



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

ANÁLISIS DE ACEITE PARA DETECCIÓN TEMPRANA DE FALLAS EN MOTORES CATERPILLAR

Noel Antonio Padilla Silva

Asesorado por el Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco

Guatemala, septiembre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE ACEITE PARA DETECCIÓN TEMPRANA
DE FALLAS EN MOTORES CATERPILLAR**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

NOEL ANTONIO PADILLA SILVA

ASESORADO POR EL ING. ESDRAS FELICIANO MIRANDA OROZCO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Julio César Molina Zaldaña
EXAMINADOR	Ing. Mynor Roderico Figueroa Fuentes
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Sanabria Solchaga
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS DE ACEITE PARA DETECCIÓN TEMPRANA DE FALLAS EN MOTORES CATERPILLAR

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 13 de octubre de 2011.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a vertical line, positioned above the printed name.

Noel Antonio Padilla Silva

Guatemala, 4 de junio de 2013

Ingeniero
Julio Cesar Campos Paiz
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Julio Campos:

Reciba un atento y cordial saludo, de acuerdo con la designación de mi persona para asesorar el trabajo de graduación desarrollado por el estudiante **Noel Antonio Padilla Silva**, carnet universitario No. **2002-13011**, titulado: **EL USO DEL ANALISIS DE ACEITE PARA DETECCION TEMPRANA DE FALLAS EN MOTORES CATERPILLAR**; encontrándolo satisfactorio en su elaboración y contenido, y en función de los parámetros establecidos, por medio del presente me permito dar la aprobación y recomendación del mismo, remitiéndolo a la dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica con el fin de darle el trámite correspondiente.

Agradeciendo su atención a la presente, me es grato suscribirme.

Sin otro particular,

Atentamente



Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
Colegiado No.4637
Asesor

Ing. Esdras Miranda Orozco
COLEGIADO 4637

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Coordinador del Área Complementaria, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **EL USO DEL ANÁLISIS DE ACEITE PARA DETECCIÓN TEMPRANA DE FALLAS EN MOTORES CATERPILLAR**, del estudiante **Noel Antonio Padilla Silva**, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



**Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador de Área**

Guatemala, agosto, de 2013.

/behdei.

Universidad de San
Carlos de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Unidad de Lingüística

Guatemala, 11 de septiembre de 2013
Ling.13-7

Ingeniero Julio César Campos Paiz
Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor director:

Por este medio hago de su conocimiento que la Unidad de Lingüística hace una modificación al título del trabajo de graduación del estudiante **Noel Antonio Padilla Silva**, con número de carné: **2002-13011** el cual fue aprobado de acuerdo al protocolo como: **EL USO DEL ANÁLISIS DE ACEITE PARA DETECCIÓN TEMPRANA DE FALLAS EN MOTORES CATERPILLAR**

La Unidad modifica el título del trabajo en virtud de que el mismo no está bien redactado y propone la siguiente forma: **ANÁLISIS DE ACEITE PARA DETECCIÓN TEMPRANA DE FALLAS EN MOTORES CATERPILLAR**

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Rosa Amelia González Domínguez'.

Licenciada Rosa Amelia González Domínguez,
Coordinadora de la Unidad de Lingüística

Cc. Archivo



El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria al Trabajo de Graduación titulado, ANÁLISIS DE ACEITE PARA DETECCIÓN TEMPRANA DE FALLAS EN MOTORES CATERPILLAR, del estudiante Noel Antonio Padilla Silva, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Julio César Campos Paiz
DIRECTOR



Guatemala, septiembre de 2013

JCCP/behdei

Universidad de San Carlos
de Guatemala

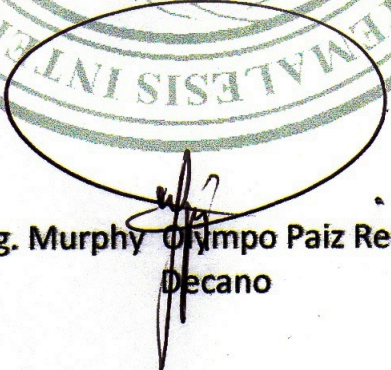


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 633.2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE ACEITE PARA DETECCIÓN TEMPRANA DE FALLAS EN MOTORES CATERPILLAR**, presentado por el estudiante universitario: **Noel Antonio Padilla Silva**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 11 de septiembre de 2013

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por todas las bendiciones que me ha dado, con su bendición seré un buen profesional y una mejor persona.
- Mi esposa** Ana Lucía Mendizábal, por siempre confiar en mí y darme tu apoyo incondicional. Gracias por todo tu amor. Te amo.
- Mis padres** Noel Padilla Q. y Mirta Silva de Padilla, por ser los mejores padres y siempre ser ejemplo que el trabajo y esfuerzo nos lleva a conseguir los éxitos que queremos, los amo y Dios los bendiga.
- Rosaura y Christa Padilla** Por su cariño y apoyo, las quiero mucho.
- Familia y amigos** A todos aquellos que de una u otra forma me dieron su apoyo para llegar a esta meta.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por todas las bendiciones que me ha dado y ayudarme a ser una mejor persona.
- Mi esposa** Ana Lucía Mendizábal, por siempre confiar en mí y darme tu apoyo incondicional. Gracias por todo tu amor, te amo. No lo hubiera logrado sin tí.
- Mis padres** Noel Padilla Q. y Mirta Silva de Padilla, por ser los mejores padres y ejemplo de perseverancia y esfuerzo hacia éxito, los amo y Dios los bendiga.
- Rosaura y Christa Padilla** Por su cariño y apoyo incondicional, las quiero mucho.
- Familia y amigos** A todos ustedes que de una u otra forma me animaron y brindaron su apoyo para llegar a esta meta.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. ACEITES LUBRICANTES	1
1.1. Sus funciones	1
1.2. Aceites de base	2
1.2.1. Aceites minerales.....	2
1.2.2. Aceites sintéticos	3
1.3. Aditivos	4
1.4. Número de base total (TBN).....	5
1.5. Cenizas o cenizas sulfatadas.....	6
1.6. Viscosidad	6
1.7. Clasificaciones API de aceite de motor.....	9
1.8. Recomendaciones de aceite para motores diésel: aceites Caterpillar para motores diésel	13
1.9. Aceites comerciales	15
1.10. Viscosidades de lubricantes recomendadas para motores diésel de inyección directa (DI).....	16
1.11. El círculo (<i>donut</i>) API	17
1.12. Limpieza	19
1.13. Filtros Caterpillar.....	19

2.	ANÁLISIS DE ACEITE.....	21
2.1.	Análisis SOS SM del régimen de desgaste	21
2.2.	Cómo evitar problemas y reducir costos conociendo los regímenes de desgaste.....	22
2.3.	Concepto de metales de desgaste.....	23
2.4.	Tendencias de metales de desgaste en su motor.....	24
2.5.	La tecnología que respalda el análisis del régimen de desgaste ..	25
2.6.	¿Cómo identificar las causas y efectos del desgaste de componentes?.....	26
2.7.	Vigilando sus componentes	26
2.8.	La relación de silicio / aluminio en la suciedad depende del lugar	26
2.9.	Análisis SOS SM del estado del aceite.....	27
2.10.	¿Cómo optimizar el rendimiento conociendo el estado de su aceite?	27
2.10.1.	Análisis del estado del aceite	28
2.11.	Análisis infrarrojo por transformadas de Fourier	29
2.12.	¿Cómo identificar el estado del aceite antes de que cause problemas?	29
2.13.	Hollín.....	29
2.14.	Oxidación	30
2.15.	Derivados de nitración	30
2.16.	Derivados de azufre / ácidos.....	30
2.17.	¿Cómo optimizar su equipo con el Programa de Servicios SOS SM ?	31
2.18.	Pruebas adicionales: detección de glicol, agua y combustible, viscosidad y TBN	31
2.18.1.	Glicol (refrigerante).....	32
2.18.2.	Agua.....	32

2.18.3.	Combustible	33
2.18.4.	Número base total (TBN)	33
2.18.5.	Viscosidad.....	35
3.	DETECCIÓN DE FALLAS	37
3.1.	Ejemplos típicos de fallas relacionadas con el aceite	37
3.1.1.	Sistema lubricante.....	37
3.1.2.	Cojinetes	39
3.1.3.	Cigüeñales	42
3.1.4.	Pistones, anillos y camisas de cilindro	45
3.1.5.	Turbocompresores	48
3.1.6.	Válvulas.....	53
3.2.	¿Cómo reducir al mínimo la ocurrencia de averías del motor relacionadas con el aceite?	55
3.2.1.	Azufre en el combustible.....	55
3.2.2.	TBN y niveles de azufre en el combustible para motores diésel de inyección directa (DI)	56
3.2.3.	TBN y niveles de azufre en el combustible para motores diésel con cámara de precombustión (PC)	58
3.2.4.	Mantenimiento básico del sistema de lubricación	60
	CONCLUSIONES	61
	RECOMENDACIONES	63
	BIBLIOGRAFÍA.....	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Valores TBN y niveles de azufre para motores diésel de inyección directa	11
2.	Valores TBN y niveles de azufre para motores diésel con precámara de combustión	11
3.	Tomando muestra de aceite.....	16
4.	Circulo API (<i>donut</i>)	18
5.	Filtros Caterpillar	20
6.	Toma de muestra de aceite 1.....	21
7.	Toma de muestra de aceite 2.....	23
8.	Sistema de lubricación motor 3408 CAT	38
9.	Cojinete de biela arañado con daños más graves causados por falta de lubricación	40
10.	Cojinete con indicios de rozamiento: primera etapa de daños causados por falta de lubricación	41
11.	Cojinete agarrotado, la etapa final de daños causados por falta de lubricación	41
12.	Arañazos profundos y desgaste pronunciado causados por falta de aceite.....	42
13.	Película de aceite entre el muñón del cigüeñal y el cojinete	43
14.	Resultado de falta de aceite.....	44
15.	Arañazos profundos a lo largo de la circunferencia; efecto de partículas abrasivas en superficie del cojinete	44
16.	Faldón de pistón dañado por desgaste abrasivo.....	45

17.	Marcas de agotamiento que pueden indicar avería en sistema de enfriamiento del sistema de lubricación.....	46
18.	Desgaste causado por falta de lubricación durante un corto período de tiempo.....	47
19.	Aéreas brillantes en el interior de la camisa causadas por exceso de depósitos en los resaltos del pistón.....	47
20.	Exceso de depósitos en primer y segundos resaltos.....	48
21.	Ralladuras profundas y daños en los orificios de aceite de los cojinetes	49
22.	Daños debidos a la presencia de partículas abrasivas grandes en el aceite.....	50
23.	Indicios de rozamiento en la parte delantera y trasera de la rueda compresora	51
24.	Descoloramiento por temperaturas altas en el lado inferior del anillo de empuje.....	52
25.	Ranuras de desgaste en las superficies de las arandelas de tope.....	52
26.	Derretido de la válvula causado por la formación de excesivos depósitos	54
27.	Rozamiento o atasco del vástago de válvula	55
28.	Valores de TBN y niveles de azufre para motores diésel con precámara de combustión	57
29.	Porcentaje de azufre	59

TABLAS

I.	Grados de viscosidad SAE para aceites de motor ^a – SAE J300, diciembre de 1999	8
II.	Temperaturas máximas y mínimas de aceite	17
III.	Combinaciones de elementos de desgaste clásicos	25

LISTA DE SÍMBOLOS

FT-IR	Análisis infrarrojo por transformadas de Fourier (<i>Fourier transform infrared spectroscopy</i>).
PC	Cámara de precombustión (<i>precombustion chamber</i>).
cP	Centipascales.
cSt	Centistock.
API CF	Clasificación API de aceites para motores de aspiración natural, turbo o sobre-alimentados que usan diésel con diferentes niveles de azufre.
API CG-4	Clasificación API de aceites para motores de servicio severo.
API CH-4	Clasificación API de aceites para motores de servicio severo.
API CF-4	Clasificación API de aceites para motores turbo o sobre-alimentados para servicio severo.
API SL	Clasificación API para aceites con economía de combustible.

°C	Grados centígrados.
°F	Grados Fahrenheit.
Vi	Índice de viscosidad (<i>viscosity index</i>).
API	Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute).
DI	Inyección directa (<i>direct injection</i>).
API CD	Motores de aspiración natural, turbo o sobrealimentados que requieren un mayor y efectivo control de los depósitos y el desgaste.
API CE	Motores turbo o sobrealimentados para servicio severo.
SOSSM	Muestreo de aceite programado (<i>scheduled oil sampling</i>).
TBN	Numero de base total (<i>total base number</i>)
W	Para indicar que un aceite trabajar en condiciones de invierno (<i>winter</i>).
PPM	Partes por millón.
OLAP	Programa de evaluación de aceite etiquetado (<i>oil labeling assessment program</i>).

ASTM Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (American Society for Testing and Materials).

SAE Sociedad de Ingenieros Automotrices (Society of Automotive Engineers).

GLOSARIO

Aceite lubricante mixto	Concepto aplicable para lubricantes de motor de amplio campo de acción, que aseguran una adecuada lubricación tanto en turismos de gasolina como en turismos diésel.
Aceites minerales	Fabricados con bases lubricantes obtenidas directamente de la destilación del petróleo.
Aceites semisintéticos	Fabricados con mezclas de bases minerales y sintéticas.
Aceites sintéticos	Fabricados con bases que provienen de transformaciones complejas o síntesis.
Aditivos	Compuestos que se incorporan en pequeñas cantidades, a los aceites base para obtener un lubricante terminado con las características y prestaciones deseadas.
Aeroemulsión	Facultad que presenta un aceite para eliminar el aire ocluido en su interior. La aeroemulsión es muy importante en aceites de turbinas y, cada vez más, en aceites hidráulicos de alta severidad. Es una propiedad intrínseca del aceite base y no puede corregirse con aditivos.

Anillos	Piezas circulares metálicas, autotensadas, que se montan en las ranuras de los pistones para servir de cierre hermético móvil entre la cámara de combustión y el cárter del cigüeñal.
Antidesgaste	Aditivo que consigue disminuir la fricción entre las partes móviles.
Antiherrumbre	Aditivo que evita que el vapor de agua de la combustión, o de la condensación atmosférica, forme herrumbre sobre las piezas del motor.
Antioxidante	Aditivo que consigue que el aceite tarde más en degradarse, ya que disminuye la oxidación del mismo.
API	American Petroleum Institute. Establece los niveles de calidad para los lubricantes de automoción, orientados fundamentalmente a fabricantes norteamericanos. Los niveles de calidad se identifican con dos letras. Los que empiezan por S, se refieren a vehículos gasolina, y cuando empiezan por C, se refieren a vehículos diésel. La segunda letra después de la S o la C indica el nivel de calidad, en orden creciente, siendo API SM por ejemplo el máximo nivel de calidad para vehículos de gasolina y los CI-4 y CJ-4 los más altos para diésel.

