



FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC  
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSO  
GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

LUIZ ENRIQUE DE MATOS ASSIS

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO IMPACTO DA EXTENSÃO DO  
INTERVALO DE DRENAGEM DE ÓLEO LUBRIFICANTE COM  
CLASSIFICAÇÃO *API CI* PARA MOTOR CICLO DIESEL

Salvador

2016

LUIZ ENRIQUE DE MATOS ASSIS

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO IMPACTO DA EXTENSÃO DO  
INTERVALO DE DRENAGEM DE ÓLEO LUBRIFICANTE COM  
CLASSIFICAÇÃO *API CI* PARA MOTOR CICLO DIESEL

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* da Faculdade Tecnologia SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dra. Lilian Lefol Nani Guarieiro

Salvador  
2016

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

A848a Assis, Luiz Enrique de Matos

Avaliação experimental do impacto da extensão do intervalo de drenagem de óleo lubrificante com classificação API CI para motor ciclo diesel / Luiz Enrique de Matos Assis. – Salvador, 2016.

94 f. : il. color.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lilian Lefol Nani Guarieiro.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial - GETEC) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2016.

Inclui referências.

1. Óleo lubrificante. 2. Motor diesel. 3. Confiabilidade – Óleo lubrificante. 4. Drenagem de óleo lubrificante. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Guarieiro, Lilian Lefol Nani. III. Título.

CDD: 621.89

## Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

### Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada "Avaliação experimental do impacto da extensão do intervalo de drenagem de óleo lubrificante com classificação API CI para motor ciclo diesel", apresentada no dia 28 de abril de 2016, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientador:



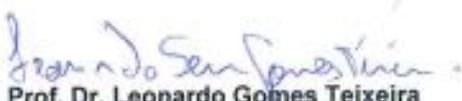
Prof. Dr. Lilian Lefol Nani Guarieiro  
SENAI CIMATEC

Membro Interno:



Prof. Dr. Valter de Senna  
SENAI CIMATEC

Membro Externo:



Prof. Dr. Leonardo Gomes Teixeira  
UFBA

Membro Externo:



Prof. Me. Miguel Andrade Filho  
SENAI CIMATEC

Dedico este trabalho a Deus que nos criou e foi criativo nesta tarefa. Seu fôlego de vida em mim foi sustento e me encorajou para questionar realidades e propor sempre um novo mundo de possibilidade.

## AGRADECIMENTOS

À minha família, por sua capacidade de acreditar e investir em mim. Mãe, seus cuidados e dedicação foram que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

A minha esposa Daniella e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

Agradeço a minha amiga, professora e orientadora Lilian Lefol que, teve bastante paciência me ajudando a concluir este trabalho, me estimulando a uma imersão ainda maior num tema que tanto me agrada, agradeço também aos meus professores do curso que mostraram o quanto estudar é bom.

Agradeço ao mundo por mudar as coisas, por nunca fazê-las serem da mesma forma, pois assim não teríamos o que pesquisar, o que descobrir e o que fazer, pois através disto consegui concluir a minha monografia.

## RESUMO

As análises de óleos lubrificantes de motores ciclo diesel são importantes como sistema gerador de informações à manutenção mecânica do motor, principalmente para previsão de custos e programação de drenagem do óleo em serviço. A confiabilidade da permanência destes óleos no cárter pode também ser tratada de maneira mais assertiva através do monitoramento contínuo do óleo a cada período de quilometragem. Apesar de muitos usuários de veículos automotores acreditarem não ter problemas a extensão do período de troca do óleo lubrificante, tendo como benefício a redução do custo de manutenção do veículo. Deste modo, este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto da extensão do intervalo de drenagem de óleo lubrificante com classificação API CI para motores ciclo diesel. O óleo lubrificante em análise foi drenado de vinte ônibus Volkswagen (modelo 17230 EOD, ano 2010 e 2011, motores ciclo diesel, fabricante MWM) de regime operacional estritamente urbano. Foram realizadas análises de óleo do motor em diferentes períodos de utilização (10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 mil Km) com intuito de observar o comportamento das variáveis: oxidação, viscosidade e desgaste metálico (teor de ferro, cobre e silício). A viscosidade e oxidação apresentaram comportamento semelhantes, apresentando uma redução na dispersão dos valores entre 20.000 e 25.000 Km rodados, justificados pela reposição de óleo lubrificante no motor. O teor de ferro apresentou aumento com o período de utilização do óleo atingindo valores críticos a partir dos 30.000 Km. A concentração de cobre aumentou próximo ao limite máximo permitido pelo fabricante do motor em 30.000 Km. O contaminante externo silício apresentou um comportamento já esperado, com clara tendência de aumento ao longo da utilização atingindo níveis críticos também a partir dos 30.000 Km. Os resultados obtidos demonstram que a qualidade do óleo lubrificante utilizado não reflete em uma extensão confiável do período de troca em relação aos 30.000 Km indicados pelo fabricante. Programas de manutenção preditiva, relacionados ao monitoramento do óleo lubrificante em empresas que possuem grandes frotas de veículos, são de suma importância para prevenir possíveis problemas mecânicos do motor.

Palavras-chave: óleos lubrificantes, motor diesel, confiabilidade, drenagem de óleo lubrificante

## ABSTRACT

The analysis of lubricating oils for diesel engines are important as information generating system for mechanical maintenance of the engine, mainly for cost estimation and oil drain programming service. The reliability of the permanence of these oils in the crankcase can be treated more assertively through continuous monitoring of oil every mileage period. Append of many users of motor vehicles have no problems believing the extent of the lubricating oil change period, with the benefit of reducing vehicle maintenance costs. Thus, this study aimed to assess the impact of the extension of the lubricating oil with API CI classification drain interval for diesel engines. The lubricating oil analysis was drained twenty Volkswagen bus (model 17230 DOE, 2010 and 2011, diesel engines, MWM manufacturer) strictly urban operating system. Engine oil analyzes were performed in different periods of time (10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40 thousand kilometers) with the intention of observing the behavior of the variables: oxidation, viscosity, wear metal (iron content, copper and silicon). The viscosity and oxidation showed similar behavior, a decrease of values between 20,000 and 25,000 Km rotated justified by replacement of lubricating oil in the engine. The iron content showed an increase in oil use period, reaching critical values from 30,000 km. The copper concentration increased close to the maximum allowed by the engine manufacturer at 30,000 Km. The external silicon contaminant introduced an already expected behavior with clear upward trend over the use reaching critical levels from 30,000 Km. The results show that the quality of the lubricating oil used does not reflect in a reliable extension of the trading period compared to 30,000 Km indicated by the manufacturer. Predictive maintenance programs, related to monitoring of the lubricating oil in companies with large fleets of vehicles, are of great importance to prevent possible engine mechanical problems.

Keywords: lubricating oils, diesel engine, reliability, lubricating oil drain

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sumário dos regimes de lubrificação.....	18
Tabela 2 – Temperaturas médias no motor Diesel.....	29
Tabela 3 – Tabela de classificação SAE J300.....	30
Tabela 4 – Tabela de classificação API para óleo lubrificante de motor ciclo diesel.....	32
Tabela 5 – Efeitos da contaminação no motor Diesel.....	37
Tabela 6 – Artigos científicos relacionados à lubrificação de motores.....	40
Tabela 7 – Especificações técnicas do motor.....	45
Tabela 8 – Rota dos veículos analisados.....	46
Tabela 9 – Planejamento de coletas de óleo lubrificante.....	47
Tabela 10 – Especificações e aprovações do óleo lubrificante.....	48
Tabela 11 – Características típicas do lubrificante.....	48
Tabela 12 – Métodos de análise utilizados na avaliação dos óleos lubrificantes.....	50
Tabela 13 – Variação da viscosidade.....	51
Tabela 14 – Limite máximo de oxidação.....	52
Tabela 15 – Limites máximos para presença de metais.....	53
Tabela 16 – Controle de reabastecimentos de óleo lubrificante durante o período analisado.....	54
Tabela 17 – Resultados obtidos para viscosidade (cSt à 100°C).....	57
Tabela 18 – Resultados obtidos para o grau de oxidação do óleo lubrificante API CI com acúmulo de rodagem.....	60
Tabela 19 – Teor de ferro presente no óleo lubrificante API CI com acúmulo de rodagem.....	63
Tabela 20 – Teor de cobre presente no óleo lubrificante API CI com acúmulo de rodagem.....	66
Tabela 21 – Teor de silício presente no óleo lubrificante API CI com acúmulo de rodagem.....	68

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demanda de lubrificantes no Brasil.....	5
Figura 2 – Esquema dos requisitos de um motor para produção de trabalho.....	7
Figura 3 – Conjunto Pistão, Biela e Virabrequim.....	8
Figura 4 – Esquema de injeção direta de combustível.....	9
Figura 5 – Esquema de injeção indireta de combustível.....	10
Figura 6 – Ciclos de combustão do motor Diesel.....	10
Figura 7 – Sistema de lubrificação de motores Diesel.....	12
Figura 8 – Cárter de óleo lubrificante.....	13
Figura 9 – Pescador de óleo lubrificante.....	14
Figura 10 – (a) bomba de engrenagem; (b) Bomba de rotor.....	14
Figura 11 – Representação em corte de um filtro com elemento filtrante.....	15
Figura 12 – Esquema de lubrificação por circulação.....	16
Figura 13 – Lubrificação por salpico no virabrequim.....	17
Figura 14 – Curva de Stribeck em função do parâmetro de filme.....	18
Figura 15 – Conjunto de pistão e anéis de segmento.....	20
Figura 16 – Atrito mecânico total do motor.....	21
Figura 17 – Detalhe do contato entre o anel e o cilindro.....	22
Figura 18 – Conjunto de eixo, tuchos e válvulas.....	23
Figura 19 – Detalhe de balancim roletado.....	24
Figura 20 – Esquema simplificado da produção do óleo lubrificante.....	26
Figura 21 – Comparativo de desempenho API – motores Diesel.....	33
Figura 22 – Principais problemas na câmara de combustão.....	36
Figura 23 – Ilustração do chassi do veículo VW 17230 EOD.....	45
Figura 24 – Duto da vareta de medição do nível de óleo lubrificante.....	49
Figura 25 – Bomba manual de sucção + vasilhame plástico.....	49
Figura 26 – Esquema demonstrativo do Boxplot.....	55
Figura 27 – Avaliação da viscosidade do óleo API CI com acúmulo de quilometragem...58	
Figura 28 – Avaliação da viscosidade do óleo API CI com acúmulo de quilometragem utilizando <i>box plot</i> .....	59

Figura 29 – Avaliação do grau de oxidação do óleo lubrificante API CI com acumulo de rodagem.....	61
Figura 30 – Avaliação do grau de oxidação do óleo lubrificante API CI com acumulo de rodagem utilizando <i>box plot</i> .....	61
Figura 31 – Avaliação do teor de ferro no óleo lubrificante com acumulo de rodagem.....	64
Figura 32 – Avaliação do teor de ferro no óleo lubrificante com acumulo de rodagem utilizando <i>box plot</i> .....	64
Figura 33 – Avaliação do teor de cobre no óleo lubrificante com acumulo de rodagem...	68
Figura 34 – Avaliação do teor de cobre no óleo lubrificante com acumulo de rodagem utilizando <i>blox plot</i> .....	67
Figura 35 – Avaliação do teor de silício no óleo lubrificante com acumulo de rodagem...	69
Figura 36 – Avaliação do teor de silício no óleo lubrificante com acumulo de rodagem utilizando <i>blox plot</i> .....	70

## LISTA DE SIGLAS

SINDICOM – Sindicato Nacional das Empresas Distribuidoras de Combustíveis e de Lubrificantes

PIB – Produto Interno Bruto

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento

ASTM - American Society for Testing and Materials

SAE - Society of Automotive Engineers

API - American Petroleum Institute

ASTM - American Society for Testing and Materials

OEM – Original Equipment Manufacturer

FTIR – Fourier Transform Infra Red

JASO – Japanese Automotive Standards Organization

MB – Mercedes Benz

MAN – Maschinenfabrik Augsburg Nürnberg

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Definição do problema.....	4
1.2	Objetivo.....	4
1.3	Importância da pesquisa.....	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Motores de Combustão Interna: Princípios de Funcionamento.....	7
2.2	Classificações dos Motores de Combustão Interna.....	8
2.2.1	Motores de Ignição por Compressão (Diesel).....	9
2.2.1.1	Sistemas de lubrificação do motor ciclo Diesel.....	11
2.2.1.1.1	Componentes do sistema de lubrificação do motor ciclo Diesel.....	12
2.2.1.1.2	Tipos de lubrificação do motor ciclo Diesel.....	15
2.3	Abrasão.....	19
2.4	Corrosão.....	19
2.5	Atrito.....	19
2.5.1	Aspectos tribológicos de motores ciclo Diesel.....	20
2.5.2	Conjuntos de Cilindro/Pistão.....	22
2.5.3	Trens de válvulas.....	23
2.5.4	Mancais do motor.....	24
2.6	Óleos lubrificantes.....	25
2.6.1	Composição do óleo lubrificante.....	25
2.6.1.1	Aditivos.....	26
2.6.2	Funções do óleo lubrificante.....	27
2.6.3	Normas para óleos lubrificantes automotivos.....	29
2.6.3.1	Classificação por viscosidade.....	29
2.6.3.2	Classificação por desempenho.....	31
2.7	Análise físico-química do óleo lubrificante.....	33
2.7.1	Contaminação do óleo lubrificante.....	35
2.8	Degradação do óleo lubrificante do motor.....	37
3	ESTADO DA ARTE.....	39
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	45

4.1 Campanha de coleta para avaliação do óleo lubrificante.....	45
4.1.1 Veículos utilizados no estudo da degradação do óleo lubrificante.....	45
4.1.2 Óleo lubrificante utilizado.....	48
4.2 Análise físico-química das amostras de óleo lubrificante.....	51
4.2.1 Controle de reabastecimentos parciais de óleo lubrificante.....	54
4.3 Avaliação do impacto da extensão do intervalo de drenagem do óleo.....	56
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
5.1 Análise das amostras de óleos lubrificantes.....	57
5.1.1 Avaliação da viscosidade.....	57
5.1.2 Avaliação da oxidação.....	60
5.1.3 Avaliação do teor de metais.....	63
5.1.3.1 Avaliação do teor de ferro.....	63
5.1.3.2 Avaliação do teor de cobre.....	66
5.1.3.3 Avaliação do teor de silício.....	69
6. CONCLUSÃO.....	72
7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	74
8. REFERÊNCIAS.....	75

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os meios de locomoção motorizados veem crescendo substancialmente e estes estão disseminados pelo território nacional e internacional. Os transportes motorizados (automóveis, caminhões e motocicletas) possuem um fator limitante em comum, eles dependem de lubrificação, em especial nos seus motores para seu perfeito funcionamento. A importância de tal fator é facilmente observada através da necessidade da drenagem do óleo lubrificante dos veículos, um ato bastante corriqueiro (Muniz, 2015).

De uma forma geral, define-se lubrificante como uma substância de origem animal ou mineral que é aplicada entre duas superfícies móveis ou, uma fixa e outra móvel, com intuito de formar uma película protetora que tem por função principal reduzir o atrito e conseqüentemente o desgaste (Runge; Duarte; Gemperlé, 1994). Em outras palavras, a lubrificação baseia-se na redução do contato entre superfícies sólidas, que dá origem ao atrito decorrente do contato mútuo entre duas superfícies rígidas detentoras de movimento relativo (Rouso, 1990). Como consequência deste atrito têm-se inúmeros problemas: aumento de temperatura, desgaste das superfícies, corrosão, liberação de partículas e, inevitavelmente, formação de contaminantes (Câmara, 2004).

Os óleos lubrificantes são compostos por óleo básico mais aditivos e, existem dois tipos de óleos básicos: Mineral e Sintético (Carreteiro; Belmiro, 2006). Os óleos básicos Minerais são os mais comuns para emprego em lubrificação, pois são obtidos diretamente do refino do petróleo e suas propriedades relacionam-se à natureza do óleo cru (alto peso molecular) que lhes deu origem. Contudo, alguns pesquisadores descrevem vantagem no emprego dos óleos básicos Sintéticos sobre os Minerais, especialmente no que diz respeito à sua estabilidade físico-química, pois eles são fabricados por meio de reações químicas envolvendo componentes de baixo peso molecular que são transformados em componentes de alto peso molecular. Desta forma, a estrutura química do óleo básico Sintético é planejada e controlada, onde o produto resultante pode ser ajustado para satisfazer exigências químicas e físicas predeterminadas (Runge; Duarte; Gemperlé, 1994). No ato da

formulação do óleo lubrificante, com o objetivo de alterar as propriedades químicas e físicas do óleo básico selecionado, é possível o emprego de aditivos químicos (compostos que irão acrescentar, acentuar ou retirar características do mesmo) para um melhor desempenho no local de aplicação do óleo lubrificante.

A importância do óleo lubrificante para saúde do motor pode ser compreendida quando relacionamos com o corpo humano, onde o motor é o coração do veículo e o óleo é o sangue que circula em suas veias, que, além de executar seu trabalho original de vedação, facilitar partida a frio e lubrificação do motor, um lubrificante líquido possui funções diversas, dentre elas pode-se destacar: proteger o motor do desgaste por atrito com a formação de película consistente entre as peças móveis, manutenção da limpeza das partes críticas do motor e sua ação como um fluido refrigerante trocando calor com partes quentes do motor (Coates; Shelley, 2006).

É possível perceber que dentre os processos de lubrificação de equipamentos específicos, destaca-se a lubrificação dos motores de combustão interna, em especial os de ciclo diesel. Estes motores possuem componentes que consomem grandes quantidades de lubrificante, requerem drenagem de óleo com menor frequência e possuem variados modelos e marcas de motor (Najjar, 1987).

O processo de lubrificação hidrodinâmica com óleo consiste em facilitar o movimento relativo entre superfícies sob carga de trabalho usando um filme de óleo lubrificante entre as mesmas. Uma boa lubrificação depende de algumas propriedades, tais como: relação entre temperatura, pressão e viscosidade, solvência dos aditivos, dispersância, detergência, ação antidesgaste e de anticorrosão, propriedades de fricção e capacidade antioxidante, que são importantes para se obter um ciclo de lubrificação ideal (Silveira, 2010). A maioria dos motores possui um sistema de lubrificação para os mancais principais e uma lubrificação por salpico para as bielas, cilindros e pistões (Câmara, 2004). Neste sentido, os óleos lubrificantes utilizados em motores são projetados considerando as seguintes funções principais (Carreteiro; Belmiro, 2006):

- Prevenir contra o atrito e desgaste;
- Evitar formação de depósitos (borras);

- Controlar temperatura de operação;
- Limpar e manter o motor limpo;
- Prevenir contra ferrugem e corrosão;
- Fornecer informações importantes, através de sua análise físico-química.

