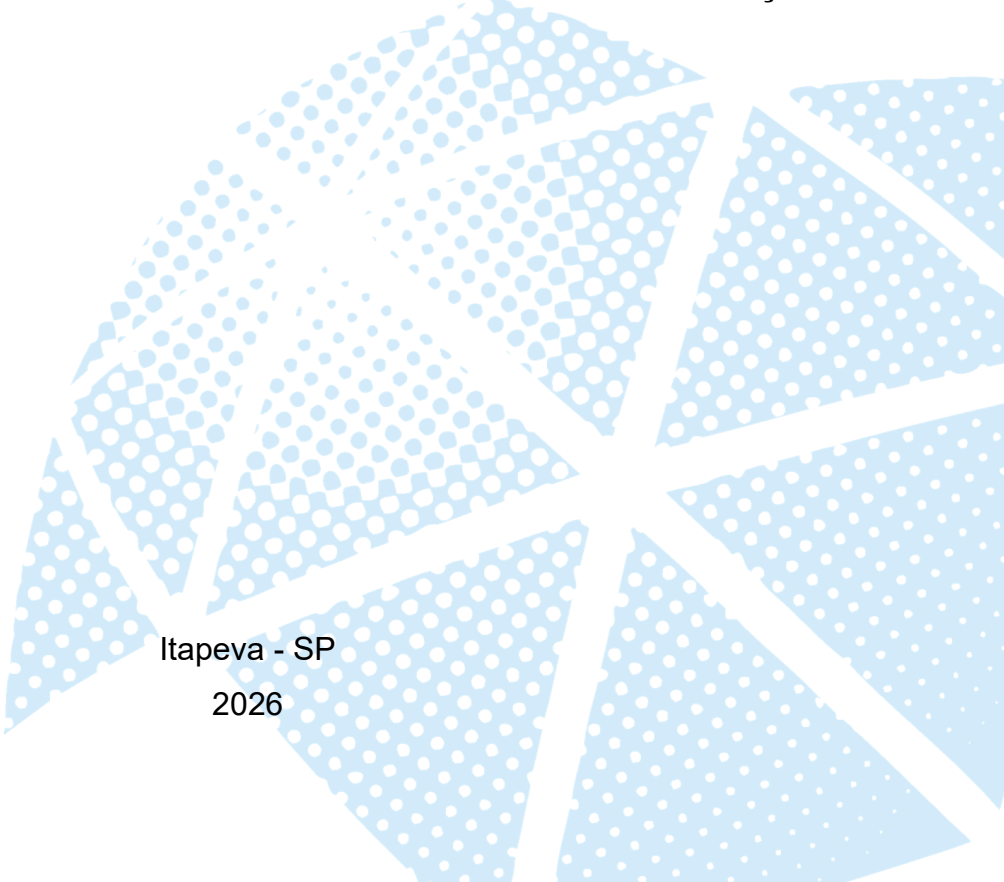


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Instituto de Ciências e Engenharia - Campus de Itapeva

MATHEUS IAN MORAES

**ANÁLISE DE ÓLEOS LUBRIFICANTES COMO FERRAMENTA DE APOIO À
MANUTENÇÃO PREDITIVA EM EQUIPAMENTOS PESADOS DE MINERAÇÃO**

Itapeva - SP
2026



MATHEUS IAN MORAES

**ANÁLISE DE ÓLEOS LUBRIFICANTES COMO FERRAMENTA DE APOIO À
MANUTENÇÃO PREDITIVA EM EQUIPAMENTOS PESADOS DE MINERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Ciências e
Engenharia, Campus de Itapeva, para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Marcel Yuzo Kondo

Itapeva - SP

2026

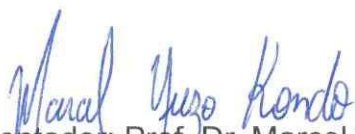
M827a	Moraes, Matheus Ian Análise de óleos lubrificantes como ferramenta de apoio à manutenção preditiva em equipamentos pesados de mineração / Matheus Ian Moraes. -- Itapeva, 2026 69 p. : il., tabs. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Produção) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva Orientador: Marcel Yuzo Kondo 1. manutenção. 2. máquinas de mineração. 3. óleos lubrificantes. 4. motores de combustão interna. I. Título.
-------	--

MATHEUS IAN MORAES

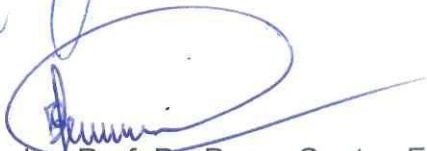
**ANÁLISE DE ÓLEOS LUBRIFICANTES COMO FERRAMENTA DE
APOIO À MANUTENÇÃO PREDITIVA EM EQUIPAMENTOS
PESADOS DE MINERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA



Orientador: Prof. Dr. Marcel Yuzo Kondo
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.



2º Examinador: Prof. Dr. Bruno Santos Ferreira
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.



3º Examinador: Prof.^a Dr.^a Irene Rodrigues Freitas
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

Itapeva, 19/06/2026.

Dedico este trabalho primeiramente à Deus, à minha amada mãe, aos meus queridos avós, à minha namorada e a todos os familiares e amigos que estiveram me apoiando durante essa trajetória ...

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por me proporcionar saúde, sabedoria e resiliência para suportar os momentos difíceis e por me dar a oportunidade de fazer tantas amizades no caminho da conquista desse diploma. Agradeço à minha mãe Vanusa e meu padrasto Altimar, que mesmo sem oportunidades de fazer um curso superior, sempre me incentivaram e ajudaram durante essa jornada, servindo de inspiração e cuidando com tanto amor.

À minha namorada, Maria Luiza, que me apoiou durante o desenvolvimento deste trabalho, com muitas conversas, conselhos e incentivos. Agradeço também à minha família e amigos que tornaram os dias mais fáceis e me lembraram que é preciso viver também.

Ao professor Dr. Marcel Yuzo Kondo por dispor de seu tempo para me orientar e por compartilhar seu grande conhecimento, inspirando e instigando o meu aperfeiçoamento pessoal, sempre confiando em meu trabalho.

A empresa em que se realizou o presente estudo, e todos seus colaboradores, pela disponibilização dos dados utilizados para o desenvolvimento do trabalho. Por fim, são muitos os nomes a serem lembrados por contribuírem direta e indiretamente em meu projeto, mas que merecem também meu profundo agradecimento e respeito.

“Por isso, vos digo que tudo quanto em oração pedirdes, crede que recebestes, e será assim convosco.”

(Marcos 11:24).

RESUMO

Na indústria de mineração, a utilização de equipamentos pesados e ativos de grande porte é a base da operação do setor, sempre representando elevados custos de aquisição e manutenção. Como estratégia para assegurar a disponibilidade, confiabilidade e controlar custos com esses ativos, a manutenção preditiva desempenha um papel fundamental, destacando-se a técnica de análise de óleos lubrificantes. Essa ferramenta permite avaliar o estado de degradação do fluido e o desgaste interno dos componentes de maneira eficaz e com baixo custo de implementação. Este trabalho teve como objetivo analisar a aplicação da análise de óleos lubrificantes como ferramenta de manutenção preditiva em equipamentos pesados de uma indústria mineradora, visando maximizar a vida útil do lubrificante e reduzir custos com trocas antecipadas de óleo. A metodologia consistiu em um estudo de caso numa empresa de mineração do sudoeste paulista, avaliação da base de dados de análises de óleos, definição das propriedades críticas do estado de degradação do óleo de motor e proposição de procedimentos relacionados à manutenção dos equipamentos. O tratamento estatístico dos dados envolveu a aplicação de análises de variância e testes post-hoc, em particular, o teste de Tukey. Os resultados permitiram identificar lacunas nos procedimentos vigentes, estabelecer limites claros de alerta e propor melhorias no plano de manutenção preventiva. Conclui-se que a abordagem preditiva estudada, se aplicada às propostas, deve otimizar os custos com revisões preventivas ao eliminar trocas prematuras de óleo, confirmando a aplicabilidade da análise de óleo como uma ferramenta preditiva para a gestão de frotas pesadas no setor de mineração.

Palavras-chave: manutenção; máquinas de mineração; óleos lubrificantes; motores de combustão interna.

ABSTRACT

In the mining industry, the use of heavy equipment and large-scale assets is the foundation of the sector's operation, always representing high acquisition and maintenance costs. As a strategy to ensure availability, reliability, and to control costs associated with these assets, predictive maintenance plays a fundamental role, with the lubricant oil analysis technique standing out. This tool allows for the effective and low-cost assessment of fluid degradation status and internal component wear. This study aimed to analyze the application of lubricant oil analysis as a predictive maintenance tool in heavy equipment within a mining industry, seeking to maximize lubricant service life and reduce costs related to premature oil changes. The methodology consisted of a case study in a mining company located in southwest São Paulo, an evaluation of the oil analysis database, the definition of critical properties of engine oil degradation status, and the proposal of procedures related to equipment maintenance. The statistical data treatment involved the application of analysis of variance and post-hoc tests, specifically Tukey's test. The results allowed for the identification of gaps in current procedures, the establishment of clear alert limits, and the proposal of improvements to the preventive maintenance plan. It is concluded that the studied predictive approach, if applied to the proposals, should optimize costs with preventive overhauls by eliminating premature oil changes, confirming the applicability of oil analysis as a robust predictive tool for heavy fleet management in the mining sector.

Keywords: maintenance; mining machinery; lubricating oils; internal combustion engines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação dos níveis de desempenho com a manutenção preditiva	20
Figura 2 – Drenagem do óleo de motor de caminhões	38
Figura 3 – Materiais utilizados para coleta das amostras de óleo	40
Figura 4 – Amostras identificadas e prontas para envio	40
Figura 5 – Exemplo de relatório de análise de óleo lubrificante recebido pela empresa	42
Figura 6 – Gráfico do comportamento dos dados de viscosidade cinemática em relação aos limites definidos	49
Figura 7 – Gráfico do comportamento dos dados de TBN em relação aos limites definidos	49
Figura 8 – Gráfico do comportamento dos dados de oxidação em relação aos limites definidos	50
Figura 9 – <i>Box plot</i> dos dados de viscosidade com tempo de serviço	51
Figura 10 – <i>Box plot</i> dos dados de TBN com tempo de serviço	52
Figura 11 – <i>Box plot</i> dos dados de oxidação com tempo de serviço	53
Figura 12 – Gráfico do teste de Tukey da viscosidade com tempo de serviço	56
Figura 13 – <i>Box plot</i> dos dados de viscosidade sem tempo de serviço	57
Figura 14 – <i>Box plot</i> dos dados de TBN sem tempo de serviço	58
Figura 15 – <i>Box plot</i> dos dados de oxidação sem tempo de serviço	59
Figura 16 – Gráfico do teste de Tukey para a viscosidade dos dados sem tempo de serviço especificado	61
Figura 17 – Gráfico do teste de Tukey para o TBN	62
Figura 18 – Gráfico do teste de Tukey para a oxidação	62

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 – Principais métodos padronizados pelo órgão responsável pela classificação de lubrificantes	32
Quadro 2 – Graus de viscosidade para óleos de motor	33
Quadro 3 – Custo médio com revisões preventivas realizadas na empresa	44
Quadro 4 – Limites de alerta e troca imediata para as propriedades críticas do óleo lubrificante de motor	48
Quadro 5 – Sugestão de progressão de intervalo de troca do óleo de motor	64
Quadro 6 – Impacto das alterações no intervalo de troca nos custos com óleo lubrificante	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de relatórios amostrais por equipamento	46
Tabela 2 – Quantidade de análises que atingiram os limites estipulados	50
Tabela 3 – Análise de variância das propriedades críticas das amostras com especificação de tempo de serviço	55
Tabela 4 – Análise de variância das propriedades críticas das amostras sem especificação de tempo de serviço	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACEA	<i>Association des Constructeurs Européens de l'Automobile</i> (Associação dos Construtores Europeus de Automóveis)
API	<i>American Petroleum Institute</i> (Instituto Americano de Petróleo)
APR	Análise Preliminar de Riscos
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ICP	<i>Inductively Coupled Plasma</i> (Plasma Acoplado Indutivamente)
JASO	<i>Japanese Automobile Standards Organization</i> (Organização Japonesa de Padrões Automotivos)
KPI	<i>Key Performance Indicator</i> (Indicador Chave de Desempenho)
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i> (Tempo Médio entre Falhas)
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i> (Tempo Médio de Reparo)
NBR	Norma Brasileira
NMMA	<i>National Marine Manufacturers Association</i> (Associação Nacional de Fabricantes Marítimos)
PCM	Planejamento e Controle da Manutenção
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade de Engenheiros Automotivos)
TAN	<i>Total Acid Number</i> (Número Total de Acidez)
TBN	<i>Total Base Number</i> (Número de Basicidade Total)

LISTA DE SÍMBOLOS

cSt	Centistokes
KOH	Hidróxido de Potássio
mm ² /s	Milímetros quadrados por segundo
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
SO ₂	Dióxido de Enxofre
°C	Graus Celsius
μm	Micrômetro
R (t)	Função de Confiabilidade
λ	Taxa de falhas
%	Percentual
h	Hora
e	Base do logaritmo natural
R\$	Real
v	Viscosidade cinemática
p	Densidade
u	Viscosidade dinâmica
mm KOH/g	Miligramas de hidróxido de potássio por grama
cm	Centímetro
Abs/0.1 mm	Absorbância por 0,1 milímetro
km	Quilômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.2	OBJETIVO GERAL	16
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.4	JUSTIFICATIVA.....	16
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1	MANUTENÇÃO	18
2.1.1	Manutenção Corretiva	18
2.1.2	Manutenção Preventiva	19
2.1.3	Manutenção Preditiva	19
2.1.3.1	<i>Análise de óleo</i>	20
2.2	INDICADORES DA MANUTENÇÃO	21
2.3	LUBRIFICAÇÃO	22
2.3.1	Tipos de lubrificação.....	23
2.4	ÓLEO LUBRIFICANTE	24
2.4.1	Funções do óleo lubrificante	24
2.4.2	Tipos de óleos lubrificantes	25
2.4.2.1	<i>Lubrificantes minerais</i>	25
2.4.2.2	<i>Lubrificantes aditivados</i>	25
2.4.2.3	<i>Lubrificantes compostos</i>	26
2.4.2.4	<i>Lubrificantes graxos</i>	26
2.4.2.5	<i>Lubrificantes sintéticos</i>	26
2.4.3	Propriedades críticas	26
2.4.3.1	<i>Viscosidade.....</i>	27
2.4.3.2	<i>Número de Basicidade Total.....</i>	28
2.4.3.3	<i>Teor de água</i>	28
2.4.3.4	<i>Ponto de fulgor</i>	28
2.4.3.5	<i>Insolúveis</i>	29
2.4.3.6	<i>Metais de desgaste.....</i>	29
2.4.3.7	<i>Número de Acidez Total.....</i>	29
2.4.3.8	<i>Oxidação.....</i>	30
2.4.3.9	<i>Nitração</i>	30

2.4.3.10	Sulfatação.....	30
2.4.3.11	Contagem de partículas	31
2.4.3.12	Índice de viscosidade.....	31
2.4.3.13	Fuligem	31
2.4.3.14	Índice PQ	31
2.4.3.15	Ferrografia.....	32
2.4.4	Classificação dos lubrificantes.....	32
2.4.4.1	Classificação SAE	33
2.4.5	Aditivos	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	35
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA E DOS EQUIPAMENTOS	35
3.2.1	Revisão preventiva	37
3.2.2	Troca de óleo do motor.....	38
3.2.3	Coleta de amostras.....	39
3.3	BASE DE DADOS UTILIZADA	41
3.4	PROPRIEDADES ANALISADAS	42
3.5	TRATAMENTO DOS DADOS.....	43
3.6	MÉTODOS ESTATÍSTICOS.....	43
3.7	ANÁLISE ECONÔMICA	43
3.8	LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	DADOS COM ESPECIFICAÇÃO DO TEMPO DE SERVIÇO.....	51
4.2	DADOS SEM ESPECIFICAÇÃO DO TEMPO DE SERVIÇO	56
5	CONCLUSÃO.....	67
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A manutenção nas indústrias é uma peça fundamental para a gestão dos ativos, sendo abordada com uma visão estratégica diretamente relacionada ao desempenho das empresas. A manutenção afeta diretamente a disponibilidade, confiabilidade e desempenho operacional dos equipamentos (Teles, 2019). Uma intervenção realizada adequadamente pode ou não determinar a continuidade de operação do ativo. Nas atividades do setor de mineração, são normalmente empregados ativos de grande porte, como escavadeiras, perfuratrizes, moinhos, rompedores e caminhões. Cada um desses equipamentos possui um elevado custo de aquisição, quando ocorre uma falha, os custos são ainda maiores, gerando impactos como a perda de produção, alto custo de reparo, necessidade de mão de obra especializada, além dos riscos à segurança dos colaboradores.