Árbol de levas	Para abrir las válvulas se utiliza un árbol de levas que va sincronizado con la distribución del motor y cuya velocidad de giro es la mitad que la del cigüeñal; por tanto, el diámetro de su engranaje será el de los balancines de un motor diésel de un diámetro doble que el del cigüeñal. Asimismo, según su situación varía el mecanismo empujador de las válvulas.
Base lubricante o aceite base	Fluido lubricante que se obtiene de la destilación del petróleo o de transformaciones complejas. Es la materia prima con la que se fabrican los lubricantes.
Bielas	Conectan el pistón y el cigüeñal, transmitiendo la fuerza de uno al otro. Tienen dos casquillos para poder girar libremente alrededor del cigüeñal y del bulón que las conecta al pistón. La biela debe absorber las fuerzas dinámicas necesarias para poner el pistón en movimiento y pararlo al principio y final de cada carrera. Asimismo, la biela transmite la fuerza generada en la carrera de explosión al cigüeñal.
Bloque	Es la estructura básica del motor, en el mismo van alojados los cilindros, cigüeñal, árbol de levas, etc. Todas las demás partes del motor se montan en él. Generalmente son de fundición de hierro o aluminio.

Bomba de aceite Está localizada en el fondo del motor en el cárter del aceite. Su misión es bombear aceite para lubricar cojinetes y partes móviles del motor. La bomba es mandada por un engranaje, desde el eje de levas hace circular el aceite a través de pequeños conductos en el bloque. El flujo principal del aceite es para el cigüeñal, que tiene unos taladros que dirigen el lubricante a los cojinetes de biela y a los cojinetes principales. Aceite lubricante es también salpicado sobre las paredes del cilindro por debajo del pistón.

Bomba de agua Encargada en los motores refrigerados por líquido, de hacer circular el refrigerante a través del bloque del motor, culata, radiador, etc. La circulación de refrigerante a través del radiador transfiere el calor del motor al aire que circula entre las celdas del radiador. Un ventilador movido por el propio motor hace circular el aire a través del radiador.

Camisas Cilindros, por cuyo interior circulan los pistones. Suelen ser de hierro fundido y tienen la superficie interior endurecida por inducción y pulida. Normalmente suelen ser intercambiables para poder reconstruir el motor colocando unas nuevas, aunque en algunos casos pueden venir mecanizadas directamente en el bloque en cuyo caso su reparación es más complicada.

Cigüeñal	Componente mecánico que cambia el movimiento alternativo en movimiento rotativo. Está montado en el bloque en los cojinetes principales, los cuales están lubricados.
Cojinetes	Apoyo para una muñequilla. Debe ser lo suficientemente robusto para resistir los esfuerzos a que estará sometido en la carrera de explosión. Los cojinetes de bancada van lubricados a presión y llevan un orificio en su mitad superior, por el que se efectúa el suministro de aceite procedente de un conducto de lubricación del bloque.
Culata	Elemento del motor que cierra los cilindros por la parte superior. Pueden ser de fundición de hierro o aluminio. Sirve de soporte para otros elementos del motor como: válvulas, balancines, inyectores, etc.
Densidad	Peso de una sustancia por unidad de volumen. Se mide según la Norma ASTM-D-4052
Depresor de la congelacion	Aditivo que evita la solidificación o falta de fluidez del lubricante a temperaturas extremadamente bajas.
Desemulsion	Mide la capacidad de un aceite para separarse de un volumen igual de agua, después de ser mezcladas.
Detergencia	Capacidad que del lubricante de eliminar de las superficies metálicas las impurezas y residuos que se producen en la combustión

Detergente	Aditivo que evita que los residuos carbonosos, procedentes de la combustión, y las lacas y barnices, procedentes de la degradación del aceite, se fijen en las superficies metálicas.
Dispersante	Aditivo que evita que los residuos carbonosos procedentes de la combustión, y las lacas y barnices, procedentes de la degradación del aceite, se fijen en las superficies metálicas.
Engranajes de distribución	Conduce los accesorios y mantienen la rotación del cigüeñal, árbol de levas, eje de leva de la bomba de inyección y ejes compensadores en la relación correcta de desmultiplicación.
Espumabilidad	Mide la tendencia de un aceite a formar espuma. Este ensayo, recogido en la Norma ASTM-D-892, informa de cómo se comportaría un aceite al ser batido o al sufrir entradas de aire.
Extrema presión	Propiedad que permite que dos superficies, sometidas a alta carga de trabajo, no queden soldadas.
Índice de viscosidad	Mide la variación de la viscosidad según la temperatura. La norma que lo describe es la ASTM-D-2270. Los valores típicos de índice de viscosidad son 95 (para los aceites normales o monogrado) y de 125 a 150 (para los multigrado).

Lubricante	Toda sustancia sólida, semisólida o líquida de cualquier origen, que sirve para reducir el rozamiento entre piezas y mecanismos en movimiento
Lubricar	Reducir el rozamiento y la fricción entre dos piezas metálicas en contacto, interponiendo una película lubricante.
Mejorador del índice de viscosidad	Aditivo que consigue mantener el aceite fluido a bajas temperaturas y suficientemente viscoso a las temperaturas de régimen de motor, es decir, mantiene la viscosidad del lubricante a las distintas temperaturas de régimen de uso.
Minerales	Lubricantes fabricados con bases obtenidas directamente de la destilación del petróleo
Monogrado	Aceites cuya variación de viscosidad obliga a que se cambien según las estaciones del año.
Multigrado	Aceites cuya variación de viscosidad con la temperatura es mínima. Estos aceites responden simultáneamente a las exigencias de utilización de altas y bajas temperaturas y pueden ser utilizados durante todo el año. Un aceite multigrado SAE es el que cumple a la vez dos escalas SAE.
Pistones	Émbolo cilíndrico que sube y baja deslizándose por el interior de un cilindro del motor.

Rozamiento	Fuerza opuesta al movimiento de dos superficies en contacto.
SAE	Referencia de una escala de viscosidades seguida en todo el mundo, establecida por la Society of Automotive Engineers para todos los aceites de uso en automoción.
Sellar	En los motores, el lubricante contribuye a hacer estanca la cámara de combustión evitando la fuga de los gases hacia el cárter al mantener la compresión adecuada.
Válvulas	Las válvulas abren y cierran las lumbreras de admisión y escape en el momento oportuno de cada ciclo. La de admisión suele ser de mayor tamaño que la de escape.
Viscosidad	Medida de la resistencia que tiene el aceite a fluir, se mide según norma ASTM-D-445 y se expresa en centistokes a 40 °C ó a 100 °C.

RESUMEN

Las averías de cojinetes, el atascamiento de anillos de pistón y el consumo excesivo de aceite son síntomas clásicos de averías del motor relacionadas con el aceite lubricante. ¿Cómo evitarlas? Hay muchas formas y tres de las más importantes son el análisis programado de aceite, el mantenimiento regular del sistema de lubricación y el uso de lubricantes apropiados. El cumplimiento de estas recomendaciones puede significar la diferencia entre sufrir repetidas averías del motor relacionadas con el aceite lubricante y obtener todas las ventajas de una vida útil productiva y satisfactoria del motor. Esta investigación intenta presentar la historia del aceite: su composición y sus funciones, como identificar su contaminación y degradación, sus consecuencias más frecuentes y algunas medidas preventivas para proteger el motor contra los efectos devastadores de las averías relacionadas con el aceite lubricante.

El aceite de motor realiza varias funciones básicas para proporcionar una lubricación adecuada. Se utiliza para conservar el motor limpio y libre de herrumbre y corrosión. Actúa como refrigerante y sellante y proporciona una película de aceite que reduce al mínimo el contacto de metal con metal y, por lo tanto, reduce la fricción y el desgaste. Pero estas son solo las funciones básicas del aceite.

La selección de un aceite lubricante apropiado debe basarse en los requisitos de rendimiento del motor según lo especifica el fabricante, así como en la aplicación en la que se va a utilizar el motor y la calidad del combustible disponible.

El análisis del aceite es importante, porque el rendimiento del aceite del motor se degrada lentamente con el tiempo, la cual ocurre a medida que aumentan las cantidades de contaminantes y metales de desgaste. En condiciones severas de operación, el proceso de degradación puede acelerarse. Para motores diésel, las condiciones severas se definen como la presencia de uno o más factores.

La mayoría de las averías relacionadas con el aceite son causadas por el aceite contaminado o degradado que fluye por el motor o por la falta de lubricación de un componente determinado. Sabiendo cómo el sistema de lubricación alimenta al motor puede simplificar el análisis de fallas. Un ejemplo de eso es la avería de un cojinete por falta de lubricación. Si se descubre la avería a tiempo, los cojinetes más alejados del suministro de aceite pueden sufrir los daños más graves.

OBJETIVOS

General

Plantear los fundamentos teóricos para el uso del análisis de aceite para detección temprana de fallas en motores Caterpillar.

Específicos

1. Conocer el aceite lubricante, su composición, funciones, clasificaciones y normas internacionales que aplican.
2. Determinar qué es y cómo identificar la contaminación y la degradación en los aceites lubricantes a través del análisis de aceite.
3. Conocer qué son y cómo se miden los metales de desgaste en los aceites lubricantes y qué pueden indicar en el análisis de aceite.
4. Conocer las averías o fallas típicas en los motores relacionadas con el aceite lubricante.

INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos se ha empezado a hablar del concepto de confiabilidad, en la medida que se comprendió que no era suficiente lograr una alta disponibilidad, sino también disminuir al mínimo la probabilidad de falla de las máquinas críticas durante la operación productiva, es decir, conseguir una alta confiabilidad. La no disponibilidad tiene fuerte impacto en la producción y por consiguiente elevación de costos.

Las consecuencias de una falla pueden ir desde pérdida de producción, pasando por las horas perdidas de mano de obra, hasta la degradación de las máquinas y el aumento del costo de las reparaciones.

Una alta disponibilidad no implica, necesariamente una alta confiabilidad, pero una alta confiabilidad sí implica una buena disponibilidad y seguridad, en la medida que la maquinaria presenta una baja probabilidad de fallas inesperadas. Para el caso de los motores de maquinaria pesada, la confiabilidad será el producto de la confiabilidad individual de cada sistema que la compone, siendo el motor el más importante.

1. ACEITES LUBRICANTES

1.1. Sus funciones

El aceite de motor realiza varias funciones básicas para proporcionar una lubricación adecuada. Se utiliza para conservar el motor limpio y libre de herrumbre y corrosión. Actúa como refrigerante y sellante y proporciona una película de aceite que reduce al mínimo el contacto de metal con metal y, por lo tanto, reduce la fricción y el desgaste. Pero estas son solo las funciones básicas del aceite. Las exigencias particulares de una aplicación determinada y las condiciones especiales en las que se utiliza el aceite son las que determinan, en gran medida, las muchas otras funciones que debe realizar el aceite lubricante. Estas funciones adicionales hacen que sea sumamente importante la selección del aceite apropiado para cada aplicación.

La selección de un aceite lubricante apropiado debe basarse en los requisitos de rendimiento del motor según lo especifica el fabricante, así como en la aplicación en la que se va a utilizar el motor y la calidad del combustible disponible. Los motores diésel, por ejemplo, funcionan normalmente a velocidades más bajas pero a temperaturas más altas que los motores de gasolina, condiciones que fomentan la oxidación del aceite, la formación de depósitos y la corrosión del metal de los cojinetes. En estas condiciones es necesario que el aceite funcione con más capacidad de protección. Aquí es donde entran en juego los aditivos. Las características finales de rendimiento del aceite dependen del aceite de base y de los aditivos que se utilizan varían según las propiedades del aceite de base y el ambiente en el que utilizará el aceite.

1.2. Aceites de base

El aceite lubricante comienza con el aceite de base o materia prima. Los aceites de base son de origen mineral (petróleo) o de origen sintético, aunque también se pueden utilizar aceites vegetales para aplicaciones especializadas. El aceite de base proporciona los requisitos básicos de lubricación de un motor, Sin embargo, a menos que se complemente con aditivos, el aceite de base se degradará y deteriorará rápidamente en algunas condiciones de operación. Dependiendo del tipo de aceite de base (petróleo, sintético o algún otro), se utilizan aditivos con distintas propiedades químicas.

1.2.1. Aceites minerales

Los aceites de base minerales son productos refinados de aceites crudos de petróleo. La fuente del aceite crudo y el proceso de refinado determinan las características del aceite de base. Los aceites crudos que se utilizan en los lubricantes para motores diésel están compuestos, principalmente de parafina, nafteno y compuestos aromáticos. Los aceites crudos con mayor contenido de parafina se usan con mayor frecuencia en las mezclas de aceite para motores.

El proceso de refinado comienza con la destilación en vacío. La destilación en vacío separa el aceite en productos con una gama similar de puntos de ebullición y viscosidades similares. Después de la destilación en vacío, los aceites deben purificarse para extraer o modificar compuestos indeseables. La purificación de los aceites de base se hace normalmente, por medio de extracción de disolvente e hidroacabado o por hidrofractura e hidroacabado. Ambos procesos se usan para limitar o eliminar las ceras, el azufre y los compuestos aromáticos. Las variaciones entre estos procesos de refinado producen aceites de base con diferentes características.

Los aceites de base minerales predominan en la formulación de los aceites para motores diésel por sus buenas cualidades y porque se pueden obtener fácilmente a un costo moderado.

1.2.2. Aceites sintéticos

Los aceites de base sintéticos se forman por procesos en los cuales materiales con una composición química determinada reaccionan químicamente para producir un compuesto con propiedades planificadas y predecibles. Estos aceites de base tienen índices de viscosidad mucho más altos que los aceites de base minerales y puntos de fluidez considerablemente más bajos. Estas características los convierten en componentes sumamente valiosos para mezclas, utilizados en la fabricación de aceites de servicio extremo para temperaturas altas o bajas. La principal desventaja de los aceites sintéticos es que su precio es demasiado alto y sus existencias son limitadas.

El grupo de aceites sintéticos conocidos como ésteres produce un mayor hinchamiento de los sellos que los aceites minerales. Para poder usar estos ésteres sintéticos es necesario tener muy en cuenta el diseño de los componentes para asegurar la compatibilidad del aceite y de los sellos. Es aceptable el uso de lubricantes con aceites de base sintéticos en los motores y en las máquinas Caterpillar si la formulación del aceite cumple con los requisitos de rendimiento y de viscosidad especificados por Caterpillar para el compartimiento en el que se va a utilizar el aceite. En climas muy fríos es necesario usar aceites de base sintéticos.

1.3. Aditivos

Los aditivos refuerzan o modifican algunas características del aceite de base. Básicamente permiten que el aceite cumpla con requisitos que van más allá de los límites del aceite de base.

Los aditivos más comunes son: detergentes, inhibidores de oxidación, dispersantes, agentes que aumentan la alcalinidad, agentes antidesgaste, reductores del punto de fluidez y mejoradores del índice de viscosidad.

