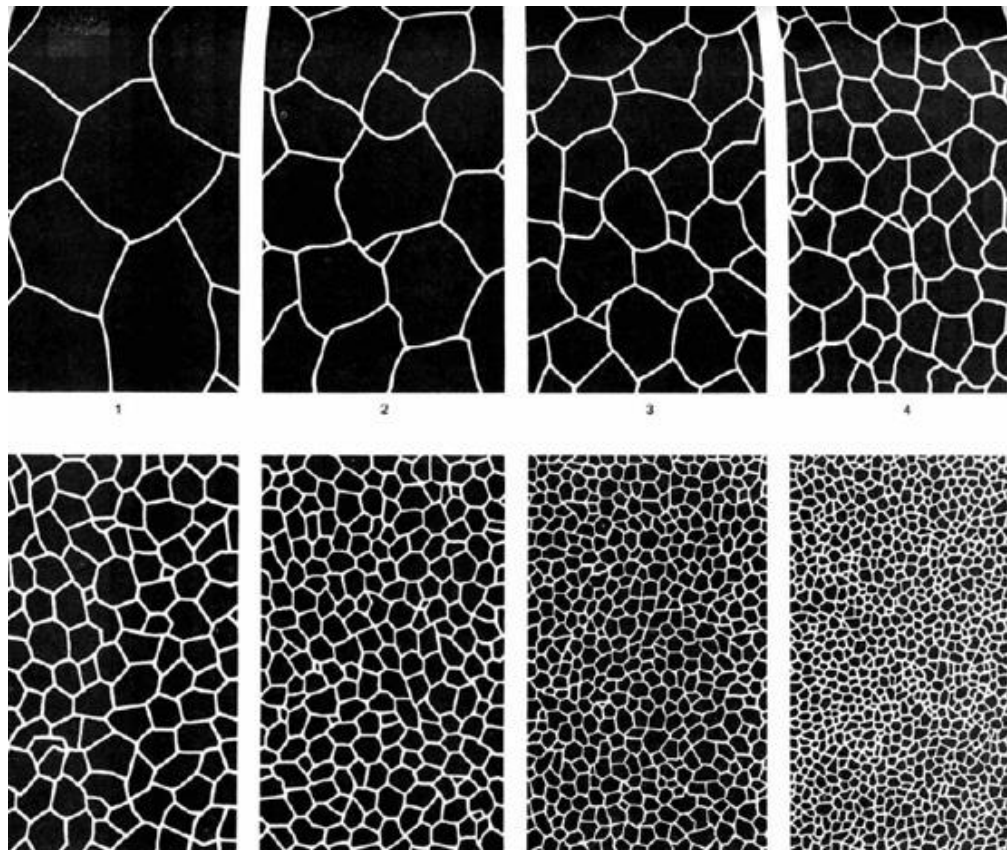


Figura 13. *Análisis metalográfico*

Fuente: <http://www.cad-cae.com/analisis04.html> 1

Para realizar el análisis metalográfico de un material se debe ejecutar la siguiente metodología:

- Selección y corte de la muestra
- Pulido de la superficie
- Ataque químico de la superficie
- Montaje en microscopio

Se debe realizar una selección cuidadosa de la parte de la pieza que se va a examinar, posterior a esto se debe realizar un corte de la misma durante el cual se debe usar altas cantidades de refrigerante con el fin de que el aumento de la temperatura no cause variaciones en el tamaño de

grano. A continuación se realiza un lijado de la superficie a examinar con distintos calibres de lija hasta llegar a realizar la limpieza de la superficie con un paño suave. En la figura 14 se muestra unos ejemplos de microscopios.



Figura 14. *Microscopio*

Fuente: <https://www.simet.cl/analisismetalografi>

Posterior a esto se realiza un ataque químico sobre la superficie con el objetivo de revelar de la forma más clara posible las características estructurales del material, los reactivos más utilizados de acuerdo al material a examinar se presentan en la siguiente tabla 9 (Facultad de Ingeniería , 2018)

Tabla 9. *Reactivos más utilizados en análisis metalográfico*

Nombre del Reactivo	Composición	Aplicaciones
Ácido Nítrico (Nital 2%)	Ácido nítrico2 cm ³ . Alcohol100 cm ³ .	Aceros, Hierros, Fundiciones
Ácido Pírico (Picral)	Ácido pírico4 grs. Alcohol100 cm ³ .	Aceros de baja aleación
Ácido clorhídrico	HCl concentrado1 cm ³ . Agua100 cm ³ .	Aceros templados
Reactivo de Bolton	Ácido pírico6 grs. Alcohol etílico 78 cm ³ . Ácido nítrico2 cm ³ . Agua20 cm ³ .	Fundiciones
Ácido Nítrico concentrado	Ácido nítrico concentrado 50 cm ³ .	Latones $\alpha + \beta$
Persulfato de amonio	Persulfato de amonio 10 grs. Agua100 grs.	Cobre y sus aleaciones
Cloruro férrico ácido	Cloruro férrico5 grs. Agua5 cm ³ . Ácido clorhídrico30 cm ³ . Alcohol isoamílico 30 cm ³ . Alcohol 96°.....30 cm ³ .	Cobre, zinc y sus aleaciones
Ácido Nítrico	A) Diluido en concentraciones de 0,5, 1, y 10% B) Ácido nítrico diluido en alcohol	Zinc y eutéctico Zn-Al
Ácido fluorhídrico	Ácido fluorhídrico5 ml Agua 99,5 ml	Aluminio

Después de realizado el ataque químico de la superficie, se montan las muestras sobre el microscopio metalográfico con el fin de visualizar las características estructurales del material y el tamaño de grano del mismo.

3.4.3 Inspección mediante tintas penetrantes. La técnica de líquidos penetrantes consiste en aplicar una sustancia de color usualmente rojo, sobre una superficie con el fin de identificar las discontinuidades presentes, permitiendo identificar la presencia de grietas, concentradores de esfuerzos entre otros. El procedimiento para la aplicación de esta técnica consiste en limpiar muy bien la superficie a la cual se le aplicara el líquido, esta superficie debe ser de buen acabado

superficial no aplica para superficies porosas. Posteriormente se aplica el líquido por toda la superficie y se espera por un periodo de 10 minutos a que el líquido penetre en el material gracias al principio de capilaridad.

A continuación se limpian los excesos de líquido y se aplica un revelador, este permite ver hasta donde ha penetrado el líquido, el tipo de discontinuidad, profundidad y extensión de la misma. La norma que reglamenta este ensayo es la ASME V examinación no destructiva. En la figura 15 se explica cómo se realiza el ensayo de tintas penetrantes.

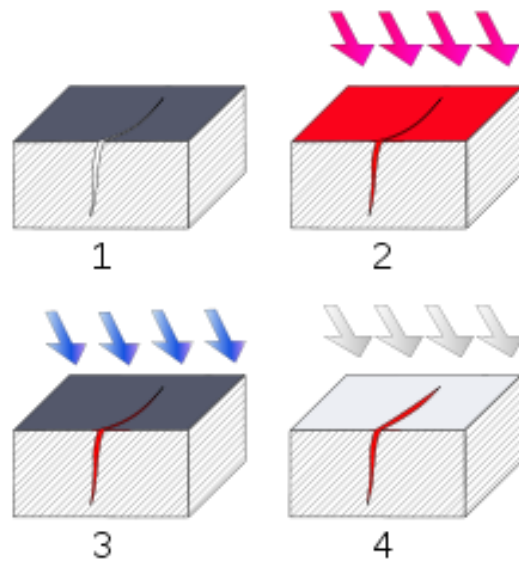


Figura 15. *Ensayo de tintas penetrantes*

3.4.4 Inspección mediante microscopio electrónico de barrido. Es una técnica que consiste en utilizar un haz de electrones en lugar de un haz de luz, haciéndolo incidir sobre la una superficie de muestra para producir una imagen en el orden de las micras, básicamente consiste en una interacción entre los electrones producidos por equipo y los electrones de los átomo propios del tipo de material que se esté analizando.

Mediante esta interacción de electrones también se puede determinar la composición del material mediante la creación de inestabilidad de los electrones del átomo y caracterizando la radiación emitida por la superficie debido a este fenómeno. En la figura 16 se observa el microscopio electrónico de barrido utilizado para el análisis del elemento.



Figura 16. *Microscopio electrónico de barrido*

4. Análisis de fallo en pistón

4.1 Contextualización de fallo en pistón

El pistón sobre el cual se realizará el análisis de fallo pertenece a un motor Cummins 4BT, utilizado en vehículo de transporte de carga tipo camión. Por medio del formato creado para la contextualización del fallo se realizó la recopilación de la información necesaria para crear un ambiente claro respecto del fallo. A continuación, en la figura 17 se muestra la información

recopilada y diligenciada en el formato e imágenes de las condiciones finales de la pieza posterior al fallo.

Universidad Industrial de Santander 		Formato de contextualización del fallo
Imagen de la pieza en estudio		
Especificaciones Técnicas	Datos del vehículo	Camion JAC tipo furgon
	Potencia y Velocidad	140HP 2500 RPM
	Metrología de la pieza	Diametro: Min 101.823 mm Max 101.887 mm
	Tipo de combustible	Diesel
	Condiciones de operación	Vehiculo con turnos de trabajo de 12 horas diarias, recorriendo todo el territorio nacional
	Descripción de la aplicación del vehículo	Vehiculo utilizado para transporte de carga seca
	Tipo de refrigerante	Anticongelante/Refrigerante Zerex® Extended Life
	Cargas de operación	Carga de 6620 kg
	Lubricante utilizado	Classic Blue Valvoline 15w40
Datos de mantenimiento	Kilometraje del vehículo	283.432
	Historial de mantenimiento	Vehiculo sin intervenciones al motor, se realizan cambios de aceite incluyendo consumibles como filtros, fluidos, etc.
	Antecedentes relacionados con el fallo	Motor con nivel de temperatura elevado, consumo de aceite, perdida de potencia en condiciones de alta potencia.
Datos de fallo	Levantamiento fotográfico de fallo	
	Metrología de la pieza	Diametro: 101.975 mm
	Descripción de las características físicas del fallo	La superficie de la cabeza del pistón la cual está expuesta a la combustión, no presenta marcas. La superficie adyacente a la cabeza del pistón e inmediatamente por encima de los alojamientos de los anillos presenta marcas de ataque profundas. Los alojamientos de los anillos no presentan marcas de corrosión ni evidencias de ataques sobre dichas superficies. La falda del pistón se encuentra en buenas condiciones. La parte interna no presenta alteraciones y el orificio del bulón no presenta huellas de fallo.

Figura 17. Formato de análisis de fallo

4.2 Descripción de características físicas del fallo pistón



Figura 18. *Pistón en estudio fallo superficie superior de anillos*



Figura 19. *Pistón con marcas de ataque*



Figura 20. *Marca en lado contrario a marca principal*



Figura 21. *Evidencias de depósitos de carbón en los anillos y marcas en la cabeza*



Figura 22. *Evidencias de presencia de posibles grietas en alojamiento de anillos*



Figura 23. *Cabeza del Pistón*

En las figuras 18 y 19 se puede observar sobre el borde o intersección de la falda del pistón y la cabeza del mismo, una marca de aproximadamente 5.5 cm de largo y 0.5 cm de alto, en la

alteración de la superficie se puede observar un deslizamiento de la superficie del pistón debido a que entro en contacto con una superficie de mayor dureza y resistencia mecánica. En la figura 20 se presenta la segunda marca de ataque presente sobre el pistón la cual tiene 2.8 cm de largo y 0.7 cm de alto, de igual forma que la marca de ataque anteriormente descrita, la topografía de la superficie presenta un deslizamiento haciendo resumir de una intersección con otra superficie más dura. En la figura 22 se observan algunas posibles grietas que tiene la superficie del pistón en la región del alojamiento de los anillos de retención, para realizar la verificación de la discontinuidad de la superficie en dicha área es necesario de utilizar el método de tintas penetrantes para inspeccionar la continuidad de la superficie. Por ultimo en la figura 23 se ve que la cabeza del pistón no presenta marcas que puedan surgir después de intersecciones con los asientos de las válvulas de admisión o quemaduras por defectos de la combustión. En la figura 24 se define el desgaste abrasivo entro dos superficies.

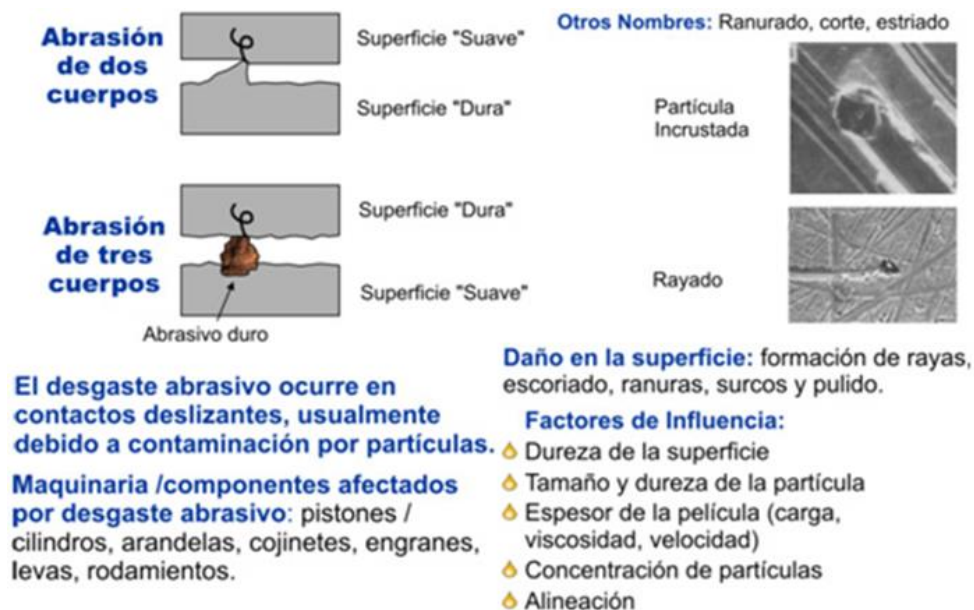


Figura 24. *Desgaste abrasivo entre dos superficies*

Fuente: <http://noria.mx/lublearn/mecanismos-basicos-de-desgaste/>

En las superficies que albergan los anillos de retención se puede observar la presencia de algunas grietas o fisuras como muestra la figura 21, se debe realizar la aplicación de tintas penetrantes para poder descartar la presencia de manchas y determinar las características de dichas grietas. Además se puede ver la presencia de depósitos de carbón. La cabeza del pistón no presenta deformaciones ni marcas ocasionadas por válvulas de admisión o depósitos de carbón.