Os impactos da manutenção industrial nos custos dos produtos das empresas são elevados. A busca por reduzir custos na manutenção dos ativos tornou-se uma necessidade estratégica que reflete na competitividade e sustentabilidade das empresas. Torna-se necessária a adoção de técnicas de manutenção preditiva, com o objetivo de antecipar falhas, aumentar a vida útil, gerir estrategicamente os ativos e, como consequência, otimizar os custos operacionais. A técnica de análise de óleos lubrificantes é amplamente utilizada pelas empresas por possibilitar a avaliação do estado do lubrificante e do desgaste interno dos componentes do ativo (Kimura; Gonçalves, 2009).

O estudo desenvolvido propõe analisar a aplicação da análise de óleos lubrificantes como ferramenta de apoio à manutenção preditiva em equipamentos pesados utilizados em uma indústria mineradora. A empresa possui um histórico de dados de análises laboratoriais sem o devido tratamento estatístico e acompanhamento. Os relatórios emitidos pelo laboratório responsável evidenciam indícios de trocas prematuras de óleo, com laudos técnicos apontando para a possível continuidade do uso do fluido. A partir de um estudo de caso real, busca-se avaliar o potencial dessa técnica para subsidiar decisões relacionadas ao intervalo de troca do óleo de motor, considerando propriedades críticas do lubrificante, condições de uso dos equipamentos e impactos nos custos de manutenção. Dessa forma, o trabalho pretende contribuir para a identificação de oportunidades de melhoria no plano de

manutenção preventiva, com foco na ampliação tecnicamente fundamentada da vida útil do lubrificante e na redução de trocas antecipadas.

1.2 OBJETIVO GERAL

Analisar a aplicação da técnica de análise de óleos lubrificantes em uma indústria mineradora como ferramenta da manutenção preditiva, identificando os impactos no intervalo de troca de óleos de motor e nos custos com revisão preventiva dos equipamentos pesados.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os principais parâmetros utilizados na análise de óleos lubrificantes e os respectivos limites associados à degradação do óleo de motor;
- Avaliar o comportamento das propriedades críticas do óleo lubrificante em função das condições de uso dos equipamentos pesados analisados;
- Verificar a possibilidade de ampliação dos intervalos de troca do óleo de motor com base nos resultados das análises laboratoriais e no comportamento estatístico das propriedades avaliadas;
- Identificar lacunas nos procedimentos de coleta, registro, acompanhamento e interpretação das análises de óleo;
- Propor melhorias no plano de manutenção preventiva dos equipamentos, considerando o uso da análise de óleo como ferramenta de apoio à manutenção preditiva;
- Estimar os impactos potenciais da ampliação dos intervalos de troca na redução dos custos com óleo lubrificante e revisões preventivas.

1.4 JUSTIFICATIVA

Em um cenário extremamente competitivo para as empresas, reduzir custos com manutenção se tornou uma necessidade de sobrevivência. Os custos gerais com as atividades de carregamento e transporte dentro das mineradoras

representam em aproximadamente 60% dos custos operacionais Quevedo (2009 *apud* Borges, 2013).

Algumas formas de reduzir custos dentro do setor de manutenção são proporcionar o aumento da disponibilidade, eficiência e confiabilidade dos equipamentos. As metodologias de manutenção preditiva são um importante aliado para aumentar esses indicadores e reduzir custos com manutenção.

A análise de óleos lubrificantes se destaca por seu baixo custo, quando comparada com outros métodos, além de ser utilizada para o monitoramento de desgastes, fornecendo resultados importantes que, se interpretados corretamente, podem auxiliar na previsão de falhas e prolongamento da vida útil dos ativos.

O presente estudo tem como justificativa explorar o potencial da análise de óleos lubrificantes na otimização da gestão da manutenção em uma indústria do ramo de mineração e evidenciar os resultados de uma aplicação real.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será apresentada a teoria sobre a qual foi desenvolvida a aplicação da análise de óleos lubrificantes como ferramenta de manutenção preditiva em equipamentos pesados.

2.1 MANUTENÇÃO

Segundo Teles (2019), a manutenção pode ser definida como um conjunto de ações realizadas com a finalidade de garantir o bom funcionamento dos equipamentos, assegurando as boas práticas e cumprimento de exigências legais norteadas pelas normas regulamentadoras. O objetivo da manutenção é evitar a perda da funcionalidade e produtividade dos equipamentos. Em caso de falhas, garantir a retomada das condições requeridas para o seu funcionamento.

2.1.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva costuma ser considerada por muitos uma alternativa mais barata, já que não exige intervenções até o momento da falha. No entanto, quando essa falha ocorre, podem gerar sérios prejuízos financeiros e operacionais, como longos períodos de indisponibilidade do equipamento e impactos negativos em toda a cadeia produtiva da empresa. Em termos conceituais, a manutenção corretiva pode ser definida, segundo ABNT NBR 5462 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994), como o conjunto de ações realizadas após a ocorrência de uma falha, com o objetivo de restaurar o ativo às condições necessárias para desempenhar sua função.

Para minimizar os impactos da manutenção corretiva, as empresas tentam adotar manutenções corretivas programadas, porém, não são todos os equipamentos que suportam operar com componentes comprometidos (Kardec; Nascif, 2009).

Em casos extremos, o setor de manutenção precisa atuar de forma emergencial, dependendo de diversas variáveis para colocar o equipamento em operação novamente, como, mão de obra qualificada, ferramentas específicas e itens necessários em estoque (Kardec; Nascif, 2009).

2.1.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva tem como o objetivo prevenir as falhas catastróficas, por isso, ela é realizada antes da ocorrência de uma falha. Segundo a ABNT NBR 5462 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994), a manutenção preventiva é definida como uma manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos pelo fabricante do ativo, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou degradação do funcionamento de um item.

Esse tipo de intervenção possui um maior impacto nos custos quando comparado com a manutenção corretiva, devido a necessidade da troca de peças e componentes antes de atingirem o fim de sua vida útil. Porém, ao analisar os custos totais, esse tipo de manutenção acaba gerando menores impactos, já que evita possíveis falhas catastróficas, que podem gerar horas ou dias de parada do ativo. Utilizando essa metodologia, é possível planejar estrategicamente os custos, tempo de parada, itens que serão trocados e mão de obra necessária.

A manutenção preventiva pode ser dividida em duas categorias. Segundo Abreu (2023), quando a manutenção ocorre baseada em intervalos de tempo predeterminados, é denominada manutenção preventiva sistemática. Por outro lado, a intervenção realizada quando um sintoma é detectado por inspeção ou controle de funcionamento, ocorre a manutenção preventiva condicionada. Algumas empresas adotam o emprego da manutenção baseada em intervalos fixos estipulados pelo fabricante do equipamento, pela equipe de projeto ou pelo setor de engenharia da empresa.

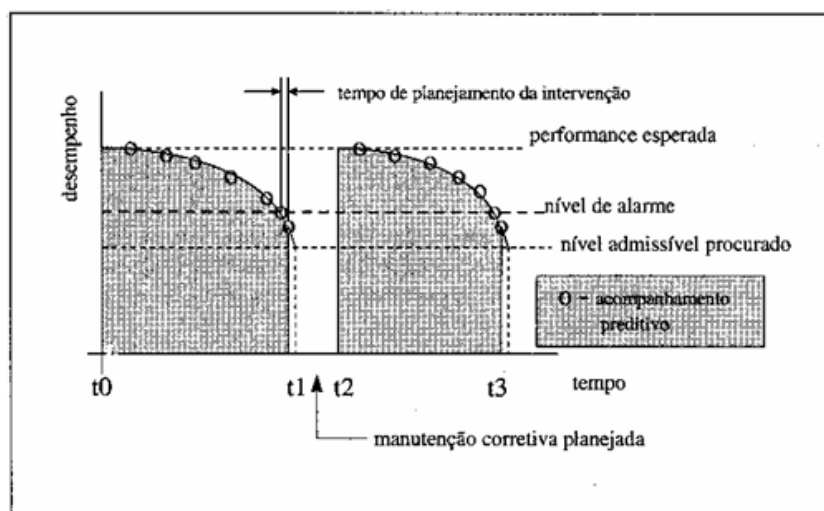
2.1.3 Manutenção Preditiva

Segundo Silva Filho (2020), a manutenção preditiva é a manutenção que permite garantir uma quantidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e corretiva.

A manutenção preditiva proporciona a utilização do componente, peça ou ativo, até muito próximo do fim de sua vida útil, por meio de técnicas de previsão de desgaste e falhas. Existem diversas técnicas que podem ser adotadas para acompanhar as variáveis que podem indicar anomalias em um equipamento. Por

exemplo, análise de óleos lubrificantes, análise de vibrações e análise por ultrassom. Na Figura 1 pode-se verificar a relação dos níveis de desempenho do ativo com a manutenção corretiva planejada, o cenário ideal da manutenção preditiva.

Figura 1 - Relação dos níveis de desempenho com a manutenção preditiva.



Fonte: (Teles, 2019).

A manutenção preditiva, regulada pela ABNT NBR 5462, utiliza da análise de dados coletados por meio de sensores, análises laboratoriais ou medições, para projetar o estado futuro do equipamento, promovendo o acompanhamento do desgaste das peças ou conjuntos do ativo, maximizando assim a vida útil do componente, realizando uma intervenção planejada no momento ideal para retirar o máximo que o componente pode entregar.

2.1.3.1 Análise de óleo

Essa técnica da manutenção preditiva é utilizada para determinar tendências de desgaste interno de componentes mecânicos por meio do acompanhamento de diferentes propriedades para avaliar problemas de forma precoce e verificar a qualidade do óleo lubrificante.

Mesmo quando o óleo é totalmente novo, é necessário o monitoramento de controle de qualidade para garantir que o lubrificante que está entrando na máquina realmente mantém as propriedades lubrificantes exigidas para proteger o motor (Alves, 2016).

Já no caso do lubrificante usado, o fluido atua como um agente de transporte para os contaminantes e partículas gerados pelo atrito entre as peças internas da máquina. Logo, o acompanhamento de suas propriedades e dos teores de metais em suspensão é fundamental. Esse controle auxilia a definição do período correto para a troca do óleo e o acompanhamento da concentração metálica para monitorar o desgaste e prever falhas nos componentes antes que ocorra uma pane funcional (Alves, 2016).

As amostras devem ser coletas e analisadas regularmente, em intervalos predeterminados de forma estratégica. Os dados obtidos através dessa técnica devem ser avaliados e utilizados para nortear decisões estratégicas da manutenção.

2.2 INDICADORES DA MANUTENÇÃO

Para gerenciar a manutenção, os gestores necessitam de estratégias e ferramentas que entreguem de forma eficiente a visão dos resultados e desempenho do setor. Para buscar a máxima eficiência na realização das intervenções de manutenção, a obtenção de dados para avaliação e definição de métricas é essencial na busca de melhores práticas e padrões de trabalho, com o intuito de melhorar os resultados e desempenho.

Para a obtenção de *insights* analíticos, são empregados KPI's (*Key Performance Indicators* ou Indicadores Chave de Desempenho), fornecendo aos gestores uma magnitude do desempenho dos ativos e de seu time. Diferentes indicadores são utilizados para auxiliar na tomada de decisão estratégica. Cada indicador fornece uma visão estratégica para o desempenho de cada processo, atividade ou equipamento. A seleção do indicador que condiz com as necessidades de cada gestão é fundamental.

Entre os indicadores mais utilizados destacam-se o MTBF, que representa o tempo médio entre falhas; o MTTR, que indica o tempo médio necessário para reparo; a disponibilidade, relacionada ao percentual de tempo em que o ativo permanece apto à operação; e a confiabilidade, associada à probabilidade de o equipamento desempenhar sua função sem falhas durante determinado intervalo de tempo. Esses indicadores fornecem uma visão ampla sobre a frequência de falhas, a eficiência das intervenções e a capacidade operacional dos equipamentos. Conforme mostrado por Raposo *et al.* (2019), a implementação da manutenção baseada em

condição do ativo por meio do monitoramento dos resultados de análise de óleos pode aumentar a disponibilidade, reduzir custos com manutenção, aumentar a confiabilidade e diminuir o tempo de inatividade do ativo.

Além dos KPIs tradicionais, a manutenção baseada na condição pode utilizar indicadores operacionais específicos, definidos a partir da variável monitorada e da base de dados disponível. Na análise de óleos lubrificantes, esses indicadores podem estar associados ao estado de degradação do fluido, à qualidade dos registros de manutenção, aos intervalos de troca e aos custos envolvidos nas revisões preventivas. A análise de óleo usado permite avaliar a condição do lubrificante, sua adequação para continuidade em uso e, em certa medida, a condição do equipamento lubrificado (CIMAC, 2011).

Entre os indicadores operacionais aplicáveis à análise de óleos, podem ser citados o percentual de amostras com óleo em condição adequada de uso, o percentual de amostras em condição de alerta, o percentual de amostras com recomendação de troca imediata, o percentual de registros com tempo de serviço informado, o percentual de trocas potencialmente antecipadas e a redução percentual estimada de custos. Esses indicadores permitem transformar resultados laboratoriais em informações gerenciais relacionadas à substituição do lubrificante e à revisão dos intervalos de troca. Em estudos de manutenção baseada na condição, o monitoramento das propriedades do óleo pode auxiliar na identificação de oportunidades para prolongamento controlado dos intervalos de substituição, desde que os parâmetros permaneçam dentro de limites aceitáveis de operação (Raposo *et al.*, 2019).

2.3 LUBRIFICAÇÃO

Quando existe um movimento relativo entre duas superfícies, muitas vezes é necessário buscar a minimização da fricção e o desgaste de ambas. Quando se aplica qualquer substância com a finalidade de reduzir o desgaste e atrito entre as superfícies, essa substância é denominada lubrificante (Silva Filho, 2020).

A lubrificação é um dos principais tipos de intervenção preventiva realizada pela manutenção. Sem lubrificação, muitos movimentos podem não ser realizados de forma correta pelos equipamentos, causando falhas catastróficas, sobrecarga de

sistemas e travamento de articulações. A garantia de uma lubrificação eficiente é crucial para equipamentos industriais e máquinas pesadas.

A lubrificação pode ser explicada como a aplicação de uma camada lubrificante com o intuito de reduzir o atrito e minimizar o desgaste entre duas superfícies em movimento relativo, realizando uma separação parcial ou total entre as partes. Segundo Abreu (2023), estudos revelam que os problemas de lubrificação são uma das principais causas de falhas em equipamentos mecânicos, representando mais de 50% das falhas.

Existem maneiras diversas de promover a lubrificação, variando conforme a geometria das superfícies em contato, sua rugosidade e textura, assim como a carga aplicada, a temperatura, velocidades de rotação e deslizamento, a pressão, condições ambientais, composição dos materiais das superfícies em contato e as propriedades físicas e químicas do lubrificante (Abreu, 2023).

2.3.1 Tipos de lubrificação

São três principais classificações de lubrificação mais abordadas na área da manutenção: Lubrificação total, Lubrificação limite e Lubrificação mista.

Na lubrificação total, também conhecida como lubrificação plena, a película formada precisa necessariamente ter uma espessura superior do que a soma das espessuras das camadas de rugosidade das superfícies, para que ocorra a correta separação. Segundo Abreu (2023), a espessura da película formada pode variar entre 0,025 mm e 0,25 mm. Esse tipo de lubrificação é o mais comum encontrado na maioria das situações em que ocorre o deslizamento contínuo das superfícies, exceto em situações de extrema pressão. Dentro dessa classificação, existem três principais tipos de lubrificação: lubrificação hidrostática, lubrificação hidrodinâmica e lubrificação elastohidrodinâmica.

A Lubrificação limite ocorre quando a velocidade relativa é muito baixa ou a pressão entre as superfícies é elevada, ou o lubrificante não possui viscosidade suficiente para evitar o atrito, aplica-se a lubrificação limite. Situações como quando ocorre a combinação de movimento de rotação e deslizamento e em casos de conjuntos de engrenagens submetidos a altas pressões são exemplos de aplicação da lubrificação limite.