A continuación, una breve descripción de la función de cada aditivo y de cómo realizan su función.

- Los detergentes contribuyen a mantener limpio el motor al reaccionar químicamente para detener la formación y el depósito de compuestos insolubles. Los detergentes que se usan en la actualidad son sales metálicas, principalmente sulfonatos, fenatos, fosfonatos y salicilatos.
- Los agentes que aumentan la alcalinidad contribuyen a neutralizar los ácidos. Los detergentes son también buenos neutralizadores de ácidos, transformando los ácidos producidos durante la combustión y la oxidación en sales neutralizadas e inofensivas.
- Los inhibidores de oxidación contribuyen a evitar el aumento de la viscosidad, el desarrollo de ácidos orgánicos y la formación de materiales carbonáceos. Los siguientes compuestos químicos se utilizan como antioxidantes: ditiofosfatos de cinc, sulfuros de fenato, aminas aromáticas, esteres sulfurizados y fenoles obstaculizados.

- Los dispersantes ayudan a impedir la formación de sedimentos dispersando los contaminantes y manteniéndolos en suspensión. Entre los tipos comunes de dispersantes se incluyen succinimidas poliisobutilénicos y los ésteres succínicos poliisobutilénicos.
- Los agentes antidesgaste reducen la fricción formando una película sobre las superficies metálicas y protegiéndolas contra la corrosión. Los tipos principales de agentes antidesgaste son detergentes alcalinos y ditiocarbamatos de cinc.
- Los reductores del punto de fluidez mantienen el aceite fluido a bajas temperaturas evitando el crecimiento y la aglomeración de cristales de cera. Se utilizan como reductores del punto de fluidez los polimetacrilatos, los poliésteres con base de estireno, los fenoles alquílicos enlazados y los naftalenos alquílicos.
- Los mejoradores del índice de viscosidad evitan que el aceite llegue a tener muy poca viscosidad a altas temperaturas. Los mejoradores del índice de viscosidad son productos químicos que mejoran (reducen) los cambios de viscosidad producidos por cambios de temperatura. Los productos químicos que se utilizan como mejoradores del índice de viscosidad son los poliisobutenos, polimetacrilatos, poliésteres con base de estireno y copolímeros de etileno y propileno.

1.4. Número de base total (TBN)

Para entender el concepto de TBN es necesario conocer el contenido de azufre en el combustible. La mayoría de los combustibles diésel contienen algo de azufre. El contenido de azufre en el combustible depende del contenido de

azufre en el petróleo crudo del cual se destiló el combustible y de la capacidad de las refinerías para eliminar dicho azufre.

Una de las funciones del aceite lubricante es neutralizar los derivados del azufre, principalmente los ácidos sulfuroso y sulfúrico, para retardar el daño corrosivo que pueden causar al motor. Los aditivos (principalmente los detergentes) en el aceite contienen compuestos alcalinos formulados para neutralizar estos ácidos. La medida de esta reserva de alcalinidad en un aceite se conoce como su TBN. Generalmente, cuanto mayor es el valor de TBN, mayor será la reserva de alcalinidad o de capacidad de neutralizar ácidos que tiene ese aceite.

1.5. Cenizas o cenizas sulfatadas

El contenido de cenizas de un aceite es el residuo no combustible del aceite lubricante. Los detergentes que se usan como aditivos en el aceite lubricante contienen derivados metálicos como compuestos de barrio, de calcio y de magnesio que son fuentes comunes de ceniza. Estos compuestos órgano-metálicos que hay en los aceites proporcionan el TBN para la alcalinidad del aceite. Un contenido excesivo de cenizas causará que se produzcan depósitos de cenizas que pueden reducir la eficiencia y la potencia del motor.

1.6. Viscosidad

La viscosidad es una de las propiedades más importantes del aceite. Está relacionada con su resistencia a la fluencia. La viscosidad tiene una relación directa con la capacidad de lubricación del aceite formando una película para separar las superficies que pueden entrar en contacto. Independientemente de

la temperatura ambiente o de la temperatura del motor, un aceite debe fluir lo suficiente para asegurar la lubricación adecuada de todas las piezas móviles.

Cuanto más viscoso (o espeso) es un aceite, más gruesa será la película de aceite que puede formar. Cuanto más gruesa sea la película, mejor se adherirá a las superficies lubricadas y mejor resistirá las fuerzas de rozamiento que tienden a removerla de esas superficies, tendrá una resistencia excesiva a fluir a bajas temperaturas y es posible que no cubra con suficiente rapidez a aquellas piezas que necesitan lubricación. Por esto, es sumamente importante que el aceite tenga la viscosidad correcta a las temperaturas más altas y más bajas a las que va a operar el motor.

Los aceites cambian de viscosidad en función de la temperatura y se hacen menos viscosos a medida que la temperatura aumenta. Las técnicas de refinado y los aditivos especiales aumentan el índice de viscosidad (VI) del aceite. Contra más alto es el valor del VI de un aceite, menor será su tendencia a cambiar de viscosidad cuando cambia la temperatura.

El sistema de clasificación de aceites de la Sociedad de Ingenieros Automotrices (Society of Automotive Engineers (SAE)) contenido en la Norma SAE J300, categoriza los aceites de acuerdo con su viscosidad (por medio de sistema numérico como SAE 10W, SAE 30, SAE 15W40, etc.). Cada uno de los números o grados de viscosidad tiene sus límites en cuanto a la viscosidad del aceite a ciertas temperaturas. En los grados de viscosidad identificados con la letra W, la viscosidad del aceite se define a 100 grados centígrados y a la temperatura más baja para arranque y bombeo.

En otras palabras, se ha probado la viscosidad del aceite para comprobar su fluidez a las temperaturas más bajas especificadas. Por lo tanto, la letra W

en el grado de viscosidad de un aceite significa, generalmente, que el aceite es adecuado para utilizar en invierno. Para los grados sin la letra W, la viscosidad del aceite se define a 100 grados centígrados solamente. En la tabla I se indican las viscosidades de varios grados de viscosidad de aceite.

Tabla I. **Grados de viscosidad SAE para aceites de motor^a – SAE J300, diciembre de 1999**

Grado de viscosidad SAE	Viscosidad a baja temperatura		Viscosidad a alta temperatura		
	Viscosidad (cP) máxima para arrancar ^b a la temp. °C	Viscosidad (cP) máxima para bombear ^c sin esfuerzo de fluencia a la temp. °C	Viscosidad cinemática ^d (cSt) con baja descomposición laminar a 100°C		Alta descomposición laminar ^e de la viscosidad (cP) a 150°C
			Mínima	Máxima	
0W	6 200 a -35	60 000 a -40	3,8	-	-
5W	6 600 a -30	60 000 a -35	3,8	-	-
10W	7 000 a -25	60 000 a -30	4,1	-	-
15W	7 000 a -20	60 000 a -25	5,6	-	-
20W	9 500 a -15	60 000 a -20	5,6	-	-
25W	13 000 a -10	60 000 a -15	9,3	-	-
20	-	-	5,6	< 9,3	2,6
30	-	-	9,3	< 12,5	2,9
40	-	-	12,5	< 16,3	2,9 (Grados 0W-40, 5W-40, 10W-40, 4)
40	-	-	12,5	< 16,3	3,7 (Grados 0W-40, 5W-40, 10W-40, 4)
50	-	-	16,3	< 21,9	3,7
60	-	-	21,9	< 26,1	3,7

NOTA:

¹cP=1mPa s: 1 cSt=1mm²/s

^a Todos los valores son especificaciones críticas definidas por ASTM D 3244

^b ASTM D 5293

^c ASTM D 4684: la presencia de cualquier esfuerzo de fluencia detectable por este método constituye una falla independientemente de la viscosidad.

^d ASTM D 445

^e ASTM D 4683, ASTM D 4741, CEC-L-36-A-90

La nueva norma se revisa en diciembre de 1999. La obligación legal de cumplir con los nuevos límites de capacidad de arranque entro en vigor en junio de 2001.

Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 2.

1.7. Clasificaciones API de aceite de motor

Las clasificaciones de rendimiento del aceite para motores diésel y de gasolina las define el Instituto Americano del Petróleo (API) y las categorías de servicio las establecieron conjuntamente API, SAE y ASTM (American Society of Testing Materials).

Las clasificaciones API del aceite para motores de gasolina se designan con dos letras, la primera de las cuales es siempre una S. Las clasificaciones que están activas en la actualidad son API SJ y API SL.

Las clasificaciones API del aceite para motores diésel se designan con dos letras, la primera de las cuales es siempre una C. Las clasificaciones que están activas en la actualidad de aceites para motores diésel de cuatro tiempos son API CF, API CF-4, API CG-4 y API CH-4.

Los aceites API CH-4 se desarrollaron para satisfacer los requisitos de los nuevos motores diésel de alto rendimiento. Además, este aceite fue diseñado para satisfacer los requisitos de los motores diésel de bajas emisiones. Los aceites API CH-4 son también aceptables para usarlos en motores diésel más antiguos y en motores diésel que usan combustible diésel con alto contenido de azufre. Los aceites API CH-4 se pueden usar en los Caterpillar que usan aceites API CG-4 y API CF-4. Los aceites API CH-4 excederán, generalmente el rendimiento de los aceites API CG-4 en los criterios siguientes: depósitos en los pistones, control del consumo de aceite, desgaste de los anillos de pistón, desgaste del tren de válvulas, control de viscosidad y corrosión.

Se han desarrollado tres pruebas nuevas de motor para el aceite API CH-4. La primera prueba evalúa específicamente los depósitos en los pistones para

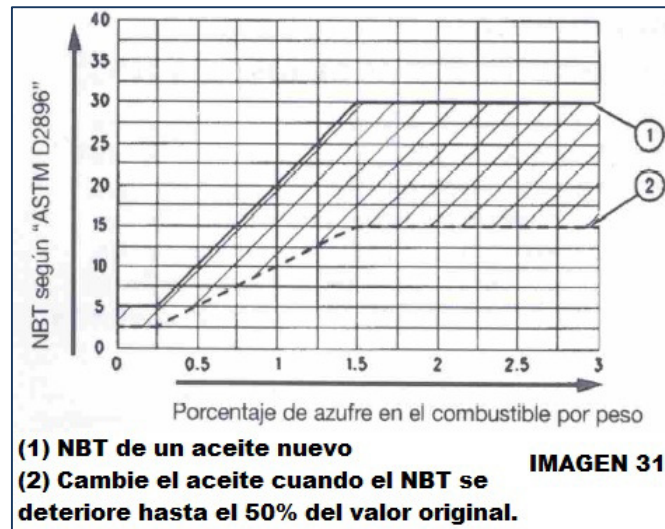
motores con pistón de acero de dos piezas. Esta prueba (depósito en los pistones) mide también el control del consumo de aceite. La segunda prueba se lleva a cabo con un contenido moderado de hollín en el aceite. La segunda prueba mide los siguientes parámetros: desgaste de los anillos de pistón, desgaste de las camisas de cilindro y resistencia a la corrosión. La tercera prueba nueva mide las siguientes características con niveles altos de hollín en el aceite: desgaste del tren de válvulas, resistencia del aceite a taponar el filtro del aceite y control de la formación de lodo.

Además de las pruebas nuevas, los aceites API CH-4 tienen límites más exigentes de control de viscosidad en aplicaciones que producen un nivel alto de hollín. Los aceites han mejorado también la resistencia a la oxidación. Los aceites API CG-4 deben pasar una prueba adicional (depósito en los pistones) para motores que usan pistones de aluminio (de una pieza). El rendimiento del aceite se establece también para los motores que operan en áreas con combustible diésel con alto contenido de azufre.

Todas estas mejoras permiten que el aceite API CH-4 logre los intervalos óptimos de cambios de aceite. Se recomienda el uso de los aceites API CH-4 para intervalos prolongados de cambio de aceite en condiciones que requieren un aceite de calidad superior. Su distribuidor Caterpillar tiene pautas específicas para optimizar los intervalos de cambios de aceite.

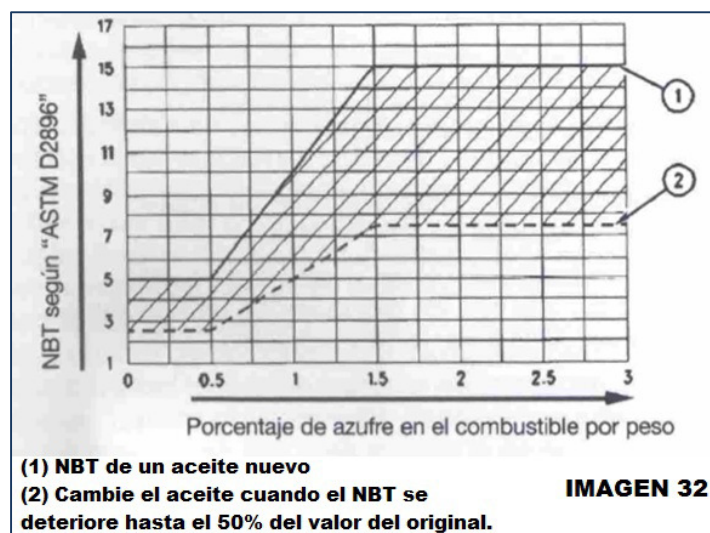
Los aceites API CH-4 se desarrollaron, principalmente, para motores diésel que usan combustibles con un nivel de azufre del 0,05 por ciento. Sin embargo, los aceites API CH-4 se pueden usar con combustibles de mayor contenido de azufre. El TBN del aceite nuevo determina el nivel máximo de azufre en el combustible.

Figura 1. **Valores TBN y niveles de azufre para motores diésel de inyección directa**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 12.

Figura 2. **Valores TBN y niveles de azufre para motores diésel con precámara de combustión**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p.14.

Los aceites API CG-4 son los primeros aceites que tienen que pasar las pruebas estándar de la industria de control de espuma y de pérdida de viscosidad por descomposición laminar. Los aceites API CG-4 deben pasar también las pruebas que se desarrollaron para corrosión, desgaste y oxidación.

Los aceites API CF-4 son apropiados para una amplia variedad de motores diésel modernos. Los aceites API CF-4 proporcionan un control de aceite más estable y reducen los depósitos en los pistones en comparación con los aceites API CF y los aceites de las clasificaciones obsoletas CE y CD. Los aceites API CF-4 proporcionan mejor dispersión de hollín en comparación con los aceites API CF y los aceites obsoletos CD. La clasificación API CF-4 se desarrolló con un combustible diésel con un 0,40 por ciento de azufre. Este combustible es representativo del tipo de combustibles es representativo del tipo de combustible diésel que se encuentran disponibles en todo el mundo.

Es importante no usar los aceites API CF monogrado o multigrado en los motores diésel Caterpillar de inyección directa (DI) (excepto los motores diésel Caterpillar de la Serie 3600).