Os lubrificantes para motores ciclo diesel devem possuir uma boa manutenção das suas propriedades químicas, já que em serviço será quimicamente e fisicamente modificado, além dos aditivos perderem suas características iniciais. Metais como ferro, cobre, cádmio, zinco, níquel e chumbo aparecem no óleo, originados do desgaste das ligas metálicas que compõem as peças do motor (Possamai, 2011). A medida que o tempo de utilização do óleo lubrificante aumenta, há uma significativa ampliação na concentração dos metais mencionados (Freitas et al., 2013).

A relação entre a degradação físico-química do óleo lubrificante e o desgaste do motor diesel, avaliado pela presença de metais no óleo lubrificante, é estudado há bastante tempo, como podemos verificar no trabalho de (Leng; Davies, 1988) publicado na revista *Wear*, onde eles examinam através de espectrometria os depósitos metálicos em cargas de óleo lubrificante utilizados em motores diesel estacionários. A espectrometria serve para nos mostrar a presença dos elementos químicos metálicos em uma determinada amostra de óleo lubrificante, onde em sua rotina trabalho no motor ciclo diesel dentro da câmara de combustão os aditivos químicos presentes são “desintegrados” até o seu nível atômico. Cada um dos elementos químicos possui frequências diferentes umas das outras, o que proporciona uma simples identificação dado suas particularidades.

Pesquisas acrescentam significativa importância ao tema dentro do cenário científico (Caneca et al., 2006; Diaby et al., 2013), onde são discutidas de maneira bastante técnica os fatores que impactam na degradação do óleo lubrificante dentro do motor de combustão interna causando depósitos na câmara de combustão e consequente desgaste do motor, dentre os fatores estudados podemos destacar: elevadas temperaturas de operação devido ao atrito entre as peças móveis, mistura com combustível e gases da exaustão por

conta dos vazamentos internos pelas folgas geradas pelo desgaste e redução da carga de aditivos no óleo lubrificante por conta das reações químicas.

A fim de avaliar a capacidade de lubrificação destes óleos, correlacionando com as condições variadas de utilização dos motores ciclo diesel, torna-se necessário um estudo profundo das propriedades dos mesmos, especialmente aquelas relacionadas ao seu desempenho como: viscosidade, oxidação e espectrometria de metais.

### 1.1 Definição do problema

Nos últimos anos aumentou a necessidade das empresas de transporte urbano se tornarem mais produtivas para conseguirem enfrentar o mercado e a concorrência onde operam. Dessa forma, as frotas de veículos automotores, em especial de regime de trabalho urbano, possuem suas bases administrativas norteadas pela correta utilização da frota de veículos, com ênfase na redução dos custos operacionais, aumento da produtividade e disponibilidade dos veículos.

Uma prática usual na manutenção das máquinas, que vem sendo implementado como parte do programa de manutenção preditiva, é o estudo físico-químico através de análise dos óleos lubrificantes utilizados na lubrificação dos componentes dos equipamentos (Carreteiro; Belmiro, 2006 e Silveira et al., 2010).

Neste contexto, surgem os questionamentos a seguir: através das análises físico-químicas do óleo lubrificante é possível gerenciar com confiabilidade o período de drenagem aplicado a este? Baseado nos resultados, há como ratificar tecnicamente o atual período e drenagem do óleo lubrificante ou pleitear aumento neste período garantindo assim uma maior disponibilidade do equipamento com significativo retorno financeiro?

### 1.2 Objetivo

O objetivo geral do presente trabalho foi avaliar experimentalmente o impacto da extensão do intervalo de drenagem do óleo lubrificante com classificação API CI para motores ciclo diesel.

Desta forma, os objetivos específicos para o desenvolvimento da pesquisa foram:

- Realizar campanha de coleta para avaliação qualitativa do óleo lubrificante;
- Analisar as amostras de óleos lubrificantes coletados em diferentes períodos de utilização;
- Avaliar o impacto da extensão do intervalo de drenagem do óleo lubrificante com classificação API CI;

### 1.3 Importância da pesquisa

Segundo o Sindicom (2014), o mercado brasileiro de lubrificantes no ano de 2012 foi de 1,26 milhões de toneladas e, estima-se que esse mercado tenha atingido um valor de 4,5 bilhões de dólares no mesmo ano. Este mercado é avaliado sob três aspectos: crescimento dos volumes físicos, demanda por lubrificantes de maior qualidade e novas regulamentações.

Com uma taxa de crescimento de 2,6% ao ano entre 2002 e 2012, como verificado na Figura 1, para o período de 2012 a 2022 projeta-se um crescimento para este mercado de 2,8% ao ano (Bain & Company, 2014).

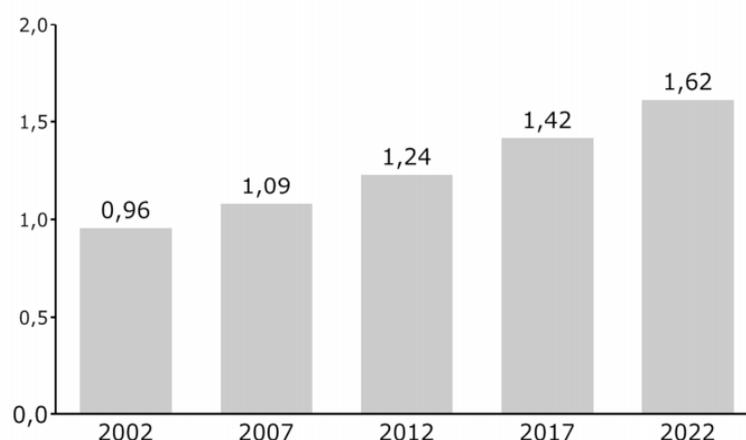


Figura 1 – Demanda de lubrificantes no Brasil.

Fonte: BAIN & COMPANY (2014)

Nota-se que a projeção de crescimento da demanda nacional por óleo lubrificante de 2,8% ao ano para o período de 2012 a 2022 é inferior à projeção

de crescimento do PIB nacional para o mesmo período, que é de 4% (Bain & Company, 2014). Dentre os motivos para tal diferença destacam-se o aumento da eficácia do lubrificante, que proporcionam maiores períodos entre as trocas, e a utilização de motores mais modernos e cada vez menores, exigindo quantidades menores de lubrificantes e evitando perdas em uso.

Além de um melhor alinhamento entre a “demanda X produção”, trabalhos relacionados à extensão no intervalo de drenagem de óleo lubrificante dos motores são economicamente importantes, pois garantem a empresa que praticar uma vantagem competitiva por ter uma maior disponibilidade do veículo e mão de obra, menor consumo de lubrificantes e filtros, além é claro da redução no descarte de óleo lubrificante que causa danos à saúde e impactos negativos ao meio ambiente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Motores de Combustão Interna: Princípios de Funcionamento

É de senso comum na comunidade científica que motores são máquinas térmicas, ou seja, transformam energia térmica (calorífica) em trabalho (energia mecânica) através de ciclos que envolvem expansão, compressão e mudança de temperatura dos gases (Brunetti, 2012).

O princípio de funcionamento dos motores de combustão interna é baseado no aproveitamento do aumento de pressão resultante da combustão da mistura ar-combustível para exercer um movimento de rotação ao veio motor, como demonstrado na Figura 2, caracterizando assim o processo de transformação da energia térmica em energia mecânica (Varela, 2002).

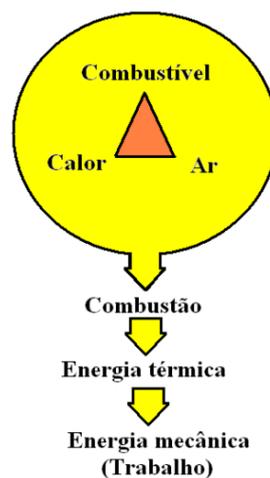


Figura 2 – Esquema dos requisitos de um motor para produção de trabalho.

Fonte: Tillmann (2013)

São denominados motores de combustão interna aqueles que o combustível é queimado internamente. A base de transformação energética mencionada anteriormente se dá pela interação dos mecanismos: pistão, biela e virabrequim, que compõem os motores em questão (Mobil Oil, 1980).

A utilização do trabalho gerado pelo motor ocorre não somente para mover o veículo como também para acionar diversos acessórios como: ar condicionado, sistema elétrico, direção hidráulica além de sistemas vitais para

o bom funcionamento do próprio motor como o sistema de arrefecimento e lubrificação (Amorim, 2004).

O motor de combustão interna, em termos simples, é composto por um cilindro (câmara de combustão) fechado na sua parte superior pelo cabeçote e na parte inferior pelo cárter de óleo lubrificante. Dentro do cilindro um pistão ligado ao eixo virabrequim pela biela se movimenta em ciclos alternados como esquematizado na Figura 3 (Tillmann, 2013).

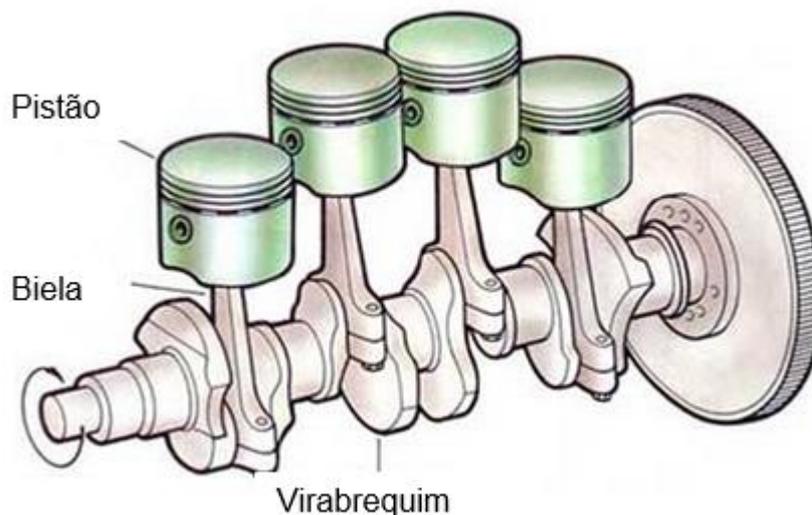


Figura 3 – Conjunto Pistão, Biela e Virabrequim.

Fonte: Reunidas Motores (2015)

O projeto aplicado na forma e disposição dos componentes do motor possibilitam transformar o movimento linear do pistão no cilindro em movimento rotativo no virabrequim.

## 2.2 Classificações dos Motores de Combustão Interna

De uma forma geral, a classificação dos tipos de motores de combustão interna leva em consideração alguns fatores (Bosch, 2005). Estes podem ser classificados quanto ao gás de admissão, assim os motores ciclo diesel possuem como gás de admissão o ar atmosférico, já os motores ciclo Otto possuem a mistura ar-combustível (Martins, 2006). Podem também ser classificados pelo tipo de ignição em: por centelha ou por compressão e pela disposição dos cilindros de combustão em: em linha ou em “V”.

### 2.2.1 Motores de Ignição por Compressão (Diesel)

O motor Diesel é um motor de combustão interna no qual o ar é comprimido a uma pressão tal que a temperatura resultante é suficientemente elevada para produzir a queima espontânea do combustível (diesel) injetado pelo bico injetor (Varela, 2002). Existem duas possibilidades para injeção do combustível na câmara de combustão: injeção direta ou injeção indireta. Na injeção direta demonstrada na Figura 4, como o próprio nome já diz, o combustível é injetado diretamente na câmara de combustão, diferente da injeção indireta que, durante o curso de compressão, o ar penetra em movimentos rotativos na chamada Câmara de Turbulência, onde ocorre a queima da maior parte do combustível, como demonstrado na Figura 5 (Rodrigues, 2009).

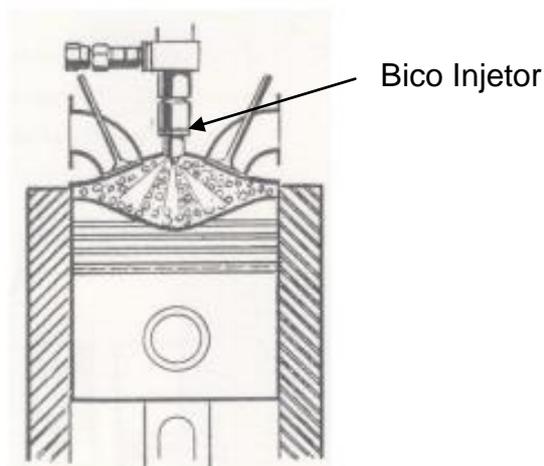


Figura 4 – Esquema de injeção direta de combustível.

Fonte: Adaptado de Howstuffworks (2015)

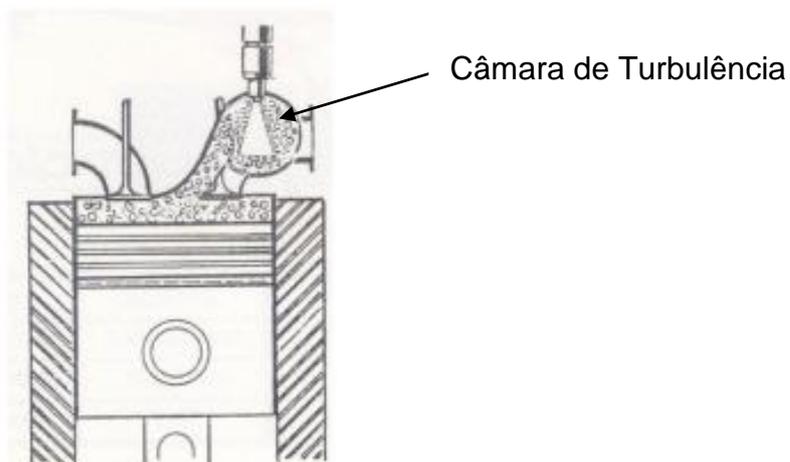


Figura 5 – Esquema de injeção indireta de combustível.

Fonte: Adaptado de Howstuffworks (2015)

Em linhas gerais, o motor ciclo Diesel funciona de maneira semelhante ao motor ciclo Otto, com seu ciclo de combustão dividido em quatro tempos como podemos verificar na Figura 6 (Câmara, 2004):

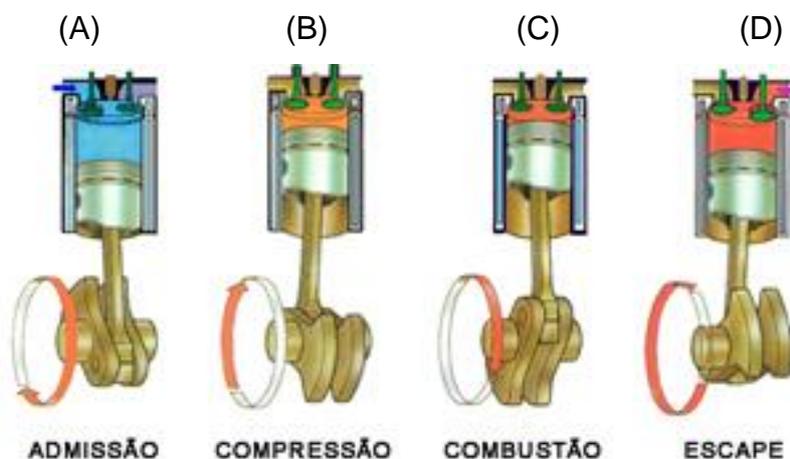


Figura 6 – Ciclos de combustão do motor Diesel.

Fonte: Clube do diesel (2009)

1º Tempo – Admissão (A) – O pistão ao descer aspira o ar para dentro do cilindro através da válvula de admissão;

2º Tempo – Compressão (B) – Após o fechamento da válvula de admissão o pistão sobe no cilindro comprimindo todo ar presente aquecendo-o. Ao final do curso do cilindro o combustível é injetado;

3º Tempo – Combustão (C) – O combustível inflamado pelo ar comprimido explode e empurra o pistão para parte inferior do cilindro;

4º Tempo – Escape (D) – Ao final do processo a válvula de escape se abre e o pistão ao subir, expelle do cilindro os gases provenientes da combustão.

Devido ao movimento relativo entre as diversas peças envolvidas no ciclo de combustão, temos perdas significativas da energia gerada pelo motor, sendo estas: perdas de calor (dissipação térmica) ou perdas por fricção (atrito). Esta segunda será tratada mais a fundo no presente trabalho, pois é justamente devido a ela que a lubrificação se torna fundamental (Diaby et. al., 2013).

O lubrificante atua no motor com uma função primária que é a redução do atrito entre as partes móveis, e com funções secundárias contribuindo com o resfriamento do motor, vedação dos cilindros formando um assentamento ideal entre os anéis de segmento e os cilindros (Leng; Davies, 1988).

#### 2.2.1.1 Sistemas de lubrificação do motor ciclo Diesel

O funcionamento satisfatório dos motores Diesel depende em grande parte da formação e manutenção das películas lubrificantes entre as peças sujeitas a atrito e, ao mesmo tempo, da natureza dessas películas (Novotny, 1983). A Figura 7 demonstra todo sistema de lubrificação do motor Diesel.

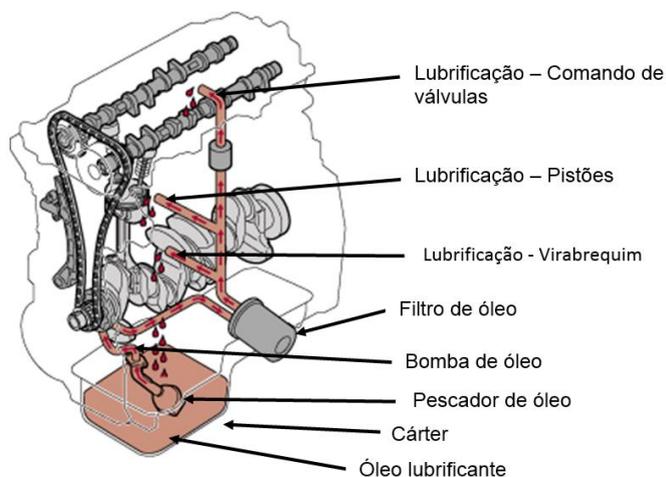


Figura 7 – Sistema de lubrificação de motores Diesel.

Adaptado de: Mecânica de motores (2015)

Como observamos na Figura 7, diversos elementos num motor ciclo Diesel atuam em conjunto na lubrificação. Estes motores são desenvolvidos para funcionar por milhares de quilômetros, para isso, o motor é provido de um sistema complexo de lubrificação, caso contrário não duraria alguns minutos, devido ao movimento incessante de peças dentro do motor, sendo que estas estão em contato com outras peças de mesmo material ou semelhante (Venkatesh, 1974 e Taylor et al., 2005). O sistema de lubrificação garante que estas peças trabalhem com um filme de óleo lubrificante entre elas, que reduz consideravelmente o atrito e conseqüentemente o desgaste.

Para o desempenho satisfatório do sistema de lubrificação, faz-se necessário a presença de óleo lubrificante em quantidades definidas, com características apropriadas, acabamento específicos das superfícies em contato, folgas ideais entre as peças e da pressão específica das superfícies de contato (Carreteiro; Belmiro, 2006).