Figura 25. *Metrología del Pistón*

En la figura 25 se presenta el procedimiento de inspección de las dimensiones del pistón a partir de lo cual se puede concluir que presenta un aumento en el diámetro de la cabeza de 0.08 mm, las dimensiones del diámetro en la parte baja de la falda y longitud del pistón se mantienen de acuerdo a especificaciones del fabricante.

4.3 Elaboración de diagrama ishikawa para el análisis del fallo

De acuerdo a la evidencia fotográfica recolectada, la caracterización del fallo además de establecer el contexto del mismo se procedió a crear el diagrama de Ishikawa para el análisis del fallo. El fallo se va a identificar a partir de ahora como ataque sobre superficie adyacente a cabeza del pistón.

Para el caso particular de elementos de motores de combustión interna se partirá de la formulación de 5 fallos primarios a partir de los cuales se formularan las posibles causas específicas de fallo. Estos fallos son

- Errores de diseño
- Defecto del material
- Defectos de manufactura
- Operación
- Condiciones de operación

Los errores de diseño están relacionados con la selección de medidas admisibles, materiales, ajustes y tolerancias de acuerdo a las condiciones de carga. Los defectos de material están relacionados con un no cumplimiento de las propiedades mecánicas en un material específico. Los defectos de manufactura están relacionados con proceso de mecanizado y ensamble inadecuados. Los fallos por operación se deben a errores humanos y por ultimo las condiciones de operación se refieren a parámetros del funcionamiento que salen de los valores admisibles causando el fallo. A continuación se desarrolla el diagrama de Ishikawa para el análisis de fallo identificado con el nombre ataque sobre superficie adyacente a cabeza del pistón. Para la elaboración del diagrama de

Ishikawa se seleccionaron 5 tipos de causa fallo primario de los cuales se establecerán las causas de fallo específicas. Estas causas de fallo primarias son:

- Fallos de diseño
- Fallos de material
- Fallos de manufactura
- Fallos debido a condiciones de operación
- Fallos por errores en la operación

4.3.1 Fallos de diseño. Selección de ajustes y tolerancias inadecuados. Durante la etapa de diseño en detalle el ingeniero debe seleccionar el ajuste que debe existir en el ensamble y los acabados superficiales que caracterizaran la fricción entre dos superficies. Un error en la selección del ajuste puede ocasionar esfuerzos de presión sobre las superficies ocasionando ataques como el que se evidencia sobre el piñón. Seleccionar un acabado superficial incorrecto causa un coeficiente de fricción muy alto teniendo como consecuencia altas temperaturas que generan dilataciones en las piezas debido a las cargas térmicas haciendo que las superficies se intersecten. Esta tolerancia inadecuada hace que el desgaste abrasivo aumente, generando que la superficie más dura arranque material de la más blanda, para este caso particular el pistón es el más blando en comparación con la superficie del cilindro.

Selección incorrecta de material. Seleccionar un material incorrecto en términos de la resistencia mecánica del mismo ocasionará que la pieza falle en las condiciones normales de operación, un caso particular es que la resistencia del material a la fluencia sea menor que el esfuerzo de trabajo.

4.3.2 Fallos de material. Resistencia mecánica menor al valor teórico. Durante la etapa de preparación del material pueden surgir fenómenos como por ejemplo un enfriamiento inadecuado que ocasionan que la dureza del material aumente y la resistencia a la fluencia disminuya, esto como consecuencia de una configuración inadecuada del material. Para el caso particular el pistón que se encuentra sometido a cargas térmicas tuvo una deformación plástica y se terminó estrellando con la superficie de la camisa del cilindro.

Dureza baja del material. Por otro lado existe la posibilidad que la dureza del material sea muy baja permitiendo que el pistón sea rayado producto del contacto con la camisa del cilindro.

4.3.3 Fallos de manufactura. Utilización de herramienta de mecanizado no apta. Esta situación puede ocasionar en primera medida no lograr el acabado superficial requerido para las condiciones de operación de la pieza, adicionalmente si la maquina o herramienta de mecanizado no cuentan con la sensibilidad necesaria, no se le podrán dar a la pieza las tolerancias de diseño en las dimensiones haciendo que funcionen con ajustes no óptimos.

4.3.4 Fallos por condiciones de operación. Una ignición incorrecta producto de una mezcla inadecuada de combustible y aire, desincronización de los tiempos de admisión y escape o una mala calidad del combustible, esta situación puede ocasionar elevación de la temperatura en la parte superior del pistón únicamente, es decir un sobrecalentamiento local haciendo que el diámetro en la cabeza del pistón aumente debido a dilatación ocurrida por el aumento en la temperatura y termine chocando con la camisa del cilindro ocasionando que la fricción entre las dos superficies aumente superando la resistencia del material más blanco para este caso el pistón. En la tabla 10 se presentan las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio, material a

partir del cual se fabrica el pistón, y en la tabla 11 se presenta los valores de coeficientes de expansión térmica de algunos materiales.

Tabla 10. *Propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio*

Aleación de aluminio forjado	Estado	Límite elástico a la tensión (convencional al 2%)		Resistencia máxima a la tensión		Resistencia a la fatiga a 5E8 ciclos		Elongación en 2 in %	Dureza Brinell -HB
		kpsi	MPa	kpsi	MPa	kpsi	MPa		
1100	recocido en hoja	5	34	13	90			35	23
	laminado en frío	22	152	24	165			5	44
2024	recocido en hoja	11	76	26	179			20	-
	tratamiento térmico	42	290	64	441	20	138	19	-
3003	recocido en hoja	6	41	16	110			30	28
	laminado en frío	27	186	29	200			4	55
5052	recocido en hoja	13	90	28	193			25	47
	laminado en frío	37	255	42	290			7	77
6061	recocido en hoja	8	55	18	124			25	30
	tratamiento térmico	40	276	45	310	14	97	12	95
7075	recocido en barra	15	103	33	228			16	60
	tratamiento térmico	73	503	83	572	14	97	11	150

Tabla 11. *Coefficientes de expansión térmica*

Material	α ($10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Material	α ($10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Material	α ($10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Material	α ($10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Hormigón	8 a 12	Acero	12	Hierro	12	Plata	19
Oro	14	Invar	0,4	Plomo	30	Zinc	30
Aluminio	23	Latón	18	Cobre	17	Vidrio	7 a 9
Cuarzo	0,4	Hielo	51	Diamante	1,2	Grafito	8
Fibra de carbono	-0.8 ⁴	Etanol	250	Arseniuro de galio	5.8	Gasolina	317
Vidrio borosilicato	3.3	Vidrio Pyrex	3.2 ⁵	Madera de roble	54 ⁶	Abeto (radial)	27 ⁷
Abeto (tang.)	45 ⁷	Abeto (long.)	3.5 ⁷	PP	150	PVC	52
Zafiro	5.3 ⁸	Carburo de silicio	2.77 ⁹	Silicona	2.56 ¹⁰	Acero inoxidable	10.1 ~ 17.3

Se puede presentar también un aumento general en la temperatura de la superficie del pistón como consecuencia de un mal funcionamiento en el sistema de refrigeración y sistema de lubricación del motor, haciendo que este se dilate y aumente el diámetro hasta chocar con la camisa del cilindro aumentando la fricción ocasionando un desgaste abrasivo sobre el pistón. Durante este fenómeno la carga ejercida sobre el pistón supera la resistencia al esfuerzo cortante y el material más duro rompe el material blando (superficie del pistón).

Las cargas térmicas conocidas como creep pudieron ocasionar la expansión del material por una afectación de la microestructura del material.

4.3.5 Fallos por mala operación. Arranque en frío. Un arranque en frío del motor, entregando regímenes de potencia altos puede ocasionar un exceso de fricción que puede llegar a rayar las superficies.

Malas prácticas de mantenimiento. Existen algunas actividades de mantenimiento autónomo las cuales pueden ser ejecutadas por el operario del equipo, para este caso el conductor del vehículo, dentro de las cuales se encuentra la revisión del nivel de fluidos del motor, esta actividad garantiza un buen funcionamiento de los sistemas de lubricación y refrigeración.

Perdida de condiciones en el aceite. El aceite en un motor se debe cambiar cada tanto kilometraje según la recomendación del fabricante, la cual se hace de acuerdo a las condiciones de trabajo y entorno. Extender el cambio de aceite aumentara la posibilidad de que con el aumento de la temperatura la viscosidad del aceite baje al punto de romperse la película de lubricante haciendo que la fricción entre las superficies en contacto aumente.

Además de que el aceite acumula un gran número de viruta resultante del desgaste de las diferentes piezas del motor, si estas partículas se alijan entre las dos superficies puede ocasionar un desgaste abrasivo característico de tres superficies.

En la figura 26 se puede observar la recopilación de la descripción de causas de fallo en el diagrama de Ishikawa, este permite relacionar los fallos principales con los específicos de una manera secuencial y escalonada.

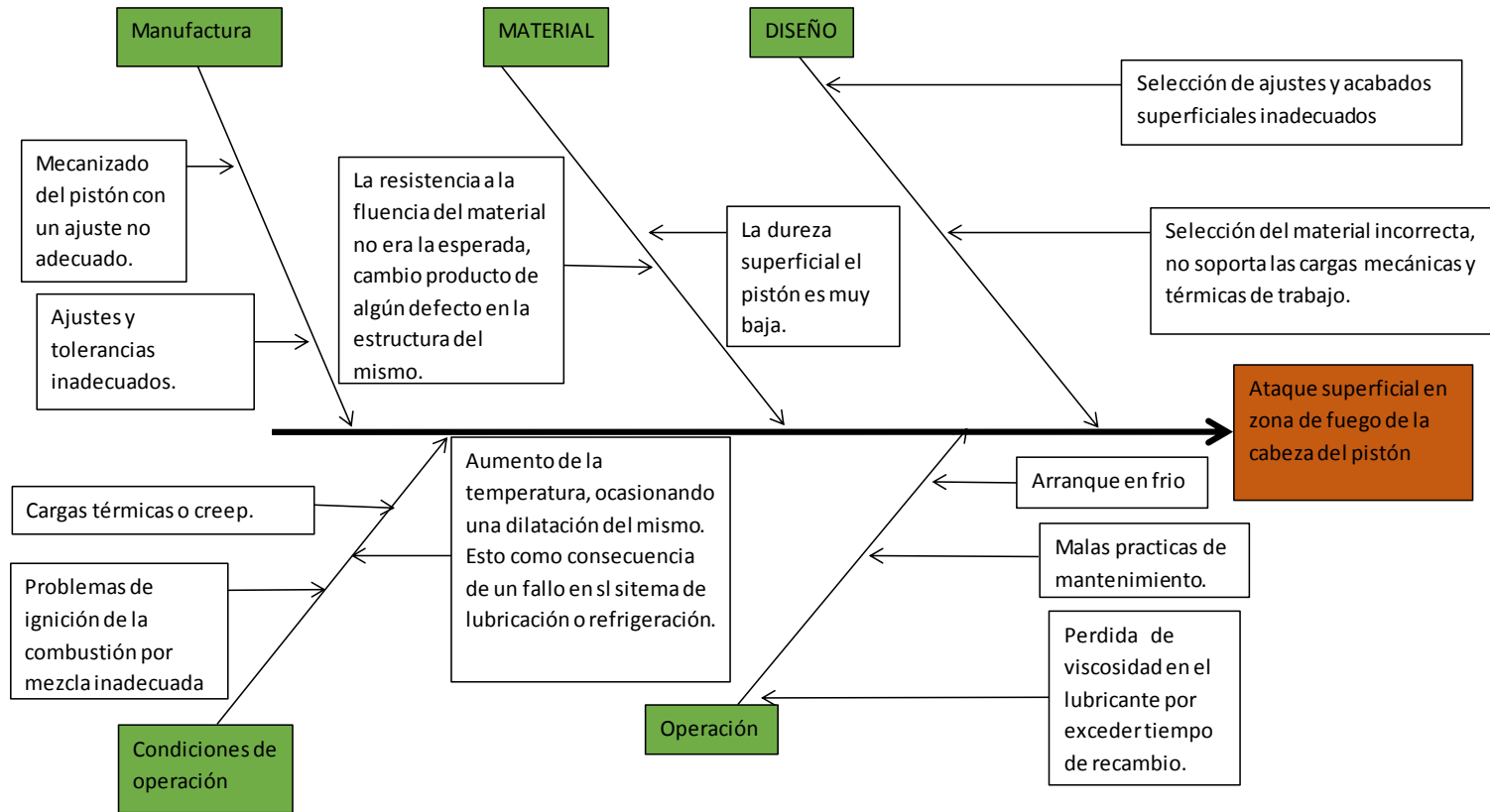


Figura 26. Diagrama de Ishikawa fallo en pistón

4.4 Aplicación de técnicas avanzadas

4.4.1 Inspección por líquidos penetrantes a pistón. El alcance de la inspección realizada mediante líquidos penetrantes en el pistón de motor Cummins cubre la superficie evaluada de la muestra. En la figura 27 se puede ver la aplicación de la sustancia sobre la superficie

Equipos empleados: Limpiador Magnaflux, Penetrante rojo soluble en agua Magnaflux, Revelador Magnaflux



Figura 27. *Aplicación del penetrante rojo en pistón*



Figura 28. *Aplicación del revelador en pistón*

Después de realizar el retiro de la sustancia como se observa en la figura 28 se pudo establecer que no se presentaban fisuras u otro modo de fallo diferente al observado en la tierra de fuego del pistón, a partir de ello se procede a analizar el fallo que tuvo como consecuencia los ataques sobre la superficie del pistón.

4.4.2 Aplicación de microscopia electrónica al pistón. Mediante el uso del microscopio electrónico de barrido se realizó la inspección de las marcas presentadas por el pistón con el objetivo de identificar claramente el mecanismo por medio del cual se dio el fallo. En la figura 49 se puede observar imagen tomada del fallo, en ella se pueden identificar las características topográficas del fallo.