API CF no es la misma clasificación de aceite que API CF-4. Los aceites API CF se recomiendan solamente para los motores diésel Caterpillar de la serie 3600 y los motores Caterpillar con sistemas de combustible con cámara de precombustión (PC).

Algunos aceites comerciales que cumplen con los requisitos de las clasificaciones API, pueden necesitar una reducción en los intervalos de cambios de aceite. Para determinar el intervalo correcto de cambio de aceite, es necesario vigilar de cerca el estado del aceite y realizar un análisis de metales

de desgaste. El método preferido es el programa SOSSM de análisis de aceite de Caterpillar.

Si no se siguen estas recomendaciones de aceite, se puede causar la reducción de la vida útil del motor debido a la formación de depósitos y a un desgaste excesivo.

1.8. Recomendaciones de aceite para motores diésel: aceites Caterpillar para motores diésel

Los aceites Caterpillar han sido desarrollados y probados para proporcionar el rendimiento completo y toda la vida útil que han sido diseñados e incorporados en los motores Caterpillar.

Los aceites Caterpillar se usan en la actualidad para llenar los motores diésel en la fábrica. Los distribuidores Caterpillar ofrecen estos aceites para uso continuo cuando se reemplaza el aceite del motor. Es necesario consultar al distribuidor Caterpillar para obtener información adicional sobre estos aceites. Debido a las variaciones considerables de calidad y rendimiento de los aceites comerciales disponibles, Caterpillar recomienda los aceites siguientes:

- Caterpillar para motores diésel: 10W30
- Caterpillar para motores diésel: 15W40

Los aceites multigrado Caterpillar para motores diésel están formulados con las cantidades correctas de detergentes y dispersantes y con la alcalinidad correcta para proporcionar un rendimiento excelente en los motores diésel de Caterpillar.

El aceite multigrado Caterpillar para motores diésel está disponible en dos grados de viscosidad: 10W30 y 15W40. La información para seleccionar el grado correcto de viscosidad para la temperatura ambiente para los motores de inyección directa se describe en la tabla I. Los aceites multigrado proporcionan la viscosidad correcta para una amplia gama de temperaturas de operación, asimismo los aceites multigrado contribuyen a mantener un bajo consumo de aceite y bajos niveles de depósitos en los pistones.

Los aceites multigrado Caterpillar para motores diésel pueden usarse en otros motores diésel y gasolina. Es importante leer las especificaciones recomendadas en el manual de fabricante del motor y comparar estas especificaciones con las de los aceites multigrado Caterpillar para motores. Las normas actuales de la industria para los aceites Caterpillar para motores diésel aparecen en la etiqueta y en la hoja de producto de los aceites.

Además de pasar las pruebas de las clasificaciones de aceite API CH-4, CG-4, CF-4 y CF, el aceite multigrado Caterpillar DEO 15W-40 (CH-4) pasa también pruebas exclusivas adicionales que incluyen pruebas de atascamiento de los anillos de pistón, control del aceite, desgaste y hollín. Estas pruebas exclusivas contribuyen a asegurar que los aceites multigrado Caterpillar proporcionan un rendimiento excelente en los motores diésel Caterpillar. Además, exceden muchos de los requisitos de rendimiento de otros fabricantes de motores diésel, por lo que representan una elección excelente para muchas flotas mixtas.

Un verdadero alto rendimiento del aceite se obtiene utilizando una combinación de pruebas estándar de la industria, pruebas exclusivas, de campo y experiencia anterior con formulaciones similares. El diseño y el desarrollo de

los lubricantes vendidos por Caterpillar de alto rendimiento y alta calidad se basan en estos factores.

1.9. Aceites comerciales

El rendimiento de los aceites comerciales para motores diésel se basa en las clasificaciones del American Petroleum Institute (API) que se desarrollan para proporcionar lubricantes comerciales para una amplia gama de motores diésel que operan en diversas condiciones.

Si no se usa el aceite multigrado Caterpillar para motores diésel, debe usarse solamente multigrado Caterpillar para motores diésel. Debe usarse solamente aceites comerciales que satisfagan las siguientes clasificaciones:

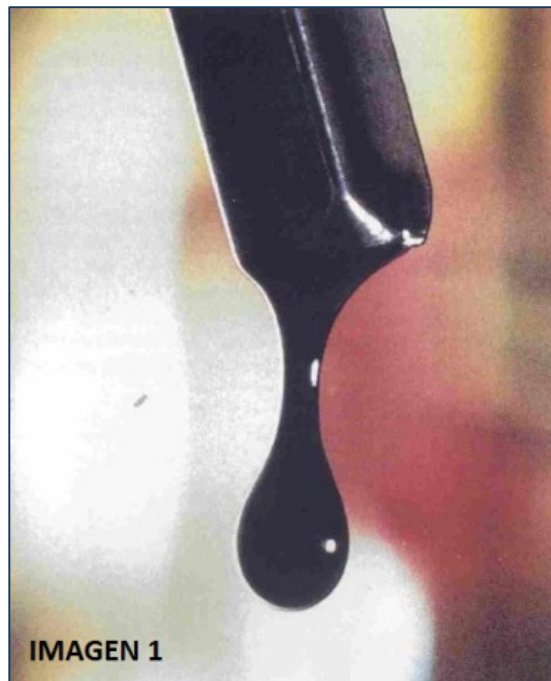
- Aceite multigrado API CH-4 (aceite preferido)
- Aceite multigrado API CG-4 (aceite preferido)
- Aceite multigrado API CF-4 (aceite preferido)

Al seleccionar un aceite para cualquier aplicación del motor, deben definirse y satisfacerse los requisitos de viscosidad y de categoría de rendimiento del aceite especificados por el fabricante del motor. El uso de uno solo de estos parámetros no será suficiente para definir al aceite necesario para una aplicación del motor.

1.10. Viscosidades de lubricantes recomendadas para motores diésel de inyección directa (DI)

El grado apropiado de viscosidad SAE de un aceite lo determina la temperatura ambiente mínima durante el arranque del motor frío y la temperatura ambiente máxima durante la operación del motor.

Figura 3. **Tomando muestra de aceite**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 2.

- Temperatura mínima: para determinar la viscosidad de aceite necesaria para arrancar un motor frío (ver tabla II).

- Temperatura máxima: para seleccionar la viscosidad del aceite para operar el motor a la temperatura ambiente más alta que se prevé (ver tabla II).

Tabla II. **Temperaturas máximas y mínimas de aceite**

Viscosidad del aceite del motor		
DEO Caterpillar multigrado CH-4 API CG-4 API CF-4 API Grado de viscosidad	Temperatura ambiente	
	Mínima	Máxima
SAE 0W20	-40°C (-40°F)	10°C (50°F)
SAE 0W30	-40°C (-40°F)	30°C (86°F)
SAE 0W40	-40°C (-40°F)	40°C (104°F)
SAE 5W30	-30°C (-22°F)	30°C (86°F)
SAE 5W40	-30°C (-22°F)	40°C (104°F)
SAE 10W30	-20°C (-4°F)	40°C (104°F)
SAE 15W30	-15°C (5°F)	50°C (122°F)

Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 16.

En general, debe usarse el aceite con la viscosidad más alta disponible que cumpla con los requisitos de temperatura para el arranque.

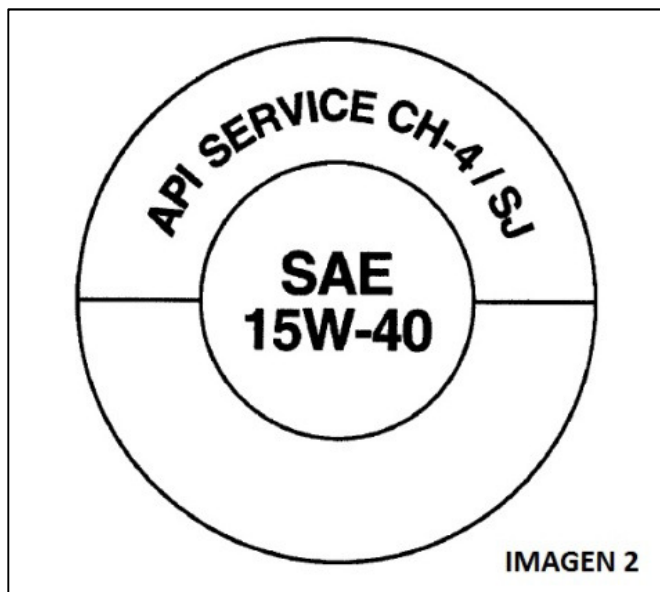
1.11. El círculo (*donut*) API

Para facilitar a los usuarios la selección del aceite adecuado, el American Petroleum Institute ha desarrollado el símbolo del círculo API (*donut*).

Este símbolo indica la clasificación de servicio API (en la mitad superior del círculo) y, si es pertinente, la característica de ahorro de energía del aceite (en la mitad inferior del círculo). La característica de conservación de energía no es aplicable a los aceites para motores diésel de servicio pesado.

Aunque cualquier proveedor de aceite puede utilizar las clasificaciones de servicio API para indicar el nivel de rendimiento de cualquiera de sus aceites comerciales, solamente las compañías certificadas y con licencia pueden imprimir el símbolo API (*donut*) en sus etiquetas. Los que usan este símbolo garantizan que sus aceites cumplen con todas las normas técnicas de rendimiento indicadas. El Programa de Valoración del Etiquetado de Aceite de SAE (Oil Labeling Assessment Program (OLAP)), copatrocinado por API y por el ejército de EE.UU., analiza muestras representativas de los aceites disponibles en el mercado para comprobar el cumplimiento de estos requisitos. Por lo tanto, para estar completamente seguro de que un aceite satisface la categoría de rendimiento publicada, debe seleccionarse un aceite que tenga el símbolo API.

Figura 4. **Circulo API (*donut*)**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 21.

1.12. Limpieza

El funcionamiento normal de un motor genera una amplia variedad de contaminantes, desde partículas metálicas microscópicas hasta productos químicos corrosivos. Si no se mantiene limpio el aceite del motor mediante un sistema de filtrado, el aceite llevaría esta contaminación a todo el motor.

Los filtros de aceites están diseñados para eliminar del sistema de lubricación estas partículas residuales perniciosas. Si se usa un filtro durante más tiempo que el calculado en su diseño, puede causar que el filtro quede taponado. Un filtro taponado causará que se abra la válvula de derivación, permitiendo el paso de aceite sin filtrar. Las partículas de residuos en el aceite llegarán directamente al motor. Cuando una válvula de derivación permanece abierta, las partículas que quedaron retenidas en el filtro pueden también escaparse y pasar por la válvula de derivación abierta.

El taponamiento del filtro puede causar también la deformación del elemento. Esto ocurre cuando aumenta la diferencia de presión entre el exterior y el interior del elemento de filtro. La deformación puede causar grietas y rasguños en el papel filtrante. Esto, a su vez, permitiría la entrada de partículas de desecho al motor donde podría causar daños a los componentes.

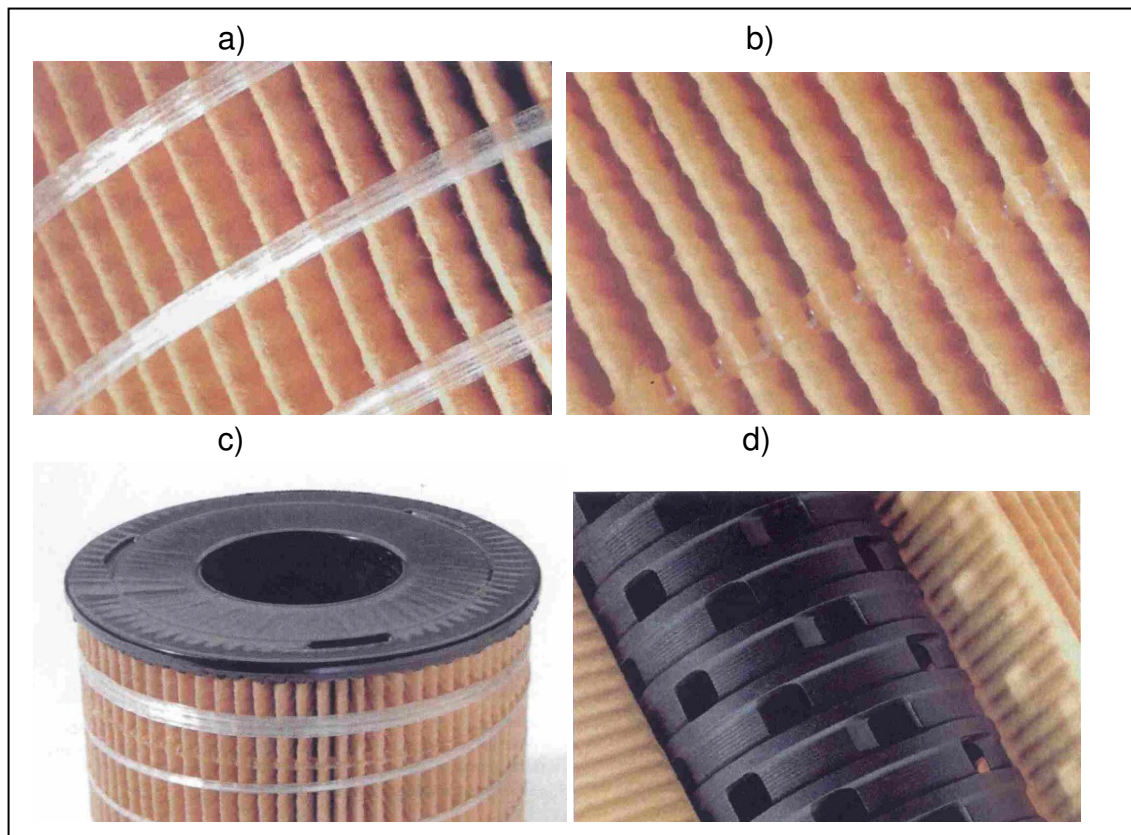
Se deben instalar elementos nuevos de filtro siempre que se drene el sumidero del motor y se llene con aceite nuevo.

1.13. Filtros Caterpillar

Los filtros Caterpillar incluyen las siguientes características para mejorar su función y rendimiento:

- Bandas en espiral y cordones de material acrílico que mantienen la estabilidad de los pliegues y el espacio entre ellos, evitando que se agrupen y optimizando su eficiencia y capacidad (ver figura 5a).
- Material filtrante exclusivo diseñado para optimizar la vida útil del motor (ver figura 5b).
- Las tapas de extremo de uretano de una pieza se unen estrechamente con el material filtrante para alcanzar mayor fortaleza (ver figura 5c).
- El tubo central no metálico evita la contaminación metálica y es más fuerte que el metal para evitar que su colapsamiento (ver figura 5d).

Figura 5. **Filtros Caterpillar**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 27.