As funções principais desse sistema são (Garcia; Schweizer, 2009):

- Reduzir o atrito entre as peças em movimento relativo;
- Reduzir o desgaste impedindo o contato direto entre as peças;
- Promover uma boa troca de calor entre as peças lubrificadas;
- Auxiliar na vedação entre pistão, cilindros e anéis;
- Proteger contra ferrugem e corrosão;
- Promover a limpeza facilitando eliminação de produtos indesejáveis.

#### 2.2.1.1.1 Componentes do sistema de lubrificação do motor Diesel

Um motor de combustão possui diversos elementos que, trabalhando em conjunto, atuam na lubrificação. Seguem abaixo os principais componentes deste sistema (Brunetti, 2012):

(A) Cárter (Figura 8) – também conhecido como reservatório de óleo, mantém uma reserva de óleo do motor além de servir de reservatório para o óleo que acabou de circular pelo motor. Além dessa função, o cárter atua na refrigeração do óleo, sendo bastante comum cárter

equipado com aletas defletoras de calor para dissipação do calor para a atmosfera (Martins, 2006);

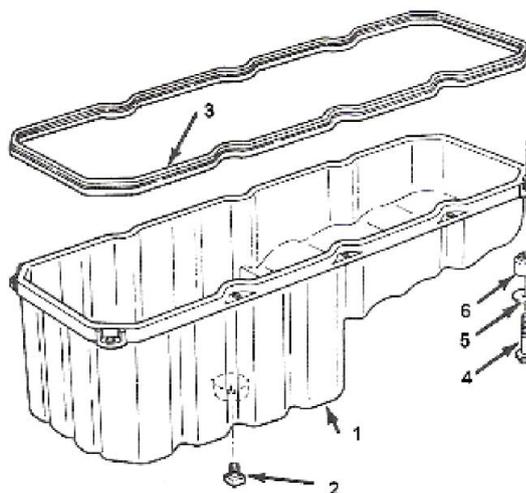


Figura 8 – Cárter de óleo lubrificante. 1-cárter; 2-bujão; 3-junta; 4-parafuso de fixação; 5-anilha; 6-elastômero.

Fonte: Rodrigues (2009)

(B) Pescador de óleo (Figura 9) – este componente consiste de um tubo normalmente de material metálico, com uma extremidade parafusada no bloco do motor, e a outra extremidade mergulhada no óleo contido no cárter. Esta extremidade possui uma pequena rede metálica que age executando uma pré-filtragem, evitando que impurezas macroscópicas atinjam canais importantes de lubrificação, causando desgaste prematuro na bomba de óleo e/ou entupimento dos canais de lubrificação (Bosch, 2005).



Figura 9 – Pescador de óleo lubrificante.

Fonte: Basílio (2011)

(C) Bomba de óleo lubrificante (Figura 10) – é o componente responsável pela lubrificação forçada do motor. Situada nas partes mais baixas do motor, logo após o pescador de óleo lubrificante demonstrado na Figura 9, a bomba de óleo lubrificante é acionada pelo virabrequim do motor e atua retirando este óleo lubrificante do cárter através do pescador de óleo apresentado anteriormente e bombeando até os canais de lubrificação, que por sua vez leva o óleo lubrificante para todas as peças que necessitam de lubrificação nas partes mais altas do motor (Câmara, 2004). Existem vários tipos de bombas, sendo que os mais comuns são: de engrenagem e de rotor;

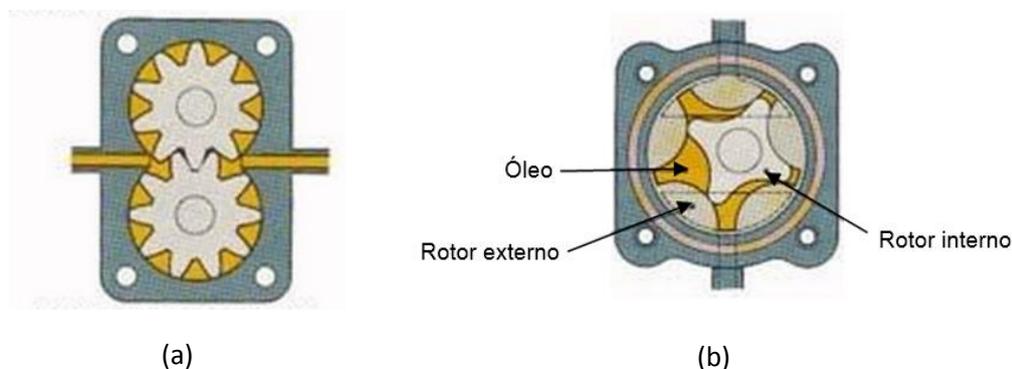


Figura 10 – (a) bomba de engrenagem; (b) Bomba de rotor.

Fonte: Costa (2002)

(D) Filtro de óleo (Figura 11) – geralmente é posicionado logo antes da bomba de óleo. É composto por um invólucro metálico que contém um papel impregnado de resina. O óleo é dirigido ao filtro por derivação, ou filtração total. No primeiro caso, apenas parte do óleo é destinado ao filtro de óleo, e a outra parte desce para o cárter. No segundo caso, todo o óleo passa pelo filtro de óleo. Este componente tem a importante função de reter as impurezas em suspensão no óleo lubrificante (Kimura, 2010). O elemento filtrante que compõe o filtro pode ser substituível (filtro com elemento filtrante substituível) ou formar um conjunto com o corpo do filtro (filtro monobloco), que se enrosca diretamente no bloco do motor. Analisando a Figura 11, observa-se os componentes que constituem os filtros:

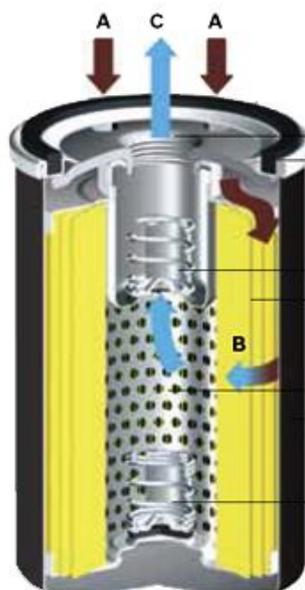


Figura 11 – Representação em corte de um filtro com elemento filtrante.  
 (A) entrada do óleo contaminado; (B) filtragem do óleo contaminado; (C) saída do óleo limpo para o motor.

Fonte: Bosch Automotive (2015)

#### 2.2.1.1.2 Tipos de lubrificação do motor ciclo Diesel

Com os avanços tecnológicos na área automotiva, os sistemas dos motores foram sendo aperfeiçoados devido ao desenvolvimento do motor de combustão interna. Com isso alguns tipos de sistemas de lubrificação foram surgindo, seja pelo desenvolvimento, seja pelo tipo de uso do motor. Os métodos mais adotados para lubrificar os motores Diesel são (Martins, 2006):

(A) Lubrificação por circulação ou pressão (Figura 12): este sistema de lubrificação utiliza a pressão da bomba de óleo para alcançar os diversos canais de lubrificação que compõem o motor. A capacidade das bombas de óleo lubrificante varia de 2 a 40 litros de óleo por cavalo-hora. A maioria dos motores Diesel é lubrificado por sistema de circulação, especialmente os mancais principais, as bielas, o comando de válvulas dentre outros componentes auxiliares. Mancais do virabrequim possuem furos de lubrificação por onde o óleo, sobre pressão, atinge as bielas. Todos os mancais são inundados por um fluxo

contínuo de óleo lubrificante, que visa a formação e manutenção de uma película hidrodinâmica completa (Brunetti, 2012).

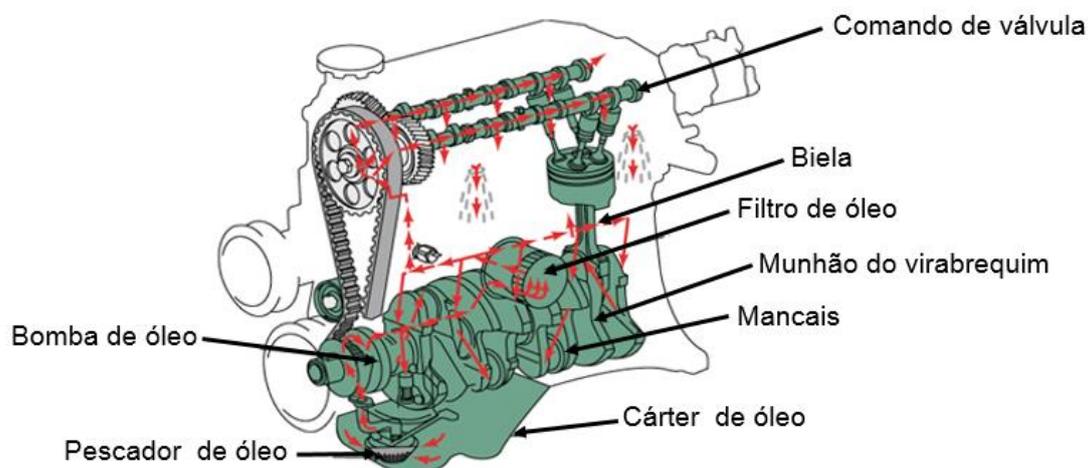


Figura 12 – Esquema de lubrificação por circulação.

Adaptado de: Dias (2014)

(B) Lubrificação por Salpico (Figura 13): chama-se salpico ao óleo que, escapando dos mancais das bielas, é projetado contra as paredes do cilindro em quantidade suficiente para assegurar a formação da película lubrificante. Neste sistema a bomba de óleo mantém algumas cubas do cárter já apresentadas cheias de óleo, estas são posicionadas propositalmente próximas a passagem de cada biela. As bielas por sua vez estão munidas com uma colher, e recolhem parte do óleo durante seu movimento de vai e vem. Há anéis raspadores e orifícios de retorno nos êmbolos, que permitem controlar exatamente a quantidade de óleo a fornecer aos cilindros (Varela, 2002 e Martins, 2006). Este é um sistema que requer canais de lubrificação maiores, devido sua baixa pressão de funcionamento (0,1 a 0,4 bar).

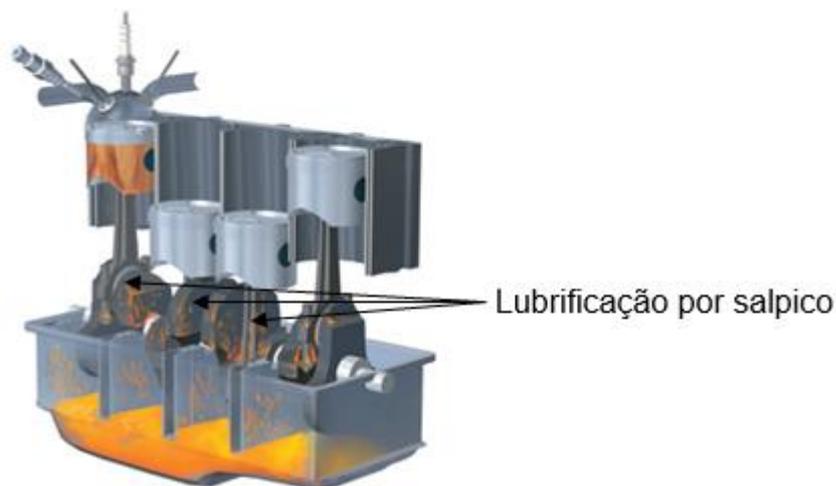


Figura 13 – Lubrificação por salpico no virabrequim.

Fonte: Quatro rodas (2015)

Na Tabela 1 serão apresentados os aspectos que caracterizam o sistema tribológico tais como: os regimes de lubrificação presentes no motor e a influência da qualidade da superfície na lubrificação, para em seguida tratar dos mecanismos de desgaste apresentados pelos dois maiores subgrupos de peças que trabalham com altas exigências de carga, atrito e temperatura, que são os sistemas de anéis/pistões e trem de válvulas.

Outra forma bastante eficiente de avaliar os modos de lubrificação é por meio da curva de Stribeck (Figura 14), que mostra a variação do coeficiente de atrito em função do parâmetro de filme através de análise gráfica (Taylor, 1993).

Tabela 1 – Sumário dos regimes de lubrificação (Bannister, 1995).

Regime de lubrificação	Características
Hidrodinâmico	Condição de lubrificação plena. A película ou cunha de óleo separa completamente as superfícies em movimento relativo.
Limite	As superfícies estão em contato com comportamento caracterizado por ações químicas (e físicas) de um fino

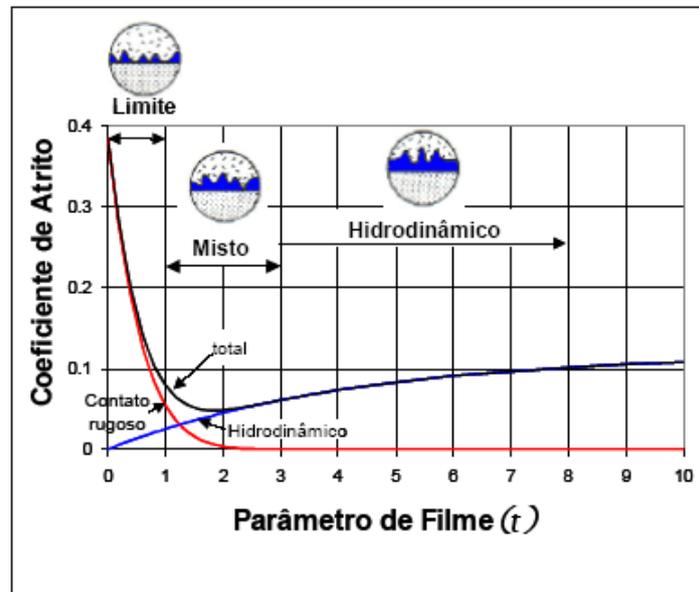


Figura 14 – Curva de Stribeck em função do parâmetro de filme.

Fonte: Brunetti (2012)

Na lubrificação limite, a película, mais fina, permite o contato entre as superfícies de vez em quando, isto é, a película possui espessura igual à soma das alturas das rugosidades das superfícies. Ocorre nas situações em que cargas elevadas, baixas velocidades ou operação intermitente impedem a formação de uma película fluida (Araújo, 2010).

Na lubrificação hidrodinâmica ou total, a película lubrificante separa totalmente as superfícies, não havendo contato metálico entre elas, isto é, a película possui espessura superior à soma das alturas das rugosidades das superfícies. Serão resultantes, assim, valores de atrito baixos e desgaste insignificantes (Carreteiro; Belmiro, 2006).

As peças do motor Diesel estão sujeitas ao desgaste que, normalmente, pode ser atribuído a três causas principais: Abrasão, Corrosão e Atrito.

### 2.3 Abrasão

A American Society for Testing and Materials (ASTM) define desgaste abrasivo como aquele que é gerado por partículas duras e protuberantes atuantes contra superfície sólida em movimento. O mecanismo abrasivo é provocado pela remoção do material pela ação de eventuais partículas duras presentes entre as superfícies com movimento relativo, ou embutido em uma das superfícies de contato (Ludema, 1996). Quando partículas abrasivas atravessam a camada lubrificante que separa as duas superfícies, o desgaste será consideravelmente aumentado pelo efeito da abrasão, o que mostra a premente necessidade de se evitar a sua formação, no interior do motor, ou então de ser reduzida a sua capacidade abrasiva (Bannister, 1996).

### 2.4 Corrosão

A corrosão metálica é a transformação de um material metálico ou liga metálica pela sua interação química ou eletroquímica num determinado meio de exposição, resultando na formação de produtos de corrosão, se ocorrer a formação de produtos ácidos, a corrosão resultante acelera ainda mais o desgaste, visto que as películas corrosivas, formadas por sais ou sabões, são geralmente mais facilmente desalojadas do que as partículas do próprio metal, fazendo com que constantemente nova superfície metálica permaneça exposta ao ataque (Davim, 2011).

### 2.5 Atrito

O atrito é definido pela resistência que um corpo desenvolve quando existe movimento relativo a outro corpo, o qual pode ser entre sólidos (atrito sólido), gás e sólido (atrito aerodinâmico), líquido e sólido (atrito fluido) ou devido a um processo de dissipação de energia interna (atrito interno), e este atrito pode ser reduzido ao mínimo pela interposição, entre as duas superfícies metálicas, de uma película viscosa e lubrificante que as separe (Ludema, 1996). Da maior ou menor eficiência com que conseguimos separar as duas superfícies em movimento relativo, dependerá o grau de redução do desgaste.

Assim, os motores Diesel possuem diversos regimes de lubrificação, desde a completa separação por cunha de óleo ou camada hidrodinâmica nos mancais, até a lubrificação por camada limite nos anéis dos êmbolos e parte superior dos cilindros ou nos excêntricos dos comandos das válvulas, onde apenas uma finíssima película de óleo se conserva entre as superfícies em movimento (Davim, 2011).

### 2.5.1 Aspectos tribológicos de motores ciclo Diesel

Dentre as peças do motor ciclo diesel condicionadas ao desgaste por atrito, sem dúvida os pistões e seus anéis de segmento demonstrados na Figura 15, são as peças mais sujeitas ao desgaste e, se este ocorrer, em pouco tempo o funcionamento do motor poderá tornar-se antieconômico pelo elevado consumo de combustível e óleo lubrificante (Garcia; Schweizer, 2013).



Figura 15 – Conjunto de pistão e anéis de segmento.

Fonte: Fygueroa (1997)

De forma subjetiva, demonstra-se na Figura 16 que a proporção de perda de energia total por atrito nos motores à combustão está direcionada em torno de 45% para o conjunto do pistão e anéis. Os conjuntos envolvendo pistão, válvulas e mancais são submetidos a diversas condições tribológicas durante os ciclos de operação, e em diferentes modos de lubrificação (Texaco, 2005).

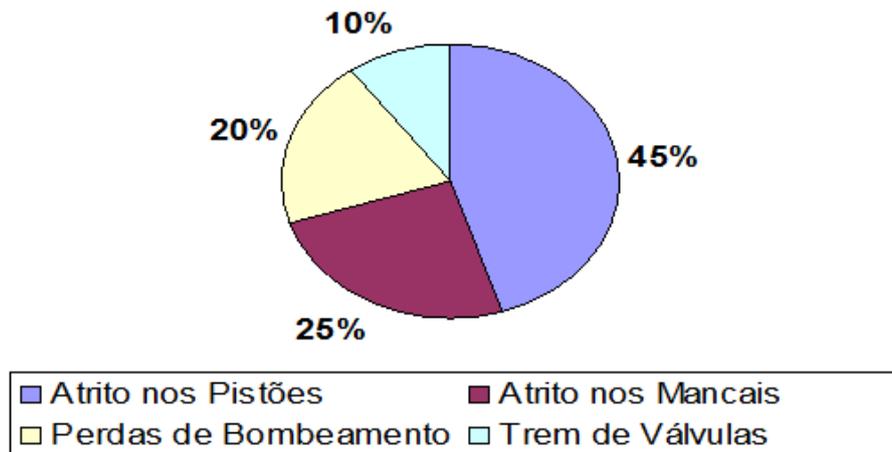


Figura 16 – Atrito mecânico total do motor.

