

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecánica

Tesis

**Análisis del desgaste mecánico y degradación del
aceite para mejorar el rendimiento de motores
Caterpillar modelo C11**

Ivan Hubert Medrano Terrel

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Mecánico

Huancayo, 2024

**INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE
INVESTIGACIÓN**

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Roberto Belarmino Quispe Cabana
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 18 de Junio de 2024

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

“ANÁLISIS DEL DESGASTE MECÁNICO Y DEGRADACIÓN DEL ACEITE PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO DE MOTORES CATERPILLAR MODELO C11”

Autor:

1. IVAN HUBERT MEDRANO TERREL – EAP. Ingeniería Mecánica

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 20 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores N° de palabras excluidas (**en caso de elegir "SI"**): SI NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,



ÍNDICE

DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTOS	6
ÍNDICE	7
INDICE DE FIGURAS.....	10
ÍNDICE DE TABLAS	13
RESUMEN	15
ABSTRACT.....	16
INTRODUCCIÓN	17
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	19
1.1 Planteamiento y Formulación del Problema.....	19
1.1.1 Planteamiento del problema.....	19
1.1.2 Formulación del problema	20
1.2 Objetivos.....	21
1.2.1 Objetivo general.....	21
1.2.2 Objetivos específicos	21
1.3 Justificación e Importancia	21
1.3.1 Justificación teórica	21
1.3.2 Justificación práctica.....	21
1.3.3 Justificación metodológica.....	22
1.4 Delimitación del proyecto.....	22
1.5 Hipótesis y Variables	22
1.5.1 Hipótesis general.....	22
1.5.2 Hipótesis específicas	22
1.5.3 Variables	23
1.5.4 Operacionalización de las variables.....	24

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	25
2.1 Antecedentes del Problema.....	25
2.1.1 Antecedentes internacionales.....	25
2.1.2 Antecedentes nacionales	27
2.2 Bases Teóricas	29
2.2.1 Motor diésel	29
A. Características del motor diésel C11.....	30
B. Normas técnicas reguladoras del motor diésel C11	31
C. Tecnología ACERT del motor diésel C11	33
2.2.2 Tribología.....	34
A. Fricción	35
B. Definición y tipos de fricción	35
2.2.3 Desgaste mecánico.....	36
A. Desgaste en el motor diésel.....	41
2.2.4 Lubricación	43
2.2.5 Análisis del aceite	51
2.1 Definición de términos básicos.....	59
CAPÍTULO III METODOLOGÍA	62
3.1 Método, Tipo y Alcance de la Investigación	62
3.1.1 Método de la investigación	62
3.1.2 Tipo de la investigación.....	63
3.1.3 Alcance de la investigación	63
3.1.4 Diseño de la investigación	64
3.2 Población y muestra.....	64
3.2.1 Población.....	64
3.2.2 Muestra	64
3.2.3 Muestreo	64
3.3 Técnicas e Instrumentos	65
3.3.1 Técnicas	65
3.3.2 Instrumentos.....	66

3.4	Procedimientos	69
3.4.1	Pre-campo	69
3.4.2	Laboratorio.....	70
3.5	Técnicas de recolección y procesamiento de datos	70
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN		72
4.1	Presentación de Resultados.....	72
4.1.1	Resultados descriptivos.....	72
4.1.2	Comportamiento de desgaste mecánico en los motores nuevo y reman en motores modelo C11	73
4.1.3	Componentes de los motores que presentan mayor desgaste que se encuentran fuera del valor crítico	81
4.1.4	Degradación prematura de componentes de los motores.....	88
4.1.5	Rendimiento del motor análisis inferencial	104
4.2	Prueba de Hipótesis	113
4.3	Discusiones	116
CONCLUSIONES		120
RECOMENDACIONES.....		121
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		122
Anexos		126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Motor Diésel Caterpillar modelo c11 remanufacturado	30
Figura 2. Placa con características Motor Diésel Caterpillar modelo c11 nuevo	31
Figura 3. Comparación de los requisitos de emisiones de NMOG/NMHC+NO en China, la Unión Europea y Estados Unidos durante 1990-2025	33
Figura 4. Sistema Acert, tomada de tecnología Acert Caterpillar, tricas STM. tecnología Acert, Caterpillar. Stmeu. Online. 2011. [accessed 7 february 2024].	34
Figura 5. Desgaste mecánico en cojinete de cigüeñal en motor diésel modelo C11 ...	37
Figura 6. Desgaste en pistón y camisas de cilindro	42
Figura 7. Desgaste en cojinetes.....	42
Figura 8. Desgaste en asiento de válvulas	43
Figura 9. Desgaste en bomba de aceite	43
Figura 10. Problemas clave asociados a la lubricación, TORMOS, Bernardo. Diagnóstico de motores diésel mediante el análisis del aceite usado. 2015, p. 17	44
Figura 11. Cat Diésel Engines, CATERPILLAR. Sistema de lubricación, p. 18.....	45
Figura 12. Modos de falla críticos y principales pruebas	54
Figura 13. Equipos de medición	55
Figura 14. Reporte de resultados de laboratorio	68
Figura 15. Tendencias de datos en software Excel	71
Figura 16. Comparación de la concentración promedio de hierro entre los motores nuevo y Reman	73