2. ANÁLISIS DE ACEITE

2.1. Análisis SOSSM del régimen de desgaste

El mantenimiento correcto del aceite es fundamental para mantener los motores diésel funcionando con un rendimiento máximo. Este incluye los cambios programados del aceite y su análisis. El análisis es importante porque el rendimiento del aceite del motor se degrada lentamente con el tiempo. Esta degradación ocurre a medida que aumentan las cantidades de contaminantes y metales de desgaste.

Figura 6. Toma de muestra de aceite 1



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 32.

En condiciones severas de operación, el proceso de degradación puede acelerarse. Para motores diésel, las condiciones severas se definen como la presencia de uno o más de los factores siguientes: factor alto de carga, demasiados ciclos, intervalos prolongados entre drenajes del aceite, altitud elevada, aire polvoriento, operación prolongada en vacío, alto contenido de azufre en el combustible y temperaturas bajas del agua de las camisas. Tanto en condiciones normales como severas, el aceite del cárter termina perdiendo la capacidad de lubricar y proteger las piezas del motor contra daños y desgaste acelerado.

Es importante, por lo tanto, analizar el aceite a intervalos regulares. Caterpillar ha desarrollado un programa de administración de mantenimiento que evalúa la degradación del aceite y detecta los primeros indicios de desgaste de los componentes internos. El programa de Caterpillar para el análisis de aceite se denomina Análisis SOSSM de aceite y forma parte del Programa de Servicios SOSSM.

El Análisis SOSSM de aceite divide el análisis del aceite del motor en tres categorías básicas: régimen de desgaste, estado del aceite y pruebas adicionales. Juntos, estos tres tipos de análisis se usan para evaluar la degradación del aceite y detectar posibles problemas del motor. Un programa de Análisis SOSSM de aceite, administrado correctamente, reducirá los costos de reparación y disminuirá el impacto del tiempo perdido por averías.

2.2. Cómo evitar problemas y reducir costos conociendo los regímenes de desgaste

El análisis del régimen de desgaste es un componente integral del Programa de Servicios SOSSM que ayudará a mantener el rendimiento del motor

y optimizar su disponibilidad. A través de pruebas regulares de muestras del aceite de su motor, el Análisis SOSSM del régimen de desgaste detecta partículas metálicas minúsculas producidas por el desgaste de los componentes vigilando las tendencias del tipo y de la cantidad de estas partículas, podrá recibir un aviso temprano de posibles problemas antes de que ocurran daños importantes.

Figura 7. **Toma de muestra de aceite 2**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 32.

2.3. Concepto de metales de desgaste

Todos los motores producen metales de desgaste en su operación cotidiana. Si el desgaste se acelera, aumentará la concentración de partículas metálicas indicando que hay un problema. El análisis del régimen de desgaste permite identificar los problemas antes de que causen reparaciones importantes o averías del motor.

El análisis del régimen de desgaste puede detectar partículas de hasta 10 micrones de tamaño. Las concentraciones de los metales de desgaste se expresan en partes por millón (ppm). El Programa de Servicios SOSSM realiza pruebas de 9 metales diferentes por lo menos: cobre, hierro, cromo, plomo, estaño, aluminio, molibdeno, silicio y sodio. Todos estos son metales de desgaste que pueden encontrarse en los motores Caterpillar excepto el silicio (que generalmente indica presencia de tierra) y sodio (que indica agua o refrigerante). Algunos elementos en una muestra pueden venir del paquete de aditivos del aceite y no del desgaste dentro del sistema. Los distribuidores tienen técnicos especializados en interpretar estos análisis que pueden detectar la diferencia entre elementos normales y elementos que indican un desgaste anormal.

2.4. Tendencias de metales de desgaste en su motor

Dos motores idénticos en condiciones idénticas de operación pueden generar partículas de desgaste a distinta velocidad. Los intérpretes de resultados SOSSM tienen acceso a una gran base de datos de muestras para compararlas con las muestras obtenidas del motor. Sin embargo, su propio motor puede proporcionar las mejores pautas de cuáles son los niveles de metales de desgaste apropiados para cada compartimiento. Por eso, la determinación de tendencias es un componente esencial del análisis del régimen de desgaste.

Después de que se han tomado tres muestras de un compartimiento determinado, se puede establecer una tendencia para cada uno de los metales de desgaste. Los intérpretes de resultados comparan entonces las muestras siguientes con esta línea de tendencia para cambios graduales en los niveles de

concentración. Esta atención a las tendencias ayuda a realizar el análisis de ciclo de vida útil y también a optimizar la productividad.

2.5. La tecnología que respalda el análisis del régimen de desgaste

El análisis del régimen de desgaste se realiza con un espectrofotómetro de emisión. El espectrofotómetro determina la cantidad de metales de desgaste y de silicio en una muestra calentando el aceite a temperaturas muy altas. A estas temperaturas, los elementos en la muestra se atomizan y cada uno de ellos emite energía luminosa con una longitud de onda diferente. Un sistema óptico mide y registra la energía luminosa y calcula los resultados en partes por millón para cada elemento.

Tabla III. **Combinaciones de elementos de desgaste clásicos**

	Combinaciones de elementos de desgaste clásicos			
	Elemento primario	Elemento secundario	Desgaste Posible	Area/causas probables del problema
Motor-extremo superior de culata	Silicio (tierra)	Hierro, cromo, aluminio	Camisas, anillos, pistones	Sistema de entrada de aire/contaminándose filtros
	Hierro	Cromo, aluminio	Camisas, anillos, pistones	Temperaturas anormales de operación, degradación del aceite, contaminación del combustible o del refrigerante, anillos atascados/rotos
	Cromo	Molibdeno, aluminio	Anillos, pistones	Escape de gases, consumo de aceite, degradación del aceite
	Hierro	-	Camisas, engranajes, tren de válvulas, cigüeñal.	Temperaturas anormales de operación, falta de lubricación, contaminación, almacenamiento (herrumbre).
Motor-extremo inferior	Silicio (tierra)	Plomo, aluminio	Cojinetes	Contaminación con tierra
	Plomo	Aluminio	Cojinetes	Falta lubricación, contaminación de refrigerante, contaminación de combustible.

Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor.* p. 36.

2.6. ¿Cómo identificar las causas y efectos del desgaste de componentes?

Comparando los resultados del análisis infrarrojo (estado del aceite) con la acumulación de los metales de desgaste, se puede identificar las causas probables del elevado nivel de metales de desgaste. La tabla III muestra algunos de los metales de desgaste más comunes, su origen y los posibles problemas que sugiere.

El análisis espectrofotométrico detecta contaminación con tierra así como metales de desgaste. El silicio es el elemento más común que indica entrada de tierra, aunque algunos suelos arcillosos producen también lecturas elevadas de aluminio.

2.7. Vigilando sus componentes

Cuando el análisis SOSSM identifica un aumento en la concentración de uno o más de los metales de desgaste, es posible apuntar en la dirección del componente que es más probable que esté causando este aumento y, frecuentemente, indicar también la causa más probable. Por ejemplo, un aumento repentino en la concentración de silicio y de hierro en una muestra indica un problema causado por fugas en el sistema de aire o por fugas en los sellos del cárter.

2.8. La relación de silicio / aluminio en la suciedad depende del lugar

Los constituyentes principales de la tierra son minerales que contienen silicio y aluminio. La relación de estos dos elementos varía mucho de un lugar a otro. Los suelos arcillosos contienen casi tanto aluminio como silicio. Por eso,

es muy importante que los resultados del análisis de sus muestras se interpreten localmente. Al estar familiarizados con los tipos de suelo que se encuentran en su área permite entender las combinaciones de elementos en sus muestras.

2.9. Análisis SOSSM del estado del aceite

El análisis del estado del aceite es similar al análisis del régimen de desgaste con una diferencia importante: evalúa compuestos químicos presentes en el aceite en lugar de partículas de elementos de desgaste.

2.10. ¿Cómo optimizar el rendimiento conociendo el estado de su aceite?

La presencia de oxígeno, el calor y los contaminantes causan la degradación del aceite. El aceite de motor es especialmente susceptible a degradarse en presencia de azufre, productos de nitración, productos de combustión, altas temperaturas y agua producida en el proceso de combustión o por condensación. El análisis del estado del aceite, uno de los componentes del Programa de Servicios SOSSM completo, contribuye a evitar daños a los componentes del motor vigilando el aceite y estando al tanto de su degradación. El análisis del estado del aceite le permite también corregir problemas que afectan el rendimiento del aceite.

El resultado final es que se obtiene el rendimiento máximo del aceite del motor, se establecen intervalos óptimos para el cambio de aceite y se reducen los costos debidos a reparaciones.

2.10.1. Análisis del estado del aceite

El análisis del estado del aceite evalúa compuestos químicos presentes en el aceite en lugar de partículas de elementos de desgaste.

El análisis del estado del aceite se realiza de la siguiente forma:

- Enviar una muestra de aceite nuevo, denominado: aceite de referencia, al inscribirse en el Programa de Servicio SOSs^M y cada vez que recibe un envío nuevo de aceite a granel. Las muestras de aceite de referencia se procesan gratis. Si se usa aceite CAT, es posible que no se necesiten nuevas muestras de aceite. Informe a su analista SOSSM de la viscosidad del aceite CAT que usa en cada sistema; el analista tiene sus propias muestras de referencia de aceite CAT.
- El nuevo aceite se analiza con un instrumento especial que utiliza luz infrarroja. La información se almacena en la memoria del instrumento
- En los intervalos programados, se envía una muestra de aceite usado.
- El instrumento que realiza el análisis del estado del aceite dirige un rayo de luz a través de una película del aceite usado y registra los datos.
- El instrumento usa una fórmula matemática para comparar el aceite nuevo con el aceite usado y cuantificar las diferencias.

2.11. Análisis infrarrojo por transformadas de Fourier

El análisis SOSSM del estado del aceite incluye un instrumento infrarrojo que utiliza un método matemático para convertir la información bruta obtenida con el instrumento a términos más fáciles de comprender. Esta prueba, identificada frecuentemente como FT-IR (análisis infrarrojo por transformadas de Fourier), identifica y cuantifica los grupos de compuestos orgánicos midiendo su absorción infrarroja a longitudes de onda específicas para cada grupo. Además de identificar productos de oxidación, hollín, compuestos de azufre y derivados de nitración, la prueba se utiliza también para detectar la contaminación del aceite debida a la presencia de combustible, agua o glicol (refrigeración del motor).

2.12. ¿Cómo identificar el estado del aceite antes de que cause problemas?

El análisis del estado del aceite detecta hollín, productos derivados de la oxidación y la nitración y compuestos / ácidos de azufre. Esta prueba puede detectar también contaminación causada por agua, combustible y glicol del refrigerante. Si detecta uno de ellos, se deben utilizar pruebas específicas para cada contaminante para confirmar los resultados.

2.13. Hollín

El hollín es el residuo insoluble del combustible parcialmente quemado. El hollín se mantiene en suspensión gracias al paquete de aditivos del aceite y es la causa de que el aceite tome un color negro. Cuando el hollín se precipita de la suspensión en el aceite, contribuye a la reducción de aditivos y, eventualmente, aumenta la viscosidad del aceite. Concentraciones altas de

hollín pueden causar daños a los cojines al impedir que llegue lubricante a las superficies de contacto que lo necesitan.

2.14. Oxidación

La oxidación ocurre cuando moléculas de oxígeno se combinan químicamente con moléculas del aceite. Esta reacción química se acelera cuando el aceite está a alta temperatura, cuando el aceite está contaminado por glicol del refrigerante del motor, en presencia de cobre y cuando los intervalos entre cambios de aceite son demasiado prolongados. La oxidación causa que el aceite se espese, forme ácidos y pierda propiedades lubricantes, lo que amenaza reducir la vida útil de los componentes del motor. El aceite oxidado causará depósitos en las válvulas y en los pisones del motor, atascamiento de los anillos y pulido de los orificios de los cilindros.

2.15. Derivados de nitración

La nitración ocurre en todos los aceites de motor, pero suele ser un problema solamente en motores de gas natural. Los derivados de nitrógeno del proceso de combustión espesan el aceite y reducen su capacidad lubricante. Si la nitración continúa sin control, puede causar atascamiento de los filtros, depósitos elevados en los pistones, enlacado de las válvulas y pistones y, finalmente, averías del motor.

2.16. Derivados de azufre / ácidos

El azufre está presente en todos los aceites y afecta todos los motores. Durante la combustión, el azufre en el combustible se oxida y se combina con agua para formar ácidos. El ácido corroe todos los componentes del motor, pero

es peligroso, principalmente para las válvulas, las guías de válvula, los anillos y las camisas de pistón.

2.17. ¿Cómo optimizar su equipo con el Programa de Servicios SOSSM?

La degradación del aceite puede ser el resultado de una serie de factores y condiciones, incluyendo intervalos prolongados entre cambios de aceite, temperaturas anormales o contaminación por combustible, agua o refrigerante. Aceites de baja calidad se degradarán más rápidamente que un aceite de calidad especial.

Con el análisis del estado del aceite, usted puede determinar la magnitud del deterioro del aceite y comprobar si el aceite está teniendo el rendimiento requerido por las especificaciones durante todo el período entre cambios de aceite.

El análisis del estado del aceite es solamente un componente del Programa de Servicio SOSSM que proporciona información para reducir el tiempo perdido por averías y ahorrarle dinero al evitar problemas graves del motor.

2.18. Pruebas adicionales: detección de glicol, agua y combustible, viscosidad y TBN

Pueden necesitarse pruebas adicionales del aceite para definir mejor el estado del aceite usado del motor. Si los resultados del análisis FT-IR muestran la presencia de glicol, agua o combustible diésel, se necesitarán pruebas adicionales para medir la concentración de estos contaminantes en el aceite. Además, en algunos casos, condicionales del aceite. Estas pruebas adicionales

completamente la información ya recogida en los análisis de régimen de desgaste y de estado del aceite.

2.18.1. Glicol (refrigerante)

El glicol causa la oxidación rápida del aceite e indica, generalmente una fuga en el sistema de enfriamiento. El aceite que está muy oxidado es pegajoso y forma depósitos que taponan los filtros. Incluso una pequeña cantidad de glicol en el aceite es inaceptable. Los motores que tienen sistemas de enfriamiento de agua a aceite pueden contaminarse con refrigerante si se desarrolla una fuga en un tubo de refrigerante o en un sello.

2.18.2. Agua

Si el análisis infrarrojo indica la presencia de agua, la cantidad aproximada se determina colocando una gota de aceite en una placa calentada a 230 – 250 grados Fahrenheit. Si hay agua en el aceite, el aceite burbujeará y chisporroteará. Comparando la cantidad de burbujas con las muestras de control de laboratorio, un técnico de laboratorio con experiencia puede determinar la cantidad de agua en la muestra. Cualquier cantidad por encima de 0,5 por ciento se considera excesiva. El agua puede contaminarse un sistema entrando desde el exterior o condensándose en el cárter del motor o en otro compartimiento dentro del motor.