Fonte: Richardson (1999)

O contato entre a coroa do pistão e a camisa é lubrificado além de ser um sistema bem projetado, operando em circunstâncias normais mostra que o desgaste é mínimo. As causas potenciais do desgaste elevado da camisa do pistão incluem depósitos de óleo excessivos e contaminações externas. A determinação do desgaste por pesagem é significativamente precisa; porém, infelizmente, o método não pode ser aplicado às camisas dos cilindros, dado que o seu peso está sujeito a outras influências. Além do desgaste, a ferrugem, as incrustações e as deformações podem falsear completamente os resultados da pesagem. Por isso, as medições de maior precisão do desgaste dos cilindros são as variações do seu diâmetro interno, medido sempre nos mesmos pontos, ao passo que o desgaste dos anéis é indicado pela sua perda de peso (Ambrozin; Kuri; Monteiro, 2009).

O trabalho de (Sinatora, 2005) possui uma abordagem bastante ampla da relação entre tribologia em motores de combustão interna. Ele faz uma revisão bibliográfica do tema, e sugere pesquisas futuras e desenvolvimentos a serem perseguidos no sentido de melhorar o desempenho, entre os quais podemos citar:

- Melhoria do perfil da superfície, rugosidade das superfícies e condições de lubrificação mista;
- Desenvolvimento da relação entre os mecanismos de lubrificação e os mecanismos químicos, com melhor compreensão da função dos aditivos com o filme lubrificante;

- Estabelecimento da relação entre modelos de desgaste e falha, materiais, lubrificação e condições térmicas;
- Melhoria de materiais, revestimentos superficiais e engenharias das superfícies.

### 2.5.2 Conjuntos de cilindros/anéis

Este conjunto está sujeito a uma grande carga e a temperaturas relativamente elevadas, devido a transmissão do calor proveniente da combustão, e a pequena amplitude do movimento oscilatório dificulta a formação de uma película de óleo, como observa-se na Figura 17. A sua deficiente lubrificação é muitas vezes causa de avarias, podendo em caso de travamento dos anéis dar lugar a empenos da biela ou a deterioração da superfície do pistão (Freitas et al., 2013; Araújo, 2010).

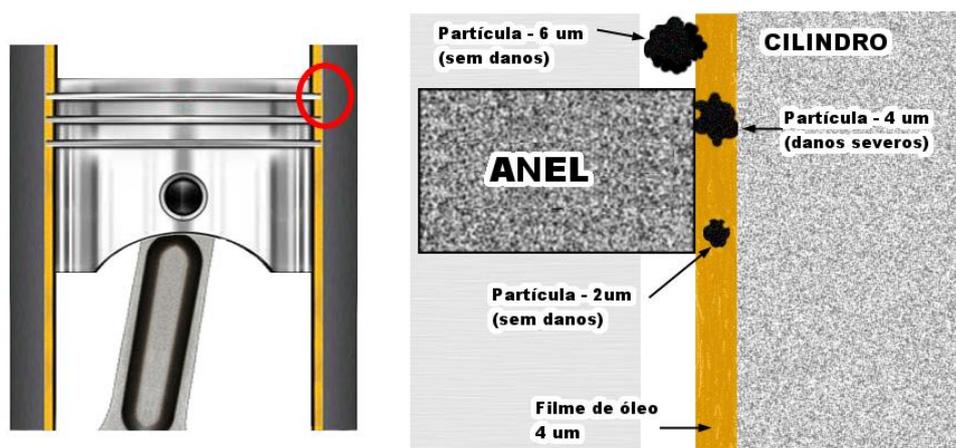


Figura 17 – Detalhe do contato entre o anel e o cilindro.

Fonte: Keller (2011)

Este conjunto sofre também significativa influência de elementos contaminantes, as peças têm um nível de acabamento que não permitem que o cilindro seja arranhado. É a admissão de corpos estranhos, como grãos de poeira, que propiciam o desgaste localizado (Silveira et al., 2010).

### 2.5.3 Trem de Válvulas

O conjunto de acionamento das válvulas compreende o tucho e uma haste, que o interliga ao balancim, apoiando-se diretamente sobre a válvula. No momento em que o eixo comando de válvulas gira, o ressalto deste aciona o tucho, que por sua vez move a haste, fazendo com que o balancim transmita o movimento à válvula, abrindo-a (Martins, 2006). Este modelo está bem representado na Figura 18:

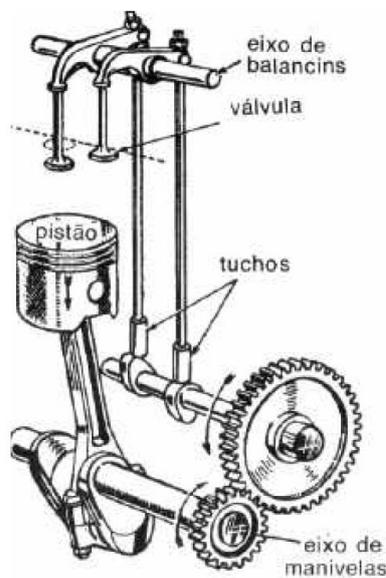


Figura 18 – Conjunto de eixo, tuchos e válvulas.

Fonte: Varela (2002)

O trem de válvulas corresponde a cerca de 15% das perdas por fricção quando em baixas rotações, nessa situação, uma vez que o eixo de comando gira à metade da velocidade que o eixo virabrequim, é muito difícil formar um filme de lubrificante adequado a um atrito reduzido (Sinatora, 2005). O projeto de trens de válvulas é extremamente complexo, elevadas cargas estão presentes, desde baixas até altas velocidades do motor. Para baixas velocidades a força primária é causada pelas molas das válvulas, em altas velocidades a principal componente é causada pelas forças de inércia. O principal tipo de lubrificação presente no trem de válvulas (incluindo cames e balancins) é o limite, já apresentado anteriormente (Santos, 1993).

A utilização de balancins roletados (com rolamento de apoio) contribui para uma significativa redução na perda por fricção, reduzindo substancialmente o desgaste nesse conjunto mecânico (Taylor; Bell, 1994).

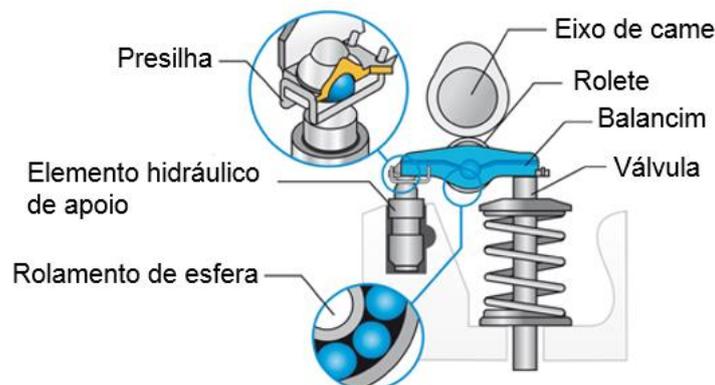


Figura 19 – Detalhe de balancim roletado.

Fonte: Notícias da oficina (2015)

Diferentemente do sistema convencional em que ocorre atrito de deslizamento nos tuchos para o acionamento das válvulas, o sistema com atrito de rolamento demonstrado na Figura 19 acima, também permite mais possibilidades geométricas, que resultaram numa melhor curva de levante das válvulas com cames de pequenas dimensões e sem dispositivo de variação.

#### 2.5.4 Mancais do Motor

O atrito neste sistema é proporcional ao quadrado da rotação do motor. A ação das cargas nos mancais não é tão efetiva à fricção, mas as forças de inércia afetam mais que as forças devido às pressões dos gases em altas rotações. Uma solução comumente empregada para redução da fricção neste conjunto é a diminuição da área dos mancais, no entanto tal solução pode trazer problemas de performance com relação à tensão relacionada a ruído, vibração e aspereza (Myshkin, 2003).

## 2.6 Óleos Lubrificantes

Se por um lado o mundo em que vivemos não poderia existir sem a existência dos fenômenos de atrito, pois a estabilidade de materiais e os movimentos controlados dele dependem, por outro lado não se pode conceber o funcionamento de nenhuma máquina, sem se considerar a existência de meios para reduzir o atrito, isto é, a lubrificação (Carreteiro; Belmiro, 2009).

Neste sentido, pode-se dizer que os óleos lubrificantes são elementos vitais e indispensáveis ao funcionamento das máquinas, sendo a lubrificação um problema universal e permanente no campo da técnica (Garcia; Mussato, 2013).

### 2.6.1 Composição do óleo lubrificante

Os óleos lubrificantes apresentam certas características que lhes são conferidas pela sua composição química, pelo tipo de refino, pelos tratamentos adicionais realizados e pelos aditivos utilizados. A Figura 20 demonstra simplificada o processo de produção de óleos lubrificantes.

Os óleos lubrificantes podem ser de origem animal ou vegetal, derivados de petróleo (óleos minerais) ou produzidos em laboratório (óleos sintéticos), podendo ainda ser constituído pela mistura de dois ou mais tipos (óleos semi-sintéticos).

Para Rodrigues (2009) os óleos lubrificantes minerais são os de maior uso industrial e automotivo desde os primórdios do século XX, devido facilidade de aquisição e relativo baixo custo, durabilidade, ampla gama de temperatura de utilização, boa miscibilidade com aditivos e compatibilidade com selos e vedantes.

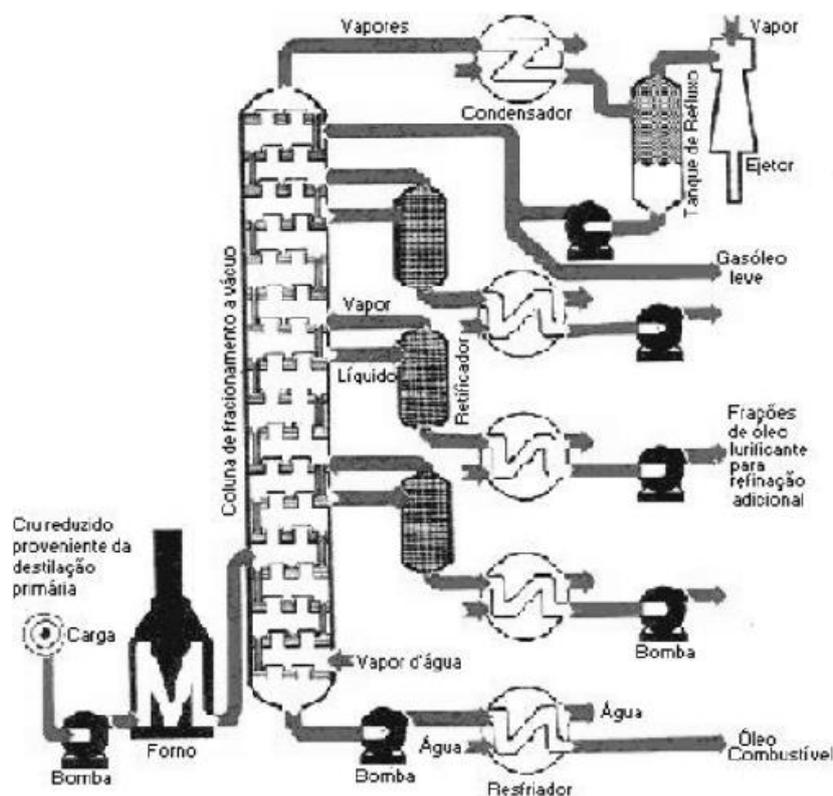


Figura 20 – Esquema simplificado da produção do óleo lubrificante.

Fonte: Gândara (2000)

Para aplicações mais sofisticadas, como por exemplo onde não se consiga uma lubrificação por película total, ou se trabalhe em altas temperaturas, ou em que seja importante uma maior durabilidade do óleo lubrificante em serviço e onde uma análise de custo-benefício revele exequibilidade econômica, recorre-se a outro tipo de óleos lubrificantes, os definidos como sintéticos (Carreteiro; Belmiro, 2009).

#### 2.6.1.1 Aditivos

Os aditivos são substâncias que acrescentam, melhoram ou até retiram propriedades dos óleos básicos que serão usados na fabricação de óleos lubrificantes e graxas. Os aditivos pertencem a diferentes categorias e possuem diferentes funções. Os principais tipos de aditivos são: anticorrosivos, antidesgaste, antiespumante, antioxidante, detergente-dispersante, melhoradores do índice de viscosidade e agentes de extrema pressão (Amorim, 2004)

## 2.6.2 Funções do óleo lubrificante

Os óleos para motor têm as seguintes funções principais, para garantir ao motor perfeitas condições de operação e longa vida útil: (i) reduzir o atrito; (ii) proteger contra corrosão e desgaste; (iii) contribuir na vedação; (iv) contribuir para o resfriamento; (v) facilitar a eliminação de produtos indesejáveis (limpar e manter o motor limpo); (vi) facilitar a partida a frio (Araujo, 2010).

Durante a partida do motor a viscosidade do óleo não deve ser elevada ao ponto de dificultar seu bombeamento, pelo contrário, deve contribuir para sua rápida circulação através do motor neste momento crítico em que existem apenas tênues películas lubrificante sobre as superfícies em contato mútuo e movimento intermitente. O comando de válvulas é o mecanismo mais prejudicado nesse processo por situar-se na parte alta do motor, e a baixa temperatura do sistema no momento da partida não favorecer sua lubrificação devido à elevação da viscosidade (Malpica, 2007).

Entre bielas, mancais e engrenagens do motor deve sempre haver uma película lubrificante de viscosidade mínima para evitar o risco de contato metal com metal sob as condições variadas de temperatura, velocidade de rotação e carga (Evans, 1978). Segundo (Sinatora, 2005), entre os anéis e cilindros o óleo deve ter viscosidade suficientemente elevada sob as altas temperaturas que ocorrem nessa região. Percebe-se então que o óleo lubrificante deve ser capaz de proporcionar boa lubrificação mesmo sob condições desfavoráveis.

Durante as paradas, e também em funcionamento a baixas temperaturas as superfícies metálicas devem ser protegidas contra a ação corrosiva dos produtos provenientes da decomposição do combustível (Carreteiro; Belmiro, 2006). O óleo deve resistir à degradação, isto é, resistir à oxidação, e possuir boa estabilidade térmica.

A viscosidade do óleo para motor deve ser suficientemente baixa para permitir fácil partida quando o motor está a temperaturas abaixo de 10 °C sem apresentar viscosidade excessivamente baixa sob a temperatura normal de operação. Este objetivo é conseguido através da seleção do grau de viscosidade e do uso de óleo do tipo multiviscoso adequado para a mais baixa

temperatura de partida. Além de facilitar a partida através de baixa viscosidade, o óleo ainda deve apresentar fácil bombeabilidade para assegurar rápida circulação pelo motor durante os primeiros instantes de funcionamento do motor. Testes demonstram que sob condições anormais o óleo lubrificante pode levar até 3 minutos até atingir as partes altas do motor, usualmente o comando de válvulas (Araujo, 2010).

A ação de vedação do óleo lubrificante no motor é necessária na área dos anéis de pistão, principalmente quando o pistão se encontra no ponto morto superior. Para realizar esta função, o óleo deve apresentar viscosidade suficientemente elevada às altas temperaturas e baixa volatilidade (Carreteiro; Belmiro, 2006). Deve contribuir para manter reduzido o desgaste dos anéis e não deve contribuir para a formação de depósitos nas ranhuras dos anéis. Deve contribuir no combate a formação destes depósitos.

Mediante a intervenção no mecanismo de atrito, o óleo lubrificante deve reduzir as consequências dos contatos inevitáveis entre superfícies em movimento relativo entre si. Deve resistir à formação de depósitos, os quais afetam a lubrificação, contribuindo para a eliminação de poeira e outras impurezas por meio da ação dispersiva, evitar que estes materiais se depositem sobre as superfícies internas do motor e fazer com que sejam removidos juntamente com o óleo usado por ocasião da troca do mesmo (Najjar, 1987).

Normalmente, durante o funcionamento do motor os seguintes materiais podem contaminar o óleo: poeiras atmosféricas, fuligem da combustão principalmente em motores ciclo Diesel, resíduos de desgaste do motor, produtos orgânicos provenientes da queima de combustível e outros agentes poluidores, os quais provocam a formação de depósitos e aceleram o desgaste (Coates; Shelley, 2006). Para combater os efeitos nocivos desses materiais, o óleo deve ser capaz de mantê-los em suspensão através de sua capacidade dispersante, seja qual for a temperatura ou as condições físico-químicas.

Uma das funções importantes desempenhadas pelo óleo lubrificante nas mais diversas aplicações, não apenas no motor, é a de refrigerar. No motor esta ação é necessária principalmente na área dos pistões e dos mancais, o óleo lubrificante deve possuir excelente estabilidade térmica e resistência à oxidação além de baixa volatilidade. Para ilustrar esta exigência, a Tabela 2

demonstra as temperaturas que são encontradas nas áreas dos anéis variam de acordo com as áreas de contato do óleo lubrificante.

Tabela 2 – Temperaturas médias no motor Diesel (Mobil Oil, 1980).

<b>Área de contato do óleo lubrificante</b>	<b>Temperatura média</b>
No topo do pistão	315-370°C
Anel superior	230-290°C
Cabeça do pino do pistão	150-230°C
Parte baixa da saída do pistão	150-180°C

### 2.6.3 Normas para óleos lubrificantes automotivos

Com os avanços tecnológicos da área automotiva, houve a necessidade de se padronizar os diferentes tipos de óleos lubrificantes para facilitar a identificação pelo consumidor, desta forma coube aos engenheiros a missão de classificá-los de acordo com sua aplicação, qualidade e desempenho. Para tanto, os produtos são sujeitos a testes específicos padronizados pela ASTM (American Society for Testing and Materials) para avaliação de sua performance e cabe ao órgão em questão avaliar o produto para uma dada classificação (Rodrigues, 2009). A seguir, serão descritos dois dos principais órgãos reguladores que classificam o óleo de motor e suas respectivas classificações.

#### 2.6.3.1 Classificação por viscosidade

A viscosidade é uma das mais importantes propriedades de um óleo lubrificante, e teve sua importância reconhecida pela SAE (Society of Automotive Engineers) no século XX, mais precisamente em 1911, quando estabeleceu o primeiro sistema de classificação para óleos de motor baseado apenas na viscosidade. Esta classificação sofreu modificações ao longo dos anos e tornou-se oficial apenas em 1962 com o nome de SAE J300 e, a última atualização desta classificação foi feita em 1999 perdurando até os dias atuais (Rouso, 1990). A viscosidade de um óleo é a medida da sua resistência ao

escoamento e varia conforme a temperatura. Por existirem várias classificações de viscosidade para óleos lubrificantes, neste trabalho será tratada apenas a classificação de viscosidade SAE J300 para óleos de motor, pois para escolher o óleo adequado o usuário deve levar em consideração a viscosidade correta para cada aplicação, neste caso a automotiva (Carreiro; Belmiro, 2006).