Figura 17. Comparación del promedio de la concentración de Cobre entre motor nuevo y Reman	74
Figura 18. Comparación del promedio de la concentración de Cromo entre motor nuevo y Reman	75
. Figura 19. Comparación del promedio de la concentración de Plomo entre motor nuevo y Reman	76
Figura 20. Comparación del promedio de la concentración de Estaño entre motor nuevo y Reman	77
Figura 21. Comparación de la concentración de aluminio entre motor nuevo y Reman	78
Figura 22. Comparación del promedio de la concentración de Silicio entre motor nuevo y Reman	79
Figura 23. Comparación del promedio entre motor nuevo y Reman.....	80
Figura 24. Desgaste de componentes del motor SC-54, Remas	81
Figura 25. Desgaste de componentes del motor SC-64, Remas	82
Figura 26. Desgaste de componentes del motor SC-75, Reman.....	83
Figura 27. Desgaste de componentes del motor SC-77, Reman.....	84
Figura 28. Desgaste de componentes del motor SC-79, Nuevo	85
Figura 29. Desgaste de componentes del motor SC-87, Nuevo	86
Figura 30. Desgaste de componentes del motor SC-88, Nuevo	87
Figura 31. Índice de desgaste en el motor SC-54-Reman.....	88
Figura 32. Velocidad de desgaste en el motor SC-54-Reman	89
Figura 33. Índice de desgaste en el motor SC-64-Reman.....	90

Figura 34. Velocidad de desgaste en el motor SC-64-Reman	91
Figura 35. Índice de desgaste en el motor SC-75-Reman.....	92
Figura 36. Velocidad de desgaste en el motor SC-75-Reman	93
Figura 37. Índice de desgaste en el motor SC-77-Reman.....	94
Figura 38. Velocidad de desgaste en el motor SC-77-Reman	95
Figura 39. Índice de desgaste en el motor SC-79-Nuevo	96
Figura 40. Velocidad de desgaste en el motor SC-79-Nuevo.....	97
Figura 41. Índice de desgaste en el motor SC-87	98
Figura 42. Velocidad de desgaste en el motor SC-87-Nuevo.....	99
Figura 43. Índice de desgaste en el motor SC-88-Nuevo	100
Figura 44. Velocidad de desgaste en el motor SC-88-Nuevo.....	101
Figura 45. Concentración media de los metales de los motores nuevos.....	102
Figura 46. Concentración media de los metales de los motores Reman.....	103
Figura 47. Rendimiento de los motores estudiados	104
Figura 48. Dispersión de los residuos	109
Figura 49. Comportamiento lineal y no lineal de las variables.....	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos técnicos del Motor Diésel C11	31
Tabla 2. Descripción de los tipos de fricción en el motor diésel	36
Tabla 3. Tipo de desgaste de acuerdo con cada parte	41
Tabla 4. Tipos genéricos de desgaste de acuerdo con cada parte	41
Tabla 5. Descripción de recorrido del lubricante.....	46
Tabla 6. Cuadro comparativo de clasificación de lubricantes	50
Tabla 7. Principales características de lubricantes.....	51
Tabla 8. Valores de alerta y críticos del motor en relación con cada parámetro	70
Tabla 9. Recopilación de datos en Excel por horas de trabajo	71
Tabla 10. Resultados del total de ppm de metales en relación a los motores analizados	72
Tabla 11. Prueba de normalidad	105
Tabla 12. Correlación.....	106
Tabla 13. Modelo 1	107
Tabla 14. Modelo 2	107
Tabla 15. Resumen de modelo.....	108
Tabla 16. Coeficientes	108
Tabla 17. Normalidad a partir de datos transformados.....	111
Tabla 18. Correlaciones	111
Tabla 19. Resumen del modelo ^b	112