A Lubrificação mista é observada quando se realiza a lubrificação entre superfícies em elevadas pressões, ocorre a ruptura da película lubrificante em alguns pontos, nesses pontos ocorre a combinação entre atritos fluidos e sólidos, devido a combinação do filme lubrificante com algumas asperezas de contato entre as superfícies.

2.4 ÓLEO LUBRIFICANTE

Durante o movimento relativo entre superfícies, deseja-se minimizar a fricção e o desgaste das peças. Segundo Cunha (2005), qualquer substância interposta que infringe a redução do desgaste e da fricção é considerado um lubrificante.

Um óleo lubrificante pode ser definido como a mistura de um óleo base e aditivos que, quando inserido entre duas superfícies, uma estática e outra em movimento, ocorre a formação de uma película protetora.

2.4.1 Funções do óleo lubrificante

Além de lubrificar o sistema, os lubrificantes exercem muitas outras funções. As funções básicas de um lubrificante incluem a redução do atrito, limpeza, proteção contra a corrosão e refrigeração.

O lubrificante tem como ação a formação de uma fina película entre duas superfícies em contato, causando redução no atrito e diminuindo o desgaste entre as partes que podem causar possíveis falhas e quebras catastróficas desses componentes.

Outra importante função do lubrificante é a remoção de partículas de desgaste originadas pela fricção de superfícies que ficam em suspensão no óleo, evitando o acúmulo de partículas e consequente incrustações.

Os lubrificantes utilizados em equipamentos pesados, além de todas as propriedades de lubrificação conhecidas, também atuam como anticorrosivos e anti-desgaste, propriedade adquiridas pela aplicação de aditivos em suas formulações, que protege as peças e componentes contra a corrosão, evitando o aumento no desgaste do sistema.

Em motores de combustão interna, o calor gerado é extremamente elevado e precisa ser dissipado. O óleo lubrificante atua como meio de transferência de calor no sistema, realizando a recirculação e auxiliando na redução da temperatura dos componentes.

2.4.2 Tipos de óleos lubrificantes

Os lubrificantes podem ser divididos em lubrificantes líquidos, lubrificantes gasosos, lubrificantes pastosos e lubrificantes sólidos. Neste estudo, exploram-se os lubrificantes líquidos. Para os óleos lubrificantes utilizados nos motores de equipamentos pesados, uma das principais formas de caracterização é por meio da determinação de sua viscosidade, propriedade que precisa estar dentro dos padrões para um desempenho adequado do sistema de lubrificação.

Esses lubrificantes são classificados com base em sua formulação. Petrobras (1999) evidencia que os lubrificantes podem ser divididos entre minerais, sintéticos, compostos, aditivados e graxos.

2.4.2.1 Lubrificantes minerais

Óleos obtidos pelo processo de destilação do petróleo. As propriedades desse tipo de óleo estão diretamente ligadas à natureza do óleo cru. Sua composição é variada e sempre é formada por muitos hidrocarbonetos pertencentes à classe parafínica, aromática e naftênica. O grupo mais utilizado e com maior importância para a indústria são os óleos minerais.

2.4.2.2 Lubrificantes aditivados

São óleos minerais puros ou sintetizados aos quais são adicionadas substâncias denominadas aditivos, para atribuir ou melhorar, no lubrificante, determinadas propriedades, como proteção anticorrosiva, redução do desgaste e aumento da resistência à oxidação.

2.4.2.3 Lubrificantes compostos

São obtidos através da mistura de óleos minerais com óleos graxos. Apresentam maior lubricidade e melhor capacidade de emulsão na presença de vapores, por isso, é utilizado em aplicações específicas, como em perfuratrizes e cilindros a vapor.

2.4.2.4 Lubrificantes graxos

São os óleos lubrificantes de origem animal ou vegetal. Foram os primeiros lubrificantes utilizados pela humanidade, atendendo as necessidades dos indivíduos daquele período, principalmente aplicado na tração animal. Atualmente, sua utilização é pouco recomendada devido a sua alta sensibilidade a elevação da temperatura, e por oxidar-se com facilidade, podendo dar origem a compostos ácidos e tornar-se obsoleto.

2.4.2.5 Lubrificantes sintéticos

Óleos desenvolvidos em laboratório por meio de processos de polimerização, visando a obtenção de lubrificantes com características específicas, como elevação da resistência a variações de temperatura extremas e maior estabilidade da viscosidade. O elevado custo para a obtenção desse lubrificante limita a sua aplicação a situações específicas em casos nos quais os demais lubrificantes não atendem às especificações necessárias.

2.4.3 Propriedades críticas

Algumas propriedades e características de um óleo lubrificante possuem maior influência em seu desempenho para atender as designações necessárias para um sistema de lubrificação.

O estudo realizado por Raposo *et al.* (2019), que explora a ampliação do intervalo de troca de óleo de motor em ônibus de transporte público, são avaliadas as propriedades de fuligem (matéria carbonosa), viscosidade, TBN, metais de desgaste,

contaminação e partículas, outrora, o autor define que a degradação do lubrificante é afetada pela oxidação, variações na viscosidade, contaminação e perda de aditivos.

Essas principais propriedades são, em geral, o que diferencia as diversas classes de óleos lubrificantes. Essas particularidades caracterizam seu desempenho, durabilidade, qualidade e nos mostram o impacto esperado na performance do sistema de lubrificação e demais componentes que dependem da lubrificação para o seu bom funcionamento. CIMAC (2011), define as principais propriedades normalmente analisadas e o que cada uma representa sobre o estado do óleo lubrificante.

2.4.3.1 Viscosidade

A viscosidade cinemática, também abordada simplesmente como viscosidade, é determinada por meio da medição do tempo em que um fluido leva para escoar por meio de um capilar a uma temperatura controlada. A viscosidade pode ser definida como a resistência ao escoamento de um fluido. Normalmente é expressa como um resultado a 40 ou 100 graus celsius (°C), indicando a temperatura do teste.

De acordo com a norma SAE J300 (1998), a viscosidade do óleo lubrificante deve ser expressa em mm², s⁻¹ ou cSt (centistokes) e definida a 100°C. Essa análise pode ser realizada a temperatura de 40°C, 100°C ou ambas, a depender da metodologia de análise do laboratório em específico. A viscosidade cinemática, por definição, é obtida através da viscosidade absoluta ou dinâmica (Pa·s) dividida pela densidade do óleo, conforme apresentado na Equação 1.

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (1)$$

Alterações na viscosidade do óleo lubrificante durante a operação são acarretadas principalmente pela oxidação e contaminação do fluido (combustível, fuligem, insolúveis, presença de água e partículas sólidas).

2.4.3.2 Número de Basicidade Total

O Total Base Number ou Número de Basicidade Total (TBN) é definido como a alcalinidade do óleo lubrificante e evidencia a quantidade de ácido clorídrico ou ácido perclórico necessária para neutralizar um grama de óleo, expressa em termos de miligramas de hidróxido de potássio (mg KOH/g). O TBN é mensurado pelo método de titulação com ácido. Essa propriedade indica o potencial do óleo lubrificante de neutralizar ácidos gerados devido à combustão interna do motor, que se condensam nas paredes do cilindro e em outras partes. Por exemplo, o enxofre presente no combustível é convertido em óxidos de enxofre, em conjunto com a água formada durante o processo de combustão, esses óxidos de enxofre se condensam nas paredes do cilindro formando ácido sulfúrico, esse ácido precisa ser neutralizado pela alcalinidade do lubrificante.

Reduções do TBN são variações principalmente geradas pelo consumo de óleo do motor, teor de enxofre do combustível e pelas condições de operação do motor do ativo.

2.4.3.3 Teor de água

Geralmente é medido através da titulação Karl-Fischer ou por espectroscopia no infravermelho. A água no óleo lubrificante é um contaminante e com grande potencial de prejudicar o motor, mesmo em pequena quantidade, por isso, os limites de tolerância são extremamente rigorosos.

Traços de água no óleo lubrificante usado tendem a ser inevitáveis, eles podem ser provenientes de vazamentos internos (sistema de arrefecimento), acúmulo de condensação ou uso de separador ajustado incorretamente.

2.4.3.4 Ponto de fulgor

É definido como a menor temperatura na qual uma faísca ou uma chama pode inflamar o vapor do óleo lubrificante. A variação do ponto de fulgor é influenciada majoritariamente pela contaminação por combustível e, em menor proporção, pela degradação do óleo.

Diferentes métodos de ensaio para ponto de fulgor são utilizados, por exemplo os ensaios do tipo “copo aberto” e “copo fechado”. Devido às perdas com evaporação, os resultados obtidos utilizando o método de copo fechado, geralmente são menores do que os resultados obtidos nas análises com o método de copo aberto.

2.4.3.5 Insolúveis

O material sólido isolado do óleo por filtração ou por centrifugação após a adição de um solvente (tolueno, pentano ou heptano) é classificado como insolúvel. A comparação dos valores obtidos só deve ser realizada se o método utilizado for o mesmo, caso contrário, não há confiabilidade na comparação. Casos de contaminação do óleo e degradação dos aditivos, são exemplos de causas para o aumento da quantidade de insolúveis.

2.4.3.6 Metais de desgaste

As partículas metálicas provenientes de desgaste encontradas no óleo lubrificante são medidas por métodos espectroscópicos, geralmente, por espectroscopia, emissão ou absorção atômica. Além de metais de desgaste, os metais podem ser provenientes de aditivos do lubrificante, produtos da combustão ou contaminantes externos, provenientes do líquido de arrefecimento ou do ar de admissão do motor.

A espectrometria de emissão por plasma (ICP) é majoritariamente utilizada para determinar a composição de metais em suspensão nas amostras de óleo lubrificante. Existe a limitação com relação a detecção de partículas maiores que 7 μm , pois não são totalmente vaporizadas no plasma, fornecendo resultados imprecisos. Para essas particularidades a espectroscopia de fluorescência de raios X, ferrometria, ferrografia, quantificação de partículas ou preparo da amostra por calcinação da medição por ICP são recomendados.

2.4.3.7 Número de Acidez Total

O Número Total de Acidez ou Total Acid Number (TAN), evidencia a quantidade de ácidos presentes no óleo lubrificante. Medido pelo método de titulação

com hidróxido de potássio (KOH) ou outras bases. A acidez é mensurada pela quantidade de KOH necessária para a neutralização do óleo, expressa na grandeza de mg KOH/g. O TAN é relevante e normalmente abordado em análises para óleos com baixo TBN e principalmente em motores a gás. Alterações em seu valor são principalmente influenciadas pela degradação do óleo lubrificante.

2.4.3.8 Oxidação

Reação do oxigênio com as moléculas de hidrocarbonetos para formar resíduos carbonosos insolúveis e resinas. A oxidação de um óleo é influenciada pela temperatura de operação e pela contaminação. A ação catalítica de metais de desgaste, como cobre e ferro, intensifica a degradação do óleo.

A oxidação é medida através do método de espectroscopia no infravermelho. Os produtos derivados da oxidação presentes no óleo lubrificante apresentam absorção no comprimento de onda de 1710 cm^{-1} .

2.4.3.9 Nitração

Para a medição da nitração é utilizada uma metodologia semelhante ao método de determinação da oxidação, porém, o comprimento de onda infravermelho analisado é de 1620 cm^{-1} . A nitração é impactada pela degradação do óleo lubrificante e resulta da reação do óleo com óxidos de nitrogênio (NOx).

2.4.3.10 Sulfatação

Os subprodutos de sulfato são provenientes da oxidação dos compostos de enxofre presentes nos aditivos utilizados na formulação do óleo lubrificante ou por conta de contaminação por combustível, resultando da reação do fluido com dióxido de enxofre (SO₂). A sulfatação é medida a partir do mesmo método de determinação da oxidação e nitração, porém, em um comprimento de onda infravermelho de 1150 cm^{-1} . Conforme o TBN diminui, os picos de absorção de sulfatação aumentam.

2.4.3.11 Contagem de partículas

O seu objetivo é determinar e acompanhar, por meio de técnicas de espelhamento ou obscurecimento da luz, ou por análise de imagem das partículas retidas na filtragem do óleo, a tendência do nível de partículas ou de sujeira. O resultado da análise é expresso em quantidade de partículas classificadas por tamanho.

A quantidade e morfologia das partículas são intercorrências de contaminação do óleo, seja através do ar de admissão do motor ou líquido de arrefecimento, condição de desgaste ou produtos gerados da combustão.

2.4.3.12 Índice de viscosidade

Calculado por meio duas medições de viscosidade, em temperaturas de 100°C e 40°C e procura demonstrar a relação entre viscosidade e temperatura do óleo lubrificante. Essa métrica é influenciada pelas propriedades do óleo base e dos aditivos utilizados em sua composição.

Um Índice de viscosidade elevado mostra pouca variação da viscosidade com a variação da temperatura, isso é importante para óleos multiviscosos, devido a sua necessidade de atender uma faixa de viscosidade ao longo de uma faixa de temperatura, permitindo um desempenho ideal sob essas condições variadas de trabalho.

2.4.3.13 Fuligem

A quantidade de fuligem é mensurada pela análise de absorção no infravermelho. O valor é alterado devido a degradação do óleo, combustão e qualidade do tratamento do óleo.

2.4.3.14 Índice PQ

Essa métrica é utilizada para avaliar a quantidade relativa de metais ferrosos em uma amostra de óleo lubrificante em função da quantidade total de detritos ferromagnéticos. O método consiste na avaliação da distorção de um campo

magnético quando a amostra de óleo é colocada nas proximidades do campo controlado dentro do equipamento, a distorção é proporcionalmente à quantidade de detritos ferromagnéticos. Logo, este índice retorna à quantidade de distorção e é independente do tamanho das partículas.

2.4.3.15 Ferrografia

Para a análise de ferrografia, utiliza-se o ferrograma como ferramenta central. Um ferrograma é criado por meio de um campo magnético que alinha as partículas ferrosas com base em seu tamanho, podendo ser realizado pelo método de deslizamento linear por gravidade ou deposição rotativa de partículas. O ferrograma é analisado por um especialista do laboratório para quantificar a concentração, tipo, tamanho e a morfologia das partículas. Essa análise permite identificar os mecanismos envolvidos na formação, tais como corte, fadiga, adesão, entre outros, melhorando a compreensão da condição de desgaste dos ativos.

2.4.4 Classificação dos lubrificantes

No processo de fabricação do óleo, após a determinação de propriedades físicas, composição química e aplicabilidade, é realizada a classificação do lubrificante. A padronização da classificação é de responsabilidade dos órgãos regulamentadores (Alves, 2016). Os métodos de classificação utilizados em diferentes países e aplicações é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Principais métodos padronizados pelo órgão responsável pela classificação de lubrificantes.

Órgão regulador	Método de classificação
SAE (<i>Society of Automotive Engineers</i>)	Classifica o óleo lubrificante por faixas de viscosidade, não levando em conta os requisitos de desempenho.
API (<i>American Petroleum Institute</i>)	Classifica o óleo lubrificante por níveis de desempenho e quanto a sua aplicação. Os óleos utilizados em motores podem ser classificados quanto a seus ciclos e tipo de serviço.

ACEA (<i>Association des Constructeurs Européens de l'Automobile</i>)	Classifica o óleo lubrificante com base em testes do órgão API para aplicações de fabricantes automotivos europeus.
JASO (<i>Japanese Automobile Standards Organization</i>)	Classifica o óleo lubrificante com base em ordem crescente de desempenho.
NMMA (<i>National Marine Manufacturers Association</i>)	Classifica o óleo lubrificante específico para aplicação em motores de popa dois tempos.

Fonte: Alves (2016).

2.4.4.1 Classificação SAE

A classificação SAE leva em consideração apenas a viscosidade do óleo, desconsiderando seu desempenho. Para óleos de motores, são definidos onze graus de viscosidade descritos na Quadro 2.

Quadro 2 – Graus de viscosidade para óleos de motor.