Cuando el agua se combina con el aceite, reduce la capacidad lubricante del aceite y forma depósitos que taponan los filtros. El agua que pasa muy cerca de un componente puede crear puntos calientes. Si el agua llega a calentarse lo suficiente, causa pequeñas explosiones de vapor que pueden fracturar el metal.

2.18.3. Combustible

La contaminación con combustible se confirma utilizando una prueba de chispa en la cual se calienta el aceite usado a una temperatura determinada en un recipiente cerrado y se coloca después sobre una llama. Los vapores de combustible producidos por el calor producirán chispas.

La presencia de combustible en el aceite del motor reduce sus propiedades lubricantes. Es frecuente encontrar pequeñas cantidades de combustible en el aceite como resultado del proceso de combustión. Pero si el nivel de combustible excede del 4 por ciento, se sugiere que compruebe las boquillas de inyección de combustible para ver si son defectuosas y verificar también otras fuentes posibles de fugas de combustible. Generalmente, la dilución con combustible es el resultado de operación prolongada en vacío, sincronización incorrecta o de un problema con los inyectores de combustible, las combas o las tuberías.

2.18.4. Número base total (TBN)

Todos los combustibles diésel contienen un poco de azufre. El contenido depende de la cantidad de azufre en el petróleo crudo y de la capacidad del proceso de refinado para eliminarlo. Una de las funciones del aceite lubricante es neutralizar los derivados del azufre (ácidos sulfuroso y sulfúrico), así como los ácidos orgánicos producidos por oxidación. De esta forma, el aceite contribuye a evitar daños corrosivos.

Los aditivos en el aceite contienen compuestos alcalinos formulados para neutralizar estos ácidos. La medida de la reserva de alcalinidad en el aceite se

denomina el Número de Base Total (TBN). En general, cuanto mayor es el valor de TBN, mayor es la reserva de capacidad alcalina contenida en el aceite.

El ácido sulfúrico y otros ácidos representan un peligro a los componentes metálicos del motor, causando desgaste corrosivo en las superficies de las guías de válvula, anillos de pistón y camisas. El tipo de desgaste corrosivo atribuido a un alto contenido de azufre en el combustible puede también acelerar el consumo de aceite. Debido a que el nivel de óxidos de azufre en el aceite usado aumenta con el intervalo entre cambios de aceite, es muy importante comprobar el valor de TBN del aceite. El TBN del aceite debe comprobarse en cada muestra de aceite.

La temperatura de salida del agua de las camisas del motor influencia la formación de ácidos corrosivos. Incluso cuando se usa un combustible con menos de 0,5 por ciento de azufre, temperaturas del refrigerante por debajo de 82,2 grados centígrados (180 grados Fahrenheit) pueden causar la condensación de los vapores de ácido en el sistema de aceite del motor y causar ataques corrosivos. Las bajas temperaturas aumentan también la cantidad de agua que se condensa, agua que podría haberse evaporado, y escapado del aceite a las temperaturas normales de operación. Esta agua residual consume algunos aditivos del aceite y reduce la capacidad del aceite de proteger los componentes del motor. Esto causa depósitos, lodo, enlacado, barniz y carbonización. En aplicaciones en ambientes de alta humedad, es más probable que se formen ácidos debido al agua adicional que hay en el aire. Por lo tanto, bajas temperaturas del refrigerante y alta humedad pueden resultar en un aumento de ataques corrosivos.

2.18.5. Viscosidad

La viscosidad se define como una medida de la resistencia del fluido a fluir. La medida normal de este parámetro para los aceites del cárter se denomina viscosidad cinemática. La viscosidad cinemática se basa en la capacidad de un aceite de fluir bajo la influencia de la gravedad en un tubo capilar. La prueba de la viscosidad cinemática se define en la Norma ASTM D445.

El aceite del cárter puede empezar a perder sus características lubricantes después de un cambio de 3 centiStokes. Un aceite que ha sufrido un cambio de viscosidad de esta magnitud no debe seguir utilizándose, porque podría causar daños al motor.

La dos causas más frecuentes de un aumento de la viscosidad del aceite del cárter son las siguientes: la primera es la acumulación de derivados de la combustión (hollín principalmente) que puede espesar el aceite. La segunda es el calor que puede causar la oxidación del aceite. Además, la oxidación, con el consecuente espesamiento del aceite, puede ocurrir si entra refrigerante (glicol) del motor en el cárter. Agua producida por condensación o contaminación también contribuye a la oxidación.

Hay dos causas principales de que un aceite pueda sufrir una reducción en su viscosidad. La primera es la disolución por combustible, que no es un problema del aceite sino un problema de contaminación que debe resolverse inmediatamente. Otra causa posible de una reducción de viscosidad es la descomposición lineal de las moléculas poliméricas de cadenas largas que forman parte de los aditivos mejoradores de viscosidad. En tal caso, el aceite ya no puede mantener su rendimiento a altas temperaturas y muestra los valores más bajos de viscosidad correspondientes al aceite de base mineral. En ambos

casos, dilución por combustible y descomposición lineal, el aceite puede diluirse hasta el punto en que ya no pueda mantener una película de aceite adecuada a las temperaturas de operación.

Cuando investigue las causas de los cambios de viscosidad del aceite, esté atento a la posibilidad de que se haya usado un aceite incorrecto al cambiar el aceite o al completar el nivel de aceite. Un análisis cuidadoso de los resultados de la prueba FT-IR puede ayudar a determinar esta posibilidad.

Un aceite que haya sufrido un cambio de 3 centistokes (cSt) ha excedido su vida útil. Probablemente se detectará un aumento en metales de desgaste en las muestras de aceite que hayan sufrido un cambio de viscosidad de esta magnitud.

3. DETECCIÓN DE FALLAS

3.1. Ejemplos típicos de fallas relacionadas con el aceite

En los motores diésel existen diversos componentes que pueden dar origen a una falla, en el presente apartado se hará referencia a las fallas que son producidas por el aceite del motor.

3.1.1. Sistema lubricante

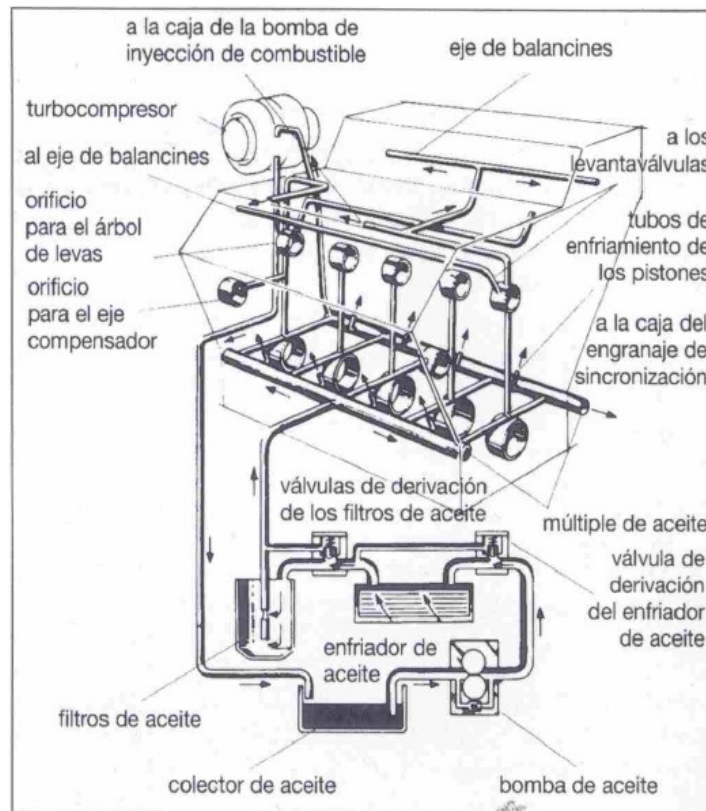
Un conocimiento básico del sistema de lubricación del motor es útil no solo para comprender cómo la contaminación y la degradación del aceite pueden dañar los componentes del motor sino también, para entender cómo la falta de aceite puede tener un efecto igualmente perjudicial.

La mayoría de las averías relacionadas con el aceite son causadas por el aceite contaminado o degradado que fluye por el motor o por la falta de lubricación de un componente determinado. Sabiendo cómo el sistema de lubricación alimenta al motor puede simplificar el análisis de fallas. Un ejemplo de eso es la avería de un cojinete por falta de lubricación. Si se descubre la avería a tiempo, los cojinetes más alejados del suministro de aceite pueden sufrir los daños más graves.

El sistema de lubricación de cada motor puede ser ligeramente diferente; sin embargo, la mayoría son iguales en principio. El sistema de lubricación del motor 3408 es similar a los sistemas de lubricación de otros motores. Como se muestra en la figura 8, la comba de aceite envía el aceite a través del enfriador

de aceite y después por los filtros de aceite. Las válvulas de derivación del enfriador de aceite o de los filtros de aceite protegen al sistema si ocurre una reducción del flujo de aceite. Cuando el motor se arranca con aceite frío o si se tapona el enfriador o el filtro, las válvulas de derivación aseguran un flujo constante de aceite a los conductos de aceite del motor.

Figura 8. **Sistema de lubricación motor 3408 CAT**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 45.

El aceite fluye desde el filtro al múltiple de aceite del bloque de motor. Este aceite fluye, entonces a los conductos de aceite del bloque para lubricar y enfriar los componentes del motor, el aceite regresa después al colector de aceite.

3.1.2. Cojinetes

Las averías de cojinetes relacionados con aceite se deben, generalmente a dos causas: falta de lubricante o tierra en el aceite.

La falta de lubricación o agotamiento del aceite significa que no hay una película suficiente de aceite entre el muñón del cigüeñal y el cojinete. Si se opera un motor durante un periodo prolongado con una película de aceite insuficiente, el daño a los cojinetes progresará rápidamente de rozamiento a desgaste abrasivo y, finalmente, al agarrotamiento del cojinete.

- Primera etapa de daño, rozamiento: en esta etapa se puede ver el corrimiento de la capa de plomo-estaño, normalmente en el centro del cojinete.
- Segunda etapa, desgaste abrasivo: se desplaza el aluminio del centro del cojinete.
- Tercera etapa: el resultado es un agarrotamiento total del cojinete.

En las tres etapas, el muñón giratorio desgasta parte del material del cojinete, desde la corona hacia la superficie de contacto de cada mitad de cojinete. La gravedad del desgaste depende de la severidad de la falta de lubricación.

La contaminación del aceite causa abrasión y resulta en rayas en la superficie del cojinete por la pérdida de aceite. Las partículas de hierro, acero, aluminio, plástico, madera, tela, etc. pueden atacar también la superficie de los muñones. A medida que las superficies de los cojinetes de los muñones se

desgastan, aumentan los espacios cambia el grosor de la película de aceite, resultando en un soporte desigual de las superficies.

Una de las fuentes principales de aceite muy contaminado es un filtro taponado. Los filtros taponados dejan pasar aceite sin filtrar conteniendo partículas de desgaste, tierra y residuos a los cojinetes, arañándolos y dañando sus superficies.

El aceite muy sucio puede causar daños, incluso después de cambiarlo. Algunas partículas abrasivas pueden quedar atrapadas en los cojinetes y hacer que el cojinete actúe como una lija en el cigüeñal.

Figura 9. **Cojinete de biela arañado con daños más graves causados por falta de lubricación**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 60.

Figura 10. **Cojinete con indicios de rozamiento: primera etapa de daños causados por falta de lubricación**



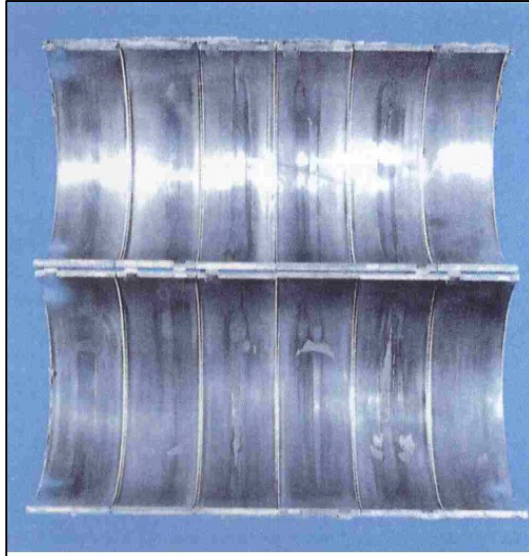
Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 60.

Figura 11. **Cojinete agarrotado, la etapa final de daños causados por falta de lubricación**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 60.

Figura 12. **Arañazos profundos y desgaste pronunciado causados por falta de aceite**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 61.

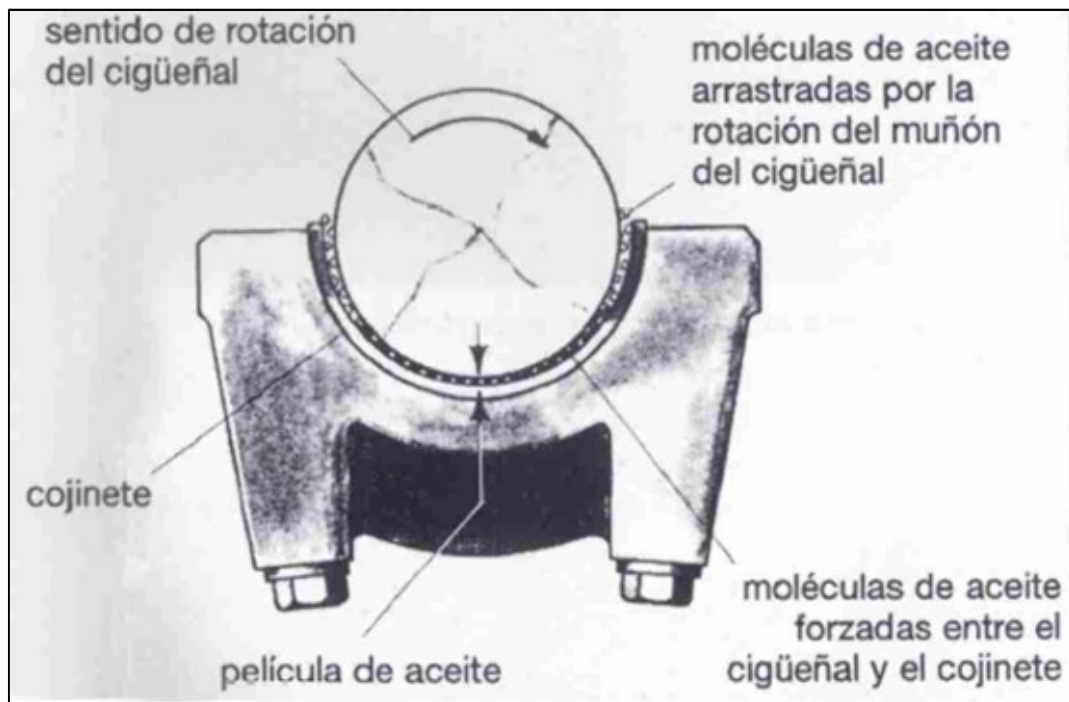
3.1.3. Cigüeñales

El aceite que fluye a los cojinetes forma una película de aceite entre el muñón del cigüeñal y el cojinete. La rotación del muñón del cigüeñal tiende a forzar aceite entre el muñón y el cojinete y, durante la operación normal, evita el contacto de metal con metal a medida que aumenta la presión del aceite.