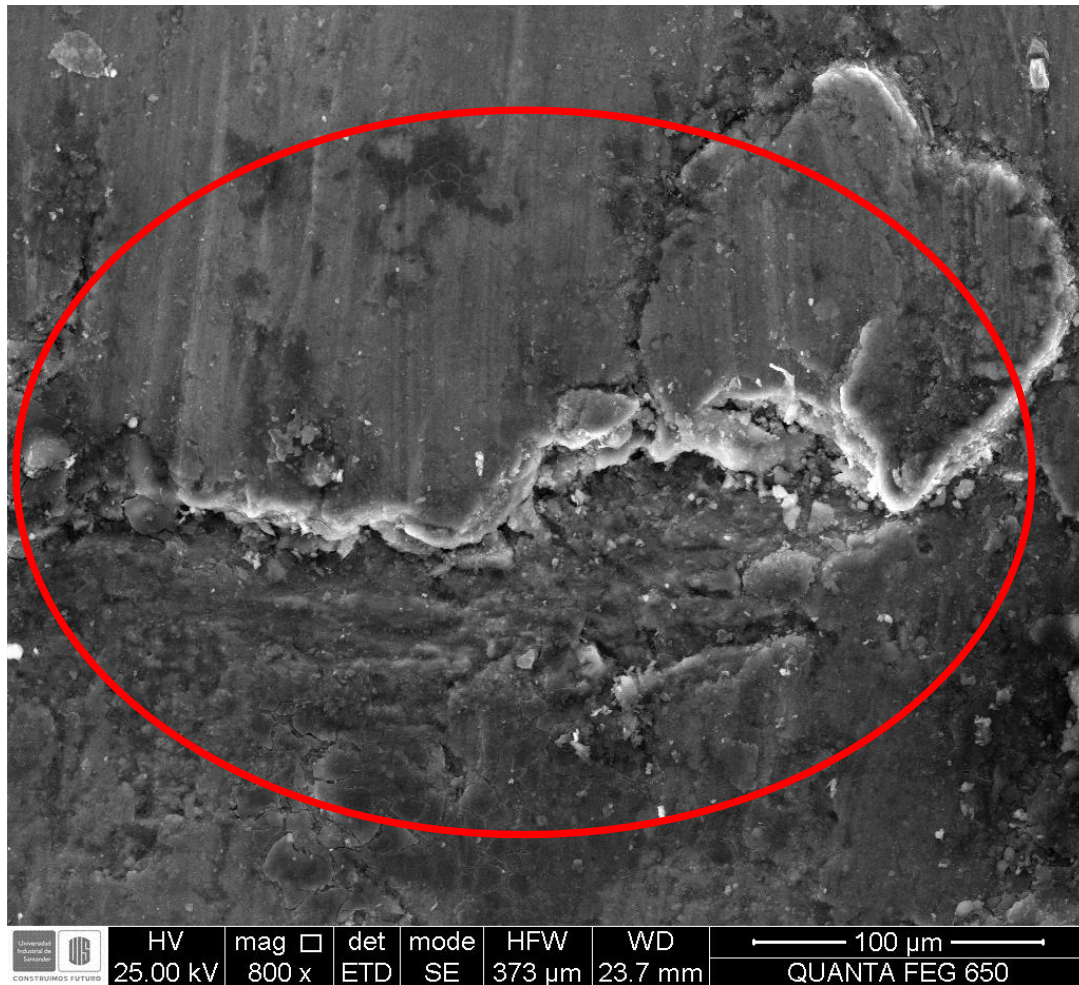


Figura 29. *Fotografía de fallo en pistón toma 1*

En la figura 29 se puede observar el deslizamiento de los planos de la superficie, allí se ve como ciertas partes quedaron con una mayor altura que otras partes, haciendo evidente la deformación sufrida por el material debido a una fuerza de fricción alta que supero la resistencia a la fluencia de la superficie del pistón.

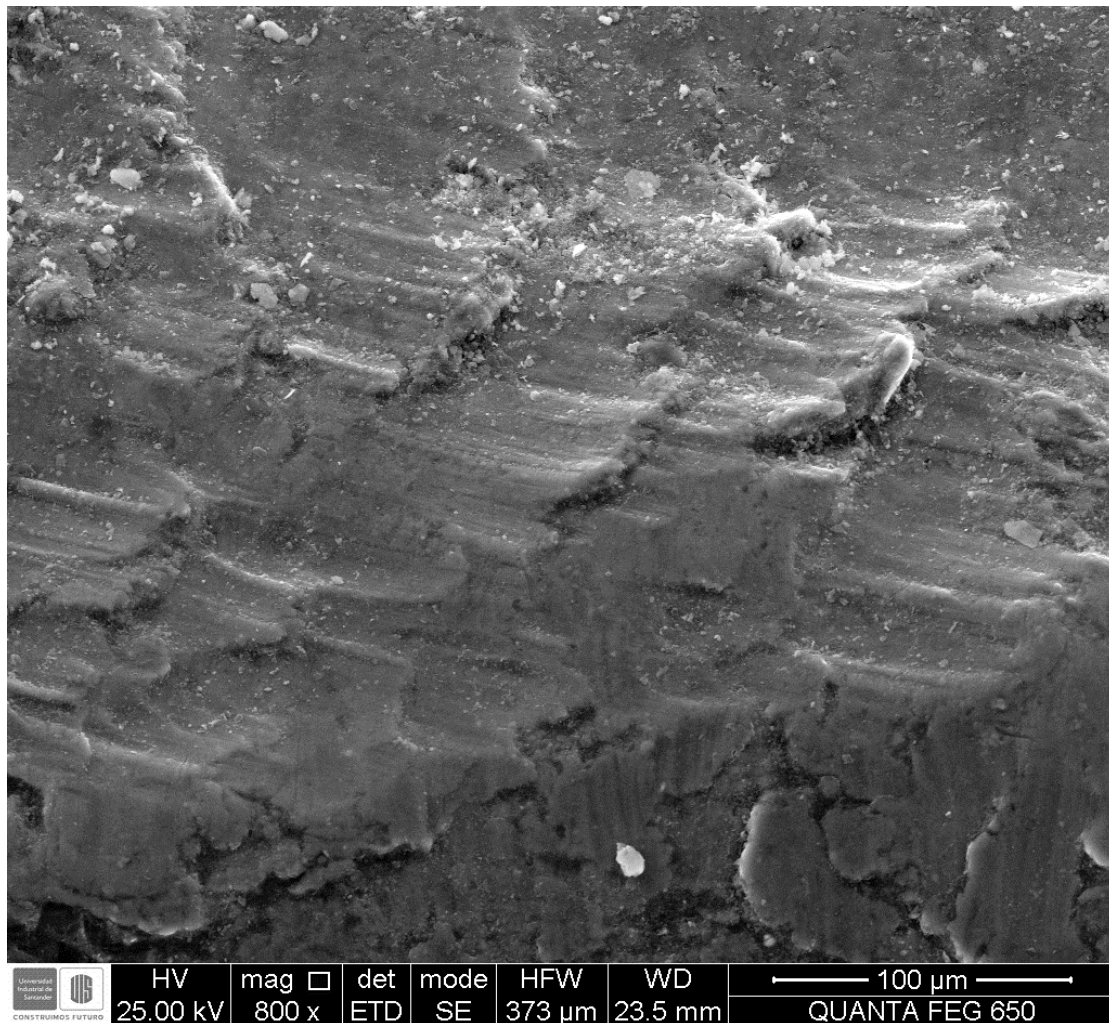


Figura 30. *Deslizamiento de material en superficie del pistón*

En la figura 30 se puede observar los deslizamientos que se presentaron en el material de la superficie del pistón, los cual permite aseverar que dicho deslizamiento se da por el aumento en la fricción debido a una dilatación y aumento en la dimensión del diámetro, la carga de fricción aumento hasta superar la resistencia al corte del material ocasionando la deformación de la superficie. Después de las observaciones se puede descartar que entre las dos superficies existieran partículas abrasivas que hubieran ocasionado el fallo. En la figura 31 se puede apreciar el punto en el cual se realizó el análisis de composición elemental del material.

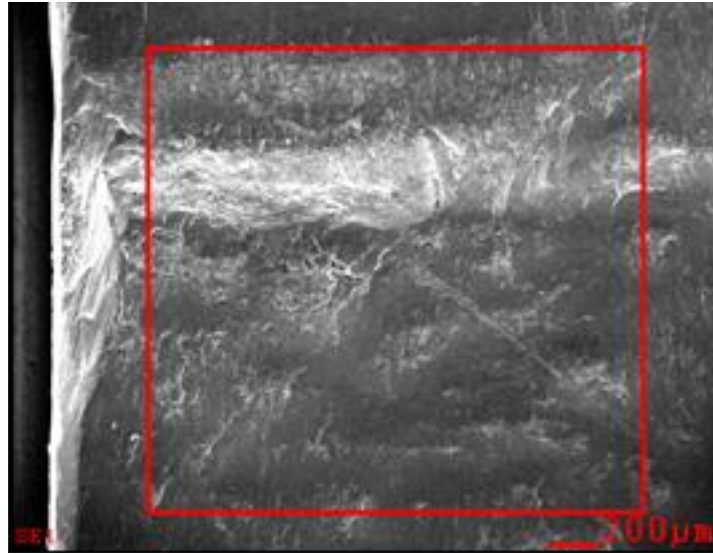


Figura 31. *Punto de análisis de composición elemental*

En la figura 31 se muestra el punto específico en el cual se realizó el análisis de composición elemental.

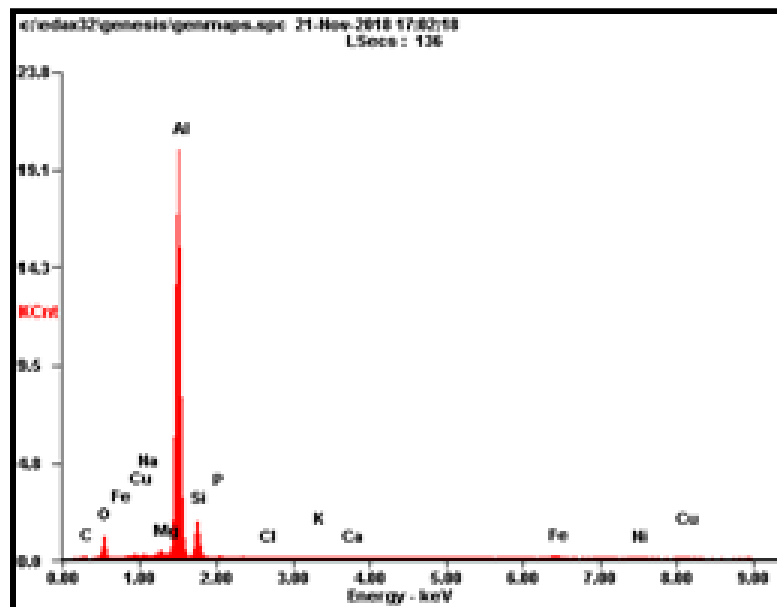


Figura 32. *Gráfico de emisiones de energía*

En la figura 32 se puede ver el grafico que representa los niveles de emisión de energía de cada uno de los componentes presentes en la superficie, el cual es proporcional a su concentración

Tabla 12. *Composición elemental del pistón*

Element	Wt%	At%
CK	05.40	10.68
OK	13.35	19.82
NaK	00.48	00.49
MgK	00.98	00.96
AlK	60.94	53.64
SiK	14.68	12.41
PK	00.44	00.34
ClK	00.17	00.12
KK	00.22	00.13
CaK	00.29	00.17
FeK	01.29	00.55
NiK	00.75	00.30
CuK	01.01	00.38
Matrix	Correction	ZAF

A partir de los resultados presentados en la tabla 12 se puede concluir que el material del pistón consiste en una aleación de aluminio y silicio.

4.5 Generación de hipótesis de fallo

A partir de las observaciones realizadas, la verificación de la información recopilada y la elaboración del diagrama de Ishikawa, se puede establecer que el fallo en el pistón identificado como ataque en área adyacente a la cabeza del pistón se debió a lo siguiente.

Se presentó un fallo en el sistema de refrigeración, teniendo como consecuencia que el calor generado durante la combustión no fuera evacuado, generando un aumento de la temperatura en las superficies adyacentes a la cámara de combustión, este aumento de la temperatura causa una dilatación del material más maleable y con mayor coeficiente de dilatación térmica para este caso el aluminio del pistón, por lo cual el diámetro del pistón aumento en 0.08 mm haciendo que la fricción entre la superficie del pistón y la camisa aumentara. Este aumento en la fricción se dio hasta el punto que se superó la resistencia al corte del aluminio haciendo que el material más duro arrancara viruta del pistón.

También por el tipo de corte que presenta el material se puede aludir el fallo a la presencia de partículas entre las dos superficies producto de un mal funcionamiento de los sistema de filtrados de aceite y aire.

El calentamiento zonal que presento el pistón, se pude aludir a igniciones incorrectas con altas concentraciones de carbono, esto debido a que la variación en el diámetro se ve únicamente en la cabeza del pistón.

5. Análisis de fallo en cigüeñal

5.1 Contextualización del fallo

El cigüeñal en estudio, es un cigüeñal perteneciente a un vehículo utilizado para transporte de personas tipo camioneta. Por medio de la implementación del formato para la contextualización e identificación de datos importantes en las piezas a analizar, se realizó la recopilación de la

información que permitió adentrarse en el fallo específico. A continuación se muestra en la figura 33 el diligenciamiento de la información sobre el formato.

Universidad Industrial de Santander		Formato de contextualización del fallo	
Imagen de la pieza en estudio			
Especificaciones Técnicas	Datos del vehículo	CHEVROLET CAPTIVA SPORT 3.0	
	Potencia y Velocidad	264 HP 6950 RPM	
	Metrología de la pieza		
	Tipo de combustible	GASOLINA	
	Condiciones de operación	Vehículo utilizado en ciudad	
	Descripción de la aplicación del vehículo	Vehículo para transporte de pasajeros con capacidad de 5 personas	
	Tipo de refrigerante	Agua + refrigerante freezotone	
	Cargas de operación	468 KG	
Lubricante utilizado	ACEITE SINTETICO Mobil 5W-30		
Datos de mantenimiento	Kilometraje del vehículo	84.080	
	Historial de mantenimiento	Motor con cambio de cigüeñal realizado a 77.516 kilómetros, se realiza una pequeña intervención al motor donde se realiza el reemplazo de casqueterías y termostato.	
	Antecedentes relacionados con el fallo	El vehículo no había sido ingresado a mantenimiento por temas de refrigeración, el cambio de lubricante se estaba realizando de acuerdo a las recomendaciones hechas por el fabricante.	
Datos de fallo	Levantamiento fotográfico de fallo		
	Metrología de la pieza		
	Descripción de las características físicas del fallo	Se presenta marcas de ataque o rayaduras sobre el muñon de biela, dicha marca creara una disminución en el diametro del muñon ocasionando botes por excentricidad, además de desajuste en las el muñon de la biela y el pie e biela.	

Figura 33. Formato inspección de cigüeñal

5.2 Descripción física del fallo en el cigüeñal



Figura 34. *Marca en muñón de biela.*

En la figura 34 se pueden observar marcas de deslizamiento causadas por un material más blando debido a un aumento en la fricción. Esta superficie está en contacto con el casquete del pie de la biela los cuales normalmente son fabricados en aluminio.