Classificação SAE de viscosidade	Viscosidade máxima de partida a baixa temperatura (mPa.s)	Viscosidade máxima de bombeamento a baixa temperatura (mPa.s) sem tensão de escoamento	Viscosidade cinemática mínima a baixa taxa de cisalhamento (mm ² /s) a 100°C	Viscosidade cinemática máxima a baixa taxa de cisalhamento (mm ² /s) a 100°C	Viscosidade mínima a alta taxa de cisalhamento (mPa.s) a 150°C
0W	6200 a -35	60000 a -40	3,8	-	-
5W	6600 a -30	60000 a -40	3,8	-	-
10W	7000 a -25	60000 a -40	4,1	-	-
15W	7000 a -20	60000 a -40	5,6	-	-
20W	9500 a -15	60000 a -40	5,6	-	-
25W	13000 a -10	60000 a -40	9,3	-	-
20	-	-	5,6	<9,3	2,6
30	-	-	9,3	<12,5	2,9
40	-	-	12,5	<16,3	3,5 (SAE 0W40, 5W40, 10W40)
40	-	-	12,5	<16,3	3,7 (SAE 15W40, 20W40, 25W40, 40)
50	-	-	16,3	<21,9	3,7
60	-	-	21,9	<26,1	3,7

Fonte: Adaptado de SAE J300 (1998).

A letra W, que aparece após o primeiro conjunto de números, indica que o óleo é projetado para utilização em baixas temperaturas, possuindo uma viscosidade

padronizada para a temperatura de 40°C. Em contrapartida, as classificações SAE que não possuem a letra W são destinadas ao uso em altas temperaturas. Nesses casos, a viscosidade dos óleos é avaliada a 100 °C, próximo a temperatura de trabalho dos motores.

Os óleos lubrificantes também podem possuir múltipla graduação, também chamados de óleos multiviscosos. Os números após a letra W indicam a viscosidade do óleo na temperatura de operação do motor. Logo, um óleo 10W40 possui uma viscosidade em alta temperatura igual a um óleo 15W40, ambos são óleos SAE 40, apenas seu desempenho em baixas temperaturas é diferente. Esses óleos são amplamente utilizados, pois oferecem desempenho adequado para aplicações em diferentes faixas de temperatura.

Durante a partida do motor, o óleo está em temperatura ambiente, sua viscosidade deve ser adequada para fluir rapidamente e alcançar todas as partes do motor. Em altas temperaturas, o óleo precisa manter a viscosidade necessária para a formação da película lubrificante. Os óleos multiviscosos facilitam a partida e bombeamento em baixas temperaturas e mantém a viscosidade suficiente para altas temperaturas. Quanto menor o índice W, mais rápido o óleo circula no momento da partida, reduzindo o contato e desgaste do motor (Silva Filho, 2020).

2.4.5 Aditivos

Com o objetivo de aprimorar as propriedades iniciais dos lubrificantes, ou atribuir novas propriedades específicas a esses fluidos, é realizada a adição de compostos químicos ao óleo base, definidos como aditivos (Abreu, 2023).

Os aditivos são incorporados aos óleos básicos com o intuito de aumentar a vida útil do produto, proporcionando características essenciais para manter sua performance de aplicação. Dentre os inúmeros aditivos disponíveis, os principais aplicados nos óleos lubrificantes são antioxidantes, dispersantes, detergentes, antidesgaste, modificadores de atrito, antiespumante, reguladores de viscosidade e ponto de fluidez, anticorrosivos, extrema pressão, antiferrugem, agentes de adesividade e detergentes alcalinos (Alves, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico, serão abordadas as informações sobre a metodologia aplicada, características analisadas, características dos equipamentos e do levantamento de dados.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho tem natureza de pesquisa aplicada, uma vez que busca analisar um problema real relacionado à gestão da manutenção de equipamentos pesados e propor melhorias com potencial de aplicação prática no contexto estudado. Quanto à abordagem, classifica-se como uma pesquisa mista, com predominância quantitativa, pois utiliza dados históricos de análises de óleos lubrificantes, tratamento estatístico e avaliação de custos, ao mesmo tempo em que considera aspectos qualitativos associados à descrição dos procedimentos de manutenção, coleta de amostras e identificação de lacunas operacionais. Em relação aos objetivos, a pesquisa possui caráter descritivo e analítico, pois descreve o processo atual de manutenção e as propriedades críticas do óleo lubrificante, além de analisar o comportamento dessas variáveis com apoio de métodos estatísticos. Quanto aos procedimentos técnicos, o estudo é desenvolvido como um estudo de caso único, apoiado por pesquisa bibliográfica, pesquisa documental e análise estatística de dados secundários, tendo como base informações obtidas em uma unidade industrial do setor de mineração.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA E DOS EQUIPAMENTOS

A empresa estudada atua no ramo de mineração e possui como principais produtos materiais de construção, como cimentos, concretos, argamassas, agregados, plastificantes, aditivos, rejuntas e acabamentos, além de insumos agrícolas. Na unidade de aplicação do estudo, é realizada a produção de agregados (britas e areias), cales e insumos agrícolas.

Para as diferentes atividades realizadas na empresa, são empregados equipamentos móveis específicos. Para a perfuração das rochas e preparação de áreas de detonação, é empregado a ação das perfuratrizes, esses equipamentos

trabalham de segunda a sexta-feira, aproximadamente oito horas por dia. A necessidade de altos esforços para a realização da perfuração exige que o motor desse equipamento trabalhe em altas rotações. Outro equipamento fundamental nas operações de extração do calcário são as escavadeiras, esses ativos trabalham de segunda-feira a sábado, por aproximadamente quatorze horas diárias, exigindo grande esforço do motor por conta da alta carga de trabalho. As carregadeiras são utilizadas também para o carregamento de materiais para movimentação interna e expedição, a sua utilização é intermitente, com ciclos de parada constante, além disso, esse ativo opera todos os dias da semana, parando somente para o abastecimento e lubrificação, essas condições favorecem ao desgaste dos componentes do ativo. Um importante grupo de equipamentos utilizado pela empresa são as carretas de transporte rodoviário, esses equipamentos seguem a mesma jornada de operação das escavadeiras e realizam o transporte de materiais entre duas unidades da empresa, as unidades estão localizadas aproximadamente a uma distância de vinte quilômetros.

Outros ativos como caminhões fora de estrada, caminhão comboio, trator, motoniveladora e caminhão pipa são utilizados pela empresa em sua operação, entretanto, esses equipamentos utilizam outras especificações de óleo lubrificante de motor, por isso, não são avaliados no presente estudo.

Em uma mineradora, as condições severas de trabalho requerem atenção especial para os ativos da empresa. A manutenção preventiva é a abordagem mais utilizada dentro da realidade operacional da empresa, a fim de prevenir falhas catastróficas que podem gerar custos adicionais. Os equipamentos motorizados estão expostos diretamente a condições extremas como altas cargas de material, projeção severa de material particulado, variações climáticas, piso irregular, presença de declives e aclives e longos períodos de operação contínua, essas circunstâncias corroboram para o aumento do desgaste dos componentes.

Dentro da empresa, o setor de planejamento e controle da manutenção (PCM) é responsável pela criação, atualização e acompanhamento dos planos de manutenção dos veículos pesados da empresa, esses planos são definidos pelos fabricantes dos ativos e adaptados às realidades operacionais, atualmente vinculados ao intervalo de horas trabalhadas.

3.2.1 Revisão preventiva

A operação de revisão preventiva se inicia com *check-list* visual do equipamento, visando a identificação de falhas aparentes que podem gerar perda da funcionalidade, diminuição do desempenho ou segurança operacional, como desgaste excessivo de equipamentos expostos, vazamentos de fluídos, folgas, trincas e condições de limpeza fora das especificações.

Em seguida, o mecânico de frotas realiza uma inspeção detalhada nos principais sistemas do ativo. A verificação do sistema do motor é feita com a medição do nível e condições do óleo lubrificante, se atingida a periodicidade recomendada no plano de manutenção, é realizada a troca do óleo lubrificante e dos filtros necessários. No sistema de transmissão de potência, é avaliado a qualidade e níveis dos óleos de diferenciais e transmissão. É inspecionado o sistema de arrefecimento, correias, mangueiras, níveis do líquido de arrefecimento e condição visual dos radiadores, como vazamento e oxidação. O sistema hidráulico do equipamento recebe atenção especial na revisão devido a sua finalidade de realizar funções críticas nos equipamentos, como acionamentos e movimentação de pistões. Durante a revisão, são inspecionados os cilindros e bombas hidráulicas, mangueiras, conexões, nível de óleo lubrificante e filtros. Também é realizada a avaliação do sistema de frenagem, por meio de testes e verificação de desgaste de componentes.

Quando o equipamento possui algum código de falha disponível para consulta via diagnóstico eletrônico é realizada a tratativa da ocorrência. Para finalizar, é realizada uma vistoria externa do ativo, avaliando o estado dos pneus, desgastes estruturais e estéticos, e realiza-se o teste operacional do equipamento. Com a aprovação do mecânico, o equipamento é liberado para operação.

No cenário atual, a empresa onde é realizado o estudo do presente trabalho, realiza a manutenção preventiva dos equipamentos baseando-se apenas nas horas trabalhadas. Cada revisão preventiva é realizada baseada em intervalos de aproximadamente 500 horas de operação para carregadeiras e escavadeiras, 250 horas para as perfuratrizes, e 10.000 quilômetros rodados para carretas de transporte rodoviário.

3.2.2 Troca de óleo do motor

Na empresa estudada, a troca de óleo do motor é realizada em todas as revisões preventivas, sem depender necessariamente do estado de degradação do fluido. Para a realização da atividade, o colaborador responsável deve seguir o padrão operacional pré-estabelecido pela empresa, respeitando todas as normas de bloqueio de energias, recomendações de segurança e o passo a passo para a intervenção.

Inicialmente, o equipamento é estacionado na vaga da oficina destinada à manutenção preventiva, o motor é desligado, aciona-se o freio estacionário e os calços nas rodas traseiras, para evitar movimentação inesperada do veículo. O mecânico responsável pela atividade inicialmente realiza a análise preliminar dos riscos (APR) e prepara os equipamentos de proteção individual (EPI) seguindo os procedimentos de segurança.

Para iniciar a troca de óleo, o motor do equipamento precisa estar com temperatura controlada, para evitar queimaduras. Caso o óleo esteja resfriado, a sua fluidez diminui, aumentando o tempo para o escoamento de todo o volume, por isso, o intervalo para elaboração da APR, separação das ferramentas e preparação dos EPI's é planejado para que a atividade se inicie com o motor ainda morno.

A troca de óleo é iniciada com o posicionamento de uma bacia de contenção sob o ponto de drenagem do cárter, denominado bujão, em seguida, é realizada a abertura do ponto de drenagem de óleo, permitindo o seu escoamento. O processo pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 - Drenagem do óleo de motor de caminhões.



Fonte: Autoria própria (2026).

Esse processo de escoamento é finalizado em cerca de trinta minutos. O óleo contaminado é coletado e transportado para a destinação final, para atender a responsabilidade ambiental e cumprir com as exigências legais.

Realizada a drenagem total do óleo, o bujão do cárter é recolocado e apertado conforme as especificações do equipamento, em seguida, é realizada a remoção do filtro de óleo do motor antigo, nessa etapa, é necessário verificar se a vedação de borracha do filtro aderiu-se ao bloco do motor, sendo necessária a realização de limpeza. Antes de instalar o novo filtro, é realizada a lubrificação prévia da borracha de vedação do filtro com o óleo novo que será utilizado, posteriormente, é realizada a instalação do filtro de forma manual, sem a necessidade de ferramentas para evitar o aperto excessivo, seguindo com o abastecimento do reservatório com o óleo lubrificante de forma gradual, acompanhando o nível por meio da vareta de medição, até atingir a marca especificada.

O motor é ligado por um breve período para a circulação e preenchimento do sistema com o óleo abastecido. Novamente, o mecânico desliga o motor e liga novamente, em seguida, é realizada a aferição do nível de óleo, verificação de vazamentos e outras anormalidades, caso não seja constatada nenhuma ocorrência, o equipamento é liberado para a operação.

3.2.3 Coleta de amostras

Para a realização da coleta da amostra do óleo de motor, o equipamento deve estar em condições normais de operação, com o motor em funcionamento horas antes da coleta, preferencialmente ainda aquecido, fornecendo uma melhor homogeneidade, o que impacta em resultados mais representativos na análise.

A limpeza dos recipientes de coleta de amostras é fundamental para garantir que não ocorra contaminação. Os frascos e mangueiras são enviados lacrados pelo laboratório, a fim de que não ocorra reutilização de recipientes. Para auxiliar na retirada da amostra, é necessário utilizar os equipamentos de coleta. Esses materiais utilizados nas atividades podem ser vistos na Figura 3.

Figura 3 - Materiais utilizados para coleta das amostras de óleo.



Fonte: Autoria própria (2026).

A coleta deve ser realizada com atenção, a fim de evitar contaminações, mantendo a amostra protegida contra poeira, água e partículas sólidas. Ao fim do procedimento, o frasco é fechado, identificado com suas informações e levado para o armazenamento em local apropriado, devidamente identificado, limpo, arejado, sem exposição à luz solar ou calor, sendo necessário realizar o envio para o laboratório responsável com urgência, conforme observável na Figura 4.

Figura 4 - Amostras identificadas e prontas para envio.



Fonte: Autoria própria (2026).

Atualmente, a empresa envia as amostras para um laboratório parceiro. Os resultados são retornados em média vinte dias após o envio. A empresa contratada envia o relatório com os dados de cada equipamento e um laudo técnico com a descrição de possíveis anomalias.

3.3 BASE DE DADOS UTILIZADA

A empresa possui em sua base de dados os resultados de amostras analisadas de cada equipamento, totalizando 46 registros de análises realizadas entre 24/05/2019 e 05/03/2026. Os dados de equipamentos que não possuem como especificação a utilização do óleo de motor 15W40 e os dados referente aos óleos de outros sistemas de lubrificação, como hidráulico ou transmissão, foram descartados. Metade dos relatórios não apresentaram o registro de tempo de serviço, sendo necessária a divisão em grupos de dados com registro de tempo de serviço e dados em geral. O laboratório parceiro devolve os resultados das análises para a empresa conforme apresentado na Figura 5, indicando no laudo os principais pontos identificados e a classificação do estado do lubrificante que pode ser “OK”, “Alerta” ou “Troca”.

Figura 5 – Exemplo de relatório de análise de óleo lubrificante recebido pela empresa.

Lauda/Amostra

A2110250038 - 01045

Produto para Análise

15W40

Local/Obra

Serie Compartimento

Solicitação nº

0015853332

Data Coleta

08/10/2025

Comentários:

Al-NORMAL Cu-NORMAL Cr-NORMAL Fe-NORMAL Si-NORMAL Pb-NORMAL Sn-N
ORMAL Mo-NORMAL Ni-NORMAL Ag-NORMAL Mg-NORMAL Ti-NORMAL V-NORMA
L Zn-NORMAL Ca-NORMAL Mn-NORMAL Ba-NORMAL B- NORMAL P- NORMAL Na
-NORMAL

Hor./Data Troca

21/10/2025

Hor./Data Atual

Tempo Serviço

14835,00

Vol. Compartimento

Reposição

0,0

Trocou o produto na coleta?