La falta de lubricación o agotamiento del aceite causa el contacto de metal con metal, aumenta la fricción y la temperatura, lo que lleva al agarrotamiento del cojinete sobre el eje. En casos extremos, la superficie del cojinete se adhiere tanto que se destruye completamente la superficie del cigüeñal.

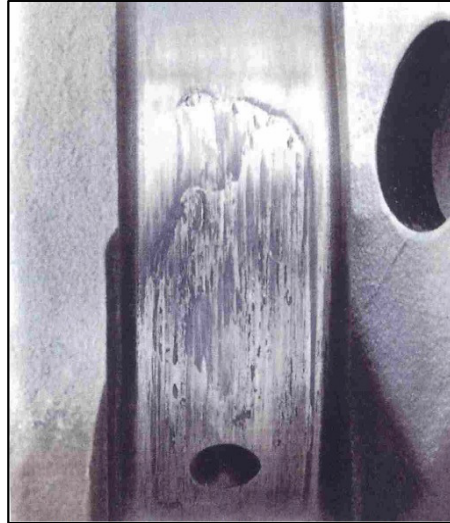
El aceite contaminado causa también, el desgaste excesivo del cigüeñal. Esto es casi siempre el resultado de partículas abrasivas / contaminación incrustadas en el cojinete.

Figura 13. **Película de aceite entre el muñón del cigüeñal y el cojinete**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 42.

Figura 14: **Resultado de falta de aceite**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 64.

Figura 15. **Arañazos profundos a lo largo de la circunferencia; efecto de partículas abrasivas en superficie del cojinete**



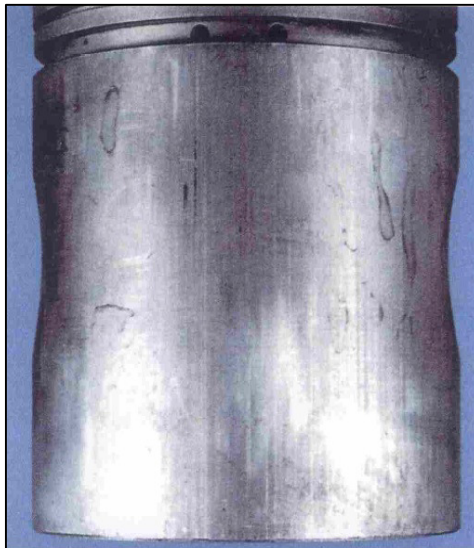
Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 64.

3.1.4. Pistones, anillos y camisas de cilindro

Las averías de pistones relacionadas con el aceite son generalmente causadas por la acción abrasiva del aceite contaminado que causa el desgaste del faldón del pistón. Algunos de los indicios son un color gris opaco del faldón, desgaste de las superficies cromadas de todos los anillos, rieles de anillo de aceite desgastados, ranuras muy desgastadas y algo de desgaste en las camisas del cilindro.

El rozamiento del pistón, que aparece como vetas en el faldón del pistón, particularmente en el área del pasador de biela y poco o nada de roce en el primer resalto, puede ser el resultado de lubricación inadecuada de la camisa del cilindro. La descomposición de la película de aceite puede producir marcas de agarrotamiento.

Figura 16. **Faldón de pistón dañado por desgaste abrasivo**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 62.

Los anillos de pistón pueden mostrar desgaste en la ranura del resorte. Algo de desgaste en la ranura del resorte es normal, pero si no se cambia el aceite cuando se debe, se producirá el atascamiento de los anillos, lo que ocurre cuando el resorte queda enganchado en una ranura desgastada y no logra su expansión completa.

El daño a las camisas de cilindro puede ser debido a la falta de lubricante o a productos abrasivos que pueden causar el pulido del cilindro (desgasta el patrón cuadrículado) y dejan una superficie brillante.

Figura 17. **Marcas de agotamiento que pueden indicar avería en sistema de enfriamiento del sistema de lubricación**



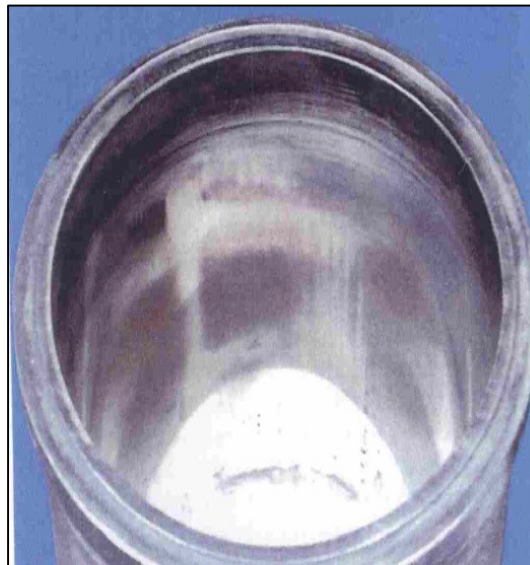
Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 63.

Figura 18. **Desgaste causado por falta de lubricación durante un corto período de tiempo**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 63.

Figura 19. **Aéreas brillantes en el interior de la camisa causadas por exceso de depósitos en los resaltos del pistón**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 63.

Figura 20. **Exceso de depósitos en primer y segundos resaltos**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 64.

3.1.5. Turbocompresores

Las averías de los turbocompresores relacionadas con el aceite se deben a la contaminación del aceite o a la falta de aceite debidas a las prácticas de operación. Es necesario suministrar aceite al turbocompresor para lubricar los cojinetes (cojinetes del muñón y de empuje) y para enfriar los cojinetes, especialmente en el extremo de la turbina.

En la operación del motor, las prácticas de arranque y de parada pueden agravar las averías de los cojinetes del turbocompresor. Al arrancar el motor, especialmente cuando la temperatura exterior es baja y el aceite es más viscoso,

dejar que se caliente el motor a baja en vacío durante un corto periodo de tiempo.

Este período en vacío permitirá que el aceite se caliente, se filtre correctamente y fluya antes de que el motor y el turbocompresor alcancen altas velocidades. Al apagar el motor, un corto periodo a baja en vacío permitirá que el aceite enfríe la caja de los cojinetes del turbocompresor. Sin este periodo de enfriamiento, el aceite se oxidará o se carbonizará y se formarán depósitos en las superficies de los cojinetes y en los conductos de aceite, los cuales pueden restringir el flujo de aceite durante el siguiente periodo de operación.

El aceite contaminado puede corroer los orificios por los que pasa el aceite y rayar y desgastar las superficies de los cojinetes, así como dañar la superficie del eje y de la caja. La falta de aceite puede causar daños a las superficies de los cojinetes y el descoloramiento del metal debido a las altas temperaturas.

Figura 21. **Ralladuras profundas y daños en los orificios de aceite de los cojinetes**

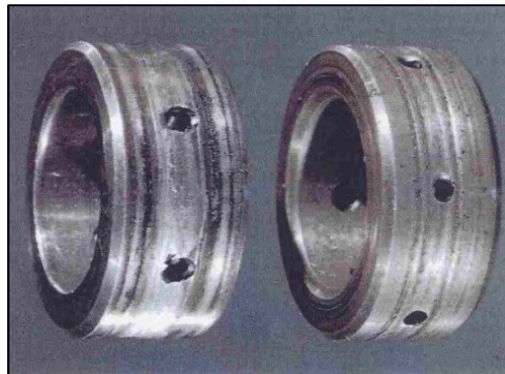


Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 66.

El daño causado a los cojinetes del turbocompresor por contaminación o por falta de lubricación permite el movimiento del eje causando rozamiento entre la rueda compresora y su caja. Las averías típicas causadas por el movimiento del eje se manifiestan como rozamiento superficial en algunos álabes cerca de su sección de inducido. En la parte posterior de la rueda, a 180 grados de donde aparece el rozamiento superficial, habrá también indicios de roce con la caja central.

Tanto la falta de lubricante como su contaminación, causan el desgaste de los cojinetes de empuje, dificultando la identificación de la causa de la avería. La inspección del estado de los cojinetes de muñón le ayudará a determinar la causa de la avería. El descoloramiento de los anillos de empuje, causado por temperaturas excesivamente elevadas, es también un indicio de falta de lubricación. En los turbocompresores, la deformación es más frecuente en el lado interior de los anillos de empuje. En los modelos Schwitzer, el descoloramiento tiende a concentrarse en una sola área de la superficie del anillo. Con frecuencia, se ven también marcas de rozamiento.

Figura 22. **Daños debidos a la presencia de partículas abrasivas grandes en el aceite**

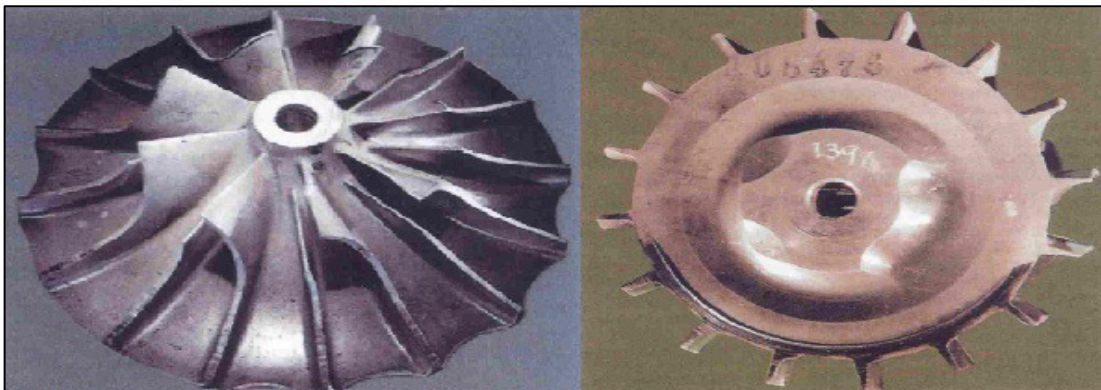


Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 66.

El daño a los cojinetes y el juego excesivo del eje debidos a la falta de lubricación o a la presencia de partículas abrasivas en el aceite puede, a la larga, causar el doblamiento o la rotura del eje. Por lo general, las piezas desgastadas por abrasión tendrán una apariencia física como de acción corrosiva. Como regla general, las superficies de los cojinetes no mostrarán señales de rozamiento y las piezas no estarán descoloridas por temperaturas altas. De las ilustraciones, la primera muestra desgaste debido a la presencia de partículas extrañas en el aceite lubricante; se han formado ranuras profundas en las dos arandelas de tope de acero. La segunda ilustración muestra desgaste abrasivo en un turbocompresor AiResearch; se han formado ranuras profundas en la arandela de tope.

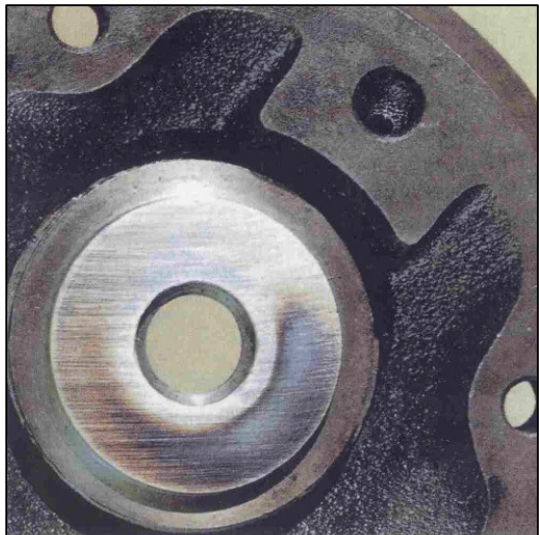
El daño en la tercera ilustración es más difícil de identificar. El desgaste abrasivo es muy ligero y da la apariencia de pulido a la superficie del cojinete de empuje, sin descoloramiento por altas temperaturas.

Figura 23. **Indicios de rozamiento en la parte delantera y trasera de la rueda compresora**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 66.

Figura 24. **Descoloramiento por temperaturas altas en el lado inferior del anillo de empuje**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 67.

Figura 25. **Ranuras de desgaste en las superficies de las arandelas de tope**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 67.

3.1.6. Válvulas

La mayoría de las averías de válvulas relacionadas con el aceite resultan de la formación de depósitos o de la falta de aceite.

La causa más frecuente de agarrotamiento de un vástago de válvula es la acumulación de depósitos entre el vástago y la guía de válvula. El agarrotamiento es causado indirectamente por la acumulación de depósitos y la contaminación del aceite. Los depósitos se acumulan debido a la descomposición del aceite.

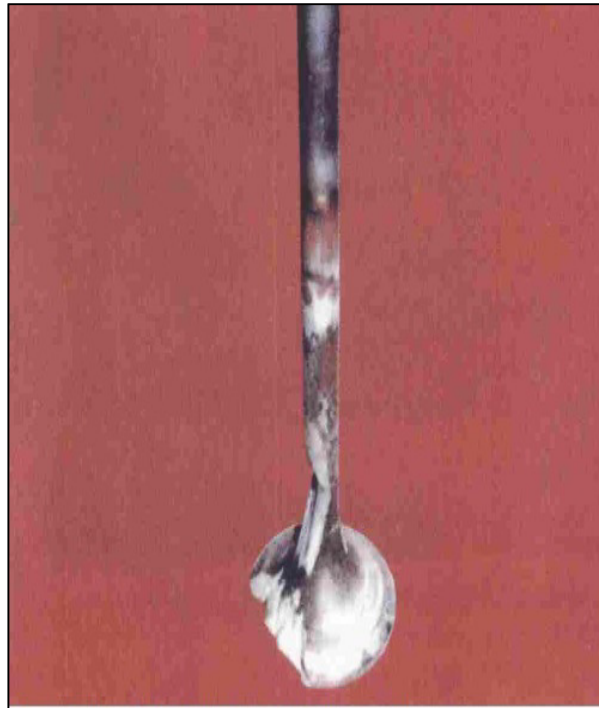
Los depósitos se acumulan debido a la descomposición del lubricante en residuos oxidados y la acumulación de residuos normales que se forman en el proceso de combustión. La acumulación progresiva de estos depósitos acelera el acampanamiento de las guías de válvulas.

El rozamiento y el agarrotamiento del vástago de las válvulas pueden ser también causados por falta de lubricación de las válvulas y de las guías de válvula.