Se puede observar que se evidencia un deslizamiento de la superficie del muñón de biela.



Figura 35. *Deslizamiento de la superficie del muñón de biela*

Se puede observar en la figura 35 que las marcas de deslizamiento se ven en los muñones de bancada y en los muñones de pie de biela. Las marcas se caracterizan por presentar una apariencia de quemadura en la superficie o mancha ocasionada por otro material.

El muñón de bancada tiene un aumento en la medida del diámetro de 0.04 mm, y el muñón de biela tiene un aumento en el diámetro de 0.05 mm.

5.3 Elaboración De Diagrama De Ishikawa

Para la elaboración del diagrama de Ishikawa se tomaran los mismos tipos de fallo principales a partir de los cuales se realizará el análisis de las posibles causas específicas que pudieron haber causado el fallo en el cigüeñal. En la figura 36 se puede observar la elaboración del análisis de modo y causa a través del diagrama de Ishikawa.

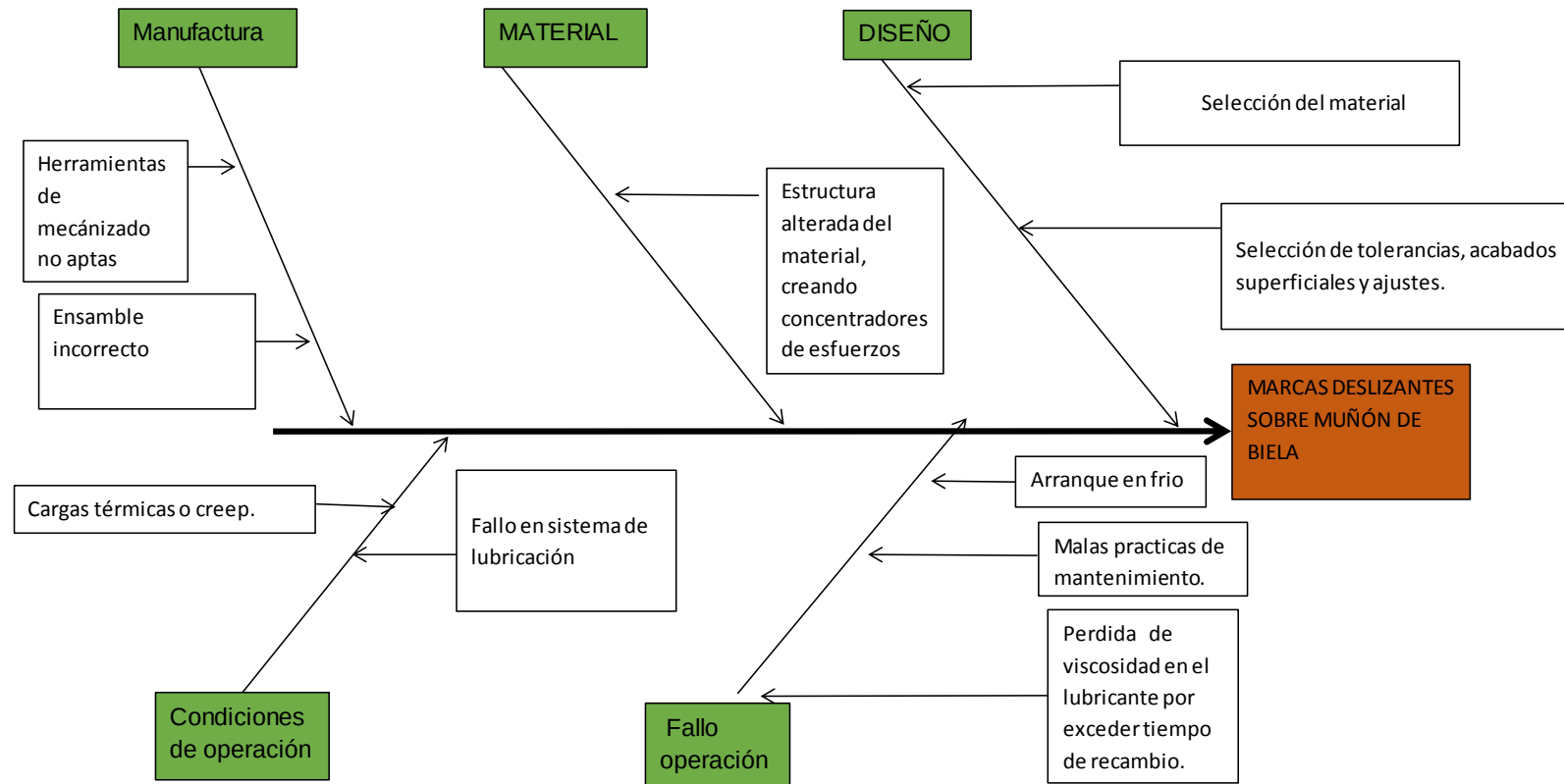


Figura 36. Diagrama de Ishikawa fallo en cigüeñal

5.3.1 Fallos de diseño en cigüeñal. Durante la etapa de diseño se pudieron haber seleccionado tolerancias y ajustes incorrectos, lo que ocasiono una intersección de la superficie del muñón de biela del cigüeñal y el casquete o buje localizado entre el cigüeñal y el pie de biela. La selección del material para la fabricación de la pieza puede estar relacionada con el fallo, ya que se pudo haber seleccionado un material con propiedades mecánicas incorrectas, el casquete que se aloja entre las dos superficies no contaba con la dureza necesaria y la resistencia al corte esperado para trabajar bajo los regímenes de carga del motor.

5.3.2 Fallos del material. El no cumplimiento de las propiedades mecánicas características de un material puede ocasionar fallos por debajo de las cargas de operación, esto normalmente sucede por una variación en la estructura del mismo. Por ejemplo si el material tiene dureza o resistencia a la tracción por debajo de los valores teóricos por una mala preparación.

5.3.3 Fallos de manufactura en la fabricación del cigüeñal. No utilizar las herramientas de mecanizado aptas para brindar a las piezas los acabados y dimensiones adecuadas puede generar ajustes de funcionamiento no aptos para la aplicación causando que las piezas ensambladas estén sometidas a fuerzas de fricción altas y sobre esfuerzos de ensamble.

El cigüeñal está compuesto por los muñones de bancada, los muñones de biela los cuales son piezas cilíndricas mecanizadas y los balancines los cuales son piezas fabricadas mediante fundición. Esto se ensambla a presión, es decir con ajustes negativos y precalentando una de las piezas. Un mal ensamble puede ocasionar excentricidades haciendo que hallan esfuerzos adicionales en los puntos de apoyo de la biela, en este caso el muñón de biela.

5.3.4 Fallos de condiciones de operación. Un aumento en la temperatura de las superficies producto de fallos en el sistema de refrigeración o una combustión incorrecta, causa una dilatación del material más dúctil en este caso el aluminio del cual está fabricado el casquete haciendo que la fricción entre las dos superficies aumente hasta superar la resistencia mecánica del aluminio creando un deslizamiento del material sobre el muñón de la biela, lo cual altera la dimensión del muñón de biela haciendo necesario rectificar la superficie o cambiar el cigüeñal como en el caso tratado. El aumento en la temperatura también puede ocasionar disminución de la viscosidad del lubricante haciendo que la película presente entre las dos superficies se rompa y aumente la fricción hasta llegar al punto de fallo del casquete. Una falla en el sistema de lubricación tendrá las mismas consecuencias.

5.3.5 Fallo por operación del vehículo. Las malas prácticas de mantenimiento autónomo, como la no revisión de niveles de aceite y agua pueden ocasionar dos situaciones que aumentan la posibilidad de que se presente el fallo en mención. Una deficiencia en el nivel de aceite puede causar que no exista una película de lubricante entre las superficies del pie de biela y el muñón de biela causando un aumento de la fricción que generan las marcas observadas en el muñón. Por otro lado no realizar verificación de nivel del agua en el sistema de refrigeración puede causar un aumento en la temperatura de las superficies del pistón y el cilindro, haciendo que estos dos se intersecten frenando de forma abrupta la manivela.

Un arranque en frío pasando de un nivel de carga o potencia bajo a un nivel alto puede hacer que las superficies se vean afectadas al no estar a temperaturas adecuadas para la operación. No realizar el cambio de aceite en los intervalos establecidos, pueden deteriorar el aceite haciendo que la viscosidad del mismo disminuya y la película del mismo ceda con las fuerzas de contacto.

5.4 Aplicación de ensayo de dureza

Para el caso de fallo en el muñón de biela del cigüeñal se realizó la aplicación del ensayo de dureza con el objetivo de inspeccionar las características de la superficie. A continuación se muestra fotografías del ensayo y los resultados obtenidos en la prueba. En la figura 37 se observa el montaje de ensayo de dureza.



Figura 37. Montaje de ensayo de dureza 1.

Para la realización del ensayo de dureza sobre los muñones de biela del cigüeñal, se seleccionó el muñón en donde se encontraron las marcas y se aisló del resto del cigüeñal mediante la aplicación de un corte con el auxilio de refrigerante con el fin de no elevar la temperatura de la superficie y tener alteraciones en la estructura del material.

Posteriormente el muñón de formar independiente se montó en el equipo de ensayo de dureza, y se midió está a lo largo de la superficie fallada en donde se tomaron varias muestras, y

de igual forma se realizó sobre un muñón que no presento el fallo, para realizar la medición sobre una superficie en condiciones adecuadas para a la aplicación. En la figura 38 se muestra la aplicación del ensayo de dureza en superficie fallada.



Figura 38. *Aplicación de ensayo de dureza en superficie fallada*



Figura 39. *Superficie con fallo*



Figura 40. *Superficie sin afectación de fallo*

En las figuras 39 y 40 se muestra la superficie que presenta fallo versus la que no tiene fallo. Los resultados obtenidos fueron los siguientes se pueden visualizar en la tabla 13.

Tabla 13. *Resultados ensayo de dureza*

Punto de medición	Superficie de fallo	Superficie sin fallo
1	52 HRA	56 HRA
2	52 HRA	56 HRA
3	54 HRA	57 HRA

5.5 Inspección de las superficies mediante el uso de microscopio electronico de barrido

Mediante el uso del microscopio electrónico de barrido con el cual se cuenta en la sede de investigación de la universidad industrial de Santander (Guatiguará), se realizó la inspección de la superficie que presento el fallo en el muñón de biela con el objetivo de observar la topografía del fallo y realizar un analisis de composición elemental en la superficie y determinar qué elementos

se encuentran allí. En la figura 41 se muestra el microscopio electrónico de barrido utilizado en el laboratorio de Guatiguará.



Figura 41. *Microscopio electrónico de barrido*

Sobre la superficie que fallo se realizaron la siguiente toma con la ayuda del microscopio de barrido electrónico las cuales pueden ser observadas en las figuras 42 y 43. La primera imagen es una toma general de la superficie en donde se pueden observar las marcas que dejó el deslizamiento del casque. La siguiente imagen es un análisis más específico en el que pude observar la topografía de la huella dejada del material más blando sobre el más duro.

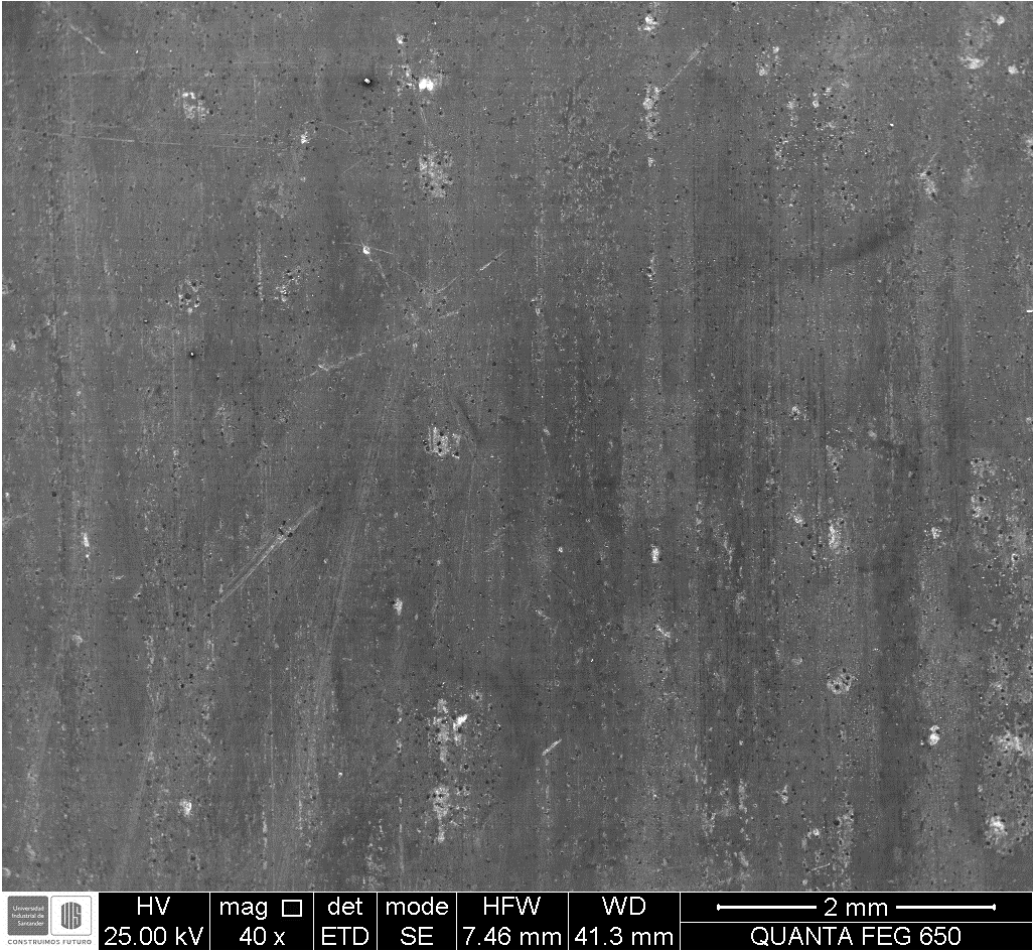
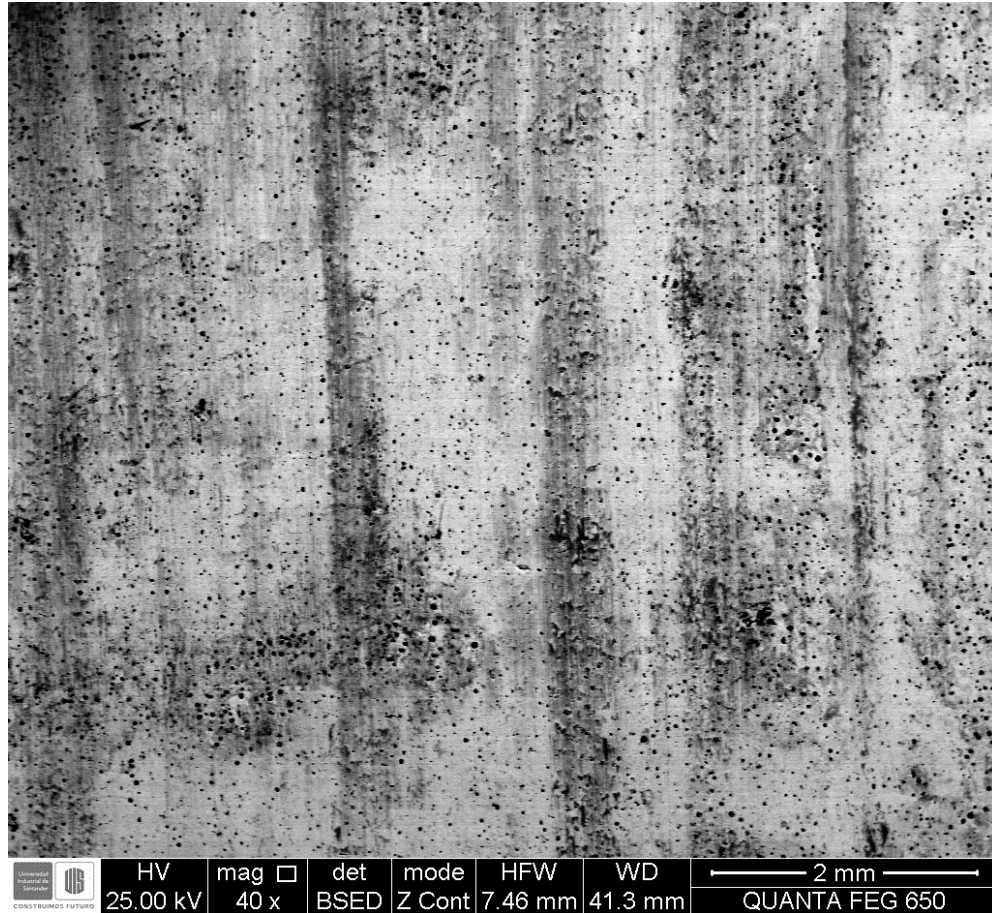