Sim

Resultados de análises: amostra ATUAL e 04 últimas

Identificação - Lauda/Amostra	A2110250038	A2307290143	A2405230234	A203323025	A1810220050
Data Coleta	08/10/2025	03/06/2025	18/04/2025	14/02/2023	22/09/2022
Horimetro/Data Atual	329979	313544	133377	164	237062022
Tempo Serviço Do Produto - 15W40/15W40/15W40	14835,00	10000,00	0,00	0,00	0,00
Condição da amostra	✓	✓	✓	✓	✓
Descrição	Norma	Unidade			
Físico Químicos					
Fulgom	ASTM D7666	% m/m	0.3	0.4	0.2
Viscosidade a 40°C	ASTM D445	cSt	105.5	102.2	78.30
Diluição	ASTM D3324	%m	<1%	<1%	<1%
Água	Labor	%	0.00	0.00	0.00
Índice de Precipitação	ASTM D91	%	0.05	0.05	0.05
T.B.N	ASTM D4739	mg KOH/g	6.70	9.17	13.3
Dispersão	ASTM D7899	-	80	89	94
Índice de Contaminação	ASTM D7899	-	0.1	0.4	0.4
Perda Ponderada	ASTM D7899	-	2	4	2
Espectrofotométrico					
Alumínio	ASTM D5185	ppm	0.10	0.39	0.93
Cobre	ASTM D5185	ppm	30.67	1.48	1.84
Cromo	ASTM D5185	ppm	0.88	0.10	0.10
Ferro	ASTM D5185	ppm	21.57	8.26	7.55
Silício	ASTM D5185	ppm	5.07	15.08	5.72
Chumbo	ASTM D5185	ppm	0.05	0.10	0.10
Zinco	ASTM D5185	ppm	853.6	1203	1454
Estanho	ASTM D5185	ppm	0.10	0.10	0.10
Molibdênio	ASTM D5185	ppm	2.51	47.49	56.21
Níquel	ASTM D5185	ppm	0.10	0.10	0.10
Calcio	ASTM D5185	ppm	2715	3423	3304
Sódio	ASTM D5185	ppm	1.21	1.71	1.01
Prata	ASTM D5185	ppm	0.10	0.10	0.10
Boro	ASTM D5185	ppm	160.7	508.6	1.10
Bário	ASTM D5185	ppm	0.10	0.10	0.10
Magnésio	ASTM D5185	ppm	9.05	18.27	1485
Manganês	ASTM D5185	ppm	0.10	0.10	0.10
Fósforo	ASTM D5185	ppm	800.2	1105	1263
Tálio	ASTM D5185	ppm	0.10	0.10	0.10
Vanádio	ASTM D5185	ppm	0.10	0.10	0.10
Infra Vermelho					
Oxidação	ASTM D7889	Abx/O.	5.476	9.273	7.518
Nitração	ASTM D7889	Abx/cm	2.355	3.396	4.444
Sulfatação	ASTM D7889	Abx/O.	14.144	15.941	13.858
Morfologia de Partículas					
BAIXA P.PART.SOLIDA	ASTM D7684	-	Normal		
Fulgem/Prod.Oxidação	ASTM D7684	-		Normal	Normal
Liga Ferrosa	ASTM D7684	-		Normal	Normal

Fonte: Laboroil, ([2026]).

3.4 PROPRIEDADES ANALISADAS

As propriedades analisadas que determinam o estado de degradação do óleo lubrificante foram viscosidade cinemática, TBN e oxidação. Essa definição ocorreu por meio do estudo realizado nos trabalhos desenvolvidos por Cimac (2011), Silva Filho (2020), Kimura e Gonçalves (2009) e Raposo *et al.* (2019).

3.5 TRATAMENTO DOS DADOS

Para o tratamento dos dados, foram utilizados os softwares R e Microsoft Excel.

3.6 MÉTODOS ESTATÍSTICOS

Para a análise estatística dos dados, foram aplicados os seguintes métodos estatísticos:

- *Box plot* para verificação da dispersão dos dados analisados.
- Análise de variância (ANOVA) para validação de diferença entre as médias dos dados para cada propriedade crítica, utilizando o nível de significância de 95%;
- Teste de Tukey para verificação de quais grupos de dados se diferem, utilizando o nível de significância de 95%.

Para a execução do teste no software R, adotou-se as seguintes variáveis para representar os ativos:

- A. Carretas;
- B. Carregadeiras;
- C. Perfuratrizes;
- D. Escavadeiras.

3.7 ANÁLISE ECONÔMICA

Na busca de austeridade em custos, todas as estratégias da organização precisam estar alinhadas. Os custos relacionados à revisão preventiva podem ser divididos entre diretos e indiretos. Para a classe dos custos diretos temos a mão de obra, óleos lubrificantes, filtros e peças de desgaste utilizadas. Ainda no orçamento anual, são estabelecidos valores para esses custos, com base na estratégia de manutenção adotada pela empresa.

Entre os custos indiretos que resultam da manutenção preventiva estão a perda de produção em decorrência da parada do ativo, a ociosidade de mão de obra

do operador de produção que necessita do equipamento móvel para realizar suas atividades e a mão de obra de planejamento da revisão preventiva.

O levantamento dos custos, diretos e indiretos aproximados de uma revisão preventiva estão evidenciados no Quadro 3.

Quadro 3 - Custo médio de uma revisão preventiva realizada na empresa.

Material	Quantidade	Valor unitário	Valor total
Óleo de motor 15W40	40 Litros	R\$ 15,00	R\$ 600,00
Filtro de óleo do motor	1 Unidade	R\$ 340,00	R\$ 340,00
Filtro de combustível	1 Unidade	R\$ 220,00	R\$ 220,00
Filtro de ar-condicionado	1 Unidade	R\$ 450,00	R\$ 450,00
Filtro de ar do motor	1 Unidade	R\$ 500,00	R\$ 500,00
Mão de obra Mecânica	3 horas	R\$ 10,00	R\$ 30,00
Mão de obra- planejamento	4 horas	R\$ 15,00	R\$ 60,00
Mão de obra - operador equipamento	4 horas	R\$ 10,00	R\$ 40,00
Perda de produção	4 horas	R\$ 200,00	R\$ 800,00

Fonte: Autoria própria (2026).

A empresa possui um total de vinte veículos pesados em sua frota que recebem a aplicação do óleo lubrificante de motor SAE 15W40, doze desses equipamentos são acompanhados neste estudo. Os custos avaliados podem ser projetados para as manutenções planejadas durante o ano para os ativos estudados, totalizando aproximadamente R\$ 249.280,00 anuais.

Essas revisões preventivas são de grande importância para os ativos, evitando falhas e melhorando a eficiência do equipamento. Falhas catastróficas geralmente levam a substituição de componentes de custo elevado e mão de obra especializada, muitas vezes terceirizada, de alto custo e necessidade de agendamento, podendo ser necessária a contratação de equipamentos substitutos, caso o equipamento designado para essa situação não esteja disponível.

3.8 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

O presente trabalho limitou-se aos ativos que utilizam óleo de motor SAE 15W40, sendo eles as carretas, carregadeiras, perfuratrizes e escavadeiras. A empresa enfrentou mudanças operacionais relacionadas a responsabilidade técnica dos dados de análise de óleo, justificando limitações encontradas na base de dados como a falta de registros de tempo de serviço do óleo e ausência de controles internos dos dados de análise de óleo. As propriedades do óleo lubrificante avaliadas também foram limitadas para as propriedades definidas como críticas de desgaste do fluido, em específico a viscosidade cinemática, TBN e oxidação. A falta de validação operacional das alterações propostas limitou a avaliação das estimativas realizadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A degradação está diretamente relacionada com a perda das propriedades iniciais do óleo lubrificante determinadas pelo fabricante. Quando o óleo não possui mais as propriedades básicas necessárias para atender as suas especificações, entende-se que ele está no fim da vida útil e deve ser descartado. Esse ponto em específico pode ser entendido como o ponto ótimo de troca ou falha prematura do óleo lubrificante por fatores que precisam ser investigados.

A avaliação do desgaste do óleo lubrificante foi realizada com o tratamento e análise de 46 relatórios amostrais. Durante a avaliação dos dados, foi constatado que 50% dos relatórios não possuem a especificação do tempo de serviço do óleo lubrificante até o momento da coleta, o que limitou a avaliação dos impactos diretos do tempo de serviço nas propriedades críticas. Para continuidade das análises, foi realizada a divisão dos dados para tratamento e análise separadamente, na primeira etapa, os dados com especificação de tempo de serviço foram avaliados, em seguida, todos os dados em conjunto, garantindo a robustez das análises.

A distribuição desses relatórios por grupo de equipamentos é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Quantidade de relatórios amostrais por equipamento.

Equipamento	Número de relatórios analisados	Número de relatórios com tempo de serviço registrado
Carretas	13	5
Carregadeiras	15	8
Perfuratrizes	11	7
Escavadeiras	7	3

Fonte: Autoria própria (2026).

Durante a análise desses dados, foi constatado que todas as amostras enviadas possuíam a descrição de “troca realizada na coleta”, entretanto, 85% dos relatórios analíticos apresentaram em laudo que “o lubrificante se encontra em condições de uso”. Vale salientar também que, 65% das análises estavam

classificadas como “OK”, 20% como “Alerta” e apenas 15% apresentaram a recomendação de troca.

Os limites de degradação dos óleos lubrificantes para que seja recomendada uma ação da equipe de manutenção sempre foram um paradigma. As análises laboratoriais retornam com o laudo dos dados coletados baseados em seus limites próprios, porém, esses limites não são padronizados e o analista da empresa precisa avaliar as recomendações e entender os cenários. Para adequar as estratégias da empresa, as organizações estão definindo seus próprios alarmes (Flitch; Troyer, 2010).

Para os analistas, os alarmes ou limites de desgaste, como são normalmente abordados, tem por objetivo principal estabelecer um parâmetro minimamente confiável com embasamento técnico e científico para definir o ponto ideal para a ação da equipe de manutenção, norteando a tomada de decisão se a intervenção será programada, corretiva ou apenas acompanhamento da progressão.

Cada análise necessita de uma avaliação particular, e os limites e alertas precisam ser adaptados. Parâmetros como elementos aditivos, estabilidade à oxidação, ponto de fulgor e TBN são abordados somente os limites inferiores, propriedades químicas e físicas do lubrificante geralmente utilizam limites superiores e inferiores para alarmes e gatilhos, por conta da estabilidade requerida (Flitch; Troyer, 2010).

Quando o TBN é medido em 2 mg KOH/g ou menos, o lubrificante é considerado inadequado para a proteção do motor, com isto pode ocorrer a corrosão (Kimura; Gonçalves, 2009). Ainda seguindo os conceitos abordados por Kimura e Gonçalves (2009), é recomendado o uso de um óleo até que o seu valor TBN reduza à metade do valor do TBN do óleo lubrificante novo. Segundo Raposo *et al.* (2019), o limite crítico do TBN para recomendação de troca é quando o valor obtido é inferior a 3 mg KOH/g.

Para o presente trabalho, adaptando os limites de viscosidade para gatilho do alerta e troca utilizados por Myshkin e Markova (2018 *apud* Silva Filho, 2020), foi definido como limites de alerta e troca uma abordagem conservadora. Seguindo essa linha de raciocínio, utilizou-se o padrão de limites, porém, utilizando como referência a viscosidade de 109 cSt e TBN de 10,5 mg KOH/g, padrões do óleo novo utilizados pela empresa, definidas pelo fabricante (Shell, 2013).

Como a oxidação aumenta com a degradação do óleo, utilizou-se a abordagem definida por Raposo *et al.* (2019), com limite superior de alerta do óleo lubrificante de 15.000 Abs/0,1 mm. O limite de troca do óleo lubrificante de motor utilizado foi definido por Flitch e Troyer (2010).

Os limites de alerta e recomendação de troca utilizados para analisar o comportamento das propriedades críticas são descritos no Quadro 4, onde a sigla “dp” representa o desvio padrão dos dados.

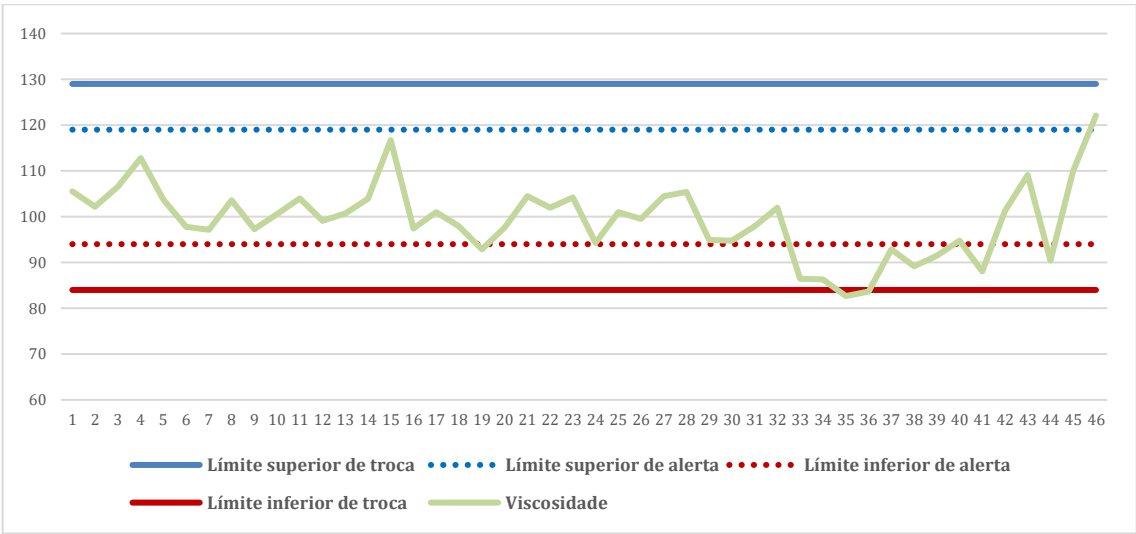
Quadro 4 - Limites de alerta e troca imediata para as propriedades críticas do óleo lubrificante de motor.

Propriedade	Limite superior de alerta	Limite inferior de alerta	Limite superior para troca	Limite inferior para troca
Viscosidade	109 + 10	109 – 15	109 + 20	109 – 25
TBN	-	$10,5 - (3 \times dp)$	-	$\frac{10,5}{2}$
Oxidação	15.000 Abs/0,1 mm	-	$média + (2 \times dp)$	-

Fonte: Autoria própria (2026).

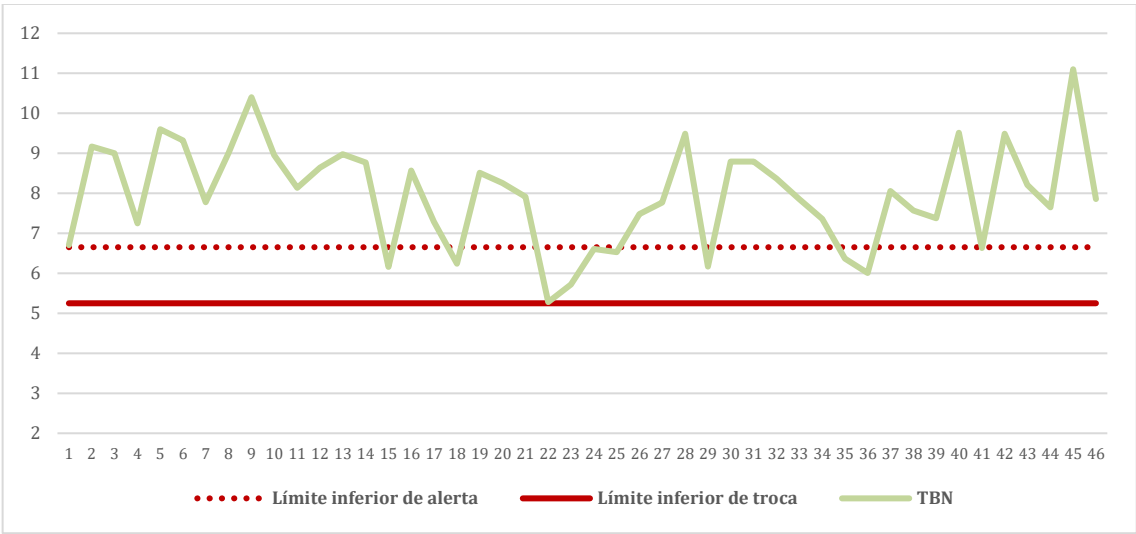
A análise dos dados das propriedades críticas de viscosidade cinemática, TBN e oxidação com relação aos limites de alerta e troca estipulados no Quadro 4 foi realizada através da interpretação das Figuras 6, 7 e 8, que mostram os valores para cada propriedade e o seu comportamento com relação aos limites.

Figura 6 – Gráfico do comportamento dos dados de viscosidade cinemática em relação aos limites definidos.