A SAE desenvolveu um sistema de classificação baseado nas medições de viscosidade. Para óleos de motores, este sistema estabeleceu onze tipos de classificações ou graus de viscosidade: SAE 0W, 5W, 10W, 15W, 20W, 25W, 20, 30, 40, 50 e 60, demonstrados na Tabela 3. A letra "W" que acompanha o grau de viscosidade vêm da palavra *winter*, e indica que é um óleo adequado para uso em baixas temperaturas. As classificações SAE que não incluem a letra "W" definem graduações de óleo para uso em altas temperaturas. A viscosidade desses óleos SAE 20, 30, 40 e 50 devem ter o valor adequado quando medida a 100 °C, estes óleos lubrificantes são conhecidos com monoviscosos (Freitas et al., 2013).

Tabela 3 – Tabela de classificação SAE J300 (Texaco, 2005).

SAE J300 Janeiro 2001 <sup>a</sup>					
Grau de viscosidade SAE	Viscosidades a Baixas Temperaturas		Viscosidades a Baixas Temperaturas		
	Viscosidade máxima <sup>b</sup> (cP)	Viscosidade máxima <sup>c</sup> (cP)	Viscosidade <sup>d</sup> (cSt a 100°C)		Viscosidade <sup>e</sup> (cP à 150°C)
			Mínimo	Máximo	
0W	6.200 até -35°C	60.000 até -40°C	3,8	-	-
5W	6.600 até -30°C	60.000 até -35°C	3,8	-	-
10W	60.000 até -25°C	60.000 até -30°C	4,1	-	-
15W	60.000 até -20°C	60.000 até -25°C	5,6	-	-
20W	60.000 até -15°C	60.000 até -20°C	5,6	-	-
25W	60.000 até -10°C	60.000 até -15°C	9,3	-	-
20	-	-	5,6	<9,3	2,6
30	-	-	9,3	<12,5	2,9
40	-	-	12,5	<16,3	2,9
50	-	-	16,3	<21,9	3,7
60	-	-	21,9	<26,1	3,7

a) 1 cP (centipoise) = 1m Pa.s; 1cSt = 1mm<sup>2</sup>/s

b) Viscosidade aparente utilizando o Simulador de partida a frio (CCS) - Método ASTM D 5293

c) Viscosidade aparente utilizando o Viscosímetro rotativo (MRV) - Método ASTM D 4684

d) Viscosidade aparente utilizando o Viscosímetro capilar - Método ASTM D 445.

e) Viscosidade após cisalhamento de 10-6s, e temperatura de 150°C utilizando o viscosímetro simulador de rolamento selado - Método ASTM D 4683

O desenvolvimento dos melhoradores de índice de viscosidade possibilitou a fabricação dos óleos de múltipla graduação e de boa qualidade, este tipo é também conhecido como óleo multiviscoso. Esses óleos, SAE

15W40, 20W50 e 10W30, por exemplo, são formados a partir da fusão de óleos lubrificantes com dois graus SAE distintos e são amplamente utilizados porque ao dar partida no motor o óleo lubrificante estará frio, nesta temperatura ele deve ser "fino" o suficiente para fluir bem e alcançar todas as partes do motor. Já em altas temperaturas, ele deve ter a viscosidade adequada para manter a película protetora entre as partes metálicas, garantindo a lubrificação adequada na temperatura de operação do motor (Câmara, 2004).

Os óleos multiviscosos podem ser usados em uma gama maior de temperaturas do que os óleos monoviscosos. Sua relação temperatura/viscosidade proporciona partida e bombeio fáceis em baixas temperaturas, todavia, eles são viscosos o bastante em altas temperaturas. Quanto menor for o número que antecede a letra "W", mais rápido o óleo fluirá no momento mais crítico, que é o da partida, evitando o contato entre as partes metálicas e minimizando o desgaste. O número à direita da letra "W" refere-se à viscosidade do óleo na temperatura de operação do motor.

#### 2.6.3.2 Classificação por desempenho

Inicialmente, a qualidade dos óleos para motor era definida exclusivamente pela sua viscosidade, sem considerar o projeto do motor, seu ambiente operacional e o tipo e qualidade do combustível utilizado. Em 1947 o API (American Petroleum Institute) regulamentou uma classificação dos óleos para motor, baseada em condições operacionais (Taylor et al., 2005).

Hoje existem basicamente duas classificações, uma para motores ciclo Otto, e outra para motores Diesel, pois os motores Diesel são mais severos em relação aos demais motores. A classificação API para motores ciclo Diesel é mais complexa que para motores ciclo Otto, devido ao processo evolutivo distinto que ambos passaram. A Tabela 4 demonstra o processo de transformação que a classificação API para motores ciclo Diesel passou. Dentro das classificações vigentes, à medida que os anos passam, estas evoluem fazendo com que o óleo lubrificante adquira novas propriedades para atender satisfatoriamente as novas tecnologias (Carreteiro; Belmiro, 2006). Outra modificação que a classificação API sofreu com o passar dos anos foi o

acréscimo dos números ao lado da especificação, para indicar o tipo de motor (2 ou 4 tempos) a que se destina o óleo lubrificante.

Tabela 4 – Tabela de classificação API para óleo lubrificante de motor ciclo diesel (Paxlub, 2015).

<b>Categoria</b>	<b>Descrição</b>
<b>API CA</b>	Serviço leve – motores diesel usando combustíveis com baixo teor de enxofre (1940-1950)
<b>API CB</b>	Destinado à motores ciclo diesel naturalmente aspirados admitindo diesel com alto teor de enxofre (1961)
<b>API CC</b>	Serviços moderados e severos, já oferecendo proteção contra desgaste, ferrugem e corrosão
<b>API CD</b>	Possui aditivação para performance em motores diesel moderadamente super alimentados (1965)
<b>API CF</b>	Serviço pesado – forte proteção contra depósitos, corrosão e desgaste (a partir de 1991)
<b>API CG</b>	Serviço severo – ideal para motores de aspiração natural e turbo alimentados de alta pressão e baixa emissão de poluentes
<b>API CH</b>	Idêntico ao API CG, porém com maior proteção contra o desgaste e a oxidação
<b>API CI</b>	Superior as categorias anteriores, proporciona maior proteção para os motores atuais, diminuindo o desgaste, a corrosão e redução na emissão de gases poluentes

Para motores ciclo Diesel, temos os níveis API vigentes: CF, CH e CI. A letra “C” significa *Commercial*, e a outra letra define o desempenho. O primeiro nível foi o API CA, obsoleto há muito tempo, consistindo em um óleo mineral puro, sem qualquer aditivação. Com a evolução dos motores, os óleos sofreram modificações, através da adição de aditivos e/ou melhora na qualidade do óleo básico utilizado na formulação, para atender às exigências dos fabricantes dos motores no que se refere à proteção contra desgaste e corrosão, redução de emissões e da formação de depósitos (Knochen, 2004). Esta classificação é de fácil entendimento já que a evolução das letras significa a evolução da qualidade dos óleos. Portanto, para a API, CI é melhor

que CH que por sua vez é melhor que CF e assim por diante. Por isso, quando é recomendado no manual do proprietário um óleo com classificação CH por exemplo, poderá ser usado um óleo CI, porém o contrário não é adequado (Muniz, 2015).

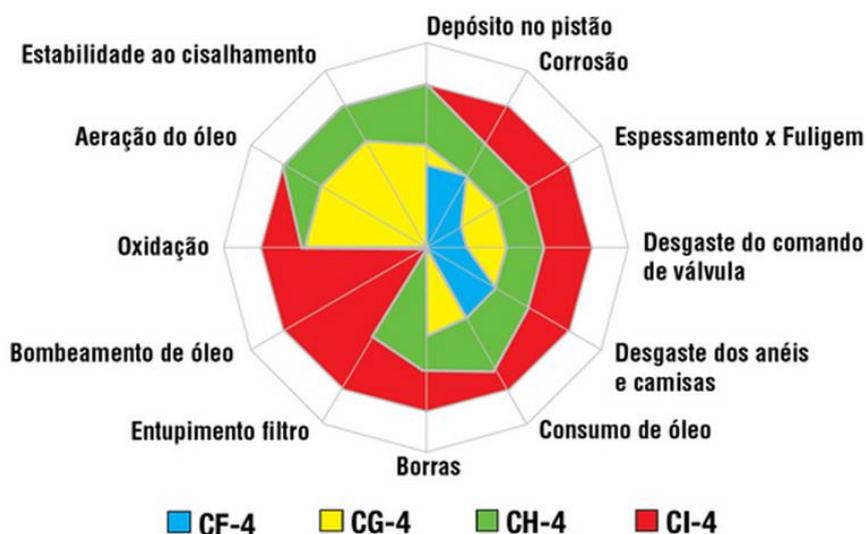


Figura 21 – Comparativo de desempenho API – motores Diesel.

Fonte: Paxlub (2015)

A Figura 21 exemplifica algumas características que são avaliadas nos óleos lubrificantes para classificá-lo no API. Como mencionado anteriormente o API avalia o desempenho do óleo lubrificante através de testes padronizados pela ASTM, originalmente conhecida como American Society for Testing and Materials e, a partir dos resultados dos testes o API classifica seguindo a escala demonstrada na Tabela 4 supracitada.

## 2.7 Análises físico-químicas do óleo lubrificante

O uso da análise de óleo como técnica de manutenção começou a ser aplicada na década 50. A crise do petróleo intensificou o uso da análise de óleo, que passou a cumprir uma nova função na manutenção das máquinas, permitindo o monitoramento das condições do óleo lubrificante e identificar a necessidade de troca ou apenas reposição parcial. Neste período foram introduzidas técnicas preditivas que permitiam através da análise de óleo

diagnosticar problemas nos equipamentos (Kim et al., 2013). Assim, as análises laboratoriais de amostras de óleos lubrificantes têm por finalidade:

- Acompanhar o desempenho do produto em uso;
- Avaliar as condições do equipamento como auxílio na manutenção preventiva;
- Resolver dificuldades relacionadas com o óleo lubrificante;
- Identificar produtos desconhecidos.

A análise físico-química tem como objetivo principal a identificação das condições do lubrificante. Estas análises podem ser efetuadas de forma pontual, ou seja, medidas isoladas; ou análise periódica, ao longo do tempo, para o acompanhamento das condições do lubrificante (Carreteiro, 2006). A seguir são descritas as principais análises físico-químicas utilizadas na manutenção dos equipamentos:

- Viscosidade Cinemática: é a medida de resistência ao escoamento de um fluido, é a principal propriedade dos óleos lubrificantes. A medida é feita a 40°C ou 100°C. A principal norma utilizada para a definição dos ensaios de viscosidade é a ASTM D445 e a unidade de medida mais utilizada é o *centistokes* (Evans, 1978).
- Análise por infravermelho: FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy ou Scan Full Spectrum*) é um teste onde a absorção de luz infravermelha é usada para avaliar os níveis de fuligem, sulfatos, oxidação, nitro-oxidação, glicol de combustível e contaminantes da água (Caneca et. al., 2006).
- Ferrografia: esta técnica de manutenção preditiva foi desenvolvida para aplicações militares pelo “*Naval Air Engineering Center of USA*” com a finalidade de aumentar a confiabilidade no diagnóstico de condições das máquinas. Esta técnica procurava superar as limitações de outras análises na identificação do mecanismo de desgaste dos componentes das máquinas. Os princípios básicos da Ferrografia são: (a) toda máquina apresenta desgaste; (b) o desgaste gera partículas; (c) o

tamanho e quantidade das partículas indicam a severidade do desgaste; (d) a morfologia e o acabamento superficial das partículas indicam o tipo de desgaste (Bertinatto, 2014).

Távora e Quelhas (2010) em seu trabalho destacaram que os óleos lubrificantes usados contêm produtos resultantes da deterioração parcial dos óleos em uso, tais como compostos oxigenados (ácidos orgânicos e cetonas), compostos aromáticos polinucleares de viscosidade elevada, resinas e lacas. Além dos produtos de degradação do óleo básico, estão presentes no óleo usado os aditivos que foram adicionados no processo de formulação e ainda não foram consumidos, metais de desgaste dos motores (ferro, chumbo, cromo, bário e cádmio) e contaminantes diversos, como água, combustível não queimado, poeira e outras impurezas.

Normalmente o óleo lubrificante atinge os limites de condenação de uma maneira lenta e progressiva e um só resultado de viscosidade, metais de desgaste e oxidação não fornece um argumento seguro para manter o óleo lubrificante em serviço ou condená-lo. Portanto é necessária a construção de um histórico, para acompanhamento da tendência do óleo lubrificante, com intervalos de coletas de amostras pré-estabelecidos para garantia da confiabilidade dos resultados (Leng, 1988).

### 2.7.1 Contaminação do óleo lubrificante

Um óleo lubrificante de alta qualidade, por si só não se deteriora facilmente. Porém, quando em serviço, está sujeito a várias espécies de contaminação e a natureza dos depósitos acumulados no interior de um motor Diesel varia de acordo com o estado dos seus componentes, com as temperaturas médias de operação e com o grau de pureza do combustível (Bosch, 2005).

Os contaminantes abrasivos são provenientes da poeira da estrada (sílica, cálcio, magnésio, etc.) e partículas metálicas que podem ser provenientes, no caso de motores novos ou recém-retificados, das operações de usinagem ou em motores em uso normal são oriundos do desgaste das peças em movimento relativo entre si. Estes metais incluem ferro, alumínio,

cobre, chumbo, cromo e outros metais constituintes do motor (Venkatesh, 1974).

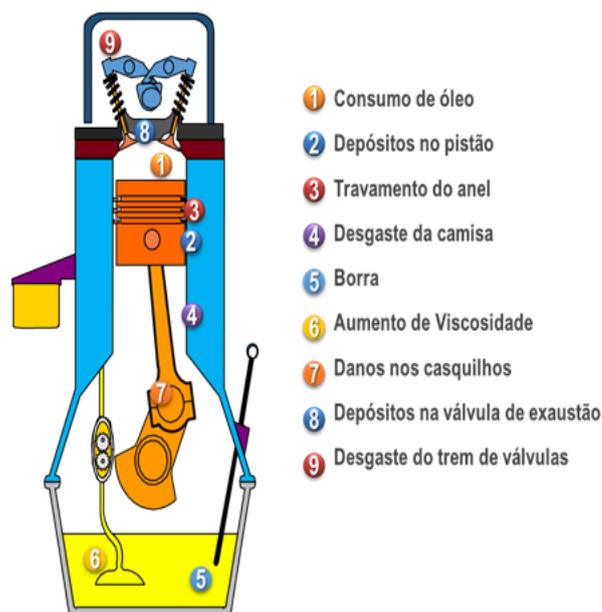


Figura 22 – Principais problemas na câmara de combustão.

Fonte: Texaco (2005)

A Figura 22 esquematiza os principais problemas do óleo lubrificante que ocorrem dentro da câmara de combustão de motores ciclo Diesel. Os resíduos da combustão, como a fuligem, formam-se continuamente em maior ou menor quantidade, em razão da queima do combustível nunca ser totalmente perfeita. A borra, por exemplo, consiste em fuligem oriunda do combustível, óleo e abrasivos e predomina no cárter e no comando de válvulas. Os depósitos existentes nas ranhuras dos aros e nos orifícios de retorno de óleo são similares, porém por se encontrarem nas partes mais baixas do pistão, onde as temperaturas são consideravelmente menores, são menos consistentes e um tanto pastosos (Coates; Shelley, 2006).

Embora inicialmente solúveis no óleo, os produtos de sua oxidação depositam-se quando as temperaturas descem, em camadas finas e aderentes, que recobrem as paredes do cilindro, saia do pistão e os mancais, e são reconhecidos como lacas e vernizes (Owring, 2004).

As partículas de fuligem e outros produtos parcialmente oxidados, resultantes da combustão incompleta, vão se formando continuamente. Grande

parte desses produtos vão se acumular no cárter com o óleo de retorno ou pelas folgas dos anéis, e ao acumularem-se no óleo lubrificante, o contaminam comprometendo aos poucos sua aditivação (Kim et al., 2013).

## 2.8 Degradação do óleo lubrificante do motor

Embora deva executar inúmeras tarefas, o óleo do motor não pode resolver totalmente o desgaste dos componentes mecânicos, nem evitar a diluição pelo combustível e contaminação com impurezas. Somente com a observação do óleo em uso, poderemos determinar com segurança o momento oportuno para efetuar a troca da carga. Além disso, a observação diária dos sistemas de ar, de combustível, de água e de filtragem torna possível descobrir a tempo, irregularidades de suma importância (Chun, 2011).

O processo de contaminação do óleo lubrificante de um motor Diesel gera algumas consequências danosas ao mesmo como podemos verificar na Tabela 5.

Tabela 5 – Efeitos da contaminação no motor Diesel (Carreteiro; Belmiro, 2006).

<b>NATUREZA DA CONTAMINAÇÃO</b>	<b>ORIGEM</b>	<b>EFEITOS</b>
Produtos solúveis e insolúveis da oxidação e deterioração	Combustível e óleo lubrificante	Redução da resistência à oxidação, formação de lacas, depósitos e lamas. Aumento da viscosidade do óleo.
Carvão sob a forma de fuligem	Combustível	Há formação de depósitos quando a quantidade é excessiva.
Pó e impurezas	Ar aspirado ou combustível	Formação de depósitos e, eventualmente, de lama. Desgaste por abrasão.
Partículas metálicas	Desgaste do motor	Formação de depósitos ou lamas e oxidação acelerada do óleo.

Continuação Tabela 5 – Efeitos da contaminação no motor Diesel (Carreteiro; Belmiro, 2006).

NATUREZA DA CONTAMINAÇÃO	ORIGEM	EFEITOS
Combustível	Fuga de gases Fuga no sistema de combustível	Diluição do óleo do cárter. Redução da viscosidade do óleo lubrificante e enfraquecimento da sua estabilidade química. Perigo de explosão no cárter.
Água	Condensação da umidade do ar Fuga no sistema de refrigeração Fuga no refrigerador de óleo	Ferrugem, emulsionamento, lamas. Diminuição da resistência do óleo à oxidação.

### 3 ESTADO DA ARTE

Os motores de combustão interna, neste caso os de ciclo Diesel, tornaram-se indispensável para vários setores da economia, desde o segmento de transporte de carga a transporte de passageiros. Existem diversos trabalhos relacionados a maneiras para obtenção do máximo rendimento e durabilidade desses motores e, com isso, também diminuir as emissões de gases nocivos ao meio ambiente (Fygueroa, 1997).

Com o passar do tempo, o óleo aplicado no motor ciclo Diesel perde a suas propriedades. Com isso, a proteção que reveste as partes móveis que ficam em contato no seu interior, como bielas, anéis, cilindros, válvulas, entre outras peças, sofrem excessivo desgaste e conseqüente diminuição na sua vida útil. Para preservar e conservar o motor ciclo Diesel é muito importante avaliar o período ideal para drenagem do óleo aplicado, ação que representa economia, oferece maior vida útil, além de ajudar a resfriar e limpar o motor (Kimura, 2010).