Tabla 20. Prueba de Kruskal Wallis	114
Tabla 21. Estadísticos de prueba ^{a,b}	115
Tabla 22. Resumen de prueba de hipótesis	115

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo analizar el desgaste mecánico en los componentes del motor nuevo y reman modelo C11 mediante el análisis tribológico que permita mejorar su rendimiento. Para ello, se empleó una metodología de nivel descriptivo, tipo básico, diseño no experimental descriptivo comparativo, realizando un total de 64 muestras en períodos de trabajo que oscilaron entre 50 y 15,000 horas. Los resultados revelaron que los componentes afectados por este desgaste fueron los segmentos del tren de válvulas, el cigüeñal, el bloque, los empujadores y los bulones. Se evidenció también desgaste en los cojinetes de biela, los cojinetes de bancada, los bulines, los pistones y los balancines. En relación con la degradación prematura de los componentes en los modelos SC-54, SC-64, SC-75, SC-77, SC-79, SC-87 y SC-88, se constató que, tanto en los motores nuevos como remanufacturados, los porcentajes de degradación fueron del 58 %, 106 %, 106 %, 115 %, 75 %, 83 % y 67 %, respectivamente. También, se observó una velocidad de desgaste prematuro (ocurrido a las 50 horas de trabajo), con los siguientes valores para los motores correspondientes: 1.76 mm/h, 2.94 mm/h, 2.94 mm/h, 3.18 mm/h, 0.492 mm/h, 2.3 mm/h y 1.96 mm/h para los modelos SC-54, SC-64, SC-75, SC-77, SC-79, SC-87 y SC-88, respectivamente. En conclusión, al analizar el desgaste mecánico entre el motor nuevo y remanufacturado del modelo C11, se evidenció que los motores remanufacturados experimentaron un desgaste mecánico superior, como lo indican las concentraciones más altas de Fe y Cu.

Palabras clave: tribología, rendimiento, metales, índice de desgaste, velocidad de desgaste, concentración.

ABSTRACT

The research aimed to analyze mechanical wear and oil degradation to improve the performance of Caterpillar C11 engines. To this end, a descriptive level methodology was used, basic type, comparative descriptive non-experimental design, making a total of 64 samples in work periods ranging from 50 to 15,000 hours. The results revealed that the components affected by this wear were the valvetrain segments, crankshaft, block, tappets, and bolts. Wear was also evident on the connecting rod bearings, base bearings, bucks, pistons and rocker arms. In relation to the premature degradation of components in the SC-54, SC-64, SC-75, SC-77, SC-79, SC-87 and SC-88 models, it was found that, in both new and remanufactured engines, the degradation rates were 58 %, 106 %, 106 %, 115 %, 75 %, 83 % and 67 %, respectively. A premature wear rate (occurring after 50 hours of work) was also observed, with the following values for the corresponding engines: 1.76 mm/h, 2.94 mm/h, 2.94 mm/h, 3.18 mm/h, 0.492 mm/h, 2.3 mm/h and 1.96 mm/h for models SC-54, SC-64, SC-75, SC-77, SC-79, SC-87 and SC-88, respectively. In conclusion, when analyzing the mechanical wear between the new and remanufactured C11 engines, it was evident that the remanufactured engines experienced superior mechanical wear, as indicated by the higher concentrations of Fe and Cu.

Keywords: tribology, yield, metals, wear index, wear rate, concentration.