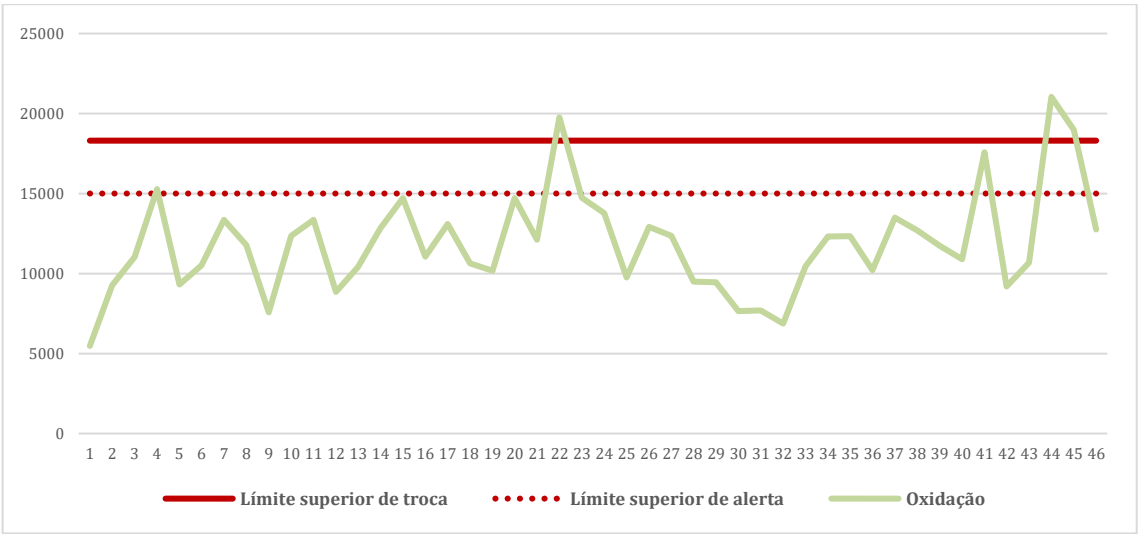
Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 7 – Gráfico comportamento dos dados de TBN em relação aos limites definidos.



Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 8 – Gráfico comportamento dos dados de oxidação em relação aos limites definidos.



Fonte: Autoria própria (2026).

De todos os dados analisados, apenas 5 amostras apresentaram propriedades que ultrapassaram os limites de troca, o que representa apenas 11% das análises, três amostras com oxidação que ultrapassaram o limite e duas amostras com viscosidade abaixo do limite inferior. Quando olhamos para o nível de alerta, quinze amostras ultrapassaram o limite, representando 33% das análises. Essa avaliação mostra que 89% das trocas foram antecipadas quando observamos exclusivamente as propriedades críticas do óleo lubrificante e os limites definidos.

A Tabela 2 evidencia a quantidade de análises que apresentaram valores de propriedades críticas que ultrapassaram os limites de alerta ou troca para cada equipamento.

Tabela 2 – Quantidade de análises que atingiram os limites estipulados.

Equipamento	Alerta (viscosidade)	Troca (viscosidade)	Alerta (TBN)	Troca (TBN)	Alerta (Oxidação)	Troca (Oxidação)
Carretas	0	0	0	0	1	0
Carregadeiras	1	0	6	0	0	1
Perfuratrizes	5	2	3	0	0	0
Escavadeiras	3	0	1	0	1	2

Fonte: Autoria própria (2026).

Observa-se que existem algumas diferenças entre os grupos de equipamentos, cada equipamento apresentou alertas e valores para recomendação de troca em propriedades críticas diferentes. Entretanto, 92% das amostras de carretas não apresentaram necessidade de troca ou alerta, quando observado as propriedades críticas em relação aos limites de alerta estipulados, para carregadeiras 47% tiveram o mesmo parecer e 43% para o grupo das escavadeiras, somente as perfuratrizes que apresentaram um percentual baixo de 27% das amostras sem ultrapassar os limites estabelecidos.

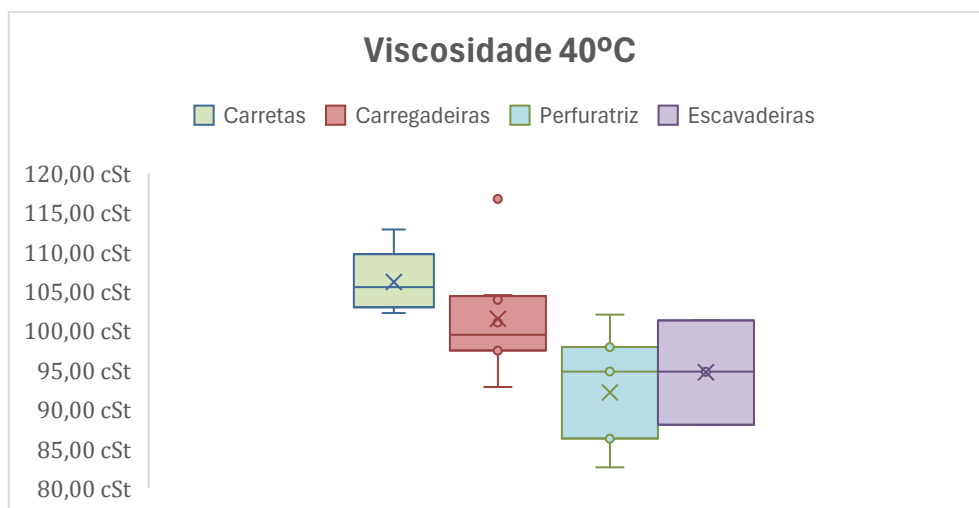
A lubrificação inadequada do motor pode acarretar problemas severos, por conta da criticidade do componente, é necessário o aprofundamento dos estudos desses dados para verificar o comportamento das propriedades críticas de cada equipamento.

4.1 DADOS COM ESPECIFICAÇÃO DO TEMPO DE SERVIÇO

Os relatórios das amostras de óleos de motor 15W40 são armazenadas pela empresa em seu banco de dados e foram utilizados para a realização das análises estatísticas pertinentes ao estudo realizado.

Para entender o comportamento dos dados de cada propriedade para cada tipo de ativo, utilizou-se das análises de diagramas de caixas, também chamados de “*box plot*”. O *box plot* dos dados de viscosidade que possuem registro de tempo de serviço especificados é apresentado na Figura 9.

Figura 9 – *Box plot* dos dados de viscosidade com tempo de serviço.



Fonte: Autoria própria (2026).

Em uma primeira análise é possível observar que o grupo de dados representados pelas carretas apresentam os maiores valores para viscosidade, com a linha mediana e média em torno de 105 cSt, a baixa dispersão dos dados pode ser observada devido a largura da caixa.

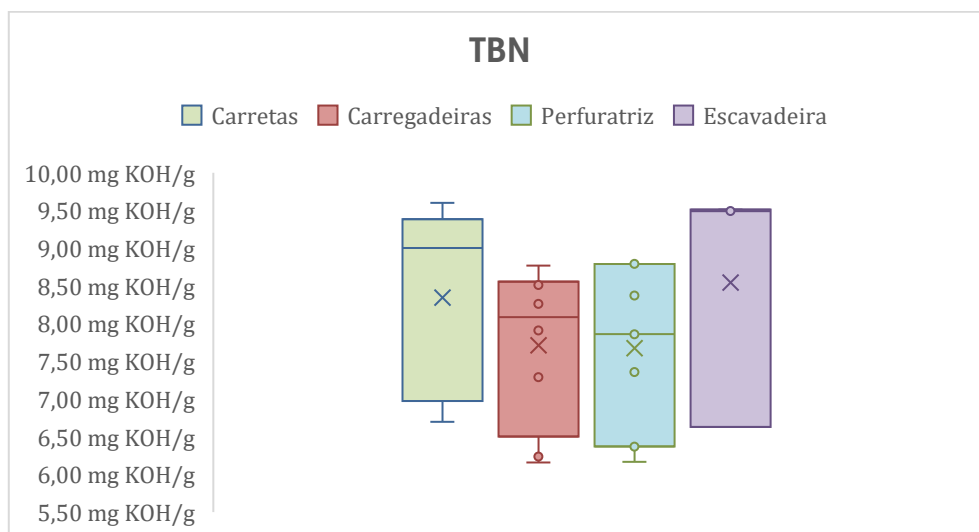
O grupo de dados das carregadeiras apresentou uma média e mediana em torno de 100 cSt, a dispersão da caixa se apresenta bem parecida com os dados de carretas, os dados se concentraram nos dois primeiros quartis, entretanto, um ponto fora da curva, denominado outlier, foi observado, podendo ser resultados de um erro de procedimento analítico, amostra contaminada ou coletada incorretamente.

Para os dados de análises do óleo lubrificante das perfuratrizes, a mediana ficou próxima de 95 cSt, a média em torno de 93 cSt, com destaque para o aumento da caixa, que indica uma maior concentração dos dados no segundo quartil e maior dispersão dos dados, quanto aos equipamentos observados anteriormente.

Os dados pertencentes às escavadeiras apresentaram um comportamento parecido com os dados das perfuratrizes, com média e mediana em torno de 95 cSt, mas, com uma dispersão menor dos dados. Outro ponto importante foi a falta das linhas de mínimo e máximo para os dados das escavadeiras, isso pode ser explicado em razão do número de amostras de escavadeiras, foram possíveis analisar somente três amostras, dificultando análises mais profundas do comportamento desses dados.

O *box plot* dos dados de TBN que possuem registros de tempo de serviço do óleo são apresentados na Figura 10.

Figura 10 – *Box plot* dos dados de TBN com tempo de serviço.



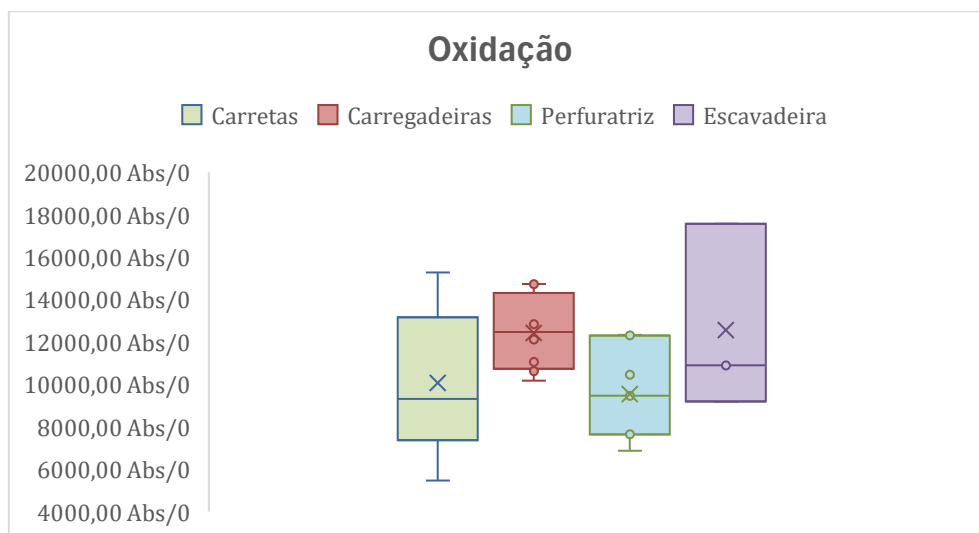
Fonte: Autoria própria (2026).

Os dados de TBN das carretas podem ser observados com uma maior concentração em valores elevados, quando comparado com os outros conjuntos de dados, com a mediana em torno de 9,00 mg KOH/g e uma média pouco menor que 8,50 mg KOH/g, com os pontos mínimo e máximo um acima de 6,70 e 9,60 mg KOH/g. O conjunto de dados das análises das carregadeiras possui uma mediana de 8,0 mg KOH/g e média de aproximadamente 7,7 mg KOH/g, os dados estão mais agrupados que as carretas, com valor mínimo de aproximadamente 6,2 mg KOH/g e valor máximo de 8,8 mg KOH/g.

As perfuratrizes apresentaram dados com mediana de 7,8 mg KOH/g, com média em torno de 7,6 mg KOH/g, a variação dos dados se comporta como os dados das carregadeiras, quando avaliado os valores máximo e mínimo, porém, com maior concentração de dados próximo à média. Os dados de análises das escavadeiras apresentam a mediana próxima de 9,5 mg KOH/g e média em torno de 8,5 mg KOH/g, esse comportamento ocorre por conta do número limitado de amostras, duas das amostras com valores próximos de 9,5 mg KOH/g tornam a mediana igual ao valor máximo, o que dificulta maiores conclusões.

Na Figura 11 é apresentado o gráfico de *box plot* dos dados de viscosidade, que possuem o registro de tempo de serviço, divididos por grupos de equipamentos.

Figura 11 – *Box plot* dos dados de oxidação com tempo de serviço.



Fonte: Autoria própria (2026).

Os dados das carretas apresentaram uma média e mediana entre 9.000 e 10.000 Abs/0.1 mm, com uma alta dispersão dos dados, com valor mínimo de 5.500

e máximo de 15.000 Abs/0.1 mm, indicando uma alta variabilidade dos resultados para oxidação. O comportamento dos dados das carregadeiras foi marcado por valores elevados, com a mediana e média próximas de 12.500 Abs/0.1 mm, porém, com uma menor variabilidade, com valor mínimo de 10.000 e máximo de 14.500 Abs/0.1 mm. Para as perfuratrizes, a média e média se mantiveram próximas de 9.500 Abs/0.1 mm e uma dispersão pouco maior que os dados das carregadeiras, com valor mínimo de oxidação de 7.000 e máximo de 12.000 Abs/0.1 mm. O grupo de dados das escavadeiras apresentou a maior variabilidade dentre os ativos analisados, com mediana em torno de 11.000 Abs/0.1 mm, média pouco maior que 12.000 Abs/0.1 mm e valores que chamaram a atenção que variando do mínimo de 9.000 Abs/0.1 mm ao máximo de 17.500 Abs/0.1 mm.

Em uma análise mais pragmática, observa-se que as carregadeiras e escavadeiras tem uma concentração dos níveis de oxidação em valores mais elevados, demonstrando maior degradação do óleo, porém, com um nível de atenção maior para os dados das carregadeiras, que possuem uma menor dispersão e estão majoritariamente concentrados em níveis superiores.

As carretas e escavadeiras possuem dados amostrais com TBN maior, indicando maior reserva alcalina, entretanto, a maior variabilidade dos dados alerta que é necessário acompanhar constantemente essa propriedade. As carregadeiras e perfuratrizes apresentaram menor dispersão dos dados e, quando comparado com as carretas e escavadeiras, apresentaram dados com valores menores de TBN, podendo descrever uma maior degradação dos óleos nesses equipamentos.

Em geral os dados de viscosidade das carretas possuem uma menor variabilidade, assim como os dados das carregadeiras, porém, com um ponto fora da curva, já o grupo de perfuratrizes apresentou as maiores variações, somente os dados das escavadeiras que dificultam uma análise mais profunda por conta das poucas amostragens.

A análise de variância (ANOVA) tem como objetivo validar a existência ou não de uma diferença significativa entre as médias. Os dados apresentaram um comportamento conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Análise de variância das propriedades críticas das amostras com especificação de tempo de serviço.

Propriedade	F	F crítico	Valor-P
Viscosidade	5,3134	3,1274	0,0079
TBN	0,6671	3,1274	0,5826
Oxidação	1,9029	3,1274	0,1634

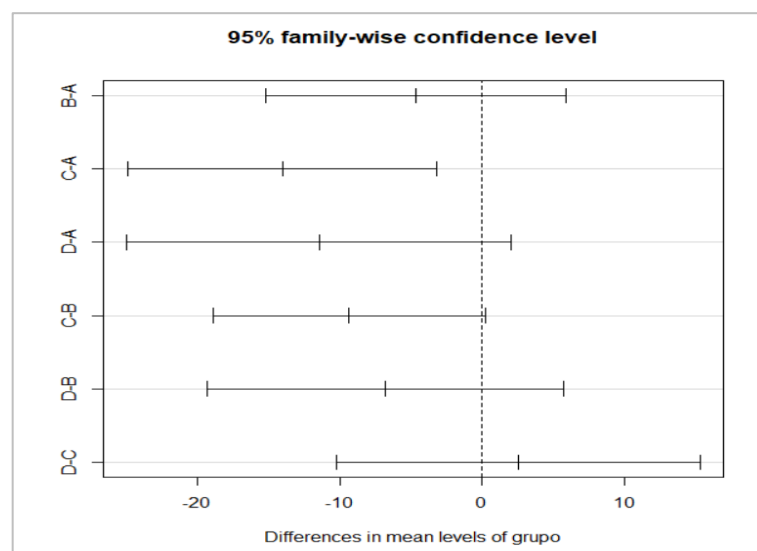
Fonte: Autoria própria (2026).

A ANOVA apresentada na Tabela 3 evidencia a diferença estatisticamente significativa entre os grupos avaliados para a viscosidade, as demais propriedades analisadas não apresentaram diferenças significativas. Observa-se que, para as propriedades TBN e Oxidação, os valores de p obtidos são superiores a 0,05, portanto, não houve evidências estatísticas suficientes para rejeitar a hipótese de igualdade entre as médias. Para a viscosidade, observa-se o valor p obtido de 0,0079, o que é menor que 0,05 mostrando que existem diferenças significativas entre as médias.