Figura 42. *Superficie con deslizamiento del casquete*

Figura 43. *Superficie con marcas de deslizamiento por contacto con aluminio*



A continuación se realizó un análisis de la composición elemental de la superficie utilizando la técnica de difracción de electrones. El recuadro verde marca el punto en cual se realizó el análisis.

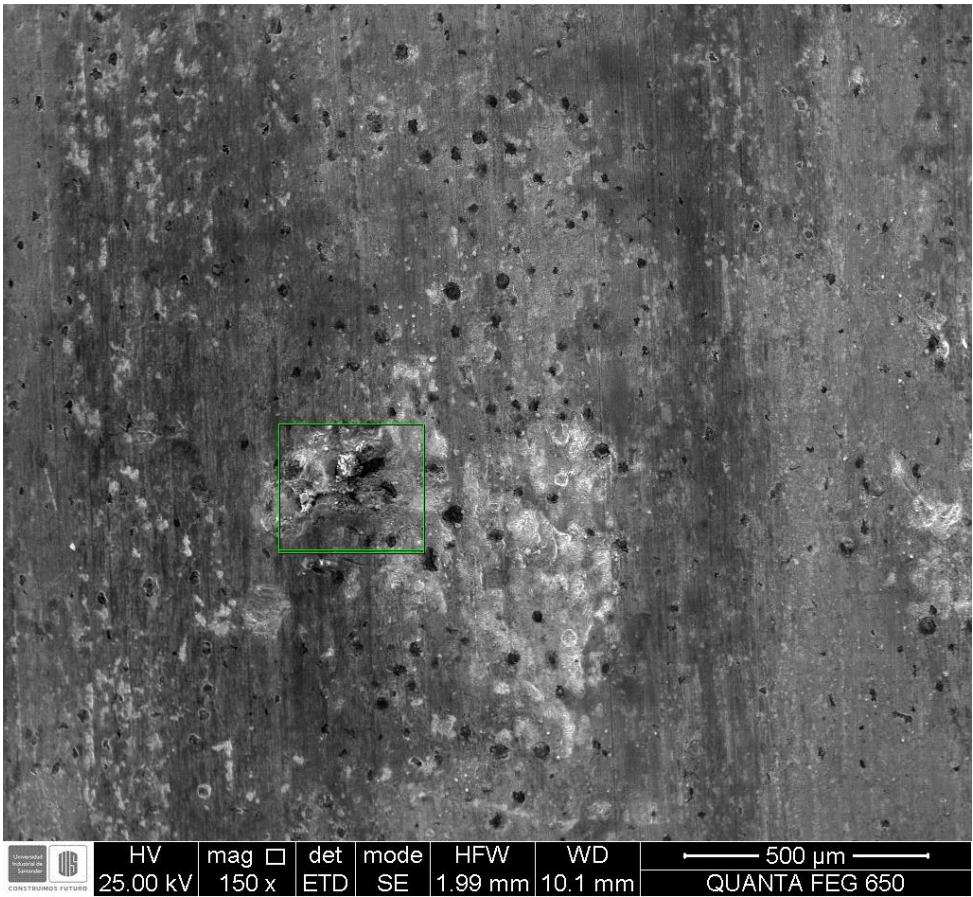


Figura 44. *Superficie con marcas de deslizamiento por contacto*

En la figura 44 se puede identificar el punto en el cual se realizó el análisis de composición elemental de la superficie. Los resultados son presentados en el grafico correspondiente a la figura 45 el cual presenta los niveles de emisión de energía de cada superficie y su relación con la concentración en la tabla 14.

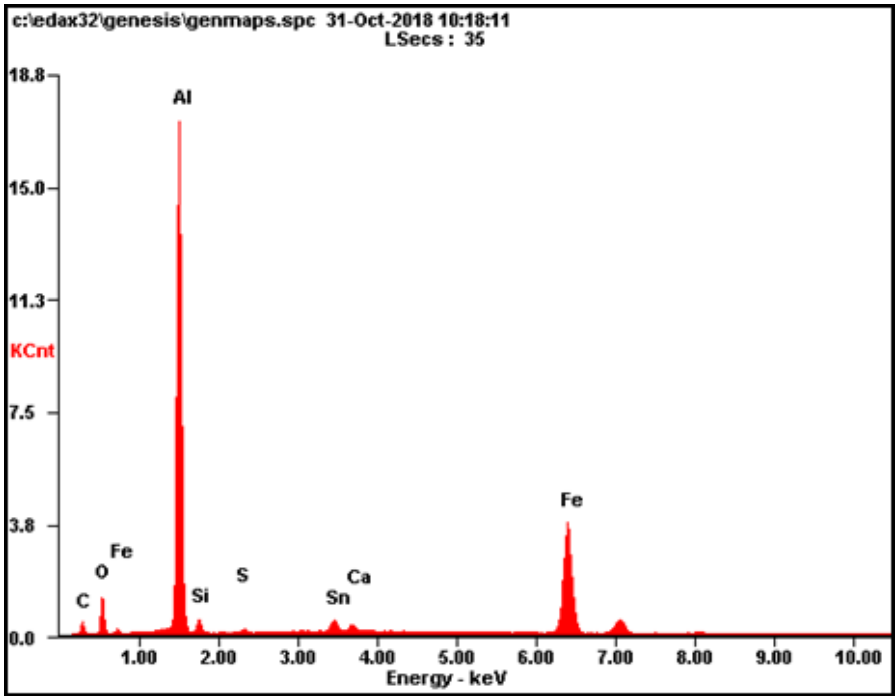


Figura 45. Nivel de energía de electrones

Tabla 14. Composición elemental de la superficie

Element	Wt%	At%
CK	08.42	19.23
OK	08.49	14.55
AlK	48.20	48.98
SiK	01.96	01.91
SK	00.39	00.34
SnL	03.97	00.92
CaK	00.30	00.21
FeK	28.27	13.88
Matrix	Correction	ZAF

De acuerdo a la última fotografía tomada, en la cual se ve un relieve o alteración de la topografía normal de la superficie, se puede establecer que esta alteración está formada por otro material. Esto se puede confirmar con el análisis elemental que se realizó sobre esa parte de la superficie. También se realizó un análisis elemental de la superficie que no presento las huellas de deslizamiento por parte del casquete de aluminio. En la figura 46 se observa el análisis de composición elemental en zona libre de huellas. En la figura 47 se ve la energía emitida por cada átomo.

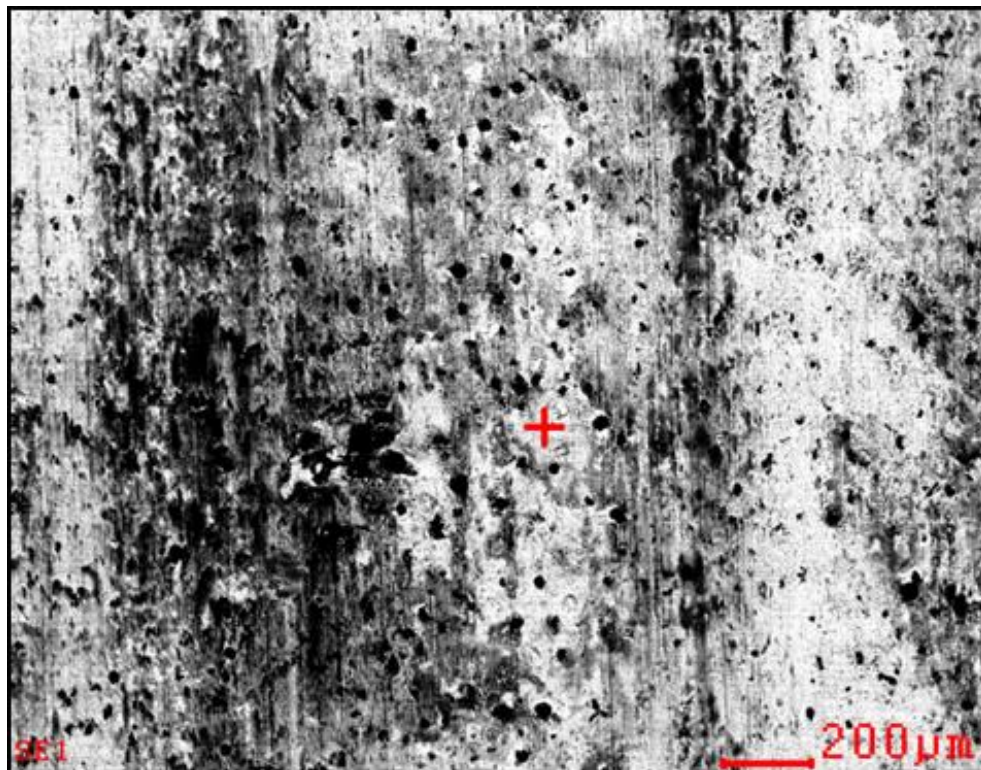


Figura 46. *Análisis de composición elemental en zona libre de huellas*

Tabla 15. Composición elemental de la superficie

Element	Wt%	At%
CK	03.58	13.90
OK	02.22	06.45
SiK	01.33	02.20
MnK	01.09	00.92
FeK	91.78	76.53
Matrix	Correction	ZAF

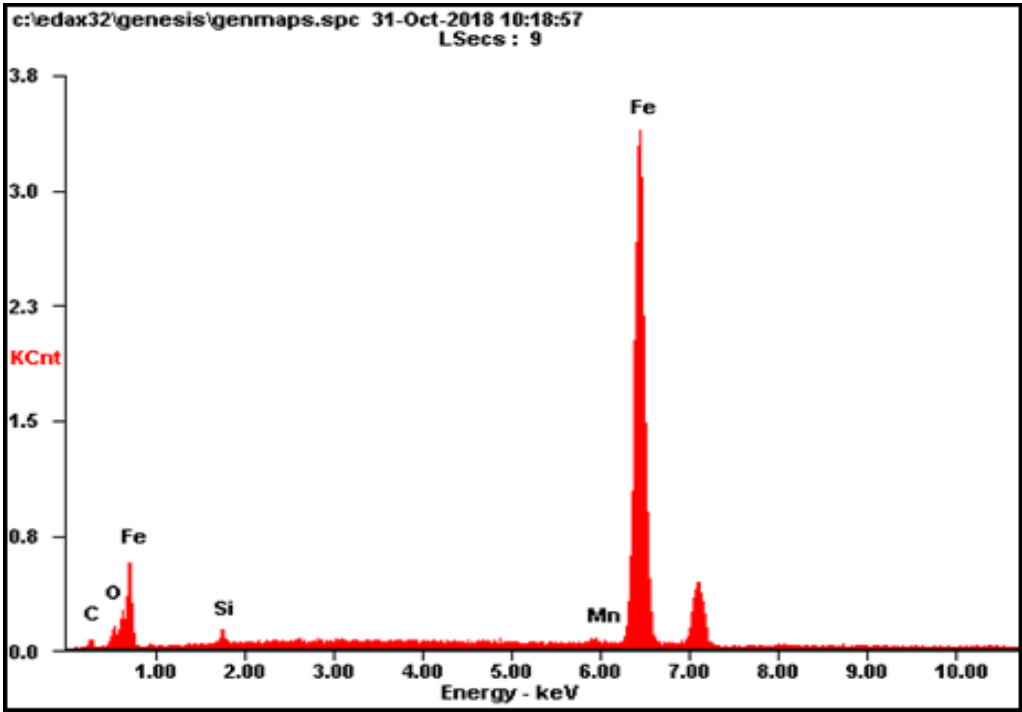


Figura 47. Energía emitida por cada átomo

En la tabla 15 se describe la composición elemental de la superficie. Este análisis realizado sobre un punto de la superficie en el cual no se encuentra contaminado con las huellas de dejadas por el buje o casquete de aluminio, se puede observar que se trata de un acero al carbono característico

de la industria automotriz, se adjunta las fichas técnica del aceros SAE 1020 Y 1045 que están en la figura 48 y 49, los cuales son los más utilizados en este tipo de aplicaciones.

5.6 Análisis metalografico

A la superficie de fallo del muñón de biela de cigüeñal se le realizó un análisis metalográfico con el objetivo de visualizar, la estructura metalográfica del material, además de esto también se analizó el pistón y la biela pertenecientes al mecanismo con el fin de establecer alguna relación de causa y efecto con el modo de fallo presentado por el muñón de biela.