Para elementos de máquinas, em especial motores de combustão interna, tem recebido destaque a área de desenvolvimento de novos óleos lubrificantes que reduzem o atrito, com conseqüente redução do desgaste. Para responder

a esta demanda, foi escolhida como área de estudos as perdas mecânicas, mais precisamente aquelas causadas por lubrificação ineficiente que geram um acentuado desgaste e desprendimento de metais dos componentes lubrificadas e estudos relacionados a degradação química e física do óleo lubrificante com o decorrer do seu uso no motor, irregularidades estas facilmente identificadas pela análise de óleo lubrificante (Pouzar; Cernohorsky. Krejcova, 2001).

Muitas pesquisas vêm sendo realizadas com intuito de avaliar a qualidade do óleo lubrificante de motores ciclo diesel. A Tabela 6 apresenta alguns trabalhos relacionados ao tema, com as propriedades analisadas e os resultados encontrados e a seguir são detalhados outros trabalhos.

Fygueroa (1997) afirma em seu trabalho que a análise do óleo lubrificante consiste em coletar amostras de óleo em um determinado período de funcionamento do motor e, logo após avalia-las para determinar alterações tanto no motor quanto no óleo lubrificante.

Através de estudos realizados no perfil das partículas encontradas no filtro de óleo do motor após a drenagem do mesmo, com o objetivo de obtenção de informações sobre o desempenho e monitoramento do motor, (Mousa; Gohar, 2006) concluiu que os filtros possuem informações relevantes sobre as partículas de desgaste e outros contaminantes sólidos, ratificando assim a importância da substituição do filtro de óleo lubrificante no ato de drenagem do mesmo.

Silveira et al. (2010) propôs um procedimento para examinar óleos lubrificantes usados no transporte público, em Teresina-PI. As amostras de óleo usado apresentaram uma tendência de aumento na concentração de todos os metais analisados em relação ao óleo novo, sugerindo ainda que o aumento na concentração, desses metais, está relacionado com a qualidade das peças que constituem os motores e o tipo de percurso realizado pelo veículo. Os resultados expostos permitiram sugerir que a presença de Fe, Cu e Ni em óleos lubrificantes usados é influenciada pelos fatores: ano de fabricação, distância percorrida e tipo do motor do veículo.

Tabela 6 – Artigos científicos relacionados à lubrificação de motores.

<b>Fonte</b>	<b>Estudo</b>	<b>Resultado</b>
<b>Venkatesh, 1974</b>	Desgaste do motor através de análise de óleo de motores diesel estacionários	Desgaste crítico nos anéis de segmento do motor e aumento significativo do nível de oxidação, acidez e consumo do óleo lubrificante.
<b>Borin, 2003</b>	Aplicação de espectroscopia no infravermelho no controle de qualidade de óleo lubrificante usado	Quimiometria através de espectroscopia no IR bastante eficaz para identificação de partículas de desgaste e contaminação por água e etilenoglicol
<b>Silveira et al., 2010</b>	Determinação de metais em óleos lubrificantes, provenientes de motores de ônibus urbano	As amostras de óleo usado apresentaram uma tendência de aumento na concentração de todos os metais analisados em relação ao óleo novo.
<b>Possamai, 2011</b>	Análise de óleo lubrificante de motor diesel para detecção de desgaste em motores Diesel após amaciamento	Evidenciou-se que o sistema tribológico fora seriamente comprometido por desgaste do casquilho (bronzina), que apresenta um revestimento superficial de alumínio e estanho.
<b>Diaby et al., 2013</b>	Fatores de impacto para a degradação do óleo do motor causando depósitos carbonáceos em sulcos do pistão de motores diesel	Concluiu que fatores como: temperatura, tempo, e qualidade do gás, são fatores que agem na degradação termo-oxidativa do lubrificante ocasionando depósitos carbonáceos nos sulcos do pistão principalmente em motores equipados com EGR
<b>Lara, 2015</b>	Controle de Qualidade no lubrificante, quimiometria avaliando o desgaste	Considerável aumento no teor de Mg, Zn e Fe proveniente do desgaste metálico no motor analisado. No entanto percebeu-se uma diminuição no teor de fósforo, atribuída a mudanças na estrutura química dos aditivos no óleo lubrificante.

A preocupação com a oxidação do lubrificante já existe há bastante tempo como podemos observar no trabalho de Najjar (1987) que realizou observações em motores estacionários de grande porte utilizados para geração de energia, utilizando lubrificante. O autor observou nos seus resultados que após 4.296 horas de operação o nível de oxidação aumenta quase em 1% da massa quando comparado ao lubrificante novo.

Freitas et al. (2013) fez um estudo bastante relevante em relação a influência da tensão de cisalhamento na viscosidade de diferentes tipos de lubrificantes. Quando analisamos os seus resultados para o lubrificante com as mesmas especificações do estudado no presente trabalho, observamos que ele não perde suas propriedades viscométricas mesmo exposto a uma tensão de cisalhamento da ordem de 300 Pascal, demonstrando assim uma excelente resistência ao atrito.

Kimura (2010) estudando níveis de desgaste através de análise de óleo lubrificante em motores diesel estacionários, utilizando diferentes misturas de biodiesel concluiu que em relação aos ensaios feitos as imagens obtidas na ferrografia analítica indicaram que as partículas de desgaste possuem dimensões e morfologias normais para o regime de trabalho adotado, e as dimensões em sua maioria não ultrapassaram 10  $\mu\text{m}$ , tamanhos estes considerados como um desgaste normal. Em relação aos valores encontrados através da absorção atômica indicam a presença normal dentre os valores obtidos dos elementos. A avaliação realizada para determinar se os níveis de partículas encontrados estão dentro da normalidade baseou-se no monitoramento contínuo do equipamento, desta forma uma alteração brusca nas quantidades dos elementos presentes no óleo indicaria uma falha ou uma possível interferência externa (desalinhamento, desbalanceamento, sobrecarga) sobre o equipamento.

Malpica (2007) desenvolveu uma excelente pesquisa em relação a manutenção preditiva de motores de combustão interna à gasolina através da técnica de análise de óleos lubrificantes, onde defendeu que esta análise permite identificar com clareza os primeiros sintomas de desgaste de um componente e que esta identificação é feita a partir do estudo da quantidade de partículas, tamanho, forma e composição, que fornecem informações sobre as condições das superfícies em movimento sem a necessidade de se desmontar

o conjunto a qual estas partes pertencem. Analisando o óleo de dois motores de combustão interna, à gasolina, um em estado avançado de deterioração e o outro novo, montados em uma bancada e com fornecimento de carga através de um redutor de velocidades, Malpica (2007) percebeu que mesmo o motor em estado avançado de deterioração, a geração de partículas nem sempre é grande e que a utilização de apenas uma técnica de análise de óleos lubrificante não é o suficiente para se determinar o estado de degradação do motor.

Santos et al. (2005) realizou um trabalho acompanhando a evolução da oxidação por degradação térmica utilizando cromatografia gasosa e espectrometria de massa em lubrificantes de motor ciclo Otto comparando o desempenho do lubrificante sintético sobre o mineral. Ao final ele observou que durante o processo de degradação térmica, algumas amostras de óleos lubrificantes minerais e sintéticos, formaram partículas em suspensão e gomas que ficaram depositadas, mas de acordo com os resultados, pode-se verificar que o óleo lubrificante de base totalmente sintética, foi o mais resistente a degradação.

Segundo Garcia, Schweizer (2009) fez um interessante estudo teórico sobre a relação do atrito com a redução do consumo de combustível e diminuição nas emissões de poluente. Ao final de sua pesquisa o autor conclui que a variação na espessura do filme de óleo lubrificante ao longo de um ciclo é a razão das alterações do regime de atrito dos anéis do pistão, com conseqüente mudança nos regimes de lubrificação. Ele estima que uma redução de 10% do atrito de acionamento do automóvel resultaria em até 3% de economia de combustível e uma redução de 18.750 toneladas na emissão de CO<sub>2</sub>.

Silveira et al. (2010) tem grande destaque no estudo desta variável pois ele estudou e analisou o lubrificante utilizado nos motores de tratores agrícolas operando em usinas de cana-de-açúcar, local este bastante propenso a contaminação por silício do lubrificante. O autor concluiu que a probabilidade de confiabilidade decresceu para 80,00% em 387 horas, em seguida, para 60,00% em 445 horas, e para 20,00% em 537 horas, permanecendo com esse valor até a troca do óleo lubrificante com 577 horas de uso.

Silveira et al. (2006) afirma que as análises de óleos lubrificantes de motores de tratores agrícolas são importantes como meio gerador de informações à manutenção mecânica. No seu trabalho foram utilizados dados referentes ao tempo de utilização do óleo lubrificante no motor de 16 tratores agrícolas, através das seguintes variáveis explanatórias: viscosidade, ponto de fulgor, diluição por combustível, fuligem, presença de água e desgaste metálico (Fe, Cu, Cr, Pb, Al e Si), os resultados obtidos foram avaliados estatisticamente através do modelo de Cox e as curvas de confiabilidade foram definidas seguindo modelo do estimador de Kaplan-Meier. Ao final dos testes o autor concluiu que as variáveis explanatórias não foram significativas para o período de troca do óleo lubrificante e que a utilização do modelo de Cox e estimador de Kaplan-Meier foram bastante apropriados para explicar o comportamento das variáveis explanatórias e permitiu identificar o comportamento do óleo lubrificante durante o período de uso.

Desta forma, a análise físico-química do óleo lubrificante de motores ciclo diesel trata-se de um tema bastante difundido nos trabalhos acadêmicos como observamos nos trabalhos supracitados, este método preditivo é utilizado muitas vezes para avaliar o grau de degradação do motor e envelhecimento do óleo lubrificante. Neste contexto, o foco do presente trabalho foi realizar uma avaliação do impacto da extensão de prazo de troca de óleo lubrificante em uma frota de ônibus, utilizando parâmetros físico-químicos em sua avaliação aplicando aos resultados obtidos um estudo estatístico para identificar em que ponto exatamente o óleo perde suas propriedades interferindo significativamente no desgaste das partes móveis do motor, além de possibilitar realizar uma avaliação ampla, com dados de toda uma frota e não de um motor isoladamente.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliação do impacto da extensão do intervalo de drenagem do óleo lubrificante utilizados em motores ciclo de diesel que equipavam ônibus de transporte urbano, foram realizadas análises físico-químicas no óleo lubrificante utilizado em diferentes períodos de utilização avaliando alterações nos valores das seguintes variáveis: viscosidade, oxidação e desgaste metálico (teor de ferro, cobre e silício). As premissas para o desenvolvimento do projeto foi que os veículos utilizados no presente estudo possuíam rotas pré-determinadas, regime de trabalho estritamente urbano e quilometragem média diária de 289 km. Os materiais técnicos fornecidos pelo laboratório do fabricante do óleo lubrificante e informações contidas no manual dos veículos estudados determinaram o limite para variação da viscosidade, oxidação e níveis máximos de contaminação metálica (ferro, cobre e silício) no óleo lubrificante utilizado. A seguir, são detalhadas as etapas metodológicas para a avaliação experimental.

### 4.1 Campanha de coleta para avaliação do óleo lubrificante

#### 4.1.1 Veículos utilizados no estudo da degradação do óleo lubrificante

Para avaliar os efeitos da condição operacional do sistema motriz dos veículos sobre a degradação do óleo lubrificante e contaminação do mesmo por partículas metálicas, foram coletadas amostras de 20 ônibus da marca Volkswagen, modelo 17230 EOD, ano de fabricação 2010 e 2011, conforme chassi do motor (Figura 23).

Os veículos selecionados operavam em regime diário estritamente urbano com rotas variadas, quilometragem média diária em torno de 289 Km e equipados com motor MWM 6.12 TCE – Euro 3 com dados técnicos descrito na Tabela 7.

O modelo do motor selecionado para o estudo possui seis cilindros em linha (Cummins), introduzido em serviço em 2010 (10 veículos) e em 2011 (10 veículos). O pacote de anel é constituído por três anéis; anel de topo, anel raspador de óleo e anel de controle de óleo. O motor é refrigerado com solução

arrefecedora, composta de 50% de água e 50% de fluido de arrefecimento à base de monoetilenoglicol e naturalmente aspirado com injeção indireta.

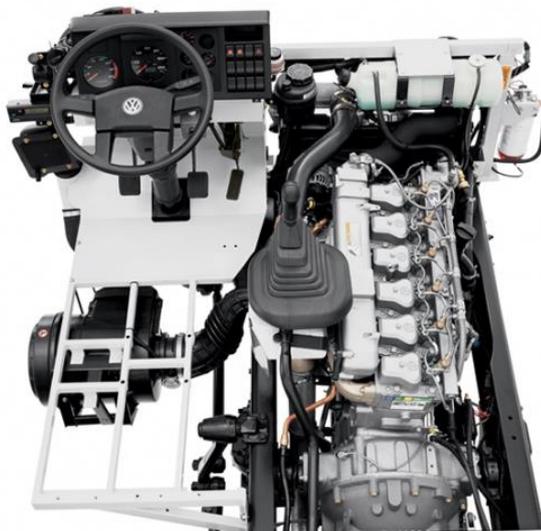


Figura 23 – Ilustração do chassi do veículo VW 17230 EOD.

Fonte: Folheto técnico (2011)

Tabela 7 – Especificações técnicas do motor.  
(Manual do Volksbus 17230, 2010/2011)

<b>Modelo</b>	<b>MWM 6.12 TCE – Euro III (Turbo e Intercooler)</b>
Nº de cilindros / cilindrada (cm <sup>3</sup> )	6 em linha / 7.2
Diâmetro do pistão (mm)	105
Curso do pistão (mm)	137
Relação de compressão	16,9:1
Potência liq.máx – cv(kW)@rpm*	225(165)@2.200
Torque liq.máx – kgfm(Nm)@rpm	84,6(830)@1.200-1.600
Sequência de injeção	1-5-3-6-2-4
Sistema de injeção	Common Rail
Compressor de ar	Knorr – LK 38
Norma de emissões	Conama P5

(\*) Valores conforme ensaio NBR ISSO 1585

O regime urbano possui rotas na cidade de Salvador, BA com trechos diversos compreendendo aclives, declives, proximidade ao mar e em alguns pontos condições ruins de estrada. A Tabela 8 descreve as rotas seguidas pelos veículos utilizados na campanha de amostragem.

Tabela 8 – Rota dos veículos analisados

<b>Nº da Ordem</b>	<b>Quilometragem diária (média)</b>	<b>Rota</b>
<b>Veículo 1</b>	298	Marechal Rodon - Pituba
<b>Veículo 2</b>	287	Ribeira/Plataforma - S.J. do Cabrito
<b>Veículo 3</b>	311	Marechal Rodon - Brotas
<b>Veículo 4</b>	342	Estação Pirajá - Brotas
<b>Veículo 5</b>	272	Estação Pirajá - Barra 3
<b>Veículo 6</b>	294	Conj. Pirajá - Est. Pirajá
<b>Veículo 7</b>	287	Marechal Rodon - Brotas
<b>Veículo 8</b>	272	Estação Pirajá - Barra 3
<b>Veículo 9</b>	291	Pirajá - Barra
<b>Veículo 10</b>	279	Pirajá - Lapa
<b>Veículo 11</b>	274	Castelo Branco - Lapa
<b>Veículo 12</b>	281	Pirajá - Pituba
<b>Veículo 13</b>	304	Marechal Rodon - Lapa
<b>Veículo 14</b>	301	Pirajá - Brotas
<b>Veículo 15</b>	288	Conjunto Pirajá - Ribeira
<b>Veículo 16</b>	322	Estação Pirajá - Barra
<b>Veículo 17</b>	239	Estação Pirajá - Barra
<b>Veículo 18</b>	310	Conj. Pirajá - Est. Pirajá
<b>Veículo 19</b>	245	Conj. Pirajá - Est. Pirajá
<b>Veículo 20</b>	276	Conj. Pirajá - Est. Pirajá

A realização da campanha de coleta para avaliação do óleo lubrificante API CI foi realizada no período de março a novembro de 2013. Dessa forma, a coleta de óleo lubrificante foi planejada de acordo com a descrição contida na Tabela 9, onde foi pré-estabelecida a data específica que os veículos estariam na quilometragem desejada para coleta de amostra.

As coletas foram realizadas em 7 diferentes períodos de utilização do óleo lubrificante estabelecendo uma variação 5 Km por período (10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 Km) com o objetivo de acompanhar o comportamento de oscilação das variáveis, criando assim um acompanhamento por tendência e não avaliando pontualmente tal comportamento.

Tabela 9 – Planejamento de coletas de óleo lubrificante.

Veículo	10.000 Km	15.000 Km	20.000 Km	25.000 Km	30.000 Km	35.000 Km	40.000 Km
Veículo 1	02/05/2013	25/05/2013	19/06/2013	14/07/2013	08/08/2013	02/09/2013	27/09/2013
Veículo 2	23/04/2013	15/05/2013	08/06/2013	02/07/2013	26/07/2013	19/08/2013	12/09/2013
Veículo 3	29/04/2013	29/05/2013	28/06/2013	28/07/2013	27/08/2013	26/09/2013	26/10/2013
Veículo 4	22/04/2013	07/05/2013	26/05/2013	14/06/2013	03/07/2013	22/07/2013	10/08/2013
Veículo 5	30/04/2013	17/05/2013	05/06/2013	24/06/2013	13/07/2013	01/08/2013	20/08/2013
Veículo 6	21/04/2013	14/05/2013	10/06/2013	07/07/2013	03/08/2013	30/08/2013	26/09/2013
Veículo 7	22/04/2013	06/05/2013	30/05/2013	23/06/2013	17/07/2013	10/08/2013	03/09/2013
Veículo 8	23/04/2013	10/05/2013	03/06/2013	27/06/2013	21/07/2013	14/08/2013	07/09/2013
Veículo 9	03/05/2013	25/05/2013	16/06/2013	08/07/2013	30/07/2013	21/08/2013	12/09/2013
Veículo 10	20/04/2013	12/05/2013	03/06/2013	25/06/2013	17/07/2013	08/08/2013	30/08/2013
Veículo 11	01/03/2013	18/03/2013	04/04/2013	21/04/2013	08/05/2013	25/05/2013	11/06/2013
Veículo 12	19/04/2013	09/05/2013	29/05/2013	18/06/2013	08/07/2013	28/07/2013	17/08/2013
Veículo 13	20/04/2013	09/05/2013	28/05/2013	16/06/2013	05/07/2013	24/07/2013	12/08/2013
Veículo 14	01/03/2013	18/04/2013	12/05/2013	31/05/2013	19/06/2013	08/07/2013	27/07/2013
Veículo 15	18/04/2013	29/05/2013	22/06/2013	15/07/2013	07/08/2013	30/08/2013	22/09/2013
Veículo 16	18/04/2013	03/05/2013	18/05/2013	02/06/2013	17/06/2013	02/07/2013	17/07/2013
Veículo 17	04/05/2013	24/05/2013	13/06/2013	03/07/2013	23/07/2013	12/08/2013	01/09/2013
Veículo 18	12/05/2013	29/05/2013	23/06/2013	18/07/2013	12/08/2013	06/09/2013	01/10/2013
Veículo 19	12/05/2013	11/06/2013	11/07/2013	10/08/2013	09/09/2013	09/10/2013	08/11/2013
Veículo 20	20/04/2013	12/05/2013	03/06/2013	25/06/2013	17/07/2013	08/08/2013	30/08/2013

#### 4.1.2 Óleo lubrificante utilizado

O lubrificante utilizado no presente estudo possui especificação de viscosidade SAE 15W40, segundo norma ASTM D 445, classificação API CI, específica para motores de quatro tempos. A Tabela 10 relaciona todas as aprovações e especificações que o lubrificante utilizando atende:

Outras informações relevantes sobre o lubrificante utilizado são suas características técnicas, que estão descritas na Tabela 11 juntamente com seus respectivos métodos ASTM para identificação:

Tabela 10 – Especificações e aprovações do óleo lubrificante.