Apesar da validação estatística da existência de diferença significativa para a propriedade de viscosidade por meio da ANOVA, não é possível identificar especificamente quais grupos diferem entre si, sendo necessária a aplicação de testes *post hoc* (“depois de”), para o presente trabalho utilizou-se o teste de Tukey.

Na Figura 12, observa-se o gráfico do teste de tukey realizado para os dados com o registro de tempo de serviço do óleo de motor no relatório de análise.

Figura 12 – Gráfico do teste de Tukey da viscosidade com tempo de serviço.



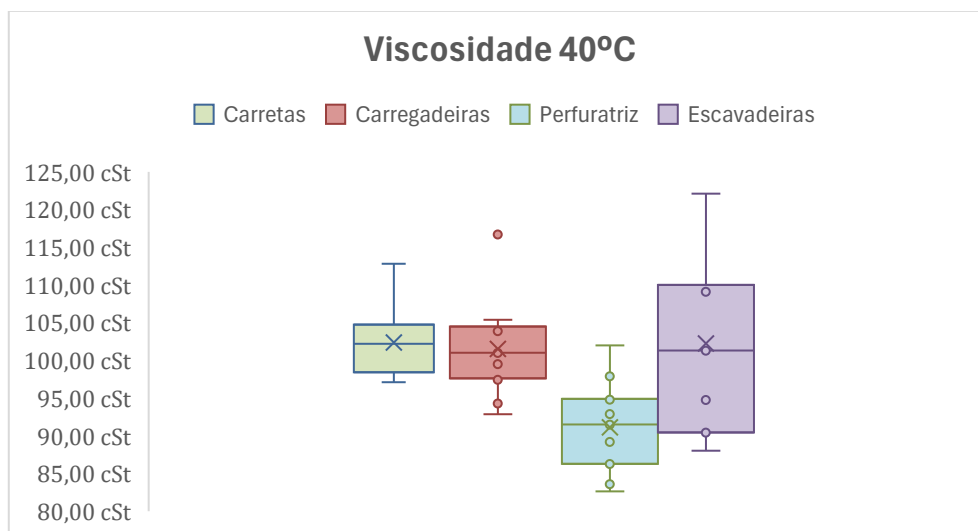
Fonte: Autoria própria (2026).

O teste de Tukey apresentando na Figura 12, mostra que o grupo de equipamentos que possuem uma diferença estatisticamente significativa entre os dados são entre o grupo das perfuratrizes e carretas. Em uma análise conjunta do teste de Tukey e do *box plot* dos dados de viscosidade, observa-se que o conjunto de amostras analisadas do grupo das perfuratrizes apresentou valores inferiores de viscosidade, sugerindo maior degradação relativa do óleo nesse grupo, enquanto, o grupo das carretas apresenta valores superiores para viscosidade sugerindo possíveis contaminações do óleo, conforme abordado por CIMAC (2011).

4.2 DADOS SEM ESPECIFICAÇÃO DO TEMPO DE SERVIÇO

Na Figura 13 é apresentado o gráfico de *box plot* de todos os dados de viscosidade, sem considerar o tempo de serviço, divididos por grupos de equipamentos.

Figura 13 – *Box plot* dos dados de viscosidade sem tempo de serviço.



Fonte: Autoria própria (2026).

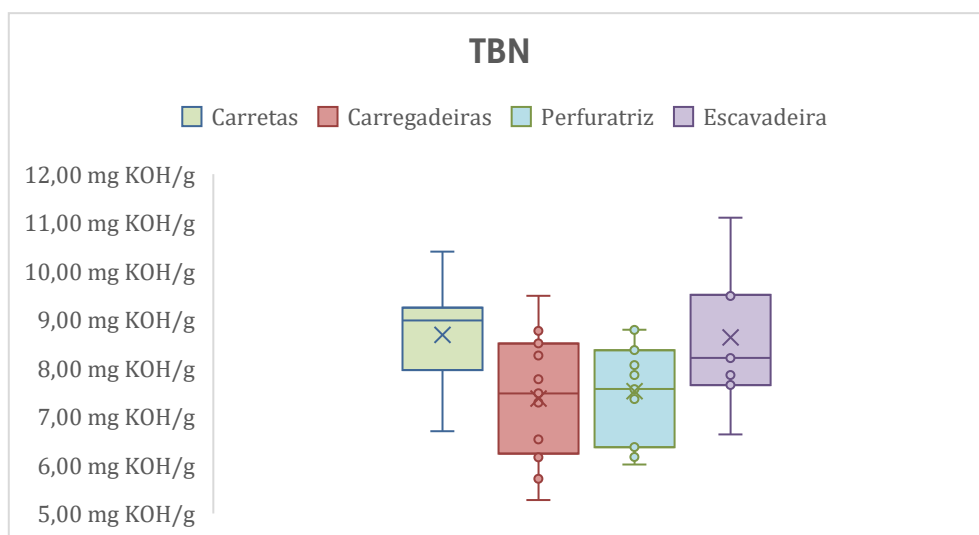
Nota-se no *box plot* apresentado na Figura 13 que existe uma diferença importante entre os grupos de equipamentos. As carretas apresentaram em seus dados uma média e mediana de 102 cSt, com seus dados variando entre 97 e 113 cSt, com uma maior concentração dos dados no segundo e terceiro quartil, mostrando que, apesar da baixa dispersão dos dados, a maioria das análises mostraram viscosidades maiores. Para os dados de análises de amostra de carregadeiras, a média e mediana tiveram um comportamento parecido com os dados das carretas, aproximadamente 101 cSt, com concentração ainda maior dos dados em valores menores de viscosidade, no entanto, uma outlier foi observada, com valor de 117 cSt, indicando uma possível análise fora das especificações. Os menores valores de viscosidade foram observados nos dados das amostras de perfuratrizes, com uma mediana e média em torno de 91,5 cSt e valores dispersos entre 83 e 98 cSt, além da maior concentração dos dados no segundo quartil, evidenciando a predominância de menores viscosidades. Os dados pertencentes às escavadeiras se destacaram por sua elevada dispersão, com média e mediana próximas a 101 cSt, com a maior taxa de ocupação dos dados no segundo quartil, logo, 50% dos dados variando de 90 a 110 cSt, além dos valores mínimo e máximo que variam de 88 a 120 cSt.

Os dados das escavadeiras possuem uma variabilidade muito alta quando comparada aos outros ativos, os dados das perfuratrizes nos mostram uma concentração maior de valores menores de viscosidade, enquanto as carregadeiras e carretas apresentam uma menor dispersão e variabilidade dos dados, com valores

mais estáveis de viscosidade. Sendo assim, boa parte dos óleos ainda poderiam ser utilizados por um maior período.

O *box plot* de todos os dados de TBN sem considerar o tempo de serviço do óleo dividido por grupos de equipamentos é apresentado na Figura 14.

Figura 14 – *Box plot* dos dados de TBN sem tempo de serviço.



Fonte: Autoria própria (2026).

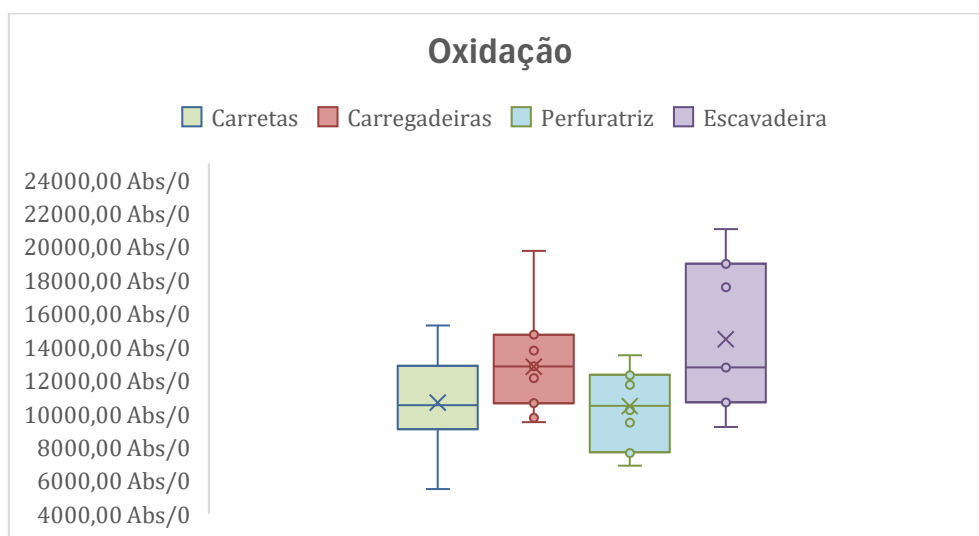
Analisando o gráfico da Figura 14, torna-se evidente algumas diferenças entre os dados amostrais de cada ativo. As carretas se comportaram com maiores valores de TBN, com uma média de 6,7 mg KOH/g e mediana de 9 mg KOH/g, 50% dos dados estão na faixa de 8 a 9,3 mg KOH/g, apresentando a menor variabilidade de dados dentre os equipamentos analisados, com dados distribuídos de forma parecida entre os quartis. Os dados das escavadeiras, assim como os dados analisados das carretas, apresentaram um comportamento parecido, com valores maiores de TBN, a média obtida foi de 8,6 mg KOH/g e mediana de 8,2 mg KOH/g, porém, nota-se uma maior variabilidade dos dados, partindo de um valor mínimo de 6,6 até 11,1 mg KOH/g, com uma maior concentração de dados no segundo e terceiro quartil. As perfuratrizes e carregadeiras apresentaram um comportamento parecido, com média e mediana em torno de 7,5 mg KOH/g, porém, com as carregadeiras apresentando uma maior variabilidade. As perfuratrizes apresentaram uma concentração maior de dados no segundo quartil, que varia de 6,4 a 8,4 mg KOH/g, enquanto seus valores de máximo de mínimo não passam, respectivamente, de 6 e 8,8 mg KOH/g. As carregadeiras, em contrapartida, tiveram sua maior concentração

de dados no segundo quartil, variando de 6,2 a 8,5 mg KOH/g, porém, com valores mínimo e máximo dos dados de 5,3 e 9,5 mg KOH/g, reforçando a variabilidade entre esse conjunto de dados. É evidente o desnivelamento da propriedade abordada, com carretas e escavadeiras apresentando os maiores valores, destacando a menor variabilidade dos dados de análises coletadas em carretas, enquanto, carregadeiras e perfuratrizes apresentaram menores valores de TBN, com as carregadeiras apresentando maior variabilidade.

Essa análise nos mostra que os óleos trocados em carretas e escavadeiras estão, em sua maioria, em condições perfeitas de uso, nos mostrando uma menor taxa de degradação, enquanto, os dados de análises dos óleos de motor de carregadeiras e perfuratrizes, apesar de estarem também em condições de uso, precisa ser observado e acompanhando por conta de sua maior taxa de degradação.

O comportamento dos dados de oxidação do óleo de motor com e sem tempo de serviço especificados são apresentados através do *box plot* na Figura 15.

Figura 15 – *Box plot* dos dados de oxidação sem tempo de serviço.



Fonte: Autoria própria (2026).

Importantes observações podem ser realizadas através do *box plot* apresentado na Figura 15, cada conjunto de dados apresenta um comportamento específico. Nas carretas, é observado uma maior concentração dos dados nos dois primeiros quartis, com média e mediana de, aproximadamente, 10.500 Abs/0.1 mm, apesar da alta dispersão dos dados no primeiro quartil, esse conjunto de dados apresentou a menor variabilidade nos 50% dos dados do segundo quartil. Os dados das carregadeiras mostraram um viés mais elevado, com média e mediana de 12.800

Abs/0.1 mm, diferindo do conjunto anterior, a maioria dos seus dados se concentra no segundo e terceiro quartil, variando de um ponto mínimo de 9.500 Abs/0.1 mm ao máximo de 19.750 Abs/0.1 mm, evidenciando a elevada dispersão dos dados. As perfuratrizes apresentaram dados que se comportaram com estabilidade em valores menores, com média e mediana de 10.500 Abs/0.1 mm e uma maior concentração dos dados no segundo quartil, de 7.650 a 12.300 Abs/0.1 mm, e limites mínimo e máximo de 6.900 e 13.500 Abs/0.1 mm, respectivamente, mostram que, esse ativo, possui pouca variabilidade nos dados de degradação do óleo por oxidação. Analisando a “caixa” das escavadeiras, é nitidamente a maior variabilidade dentre os grupos, com mediana 12.760 Abs/0.1 mm e média de 14.450 Abs/0.1 mm, os dados variam do mínimo de 9.200 Abs/0.1 mm ao máximo de 21.000 Abs/0.1 mm, com uma maior concentração no segundo quartil, e, com a maior dispersão dos dados dentre os ativos analisados, variando de 10.700 a 19.000 Abs/0.1 mm.

A degradação do óleo de motor é atrelada a oxidação do fluído, logo, podemos verificar que as escavadeiras e carregadeiras possuem valores de oxidação maiores sugerindo maior degradação relativa do óleo para esses grupos. O comportamento dos dados das perfuratrizes foi muito satisfatório, com pouca variabilidade e concentrações em baixo nível de oxidação, assim como as carretas, porém, com maiores variações dos dados.

Para verificar a existência de diferenças significativas entre as médias dos dados, é apresentada a análise de variância dos dados com e sem registros de tempo de serviço na Tabela 4.

Tabela 4 – Análise de variância das propriedades críticas das amostras sem especificação de tempo de serviço.

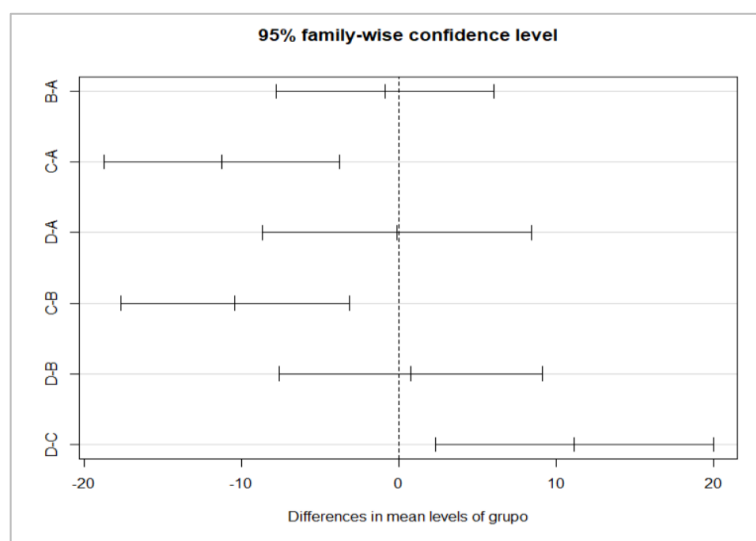
Propriedade	F	F crítico	Valor-P
Viscosidade	7,1120	2,8271	0,0006
TBN	4,2962	2,8271	0,0099
Oxidação	3,8957	2,8271	0,0152

Fonte: Autoria própria (2026).

No teste estatístico mostrado na Tabela 4, foi validada a diferença significativa entre os grupos de ativos avaliados para todas as propriedades. Observa-se que, os dados de viscosidade resultaram em um valor p de 0,0006, os dados de TBN o valor p obtido foi de 0,0099 e para os dados de oxidação o valor p calculado foi de 0,0152, os valores de p obtidos são inferiores a 0,05, mostrando evidências estatísticas suficientes para rejeitar a hipótese de igualdade entre as médias.

Os resultados indicam que o fator avaliado exerce influência significativa sobre os valores de todas as propriedades. Para identificar quais grupos de ativos apresentam diferenças estatisticamente significativas entre as médias para cada propriedade, foi aplicado novamente o teste de Tukey. O teste de Tukey realizado para os dados de viscosidade pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 – Gráfico do teste de Tukey para a viscosidade dos dados sem tempo de serviço especificado.