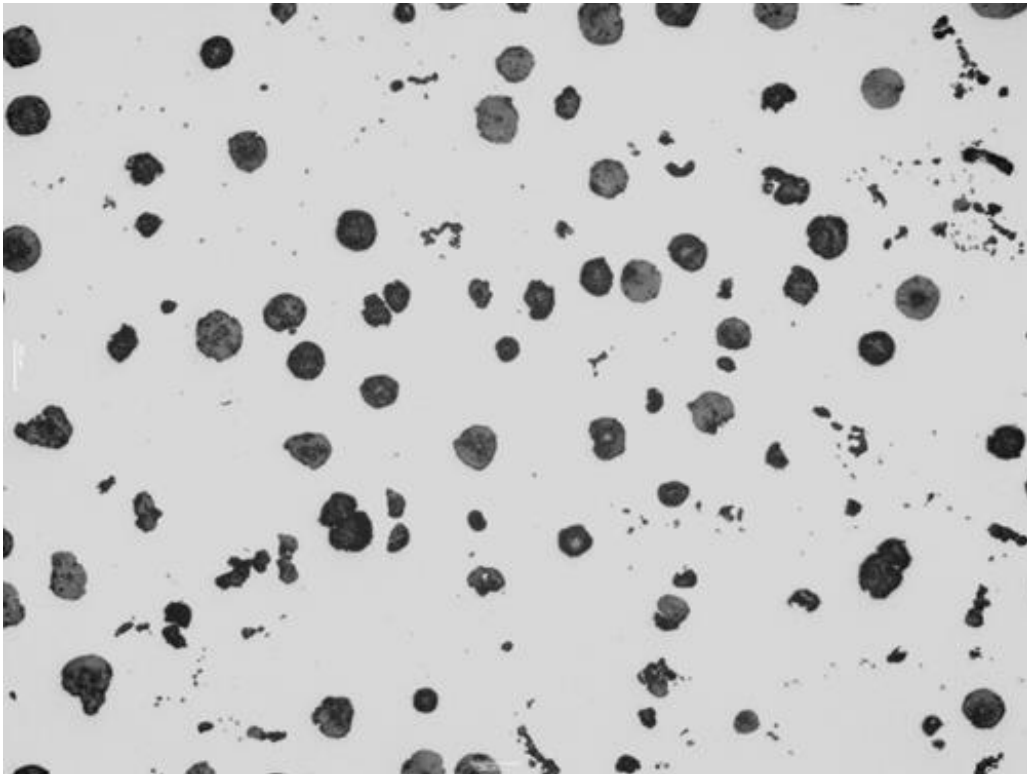


Figura 50. *Estructura metalográfica del muñón de biela toma 1*

La preparación metalográfica se realizó con base a la Norma ASTM E- 3 y el ataque químico por inmersión con Nital según la Norma ASTM E-407. De la figura 50 se puede concluir que la microestructura del cigüeñal es de una fundición Nodular con una matriz perlítica. Según la norma ASTM A- 247 a 100 aumentos (100x), el tipo de grafito es nodular o esferoidal con un tamaño de 6 indicando a su vez la distribución.

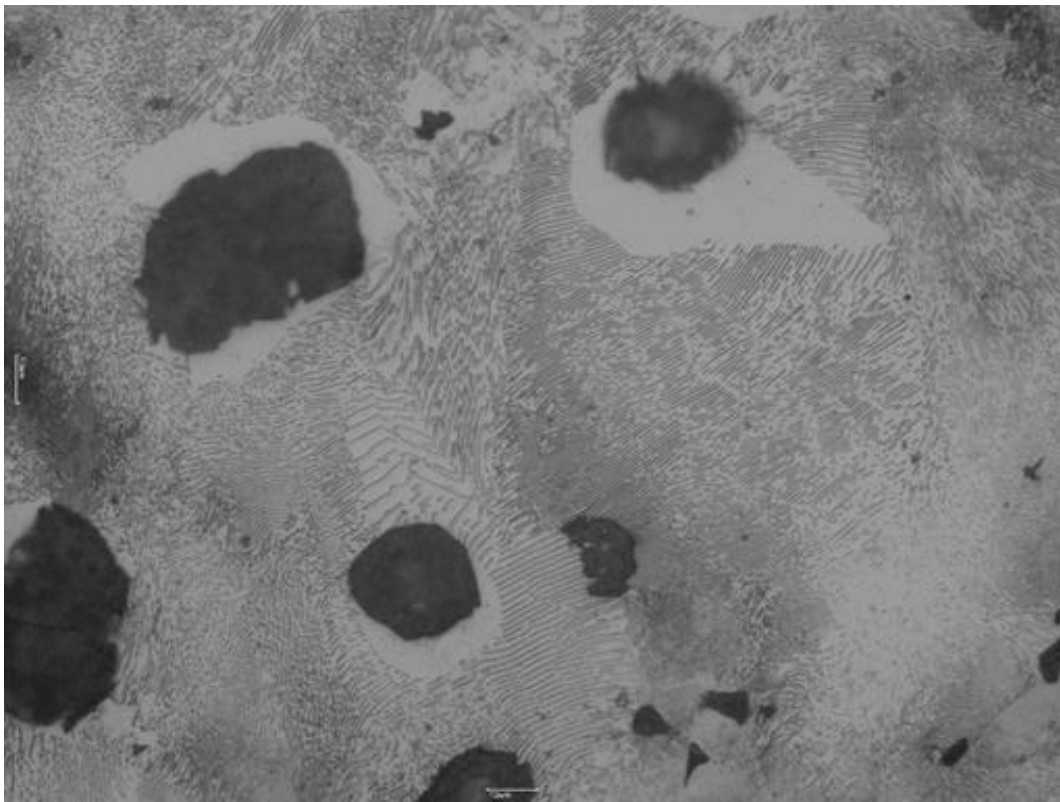


Figura 51. *Estructura metalográfica del muñón de biela toma 2. Ataque Nital. 500X . Grafito nodular tamaño 6. Matriz perlítica*

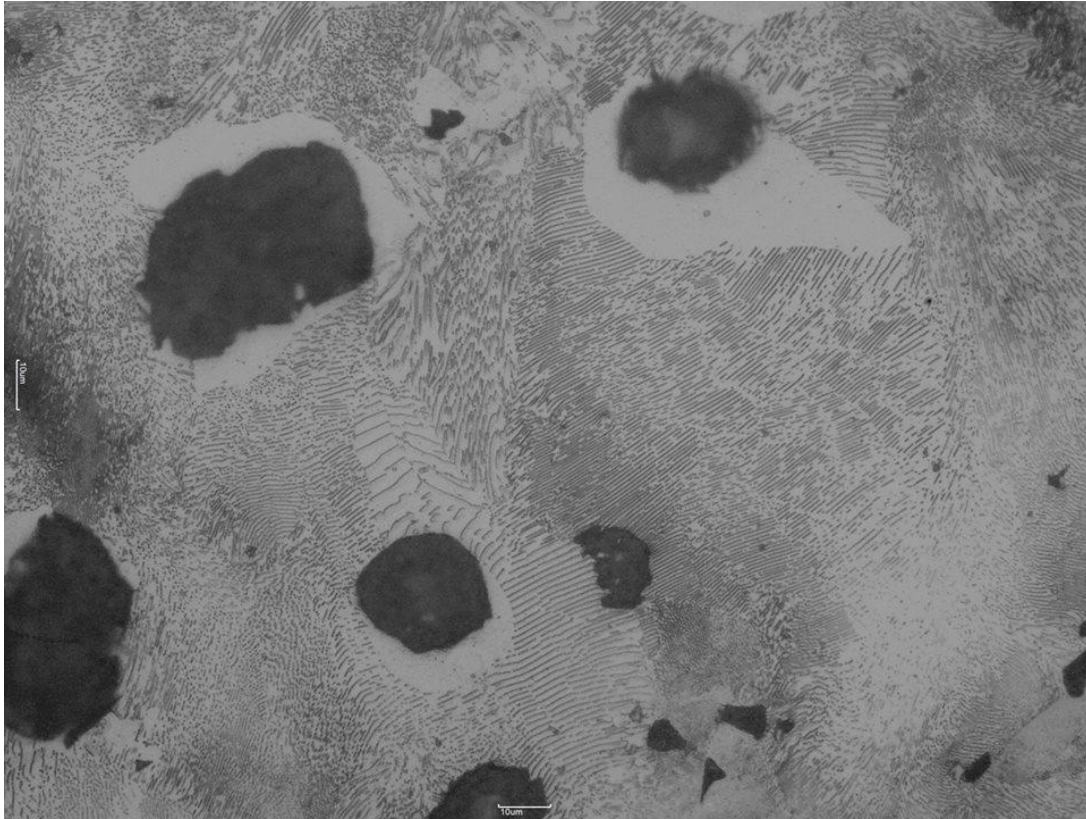


Figura 52. *Estructura metalográfica del muñón de biela toma 3*

En la figuras 51 y 52 puede observar que no existen alteraciones en la estructura metalográfica, ni quemaduras en el plano cercano a la superficie que presento el fallo.