Los depósitos de carbón en el asiento de la válvula pueden crear problemas si llegan a ser excesivos. Se necesita algo de lubricación para evitar el desgaste extremo del asiento de la válvula y del casquillo en la culata. Pero el exceso de depósitos puede causar la acumulación de carbón en el asiento de la válvula, que podría descascarillarse y romperse, permitiendo la fuga de los gases de combustión. Esta fuga de gases calientes causaría altas temperaturas en la superficie de las válvulas produciendo grietas o derritiendo la válvula.

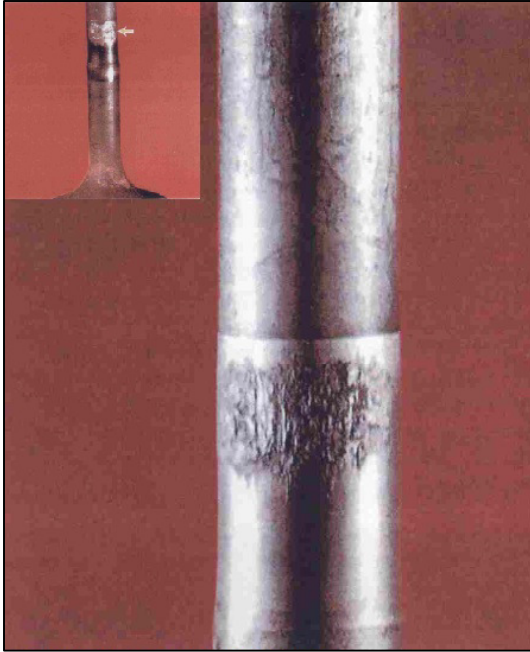
Este tipo de avería de válvulas puede ocurrir en motores que usan combustible líquido o gaseoso. La tendencia del aceite a formar carbón y el nivel de cenizas sulfatadas del aceite afectan la formación de carbón en el asiento de las válvulas.

Figura 26. **Derretido de la válvula causado por la formación de excesivos depósitos**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 70.

Figura 27. **Rozamiento o atasco del vástago de válvula**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 70.

3.2. ¿Cómo reducir al mínimo la ocurrencia de averías del motor relacionadas con el aceite?

Luego de describir las fallas que tienen origen en el aceite del motor, en el presente apartado se hará mención de diferentes puntos que deben ser tomados en cuenta para reducir las fallas derivadas del aceite.

3.2.1. Azufre en el combustible

La contaminación del aceite puede tomar distintas formas, pero ninguna es más rápida en sus efectos perjudiciales que el ácido sulfúrico que puede producirse debido a altos niveles de azufre en el combustible.

Desde octubre de 1993, es legalmente obligatorio en los Estados Unidos utilizar combustible con bajo contenido de azufre en los vehículos de carretera. En el estado de California todos los vehículos deben usar combustible con bajo contenido de azufre. El combustible con bajo contenido de azufre se introdujo para ayudar a los fabricantes de motores a cumplir con las normas de control de emisiones en estas aplicaciones. No hay prácticamente efectos negativos debidos al uso de combustible con bajo contenido de azufre.

Hacer frente a los efectos del azufre en el combustible no es una tarea fácil. Aunque el uso de lubricantes adecuados y de intervalos correctos de cambios de aceite reduce el nivel de desgaste abrasivo, el desgaste del motor aumentará cuando se usan combustibles con alto contenido de azufre. Estos combustibles no solo producen ácidos que atacan químicamente a los componentes del motor y causan desgaste corrosivo, sino que los aceites que se usan para contrarrestar el efecto de los ácidos tienen un contenido más alto de ceniza, lo que aumenta el riesgo de que se formen depósitos.

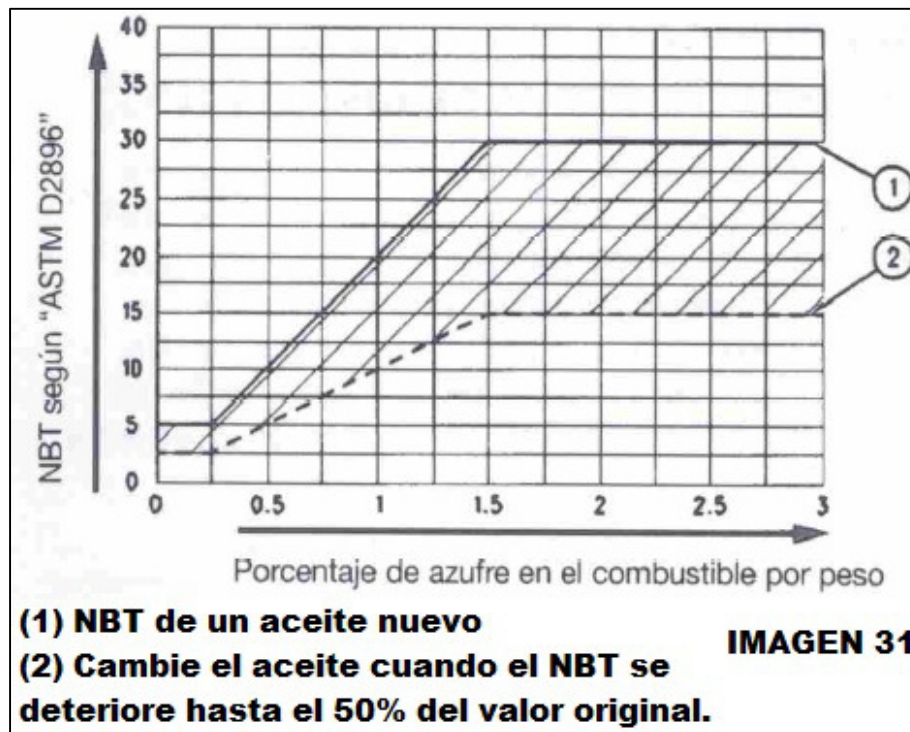
Conozca el contenido de azufre en el combustible preguntando periódicamente a su proveedor o analizando el combustible. El contenido de azufre puede cambiar con cada entrega de combustible a granel.

3.2.2. TBN y niveles de azufre en el combustible para motores diésel de inyección directa (DI)

El Número de Base Total (TBN) depende del nivel de azufre en el combustible. Para motores de inyección directa que usan combustible. Para motores de inyección directa que usan combustible destilado, el valor mínimo de TBN de un aceite nuevo debe ser igual a diez veces el nivel de azufre en el combustible. La Norma STM D2896 define el TBN. El valor mínimo de TBN del

aceite debe ser cinco, independientemente del nivel de azufre en el combustible. La ilustración 1 muestra el valor de TBN.

Figura 28. **Valores de TBN y niveles de azufre para motores diésel con precámara de combustión**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 12.

Usar las pautas siguientes cuando el nivel de azufre en el combustible exceda de 1,5 por ciento:

- Seleccionar un aceite con el valor más alto posible de TBN que cumpla con los requisitos de una de estas clasificaciones: API CH-4, API CG-4 y API CF-4.

- Reducir al intervalo entre cambios de aceite, basando el intervalo en los resultados del análisis de aceite. Asegurarse de que en el análisis de aceite se incluyen un análisis del estado de aceite y un análisis de los metales de desgaste.

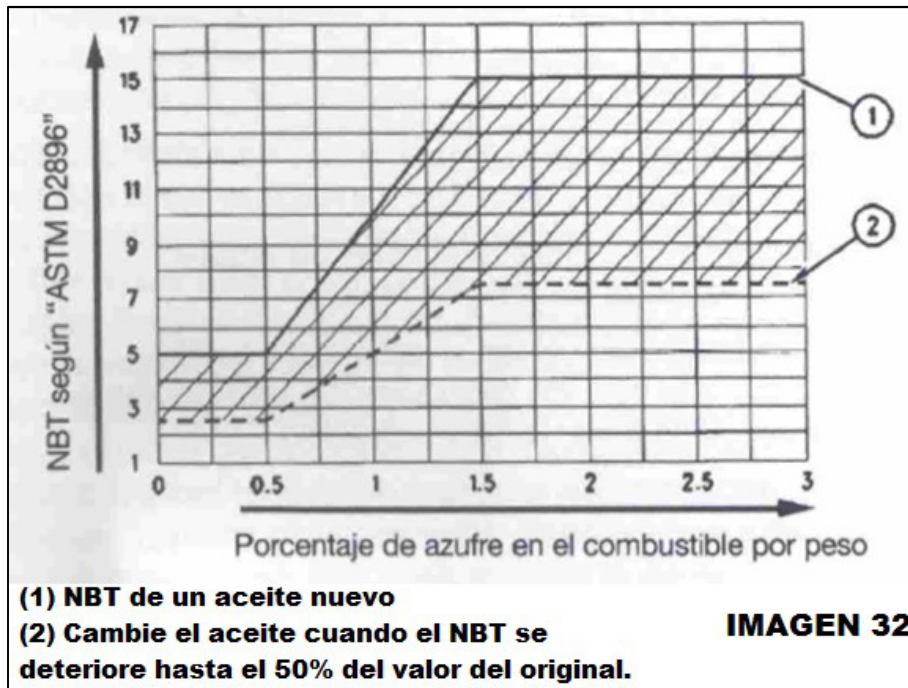
Un aceite con un valor alto de TBN puede producir excesivos depósitos en los pistones. Estos depósitos pueden causar pérdida de control del consumo de combustible y el pulimiento del orificio de los cilindros.

Si se opera un motor diésel de inyección directa (DI) con niveles de azufre en el combustible por encima de 1,0 por ciento, puede ser necesario acortar los intervalos entre cambios de aceite para poder mantener una protección adecuada contra el desgaste.

3.2.3. TBN y niveles de azufre en el combustible para motores diésel con cámara de precombustión (PC)

El TBN de un aceite nuevo depende del nivel de azufre en el combustible que se utiliza. El valor mínimo de TBN del aceite que se usa en los motores PC debe ser igual a veinte veces el nivel de azufre en el combustible. La Norma STM D2896 define el TBN. El valor mínimo de TBN del aceite debe ser cinco, independientemente del nivel de azufre en el combustible. La ilustración 2 muestra el valor de TBN.

Figura 29. **Porcentaje de azufre**



Fuente: publicación de Caterpillar. *El aceite lubricante y su motor*. p. 13.

Cuando el nivel de azufre en el combustible exceda 1,5 por ciento, hacer lo siguiente:

- Seleccionar un aceite con el valor más alto posible de TBN que cumpla con los requisitos de una de estas clasificaciones: API CF, API CF-4, API CG-4 y API CH-4.
- Reducir el intervalo entre cambios de aceite, basando el intervalo en los resultados del análisis de aceite. Asegurarse de que en el análisis de aceite se incluyen un análisis del estado del aceite y un análisis de los metales de desgaste.

Si se opera un motor PC con niveles de azufre en el combustible por encima de 1,0 por ciento, puede ser necesario acortar los intervalos entre cambios de aceite para poder mantener una protección adecuada contra el desgaste.

3.2.4. Mantenimiento básico del sistema de lubricación

Probablemente, el paso más importante para evitar averías relacionadas con el aceite del motor es estar siempre alerta. Específicamente, esto significa estar atento a los primeros indicios de problemas. Una forma de hacer esto es realizar una comprobación básica buscando señales obvias de advertencia. Una comprobación de ese tipo debe hacerse con frecuencia y debe incluir los siguientes 3 elementos clave:

- Una inspección externa del motor, para ver si hay indicios de fugas de cualquier compartimiento.
- Una comprobación del medidor de presión de aceite. Un cambio en este medidor puede indicar desde una bomba de aceite defectuosa hasta una válvula de alivio de presión atascada.
- Una comprobación del medidor de nivel de aceite: un nivel bajo de aceite puede indicar consumo excesivo, fugas o averías de las tuberías de aceite.

Otra regla general importante es seguir los intervalos recomendados para cambiar el aceite y los filtros. Esto es muy importante en la lucha contra la contaminación / degradación del aceite, especialmente con combustibles que tienen altos niveles de azufre.

CONCLUSIONES

1. Se plantearon fundamentos teóricos para el uso del análisis de aceite para detección temprana de fallas en motores Caterpillar, basándose en literatura de Caterpillar.
2. En Guatemala prevalece en los distribuidores de lubricante para motores de combustión interna las Norma SAE y API, las cuales son básicas en las características y propiedades de aceite y grasas, que redundan en el tipo de falla y su prevención.
3. A través del análisis de aceite se identificaron las características de desgaste y falla que provocan la contaminación y degradación de los aceites lubricantes. En el desarrollo del trabajo se proporciona una explicación detallada del procedimiento.
4. Los metales que, principalmente deben controlar su presencia en el aceite lubricante, junto con sus límites son: cobre (Cu), hierro (Fe), cromo (Cr), aluminio (Al) y plomo (Pb); estos medidos en partes por millón (ppm).
5. Las averías más frecuentes que se controlan por análisis de aceite son: falla en cojinetes de cigüeñal, arañazos y desgaste en superficies de muñon del cigüeñal, agarrotamiento de pistones, camisas rayadas, falla en eje de turbocompresor.

RECOMENDACIONES

1. Es importante conocer las propiedades, aplicaciones y normas que rigen los aceites lubricantes para su correcta, selección y aplicación en motores y así disminuir la probabilidad de fallas debido a una mala lubricación.
2. Es vital el uso del análisis de aceite lubricante para conocer de antemano si un equipo está presentando problemas internos, ya sea desgastes excesivos o prematuros, una degradación de las propiedades del aceite por una mala aplicación o por una contaminación con agentes externos.
3. Conocer qué y cuáles son los niveles aceptables de metales de desgaste en el aceite, esto ayudará a llevar un mejor control efectivo del estado del motor.
4. Conocer las fallas típicas por mala lubricación o por desgastes excesivos, previene el suceso y a programar de mejor manera los servicios preventivos para reducir los tiempos parados por reparaciones imprevistas.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALTMANN, Carolina. *El análisis de aceite como herramienta del mantenimiento proactivo en flotas de maquinaria pesada* [en línea]. <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/0607lubricacion.pdf>. 2005, Congreso Uruguayo de Mantenimiento, 9 p. [Consulta: agosto de 2012],
2. Caterpillar Inc. *Knowledge Network by Caterpillar University* [en línea]. <https://kn.cat.com/knhome.cfm>. Estados Unidos de Norteamérica. [Consulta: agosto de 2012].
3. _____. *Publicación SSBD0640-03, el aceite lubricante y su motor*. Estados Unidos de Norteamérica: Caterpillar Inc., 2001, 126 p.
4. _____. *Publicación PSHP6001-08, cómo tomar una buena muestra de aceite*. Estados Unidos de Norteamérica: Caterpillar Inc., 2000, 2 p.
5. _____. *Publicación PSHP7076-02, entienda las pruebas de los servicios SOSSM*. Estados Unidos de Norteamérica: Caterpillar Inc., 2003, 8 p.
6. _____. *Publicación PSGJ0046, servicios SOSSM CAT^R entendiendo los resultados*. Estados Unidos de Norteamérica: Caterpillar Inc., 2007, 15 p.