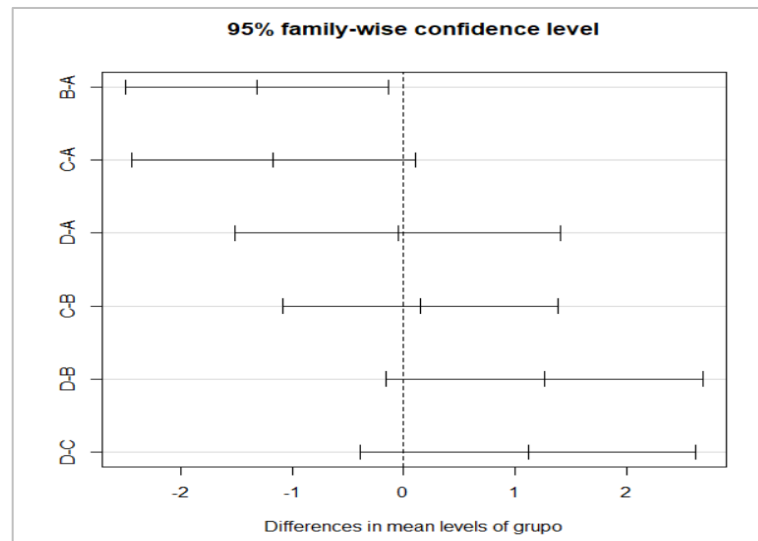


Fonte: Autoria própria (2026).

Nota-se que os dados de viscosidade das perfuratrizes são estatisticamente diferentes dos demais grupos de equipamentos avaliados. Os demais grupos de dados de viscosidade podem ser classificados como estatisticamente iguais.

Na Figura 17, é apresentado o teste de Tukey realizado para os dados de TBN.

Figura 17 – Gráfico do teste de Tukey para o TBN.

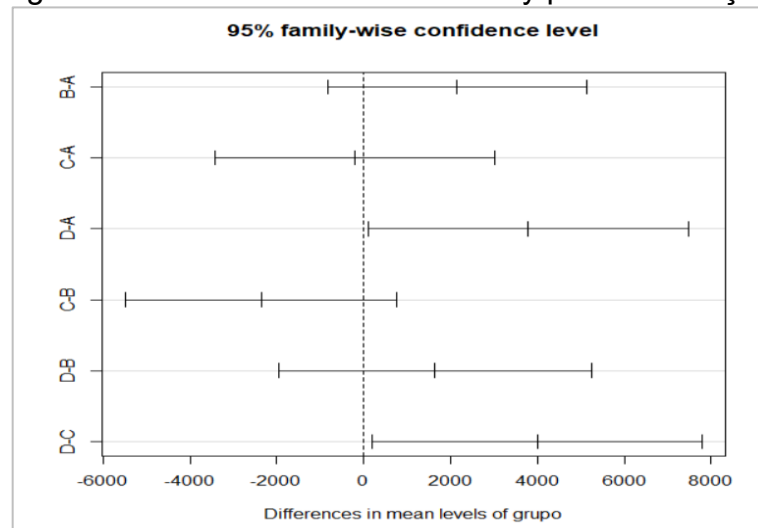


Fonte: Autoria própria (2026).

Observa-se no teste de Tukey para os dados de TBN que a diferença estatística entre as médias é pertencente aos grupos de carretas e carregadeiras. O teste para avaliação dos dados dos demais ativos mostraram que não existem diferenças estatísticas entre os dados.

O gráfico do teste de Tukey dos dados oxidação é mostrado através da Figura 18.

Figura 18 – Gráfico do teste de Tukey para a oxidação.



Fonte: Autoria própria (2026).

Analisando o teste de Tukey realizado para os dados de oxidação, o grupo das escavadeiras se mostrou diferente estatisticamente dos grupos das perfuratrizes

e das carretas. Os demais resultados mostraram que os demais ativos possuem médias de oxidação estatisticamente semelhantes.

O teste de Tukey refinou a análises realizada por meio da ANOVA, mostrando quais equipamentos possuem médias estatisticamente diferentes, afunilando as discussões para os equipamentos e propriedades que se diferem.

Analisando os resultados obtidos por meio da aplicação dos métodos estatísticos, observa-se que as trocas de óleos dos equipamentos estão sendo realizadas de forma antecipada em 89% das vezes, já que, os dados amostrais nos mostram que as propriedades críticas não atingiram os limites estipulados para troca.

É evidente a diferença de comportamento de algumas características críticas de equipamento a equipamento, mostrando que existem fatores particulares que aumentam o desgaste do óleo de motor.

A análise dos dados que possuem a marcação correta do tempo de troca trouxe importantes evidências de troca antecipada, mas impossibilitou análises mais críticas para cada equipamento devido ao número limitado de dados. Por outro lado, os dados das amostras considerando todos os registros, mesmo sem a especificação de tempo de trabalho do óleo, trouxeram indícios mais conclusivos de trocas antecipadas, mesmo sem a especificação de horas, os limites não foram atingidos, as diferenças entre as propriedades críticas também puderam ser avaliadas de forma mais significativa, expandindo ainda mais a diferença de comportamento da degradação do óleo para cada equipamento.

Segundo Raposo *et al.* (2019), estudos baseados no acompanhamento contínuo de amostras de óleo lubrificante de motor demonstram que os intervalos de manutenção podem ser aumentados, gerando simultaneamente o aumento da relação entre custo e eficácia da manutenção. Com base nas análises realizadas, é possível notar a existência de uma lacuna para ganho de tempo de trabalho do óleo lubrificante por meio da manutenção preditiva. A partir do monitoramento das propriedades críticas do lubrificante, foi possível delinear estratégias diferenciadas para a extensão dos intervalos de troca com base no perfil de operação de cada ativo. Para as carregadeiras e carretas, a análise histórica revelou uma valores de degradação do óleo de motor menor, o que fundamentou a proposta de estender o intervalo de substituição em 40%. Por outro lado, as escavadeiras e perfuratrizes demandaram uma abordagem mais conservadora, com um incremento limitado a 20%. Essa cautela se justificou pelo comportamento mais severo observado na degradação do óleo de

motor desses grupos de equipamentos. Sugere-se para a empresa o aumento progressivo do intervalo de troca para os equipamentos estudados, contudo, é necessário adotar um intervalo de progressão e acompanhamento específico para cada equipamento, devido às diferenças citadas anteriormente. É pertinente salientar que as revisões preventivas devem ser realizadas seguindo os planos de manutenção da empresa. As atividades realizadas durante esse procedimento, como troca de filtros, inspeções elétricas e estruturais não foram avaliadas no presente estudo, se limitando somente ao prolongamento gradual da troca de óleo do motor, condicionada ao acompanhamento contínuo das propriedades críticas do óleo. As recomendações de progressão gradual do intervalo de troca do óleo de motor dos ativos estudados são apresentadas no Quadro 5, reforçando a abordagem conservadores para os equipamentos que apresentaram comportamento de maior degradação do óleo de motor a partir das análises dos dados de propriedades críticas.

Quadro 5 – Sugestão de progressão gradual de intervalo de troca do óleo de motor.

Equipamento	Intervalo atual	Aumento inicial	Progressão de aumento (Anual)
Carretas	10.000 km	40%	1.000 km
Carregadeiras	500 horas	40%	50 horas
Perfuratrizes	250 horas	20%	25 horas
Escavadeiras	500 horas	20%	50 horas

Fonte: Autoria própria (2026).

No Quadro 6 é possível verificar a projeção potencial da redução nos custos com a implementação do aumento gradual no intervalo de troca sugerido.

Quadro 6 – Impacto das alterações no intervalo de troca nos custos com óleo lubrificante.

Equipamento (Quantidade)	Quantidade de trocas (atual)	Custo atual	Quantidade de trocas (após implementação)	Custo estimado	Redução
Carretas (4)	48	R\$ 28.800,00	28	R\$ 16.800,00	41,67%
Carregadeiras (4)	16	R\$ 9.600,00	10	R\$ 6.000,00	38,00%
Perfuratrizes (2)	12	R\$ 7.200,00	10	R\$ 6.000,00	16,67%
Escavadeiras (2)	8	R\$ 4.800,00	6	R\$ 3.600,00	35,00%

Fonte: Autoria própria (2026).

Com base nas projeções realizadas, o aumento dos intervalos de troca apenas do óleo lubrificante, estima-se que pode reduzir aproximadamente 7% dos custos com revisões preventivas, o que representa aproximadamente R\$ 18.000,00. O aumento gradual do intervalo de trocas de óleo, condicionada ao acompanhamento contínuo das propriedades críticas e a viabilização de prolongamento gradual do intervalo de revisão preventiva pode aumentar ainda mais essa redução.

Outros mecanismos de degradação e desgaste que não foram avaliados detalhadamente neste estudo, como a contaminação, fuligem, metais de desgaste, partículas ferrosas e condições operacionais específicas. Esses fatores podem influenciar em uma degradação e necessidade de troca prematura do óleo lubrificante e afetar o desempenho do motor, portanto, devem ser acompanhados continuamente pela empresa.

Existe também a possibilidade de melhorar os processos de coleta e envio de amostras, salientando a importância da correta marcação dos dados de tempo de trabalho do óleo, para acompanhamento do desgaste do fluido e desenvolvimento da previsão do ponto ótimo de troca. Uma oportunidade de melhorar o setor de manutenção da empresa é a contratação de um engenheiro da manutenção para o acompanhamento contínuo do desgaste dos óleos lubrificantes e dos componentes internos nos ativos, para a prevenção de falhas catastróficas, promovendo redução dos custos e aumento da disponibilidade dos ativos. Para melhorar o tempo de obtenção dos resultados laboratoriais das amostras de óleo, sugere-se a busca de

novos laboratórios parceiros mais próximos ou a aquisição de equipamentos laboratoriais para a realização do procedimento no laboratório interno da empresa. A adequação por parte da empresa às propostas sugeridas pode contribuir para o aprimoramento do controle operacional da manutenção preventiva, reduzir trocas de óleo de motor de forma antecipada e aumentar a disponibilidade potencial dos ativos, mediante ao acompanhamento por análises laboratoriais periódicas dos impactos dos novos intervalos de troca.

Por fim, a síntese dos principais pontos encontrados e discutidos ao longo deste estudo são:

- Diferença significativa da propriedade de viscosidade principalmente do grupo de perfuratrizes com os demais grupos;
- Diferença significativa da propriedade TBN entre os grupos de carretas e carregadeiras;
- Diferença significativa da propriedade oxidação do grupo de dados das escavadeiras com os grupos de carretas e perfuratrizes;
- 89% das amostras de óleo apresentaram-se em condições de uso quando observado a degradação do óleo;
- 85% das amostras tiveram laudo laboratorial de condições adequadas para o uso;
- 50% dos dados não possuem registro de tempo de serviço;
- Ampliação gradual dos intervalos de troca de óleo (20% para perfuratrizes e escavadeiras, 40% para carretas e carregadeiras);
- Estimativa de 7% de redução de custos das manutenções preventivas (R\$ 18.000,00/ano).

5 CONCLUSÃO

O presente estudo possibilita analisar, de forma aplicada, o uso da análise de óleos lubrificantes como ferramenta de apoio à manutenção preditiva em equipamentos pesados do setor de mineração, evidenciando sua contribuição para a gestão dos ativos industriais e para a avaliação de indicadores operacionais associados à condição do lubrificante, aos intervalos de troca e aos custos de manutenção preventiva.

A partir da definição e do acompanhamento dos parâmetros críticos de viscosidade, oxidação e número de basicidade total, é possível identificar situações em que os óleos lubrificantes de motor ainda apresentou condições adequadas de uso no momento previsto para substituição. Dessa forma, a análise de óleo tem potencial para subsidiar decisões mais técnicas sobre o intervalo de troca, contribuindo para evitar tanto substituições prematuras quanto intervenções tardias.

Os resultados obtidos por meio da análise estatística indicam que os equipamentos avaliados podem apresentar comportamentos distintos de degradação do óleo de motor. Essa constatação reforça a necessidade de acompanhamento específico por tipo de equipamento ou ativo, considerando suas condições de operação, tempo de serviço e histórico de análises.

Também foram identificadas lacunas nos procedimentos de manutenção e no registro das informações utilizadas para tomada de decisão, especialmente quanto ao acompanhamento sistemático dos laudos e à disponibilidade de dados completos sobre o tempo de serviço do óleo. A melhoria desses registros pode favorecer análises mais precisas e apoiar a definição de intervalos de troca tecnicamente mais adequados.

Com base nas premissas adotadas e nos resultados discutidos, a alteração gradual dos intervalos de troca pode ser considerada pela empresa, desde que acompanhada pelo monitoramento contínuo das propriedades críticas do óleo e pelos respectivos limites de alerta e troca. Essa abordagem apresenta potencial para reduzir custos com manutenção preventiva, especialmente por evitar trocas antecipadas de lubrificante ainda em condição aceitável de uso. Os benefícios estimados decorrem de uma análise baseada em dados históricos, a implementação das alterações propostas deve ser acompanhada por monitoramento contínuo dos equipamentos. O estudo demonstrou apenas estimativas de possíveis reduções associadas aos

cenários avaliados, a aplicação das alterações no intervalo de troca não foi realizada e reduções reais não foram avaliadas.

Dessa forma, o trabalho atingiu os objetivos propostos ao identificar parâmetros críticos da análise de óleo, avaliar o comportamento das propriedades analisadas, apontar oportunidades de melhoria nos procedimentos de manutenção e estimar impactos potenciais nos custos. Os resultados evidenciam a aplicabilidade da análise de óleos lubrificantes como ferramenta de apoio à manutenção preditiva em equipamentos pesados.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Raul Amorim de. **Lubrificantes e Lubrificação**. 1. ed. Rio de Janeiro: DPC, 2023.
- ALVES, L. F. N. **Determinação de metais em óleos lubrificantes utilizando a técnica de espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- BORGES, Thiago Campos. **Análises dos Custos Operacionais de Produção no Dimensionamento de Frotas de Carregamento e Transporte em Mineração**. 2013. 116 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2013.
- CIMAC**. *Used engine oil analysis: user interpretation guide*. Recommendation 30. Frankfurt: CIMAC, 2011. Available from: https://www.cimac.com/cms/upload/Publication_Press/Recommendations/Recommendation_30.pdf. Access in: 13 jun. 2026.
- CUNHA, R. C. **Análise do estado de conservação de um redutor de velocidade através da técnica de partículas de desgaste no óleo lubrificante auxiliada pela análise de vibrações**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.
- FITCH, Jim; TROYER, Drew. **Oil Analysis Basics**. 2. ed. Tulsa: Noria Corporation, 2010.
- SILVA FILHO, Leonardo Pereira da. Análise preditiva do óleo lubrificante usado em sistemas automotivos de equipamentos e maquinário pesado. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v. 16, n. 1, 2020. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/revistagi/article/view/11392>. Acesso em: 3 fev. 2026.
- KARDEC, Alan; NASCIF Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.
- KIMURA, R. K.; GONÇALVES, A. C. **Uso da técnica de análise de óleo em motores diesel estacionários, utilizando misturas de biodiesel e diferentes níveis de contaminação do lubrificante**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.
- LABOROIL. **Laboratório de análise**. [2026]. Disponível em: <https://www.laboroil.com.br/>. Acesso em: 5 mar. 2026.
- PETROBRAS. **Lubrificantes**: fundamentos e aplicações. Rio de Janeiro: Petrobras, 1999.

RAPOSO, Hugo; FARINHA, José Torres; FONSECA, Inácio; FERREIRA, L. Andrade. *Condition monitoring with prediction based on diesel engine oil analysis: a case study for urban buses*. Actuators, Basel, v. 8, n. 1, artigo 14, 2019. DOI: 10.3390/act8010014.

SAE. **Automotive Driveline Lubricant Viscosity Classification**: SAE Standard J306_202502. Revised February 2025. Issued March, 1998. International Technical Standard. [S. l.]: SAE, 2025. Available from: https://doi.org/10.4271/J306_202502. Access in: 4 jun. 2026.

SHELL. **Shell Rimula R4 X 15W-40 (CI-4/E7/DH-1)**: ficha de dados técnicos. Versão 4.0. [S. l.]: Shell, 2013. Disponível em: [https://www.luboil.pt/documentos/pdf/GPCDOC_Local_TDS_Portugal_Shell_Rimula_R4_X_15W-40_\(CI-4_E7_DH-1\)_pt_TDS.pdf](https://www.luboil.pt/documentos/pdf/GPCDOC_Local_TDS_Portugal_Shell_Rimula_R4_X_15W-40_(CI-4_E7_DH-1)_pt_TDS.pdf). Acesso em: 10 mai. 2026.

TELES, Jhonata, **Bíblia do RCM: O Guia Completo e Definitivo da Manutenção Centrada na Confiabilidade na Era da Indústria 4.0**. 1. ed. Brasília: ENGETELES, 2019.