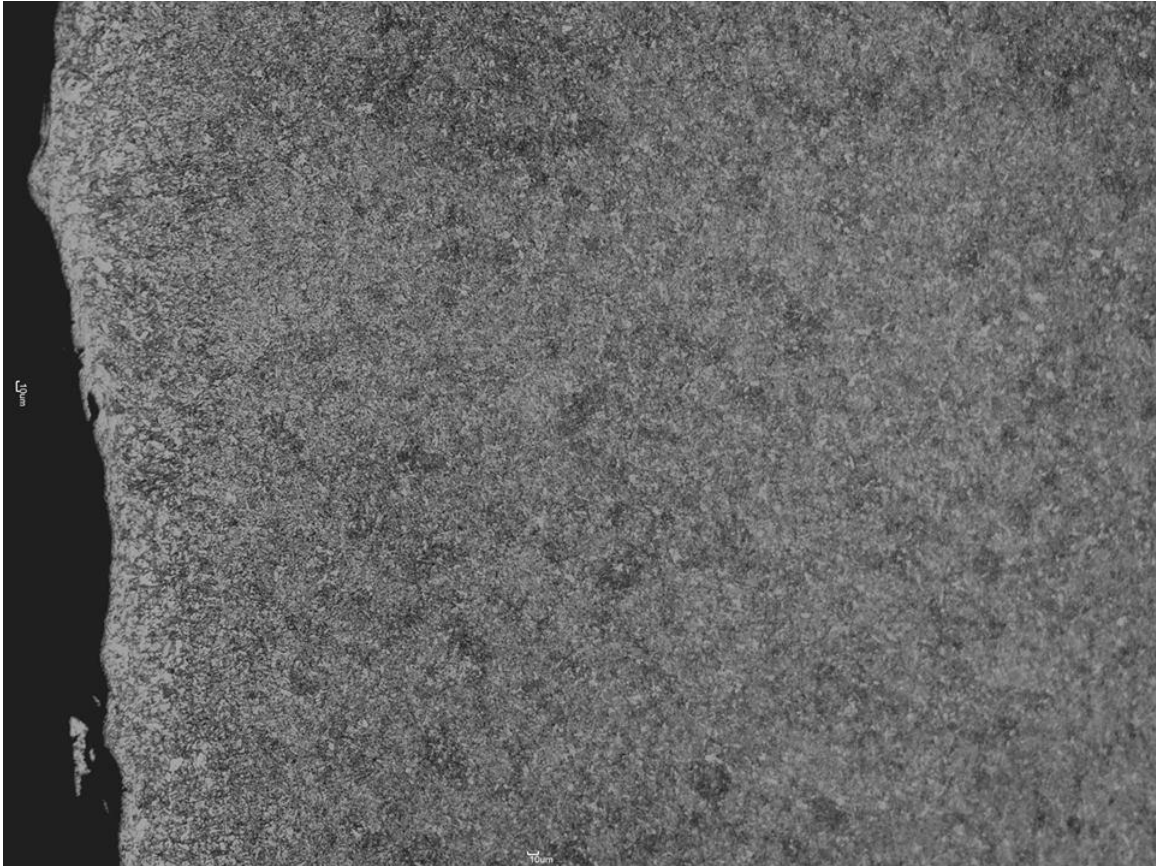


Figura 53. *Estructura metalográfica de la biela toma 1*

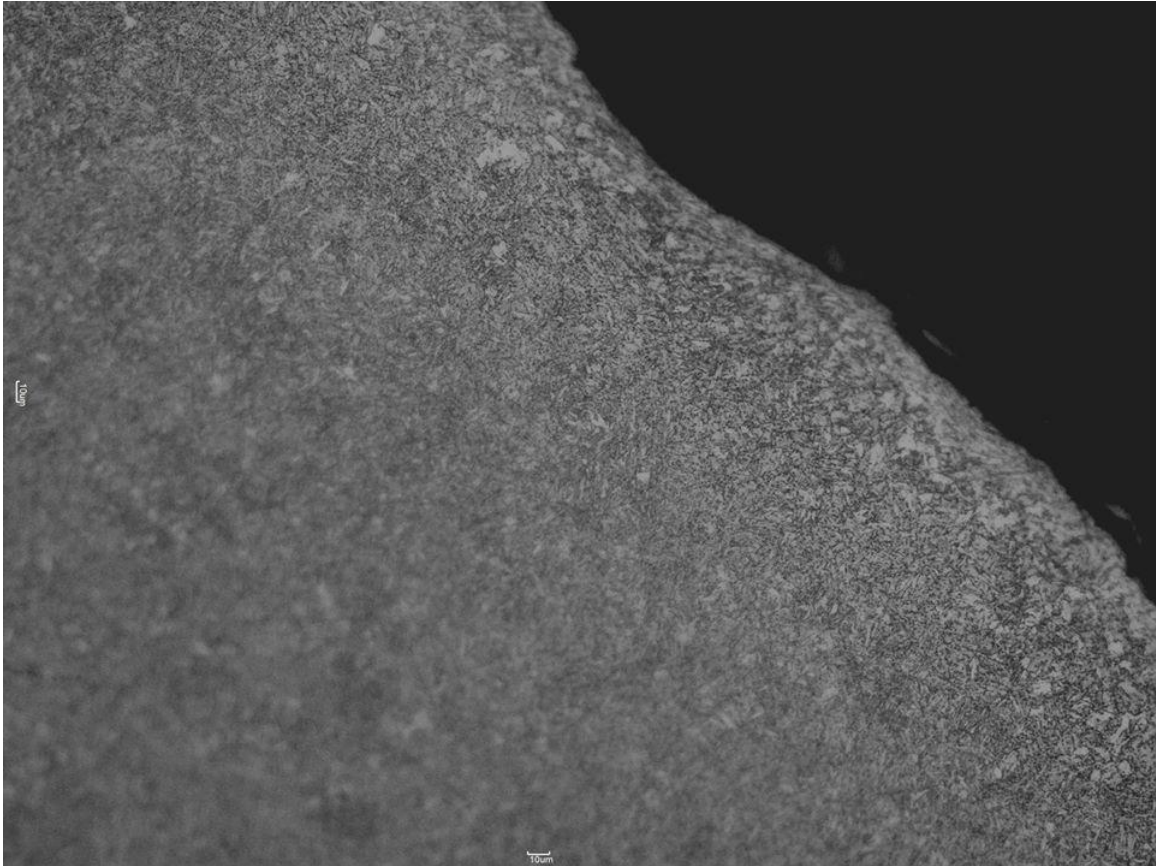


Figura 54. *Estructura metalográfica de la biela toma 2*

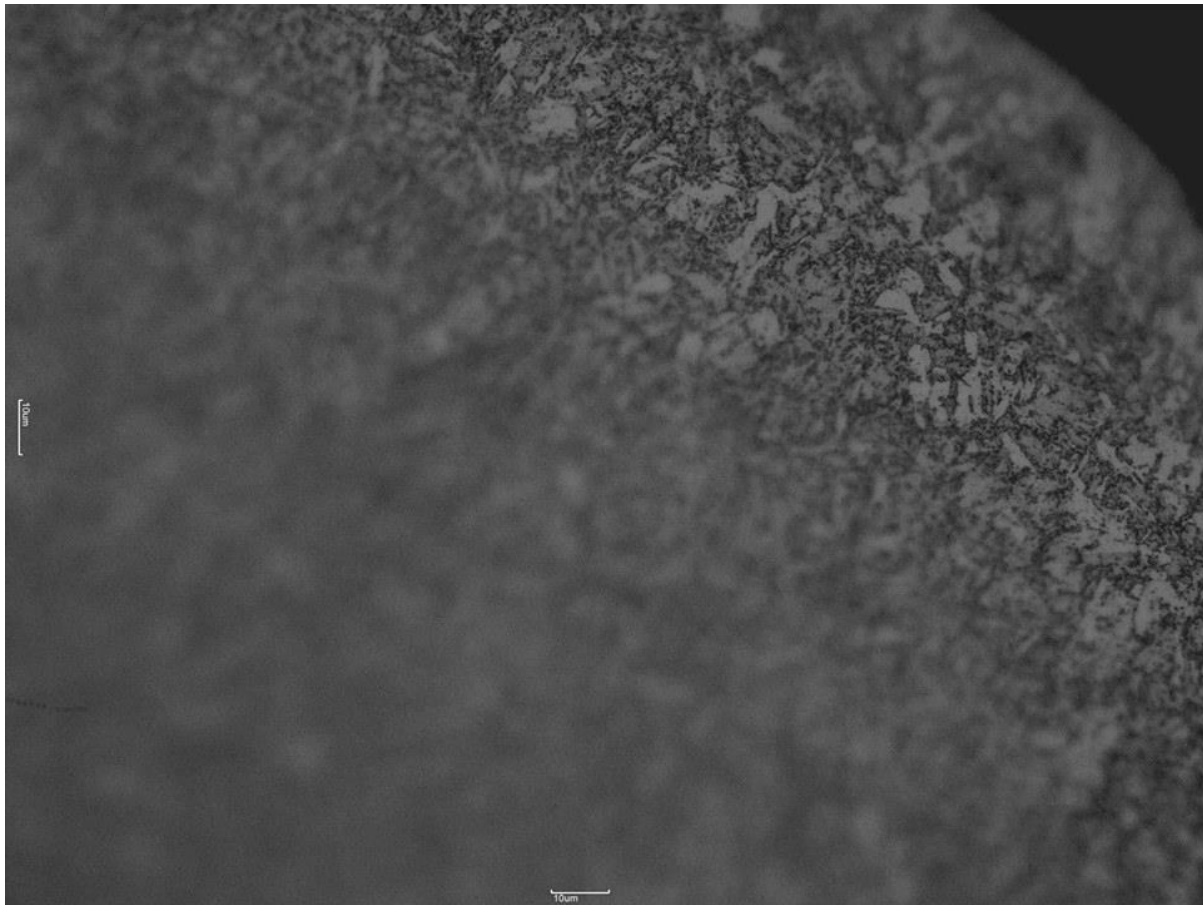


Figura 55. *Estructura metalográfica de la biela toma 3*

De las figuras 53,54 y 55 se puede observar la estructura metalográfica correspondiente a la sección transversal de la biela, hecha de acero y tiene un tratamiento térmico de temple – revenido, este último se hizo a altas temperaturas para bajar un poco la dureza de temple. La microestructura por tanto es de martensita revenida homogénea con buena tenacidad. En la biela se observa una estructura normal, de acuerdo a las especificaciones de material y fabricación del elemento, se puede observar deslizamiento que es producto del sometimiento de la pieza a una carga de compresión alto por el repentino frenado de alguno de los componentes del mecanismo manivela, biela y corredera.



Figura 56. *Estructura metalográfica del pistón toma 1*

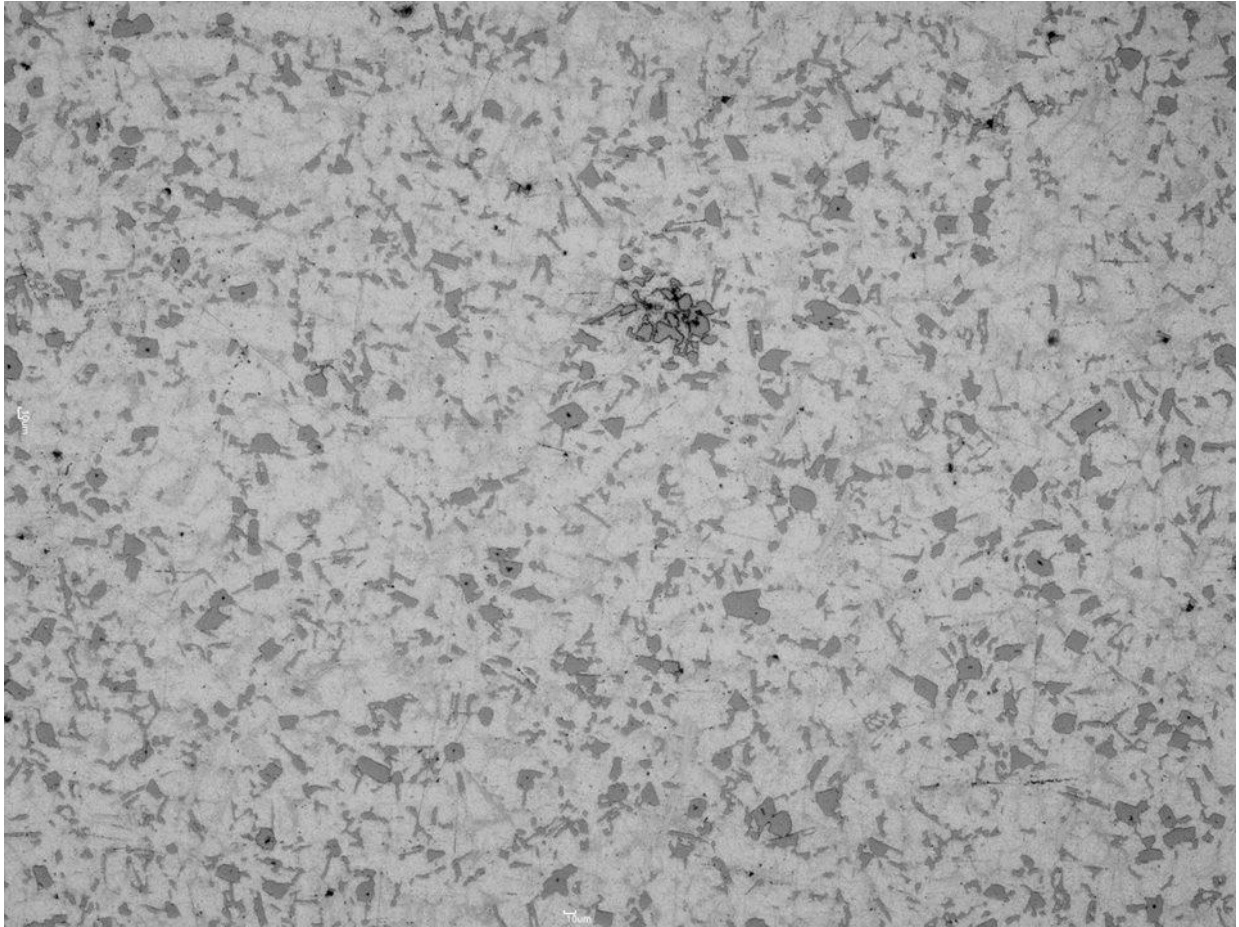


Figura 57. *Estructura metalográfica del pistón toma 2*

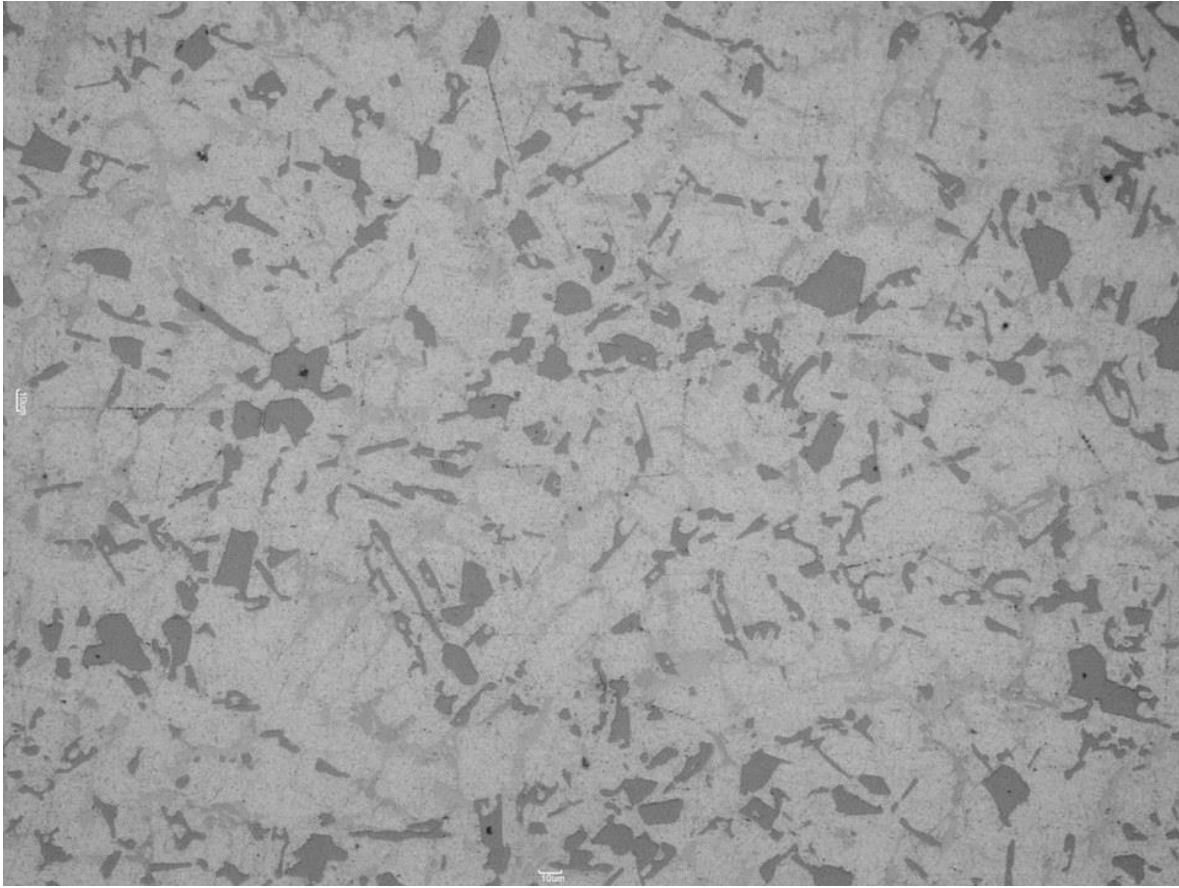


Figura 58. *Estructura metalográfica del pistón toma 3*

De las figuras 56,57 y 58 se puede concluir que el material del pistón es una aleación de aluminio – silicio y su estructura metalográfica presenta una solución sólida α dendrítica de silicio en aluminio con un eutéctico de $\alpha + \text{Si}$.

5.7 Generación de hipótesis de fallo

De acuerdo al análisis de la información recolectada en la contextualización del fallo, la elaboración del diagrama de Ishikawa para el análisis del efecto y las causas y por último los análisis de microscopia, metalográficos y composición elemental se puede establecer los siguiente:

Debido a las marcas y alteración en la topografía del cigüeñal por presencia de una inserción de aluminio, y determinar que no hay superficie externa quemada en el muñón de biela del cigüeñal, se puede establecer que entre la superficie del muñón y el casquete hubo un aumento en la fricción por la no presencia de una película de lubricante, esto debido a deficiencias en el sistema de lubricación las cuales pueden estar relacionados con un fallo en el sistema de bombeo de aceite, taponamiento de conductos de lubricación, bajo nivel de lubricante debido a fugas o extensión en el recambio del aceite y por ultimo a un deterioro del aceite debido al cumplimiento de vida útil de este. Esta ausencia de lubricante fue aumentando la fricción al punto de sobrepasar la resistencia al corte del aluminio del cual está fabricado el casquete o buje del pie de biela permitiendo que el muñón de biela corte y arranque material del casquete del pie de biela, esta acción crea un juego entre el muñón de biela y el pie de biela haciendo que el motor entre en fallo haciéndose visible mediante un aumento en la vibración, como consecuencia de esto el muñón de biela se ve alterado en la dimensión del diámetro haciéndose necesario el rectificar la superficie o en el peor de los casos hacer el cambio de cigüeñal.

6. Análisis de fallo en biela

6.1 Contextualización del fallo

La biela en estudio pertenece al motor de una camioneta deportiva utilizada para el transporte particular dentro de la ciudad y viajes intermunicipales. A través del diligenciamiento del formato creado para la contextualización del fallo se pudo realizar la recopilación de la información necesaria para conocer toda la variable que pudieran incidir en las causas y producción del fallo

en cuestión. El fallo consiste en un pandeo de la biela, es decir una desviación entre los dos puntos de rotación de la misma. En la figura 59 se puede observar la elaboración del análisis de modo y causa a través del diagrama de Ishikawa.