<b>Descritivo</b>	<b>Aprovações e Especificações</b>
<b>Classificação de desempenho (EUA)</b>	API CI
<b>Classificação de desempenho (EUROPA)</b>	ACEA E7
<b>Aprovações de OEM's</b>	Caterpillar ECF-2 Cummins CES 20078 JASO DH-1 MB 228.3 Mack EO-M Plus /EP-N Volvo VDS-3 MAN 3275-1 Renault Trucks RLD-2 Detroit 7SE 270 (4-Stroke Cycle) MTU Oil Category 2

Tabela 11 – Características típicas do lubrificante.

<b>Características típicas</b>	<b>Valor</b>
Grau SAE	15W-40
Viscosidade à 40°C, ASTM D 445	108
Viscosidade à 100°C, ASTM D 445	14,44
Índice de Viscosidade, ASTM D2270	136
Teor de cinzas sulfatadas, % peso, ASTM D874	0,9
Número total de base, mg KOH/g, ASTM D 874	10
Ponto de Fluidez, °C, ASTM D97	-30
Ponto de Fulgor, °C, ASTM D92	215
Densidade a 5°C, kg/l, ASTM D4052	0,88
Oxidação, ASTM E2412	4
Teor de Ferro, ppm, ASTM D6595	3,32
Teor de Cobre, ppm, ASTM D6595	1,17
Teor de Silício, ppm, ASTM D6595	2,49

As amostras foram coletadas através do duto da vareta de nível do óleo, utilizando mangueira de borracha flexível transparente acoplada a uma bomba manual de sucção. Os cuidados tomados no ato da coleta das amostras foram:

- Garantia da homogeneidade da amostra coletando do motor recém desligado;

- Para evitar contaminação no local de retirada da amostra, foram utilizadas mangueiras flexíveis para cada coleta;
- O recipiente de coleta foi lacrado, para evitar qualquer contaminação;
- O ponto de coleta foi sempre o mesmo, o duto da vareta de nível do óleo do moto conforme ilustrado na Figura 24;
- As amostras foram identificadas com todas as informações necessárias como: nome do óleo lubrificante, identificação do veículo e tempo de utilização do óleo lubrificante.

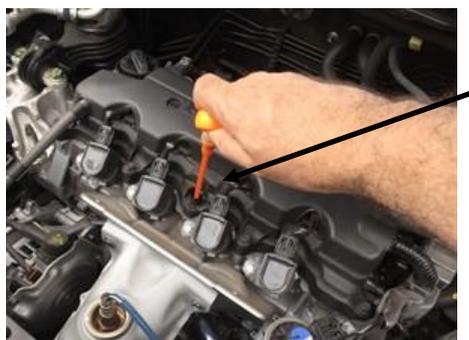


Figura 24 – Duto da vareta de medição do nível de óleo lubrificante.

Fonte: Marum (2015)

Para a coleta do óleo lubrificante foi utilizada uma bomba de vácuo manual, a qual foi fixada no recipiente de polietileno para armazenamento da amostra em temperatura ambiente e foram coletadas amostras de 250 mL em cada ciclo de quilometragem (Figura 25).



Figura 25 – Bomba manual de sucção com vasilhame plástico.

Fonte: Maxxilub (2015)

O óleo foi coletado através de uma mangueira direcionada ao reservatório de óleo pela tubulação da vareta de medição de nível, a uma altura pré-determinada (o meio do cárter de óleo) para evitar coleta em pontos de acúmulo de contaminantes. Após a coleta as mostras foram encaminhadas para análise das propriedades físico-químicas do óleo.

#### 4.2 Análise físico-química das amostras de óleo lubrificante

As variáveis monitoradas foram escolhidas segundo relevância e disponibilidade de técnicas para sua realização. Assim, foram analisadas as propriedades: viscosidade, oxidação e teor de metais (ferro, cobre e silício). A caracterização físico-química das amostras coletadas foi realizada utilizando as normas e equipamentos descritos na Tabela 12.

Tabela 12 – Métodos de análise utilizados na avaliação dos óleos lubrificantes.

<b>Variável</b>	<b>Norma</b>	<b>Equipamento</b>
Viscosidade	ASTM D445	Viscosímetro
Oxidação	ASTM E2412	Espectrômetro de infravermelho
Metais (Fe, Cu e Si)	ASTM D6595	Espectrômetro de Emissão Atômica RDE

Dentro das propriedades reológicas, a viscosidade é uma das principais características a ser caracterizada nos óleos lubrificantes, uma vez que ela determina a capacidade de carregamento de carga, bem como de características como fluidez e fluxo de calor, devendo ser mantida dentro de limites pré-estabelecidos (Carreteiro; Belmiro, 2006). O viscosímetro utilizado para análise deste parâmetro foi o Viscosímetro Stabinger SVM 3001 da marca Anton Paar. A determinação da viscosidade foi baseada na norma ASTM D445 que especifica um processo para a determinação da viscosidade cinemática de produtos líquidos derivados do petróleo, tanto transparentes e opacos, por medição do tempo para um volume de líquido a fluir por ação da gravidade

através de um viscosímetro capilar de vidro calibrado. A viscosidade foi medida em triplica para todas as amostras de óleo.

Na Tabela 13 estão descritos os limites máximos e mínimos de variação para a viscosidade do óleo lubrificante utilizado neste trabalho. O aumento desta propriedade durante o uso pode ser devido a: presença de compostos oxidados, contaminação por um fluido de maior viscosidade, presença de compostos insolúveis e presença de água. Contudo, sua diminuição ocorre normalmente devido a: contaminação por combustível, contaminação por um fluido de menor viscosidade e quebra da molécula do aditivo melhorador de índice de viscosidade.

Tabela 13 – Variação da viscosidade.

<b>Óleo SAE 15W40</b>	<b>Viscosidade (cSt. à 100°C)</b>
Lubrificante novo	14,40
Limite de variação (Mínima)	11,36.
Limite de variação (Máxima)	15,62

A oxidação observada nas amostras de lubrificantes é uma das análises mais complexas, porque deve ser realizada paralelamente com os seguintes parâmetros: a) queda dos índices de basicidade do óleo lubrificante; b) cruzamento observado entre valores do teor de acidez versus o teor de basicidade; c) aumento de viscosidade; d) eventos observados de aumento de temperatura de trabalho do motor. Isso dificulta a escolha de um valor fixo para condenar determinada amostra por oxidação. Entretanto, os demais parâmetros aqui citados, necessariamente não podem ser adversos nessa mesma amostra, sob risco de se recomendar troca da carga de óleo ou parada do motor.

A determinação da oxidação foi realizada seguindo a metodologia descrita na norma ASTM E2412. Esta norma aborda o uso da espectroscopia no infravermelho por absorção atômica para o monitoramento do nível dos

aditivos no óleo lubrificante, o acúmulo de contaminantes externos, a degradação do óleo lubrificante e, a oxidação como evidência da degradação do óleo lubrificante. Assim, foi utilizado um espectrômetro de infravermelho de alto desempenho e de tamanho compacto (Tensor II, da marca Bruker) para avaliação da oxidação do óleo API CI. Baseado em informações cedidas pelo fabricante do óleo lubrificante estudado, a Tabela 14 descreve o limite máximo para oxidação adotado no presente trabalho.

Tabela 14 – Limite máximo de oxidação.

<b>Óleo lubrificante</b>	<b>Nível de oxidação</b>
Lubrificante novo	4
Limite máximo	6

A determinação de certos metais em óleos lubrificantes usados é uma prática usual na manutenção das máquinas e vem sendo implementada como uma parte do programa de manutenção preditiva de empresas. Na manutenção preditiva, as propriedades físico-químicas do óleo são estudadas para determinar o tempo apropriado para substituí-lo e o desgaste do motor é monitorado através dos teores de metais no óleo lubrificante. A norma ASTM D6595 aborda a determinação de detritos no óleo lubrificante usado e é tida como um método de diagnóstico praticado em programas de monitoramento das condições do equipamento. O método de ensaio é capaz de detectar e quantificar os elementos resultantes do desgaste e de contaminação que variam a partir de materiais dissolvidos em partículas de aproximadamente 10 micrômetros de tamanho através de um disco eletrodo rotativo de espectroscopia de emissão atômica (RDE-AES). Assim, para análise de metais foi utilizado um Espectrômetro de Emissão Atômica RDE (Spectroil M, da marca Spectro Scientific), um espectrômetro robusto e compacto projetado especificamente para avaliação de metais em óleos lubrificantes. A Tabela 15 demonstra os limites máximos de concentração dos metais estudados, tais limites foram retirados do manual do fabricante do veículo e são baseados em

estudos de desempenho desenvolvidos em fábrica para o modelo de motor do presente estudo.

Tabela 15 – Limites máximos para presença de metais.

<b>Metal</b>	<b>Concentração máxima (ppm)</b>
Ferro (Fe)	80
Silício (Si)	10
Cobre (Cu)	30

É importante destacar que todos os equipamentos utilizados nas análises deste trabalho estavam com o certificado de calibração em dia, o laboratório escolhido possui ISO 9001:2008 para os procedimentos internos de análise de óleo lubrificante.

#### 4.2.1 Controle de reabastecimentos parciais de óleo lubrificante

Mesmo com toda tecnologia no desenvolvimento de peças e motores, o óleo ainda é consumido, diminuindo o nível no reservatório durante o seu uso. Grande parte desse lubrificante é usado nos pistões e cilindros para facilitar o deslocamento e acaba sendo parcialmente consumido. Em sua rotina de operação constante acabam também surgindo perdas de lubrificante por evaporação (contato com as zonas quentes) e por queima na câmara de combustão. Devido a isso, existe a necessidade de realizar reabastecimentos parciais frequentes para que a quantidade mínima de óleo lubrificante do motor não seja ultrapassada. Dessa forma, tal prática influenciou diretamente nos resultados obtidos através das análises físico-químicas realizados no óleo lubrificante usado no presente trabalho. A Tabela 16 registra em litros as quantidades de óleo que foram reabastecidas em cada veículo estudado em suas respectivas quilometragens analisadas para estabelecer, caso exista, uma

relação entre os resultados obtidos a partir das análises físico-químicas e os reabastecimentos de óleo lubrificante.

Tabela 16 – Controle de reabastecimentos de óleo lubrificante durante o período analisado.

Veículo	Quilometragem rodada (Km)							Total de reabastecimento (L)
	10.000 (L)	15.000 (L)	20.000 (L)	25.000 (L)	30.000 (L)	35.000 (L)	40.000 (L)	
Veículo 1	-	1	2	1	2	-	1	7
Veículo 2	1	-	1	1	2	-	-	5
Veículo 3	-	1	2	1	-	1	1	6
Veículo 4	1	-	1	1	1	2	1	7
Veículo 5	-	2	1	2	1	1	-	7
Veículo 6	-	1	2	1	1	-	1	6
Veículo 7	-	1	2	1	-	1	2	7
Veículo 8	1	-	1	2	1	-	1	6
Veículo 9	1	-	-	-	1	-	-	2
Veículo 10	-	1	2	1	-	1	-	5
Veículo 11	1	1	1	1	1	1	1	7
Veículo 12	-	1	1	-	2	-	1	5
Veículo 13	-	-	1	1	1	1	-	4
Veículo 14	1	-	-	1	-	1	1	4
Veículo 15	-	1	-	1	1	-	1	4
Veículo 16	1	1	1	2	-	1	-	6
Veículo 17	1	1	1	1	-	-	1	5
Veículo 18	-	1	1	-	-	1	1	4
Veículo 19	1	-	1	1	1	-	1	5
Veículo 20	-	-	-	1	-	1	-	2

De uma forma geral pode-se dizer que foi reabastecido um volume médio de aproximadamente de 5 litros de óleo lubrificante por veículo durante o período analisado e, um volume máximo e mínimo de 7 e 2 litros respectivamente. Conforme ilustrado na Tabela 16, foi possível agrupar em 5 grupos (verde, azul, amarelo, rosa e laranja) os volumes de reabastecimento, que foi utilizado para a discussão dos resultados obtidos neste trabalho. O volume total de óleo lubrificante dos veículos estudados é de 20 L. O que significa dizer que em média foram adicionados de 10 a 35 % de óleo lubrificante nos veículos no período de teste. Levando em consideração que, na prática, o ideal seria um reabastecimento de 1 L de óleo lubrificante a cada 5.000 Km rodados em um motor ciclo diesel, o percentual de 35% de

reabastecimento está dentro do esperado na prática para o acúmulo de 40.000 Km rodados (40% de reabastecimento).

#### 4.3 Avaliação do impacto da extensão do intervalo de drenagem do óleo

O impacto da extensão do intervalo de drenagem do óleo API CI utilizado em veículos com motores ciclo diesel foi avaliado através da aplicação da ferramenta *Box Plot* ou diagrama de caixa nos dados obtidos, utilizando o software Excel 2010. Um *box plot* é um sumário gráfico da distribuição de uma amostra que exhibe sua forma, tendência central e variabilidade, o que auxilia significativamente na mineração, visualização e interpretação dos resultados dos ensaios. Através da disposição dos valores em ordem crescente tem-se uma ideia clara sobre a localização e a dispersão dos dados de um conjunto de amostras. Conforme demonstrado na Figura 26, para elaboração o gráfico *box plot* foi necessário calcular: a mediana, o primeiro e terceiro quartil, a adjacente inferior e superior.

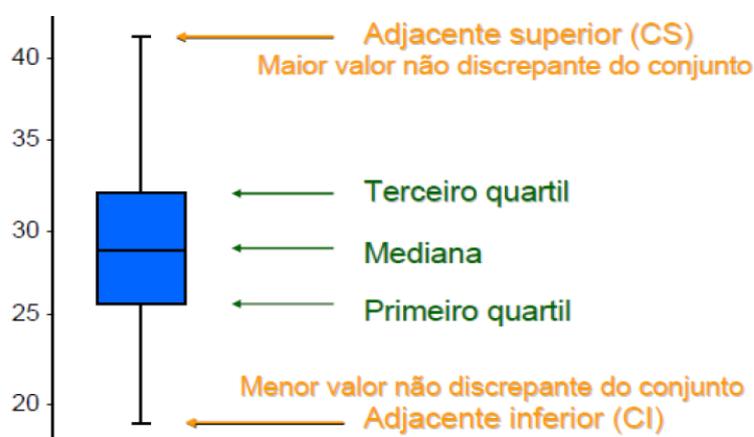


Figura 26 – Esquema demonstrativo do Boxplot.

Fonte: Adaptado de (Oliveira, 2011)

Através dos resultados obtidos foi realizada uma avaliação não só do impacto da extensão do intervalo de drenagem do óleo API CI como também do impacto do reabastecimento necessário do óleo lubrificante no motor nas propriedades estudadas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise das amostras de óleos lubrificantes

A lubrificação pode ser considerada como um princípio básico para o funcionamento da maioria dos equipamentos. Porém, a lubrificação é uma das causas de falha mais comuns nos motores ciclo diesel, podendo causar sérios prejuízos operacionais e danos nos motores.

Dentre os parâmetros físico-químicos avaliados no presente estudo, a viscosidade e a oxidação do óleo lubrificante são os parâmetros que merecem maior atenção, devido sua irreversibilidade perante as condições de uso deste, ou seja, após alterações destas variáveis, a única alternativa é a substituição parcial ou total de toda carga lubrificante. Diferente do que ocorre quando o óleo lubrificante é contaminado por partículas sólidas, pois neste caso basta que seja realizado uma filtragem para a resolução do problema.

A avaliação do teor de metais em óleos lubrificantes é uma prática usual na manutenção de motores ciclo diesel e, tem sido fundamental para prevenir falhas no motor, controlar a qualidade do motor e identificar algumas alterações específicas na condição operacional do veículo.

#### 5.1.1 Avaliação da viscosidade

A viscosidade é uma das principais características físicas monitorada nos óleos lubrificantes, uma vez que ela determina a capacidade de carregamento de carga, bem como de características como fluidez e fluxo de calor devendo ser mantida dentro de limites pré-estabelecidos. A alteração da variável viscosidade é atribuída à degradação das amostras durante o uso, pois esta propriedade é sensível ao tamanho molecular e ao estado de agregação. Mudanças na viscosidade dinâmica dos óleos lubrificantes afetam diretamente a capacidade de lubrificação e proteção das partes móveis do motor.

A Tabela 17 apresenta os resultados (cSt à 100°C) obtidos a partir da análise das amostras coletadas em cada período de estudo.

Tabela 17 – Resultados obtidos para viscosidade (cSt à 100°C).

Veículo	Quilometragem rodada (Km)						
	10.000 (cSt à 100°C)	15.000 (cSt à 100°C)	20.000 (cSt à 100°C)	25.000 (cSt à 100°C)	30.000 (cSt à 100°C)	35.000 (cSt à 100°C)	40.000 (cSt à 100°C)
Veículo 1	13,40	12,42	12,69	13,12	13,38	13,96	15,03
Veículo 2	11,58	12,57	11,43	12,35	12,37	13,15	13,76
Veículo 3	12,34	13,39	11,84	12,48	12,71	13,59	14,87
Veículo 4	12,91	13,50	13,66	13,93	14,07	14,86	14,54
Veículo 5	13,43	13,08	12,79	13,40	14,87	15,25	15,86
Veículo 6	11,79	12,93	12,54	12,87	13,75	14,76	15,60
Veículo 7	12,37	11,86	11,88	12,34	13,54	14,54	15,37
Veículo 8	13,36	14,36	13,43	14,51	14,54	14,56	15,67
Veículo 9	11,35	11,55	11,62	11,95	12,54	14,78	15,69
Veículo 10	13,54	13,57	12,62	11,65	11,79	12,59	13,59
Veículo 11	13,38	11,41	11,53	11,56	11,68	12,65	14,76
Veículo 12	13,22	11,23	11,30	11,16	11,19	11,57	12,54
Veículo 13	12,26	13,02	12,63	11,72	11,89	11,95	12,01
Veículo 14	11,43	11,42	12,47	12,53	14,34	16,13	16,35
Veículo 15	14,36	13,55	12,37	11,49	11,52	11,46	11,67
Veículo 16	12,19	11,21	11,30	11,43	11,54	12,39	12,51
Veículo 17	13,36	12,38	11,41	11,96	11,95	12,40	12,68
Veículo 18	12,47	11,41	11,58	12,78	12,01	13,48	13,74
Veículo 19	12,53	13,11	12,47	11,39	11,41	11,45	11,51
Veículo 20	12,01	11,46	11,93	12,05	12,78	15,77	16,41

Dessa forma, através dos resultados obtidos para viscosidade pôde-se observar que extensão do intervalo de drenagem do óleo lubrificante pode ser fortemente influenciada pelo acúmulo de rodagem. Para verificar a influencia do reabastecimento neste parâmetro analisado, os resultados obtidos foram agrupados pelo volume total de reabastecimento (Figura 27). Em uma análise preliminar é possível observar uma queda da viscosidade à medida que se aproxima de 20.000 Km, que pode ser justificada por contaminação externa como por exemplo do combustível diesel.