Universidad Industrial de Santander		Formato de contextualización del fallo
Imagen de la pieza en estudio		
Especificaciones Técnicas	Datos del vehículo	CHEVROLET CAPTIVA SPORT 3.0
	Potencia y Velocidad	264 HP 6950 RPM
	Metrología de la pieza	Diámetro de bulón: 53,2 mm Diámetro de muñon de biela: 83,05 mm
	Tipo de combustible	Gasolina
	Condiciones de operación	Vehículo con operación diaria de 40 km
	Descripción de la aplicación del vehículo	Vehículo para transporte de pasajeros con capacidad de 5 personas
	Tipo de refrigerante	Agua
	Cargas de operación	468 KG
Datos de mantenimiento	Lubricante utilizado	ACEITE SINTETICO Mobil 5W-30
	Kilometraje del vehiculo	106000 km
	Historial de mantenimiento	Al vehiculo se le realizó rectificado de la culata, por una desviación de 075 mm. Cambio de aceite cada 10000 km
	Antecedentes relacionados con el fallo	Rectificado de culata por sobrecalentamiento del motor
Datos de fallo	Levantamiento fotográfico de fallo	
	Metrología de la pieza	Hay una desviación o deflección en la viga p cuerpo de la biela de 4 mm.
	Descripción de las características físicas del fallo	La biela presenta un pandeo o curvatura en el cuerpo de la misma de forma perpendicular a los dos puntos de rotación. Se ven algunas marcas en los dos puntos de rotación de la biela, como lo son el pie y la cabeza e biela. Se evidencia en las fibras del material que trabajaron durante el fallo a tensión un aumento en la longitud de las mismas, Y en las fibras que trabajaron a compresión una reducción en la longitud.

Figura 59. Formato de inspección biela

6.2 Descripción física del fallo en la biela

La biela presenta un pandeo en el cuerpo de la misma, evidenciando una desviación de la trayectoria normal entre los dos puntos de rotación. El pandeo se encuentra en su punto más alejado de la trayectoria normal en la parte media del cuerpo de la biela.



Figura 60. *Fallo por pandeo en biela*

Se pueden observar en la figura 60 deformaciones en las superficies del cuerpo de la biela. La cabeza de biela no evidencia alteraciones en las superficies, pero presenta algunas marcas en la superficie que se encuentra en contacto con el muñón de biela.

La cabeza de biela no presenta ninguna deformación ni marcas sobre la superficie.

6.3 Elaboración de diagrama de ishikawa

Para la elaboración del diagrama de Ishikawa se bautizó el fallo en la biela como pandeo de cuerpo de la biela. Se establecieron las causas de fallo primarias y a partir de allí saldrán las causas de

fallo debido a situaciones específicas. En la figura 61 se puede ver el diagrama Ishikawa para este fallo en estudio.

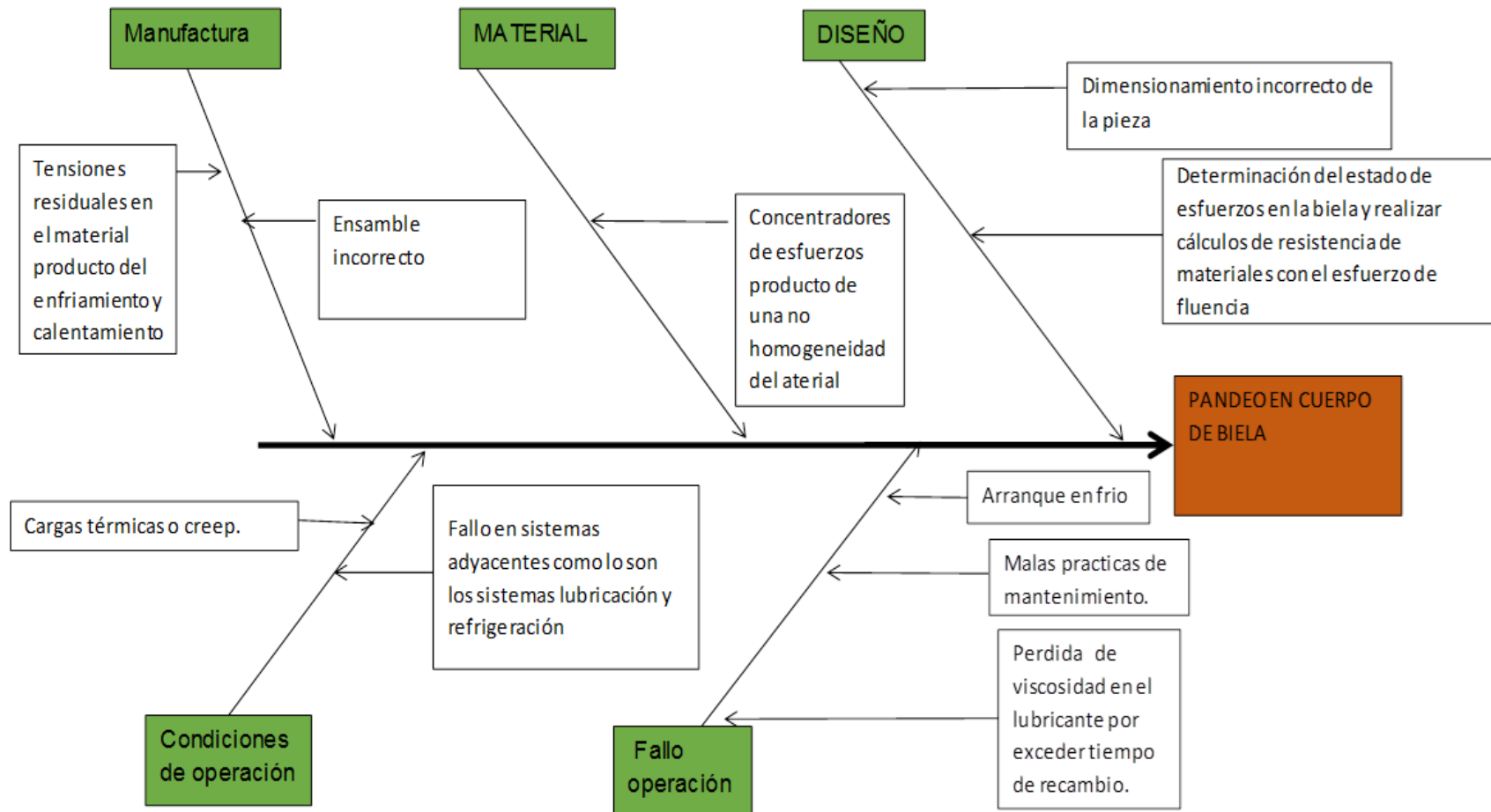


Figura 61. Diagrama de Ishikawa fallo en biela.

6.3.1 Fallos de diseño en la biela. Durante la etapa de diseño se pudieron cometer errores en la realización del estado de esfuerzos de la biela, determinando esfuerzos menores a los esfuerzos a los que está sometida la pieza durante la operación, esto pudo llevar a realizar un mal dimensionamiento de la sección transversal de la misma, aumentando el esfuerzo causado sobre esta con la carga de operación sobrepasando este el esfuerzo de fluencia del material ocasionando el fallo en mención.

También pudo ocurrir un mal dimensionamiento de la pieza haciendo que el esfuerzo de compresión sobre la biela aumentara.

Otro de los errores pudo haber sido no tener claro que el esfuerzo crítico al que está sometida la biela es el de compresión, por lo que el esfuerzo admisible se debió calcular teniendo en cuenta la resistencia a la compresión del material.

6.3.2 Fallos del material. Las bielas se fabrican mediante fundición de aluminio o alguna aleación lo que les permite ser livianas. El tener conformado en el molde incorrecto puede generar concentradores de esfuerzos haciendo que la biela soporte una carga menor a la carga de diseño, es decir se presente fatiga en la pieza.

6.3.3 Fallo por errores de manufactura en la fabricación de la biela El método de elaboración o fabricación de una biela es mediante la forja, durante este proceso el molde inicial del material se calienta hasta unos 450 °C temperatura suficiente para volver maleable la estructura del mismo, posteriormente con una prensa se impacta el material para marcar la forma de la biela, a continuación se procede a realizar el enfriamiento y tratamiento térmico de ser necesario. Estas

condiciones de calentamiento y enfriamiento causan tensiones en el material en donde los esfuerzos pueden aumentar su magnitud sobreviniendo al fallo en la pieza.

6.3.4 Fallos de condiciones de operación. Dentro de las condiciones de operación que pudieron haber ocasionado el pandeo en la biela, se encuentra la temperatura de combustión y por tanto la temperatura de las superficies adyacentes a la combustión. Esta temperatura elevada se debe a que por alguna razón no hay un proceso de transferencia de calor eficiente de las superficies que rodean la combustión como lo son el pistón y el cilindro, esto ocasiona una dilación en el pistón haciendo que este se estrelle con la camisa o cilindro, como consecuencia de esto el pistón se frena dentro del cilindro causando una carga de compresión a la biela la cual supera el límite elástico en carga de compresión llegando a deformarla plásticamente.

6.3.5 Fallos por operación del vehículo. Un arranque en frío, en donde las superficies no están a una temperatura adecuada para el trabajo, genera resistencia adicional que en determinado caso pueden ocasionar un aumento en la carga de compresión a la que está sometida la biela. Malas prácticas de mantenimiento dentro de las cuales se encuentra la no revisión de niveles de fluidos y alargar tiempos de recambio.

6.4 Generación de hipótesis de fallo

A partir de la evidencia recolectada, y determinar la correcta configuración del material además de que tiene las propiedades mecánicas adecuadas para funcionar con las cargas de operación del motor, se puede establecer que la biela fallo producto de una carga de compresión que sobre paso

la resistencia del material, esta debido a un frenado abrupto del mecanismo biela manivela conformado por el pistón la biela y el cigüeñal, ocasionado una carga de compresión mayor a la resistencia del material generando una deflexión de la biela.

7. Conclusiones

La integridad y confiabilidad operacional en los vehículos tiene la probabilidad de no fallo alrededor del 50% hasta los 80 mil kilómetros de operación, los daños que se pueden presentar son característicos de la etapa de asentamiento del motor, después de los 80 mil kilómetros la probabilidad de no fallo disminuye exponencialmente hasta llegar a una etapa con una probabilidad de 5%, la cual se debe a la vejez del vehículo.

Con el análisis de criticidad se permitió realizar el análisis de la información recopilada de las diferentes intervenciones realizadas en motores de combustión interna, a partir de la realización del Pareto se pudo establecer que los elementos de mayor criticidad son el pistón, la biela y el cigüeñal, y a su vez los fallos en estos elementos son los causantes del 80 % de las averías en motores de combustión interna.

El análisis de fallo mediante el método de causa y efecto (Ishikawa) es una buena herramienta para la recopilación de las causas de fallo de un elemento de motor de combustión interna con el fin de establecer hipótesis de fallos, validando estos resultados con técnicas avanzadas y de esta forma generar el informe del fallo.

Se realizó una investigación en la cual se caracterizaron los diferentes modos de fallo que pueden ocurrir en el pistón, la biela y el cigüeñal, estableciendo una relación entre estos y las causas.

Esto permite a la hora de analizar un fallo familiarizar las características físicas del fallo observado con un modo de fallo en especial y unas causas específicas.

El pistón el cual tiene unas marcas características de un ataque con el cilindro del bloque del motor, puede relacionarse con un fallo producto de una elevada temperatura en las superficies del mismo causando una dilatación y aumento en el diámetro de 0.09 mm lo que hace que la cabeza del pistón sufra una intersección con el cilindro. Esta temperatura elevada es causada por una falla en el sistema de refrigeración en el cual el nivel de refrigerante baja, haciendo insuficiente el flujo de este para extraer el calor de la cámara de combustión, este nivel deficiente se puede presentar por fugas en el sistema o malas prácticas de mantenimiento.

La creación de formatos para realizar la recopilación de la información permite establecer los requerimientos necesarios para realizar el análisis, siendo concretos en la recolección de la información lo cual permitirá un panorama más claro para realizar el análisis del fallo en cuestión, poderlo caracterizar de forma correcta y establecer las causas.

El cigüeñal presenta una marca leve, la cual no es profunda, esto es característico de un aumento en la fricción por rotura de la película de lubricante presente entre las dos superficies ocasionada por alargar el tiempo de recambio del aceite causando un deterioro en el mismo haciendo que este no sea apto para operar.

En el fallo de la biela claramente se puede observar que es producto a un choque del pistón con la camisa por la magnitud de la desviación o deflexión sobre el cuerpo de la biela la cual es de 0.6 mm, este fallo es consecuencia de una dilatación y aumento en el diámetro del pistón o una reducción en el diámetro de la camisa del cilindro.

Los análisis metalográficos se deben utilizar cuando se quiere analizar la estructura y buscar causas que estén relacionadas con la estructura del elemento o evidencias que se puedan

registrar en la estructura del material, el microscopio electrónico de barrido es para identificar muy bien el mecanismo de falla y ver detalladamente la superficie que fallo.

Bibliografía

BARBOSA, Edwarth S.; LOPEZ, Andrés L. Optimización de los recursos del laboratorio de máquinas térmicas alternativas en el área de motores de ignición por compresión (Diésel). Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico mecánicas Bucaramanga Colombia. 2004.

GREUTER, Ernst y ZIMA, Stefan. Engine failure analysis. Internal combustion engine failures and their causes. Würzburg (Germany), 2012. 568 p.

UEVARA, Cesar A.; Propuesta de un plan de mantenimiento predictivo basado en la técnica de análisis de aceites en vehículos críticos de la flota Timon s.a. Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico mecánicas Bucaramanga Colombia. 2016.

HEYWOOD, John B. Internal combustion engine fundamentals. NEW YORK, 1998, 930 p.

MEJIA, Ramiro A. Desarrollo de un programa de mantenimiento preventivo a los motores diésel pertenecientes al parque automotor de la empresa covolco. Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico mecánicas Bucaramanga Colombia. 2015.

PERTUZ COMAS, David Alberto. Integridad y confiabilidad. Bucaramanga, 2016. 195 p.

Anexos

Anexo 1. Análisis Metalográfico

En Carpeta CD

Anexo 2. Análisis Por Microscopio Electrónico De Barrido Piston

En Carpeta CD

Anexo 3. Análisis Por Microscopio Electrónico De Barrido Cigüeñal

En Carpeta CD

Anexo 4. Compendio-De-Fallos

En Carpeta CD

Anexo 5. Diagrama De Flujo

En Carpeta CD

Anexo 6. Formato Contextualización Del Fallo Y Pareto

En Carpeta CD

Anexo 7. Marco Teórico

En Carpeta CD