Segundo Kimura (2010) vários fatores podem influenciar na alteração da viscosidade do óleo lubrificante, como diluição por combustível. O autor estabeleceu em seu trabalho uma excelente relação entre o combustível utilizado e o comportamento de viscosidade analisando motores de pequeno porte utilizados para geração de energia elétrica, realizando um experimento onde testava três possibilidades de diluição de combustível no lubrificante e

fica claro nos resultados a perda significativa de viscosidade à medida que se aumenta o teor de combustível derivado do petróleo no lubrificante.

A partir de 30.000 rodados foi possível observar uma dispersão maior dos resultados e um gradativo aumento da viscosidade, à medida que foi sendo acumulada a quilometragem rodada. É importante destacar que apesar da dispersão dos dados obtidos, a qualidade do óleo API CI foi capaz de garantir que a viscosidade se mantivesse dentro dos limites máximos e mínimos especificados pelo fabricante com garantia de qualidade até 30.000 Km rodados (Figura 28). A análise através do gráfico gerado pelo *Box plot* facilita a observação do comportamento descrito (Figura 28) anteriormente, onde a partir de 35.000 Km já é possível observar uma incerteza da capacidade do óleo manter suas propriedades dentro das especificações, uma vez que foram obtidos valores de viscosidade acima do limite máximo permitido.

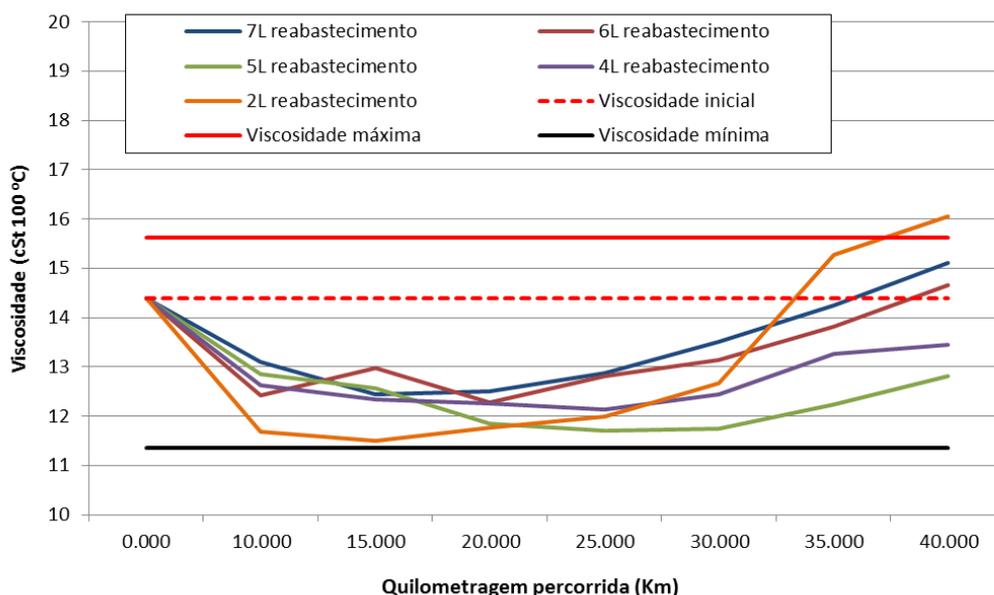


Figura 27 – Avaliação da viscosidade do óleo API CI com acumulo de quilometragem.

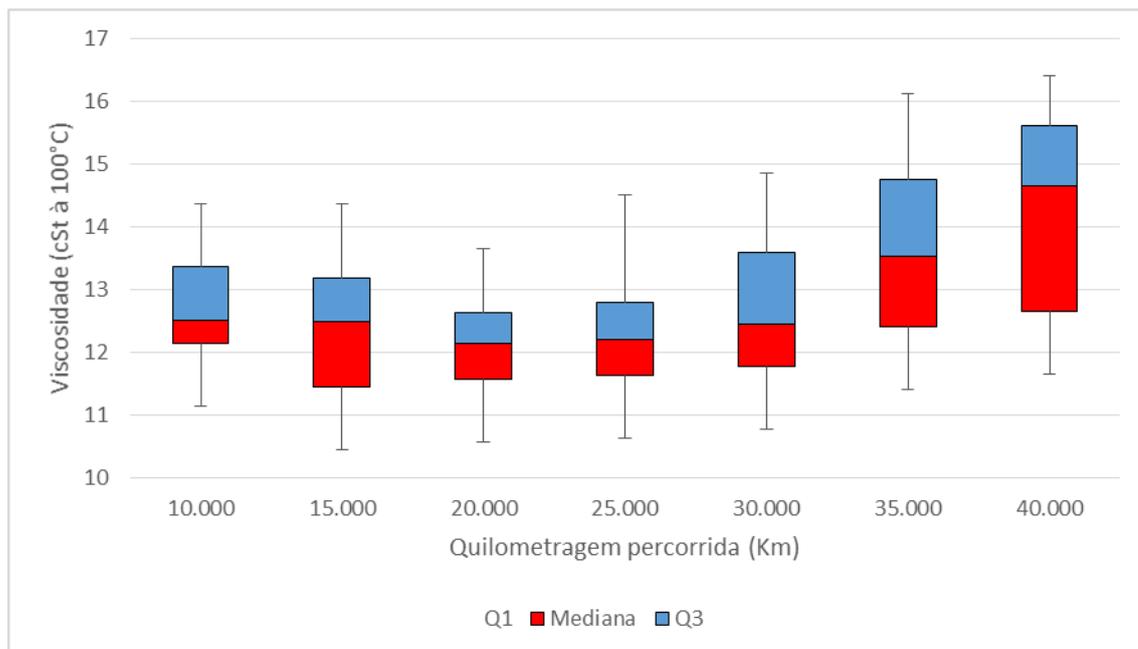


Figura 28 – Avaliação da viscosidade do óleo API CI com acúmulo de quilometragem utilizando *box plot*.

A manutenção da viscosidade do óleo dentro dos limites estabelecidos para sua aplicação é de extrema importância, considerando que o aumento desse fator pode representar empecilho à fluidez necessária à lubrificação, com maior dispêndio de energia. Por outro lado, viscosidade abaixo do ideal pode ocasionar elevadas taxas de desgaste prejudicando o correto funcionamento do motor. As Figura 27 e 28 demonstram com clareza o aumento da dispersão a partir dos 30.000 Km e, que a partir de dos 35.000 Km mais da metade dos resultados encontrados estavam acima da viscosidade do óleo lubrificante novo, o que torna o sistema de lubrificação ineficiente acentuando o desgaste e aumentando o consumo de combustível.

#### 5.1.2 Avaliação da oxidação

A oxidação é o agente primário da degradação dos lubrificantes e sua ocorrência tem motivado muitas pesquisas tentando esclarecer a química da oxidação dos lubrificantes. Os óleos lubrificantes degradaram-se por um mecanismo que envolve a reação com o oxigênio do ar atmosférico, alterando

sua composição química, prejudicando sua capacidade de lubricidade. A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos para a variável em questão.

Tabela 18 – Resultados obtidos para o grau de oxidação do óleo lubrificante API CI com acúmulo de rodagem.

Veículo	Quilometragem rodada (Km)						
	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000
<b>Veículo 1</b>	6,20	6,25	6,23	6,33	6,40	6,43	6,76
<b>Veículo 2</b>	6,11	6,13	6,22	6,29	6,31	6,20	6,81
<b>Veículo 3</b>	6,31	6,33	6,21	6,42	6,51	6,66	6,97
<b>Veículo 4</b>	6,42	6,32	6,42	6,31	6,40	6,52	6,78
<b>Veículo 5</b>	6,22	6,30	6,39	6,45	6,51	6,42	6,88
<b>Veículo 6</b>	6,74	6,75	6,88	6,73	6,81	7,11	7,30
<b>Veículo 7</b>	6,35	6,40	6,47	6,54	6,65	7,21	7,35
<b>Veículo 8</b>	6,22	6,26	6,31	6,44	6,10	6,29	7,33
<b>Veículo 9</b>	6,44	6,20	6,22	6,61	6,58	6,98	6,95
<b>Veículo 10</b>	6,41	6,45	6,41	6,49	6,52	6,67	7,22
<b>Veículo 11</b>	6,11	6,15	6,21	6,29	6,56	6,89	6,95
<b>Veículo 12</b>	6,72	6,65	6,53	6,60	6,76	6,43	7,51
<b>Veículo 13</b>	6,02	6,08	6,33	6,27	6,37	7,01	7,37
<b>Veículo 14</b>	6,55	6,58	6,61	6,54	6,25	6,82	7,74
<b>Veículo 15</b>	6,28	6,20	6,27	6,34	6,21	6,87	7,32
<b>Veículo 16</b>	6,64	6,52	6,55	6,60	6,71	6,82	7,49
<b>Veículo 17</b>	6,54	6,49	6,52	6,47	6,78	6,84	7,23
<b>Veículo 18</b>	6,37	6,31	6,40	6,77	6,90	7,04	7,83
<b>Veículo 19</b>	6,18	6,04	6,33	6,41	6,19	6,84	7,34
<b>Veículo 20</b>	6,38	6,41	6,28	6,32	6,30	6,89	7,19

Este trabalho faz uma análise do processo de degradação térmica do óleo lubrificante API CI utilizado no motor ciclo diesel, de regime de operação estritamente urbano. Através da determinação do grau de oxidação do óleo em diversos períodos de utilização, comparando os resultados com o grau de oxidação do óleo novo, pôde-se observar que a partir de 30.000 Km rodados a oxidação tende a aumentar consideravelmente (Figura 29). Aos resultados obtidos foram plotados utilizando *Box plot* demonstrado (Figura 30) ilustrando a dispersão dos valores para os diferentes períodos analisados.

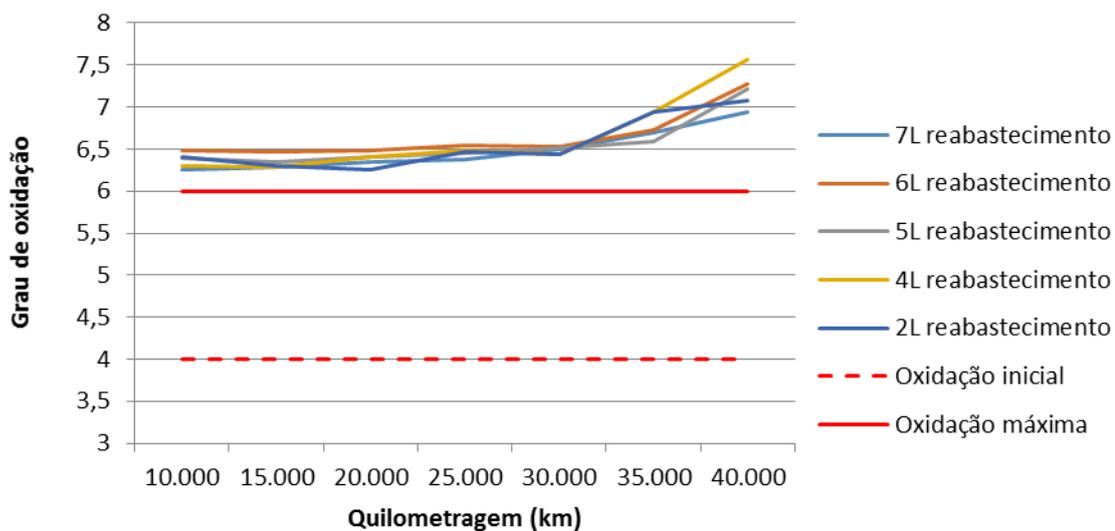


Figura 29 – Avaliação do grau de oxidação do óleo lubrificante API CI com acumulo de rodagem.

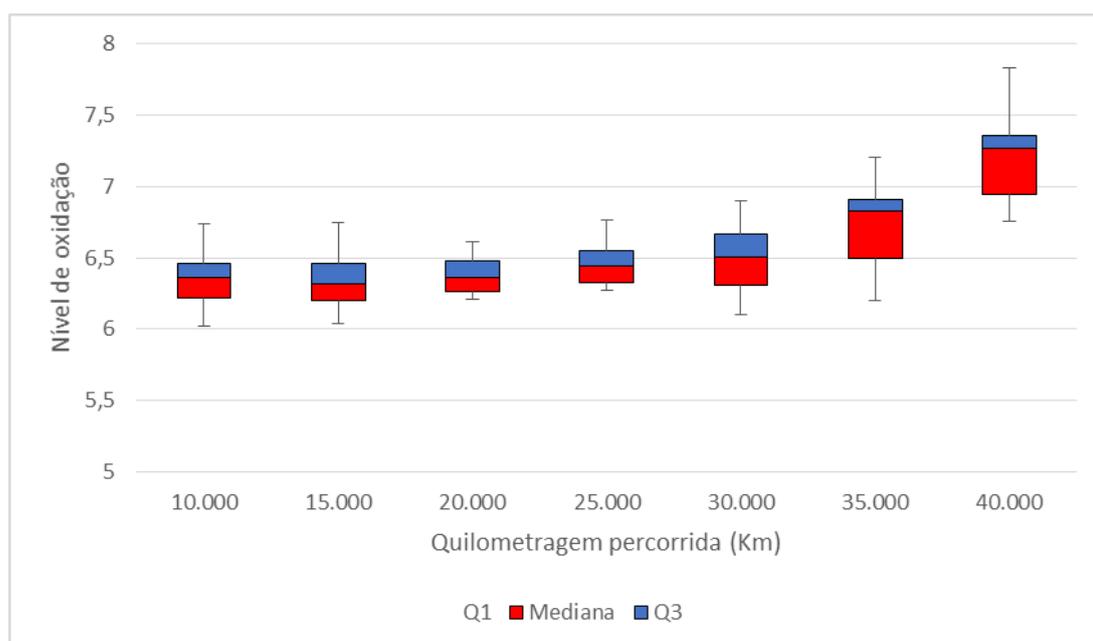


Figura 30 – Avaliação do grau de oxidação do óleo lubrificante API CI com acumulo de rodagem utilizando *box plot*.

O grau de oxidação no início da análise já apresentou valores absolutos elevados e acima do máximo permitido, e assim como visualizado anteriormente para viscosidade, esta variável em questão apresentou uma leve dispersão dos resultados a partir de 30.000 Km atingindo valores absolutos

críticos e elevadas dispersões para uma boa manutenção da lubrificação do motor. Vale ressaltar que o óleo lubrificante utilizado em motores ciclo diesel são submetidos a altas temperaturas, longos períodos de utilização e rotações variáveis e, devido a isso tendem a sofrer oxidação prematuramente, sendo a sua degradação sob condições de operação um problema que envolve significativas perdas econômicas.

A preocupação com a oxidação do lubrificante já existe há bastante tempo como podemos observar no trabalho de (Najjar, 1986) que realizou observações em motores estacionários de grande porte utilizados para geração de energia. Nos seus resultados foi observado que o nível de oxidação aumenta quase em 1% da massa quando comparado ao lubrificante novo após 4.200 horas de utilização.

Pode-se concluir que o óleo API CI não possuiu um comportamento seguro quanto ao grau de oxidação não atendendo os limites máximos estabelecidos de oxidação. Todavia, é possível observar uma estabilidade do grau de oxidação até aproximadamente 30.000 Km acumulados e que, o reabastecimento de até 35% não demonstrou efeito nas propriedades do óleo lubrificante estudado.

### 5.1.3 Avaliação do teor de metais

#### 5.1.3.1 Avaliação do teor de ferro

O desgaste do motor pode ser identificado no óleo lubrificante através do aumento da quantidade de metais que formam as peças do motor e, o metal ferro é identificado com maior frequência, por ser um metal fundamental na constituição do motor.

O elemento ferro não é adicionado aos lubrificantes como aditivo, portanto, sua origem na amostra de óleo lubrificante novo pode ser proveniente do próprio óleo utilizado ou de algum tipo de contaminação, possivelmente, adquirida durante o transporte e/ou armazenamento do lubrificante (Silveira, 2006). O acompanhamento do teor de Ferro foi realizado no presente trabalho, onde foi avaliado este parâmetro ao longo de diferentes períodos de utilização

do óleo lubrificante do motor, estudando o comportamento das médias nos diferentes períodos, como demonstrado na Tabela 19.

Tabela 19 – Teor de ferro presente no óleo lubrificante API CI com acúmulo de rodagem

Veículo	Quilometragem rodada (Km)						
	10.000 (ppm)	15.000 (ppm)	20.000 (ppm)	25.000 (ppm)	30.000 (ppm)	35.000 (ppm)	40.000 (ppm)
Veículo 1	64,23	64,48	63,28	67,21	73,54	79,78	81,00
Veículo 2	54,41	52,33	55,01	59,76	68,21	96,99	103,62
Veículo 3	75,33	76,19	79,61	82,33	79,96	94,64	99,29
Veículo 4	65,18	60,76	62,01	70,10	75,69	85,11	99,23
Veículo 5	61,32	65,45	61,99	63,87	61,03	79,03	87,90
Veículo 6	55,75	53,97	51,83	55,70	59,01	58,24	97,35
Veículo 7	41,35	48,20	51,78	71,20	72,97	87,34	79,45
Veículo 8	35,45	38,32	41,29	43,55	49,45	59,23	74,56
Veículo 9	65,09	60,31	62,31	59,21	67,35	105,75	110,54
Veículo 10	53,46	55,65	52,77	54,19	65,23	89,98	96,34
Veículo 11	50,04	53,10	51,99	54,22	62,29	64,05	67,87
Veículo 12	53,98	55,29	59,23	56,86	54,35	62,54	70,34
Veículo 13	49,01	51,42	52,39	51,33	55,34	67,79	77,05
Veículo 14	44,76	40,21	43,55	46,28	58,45	86,67	99,65
Veículo 15	64,97	69,23	67,11	64,11	60,97	68,48	74,56
Veículo 16	68,42	65,89	69,72	73,77	68,05	69,71	70,23
Veículo 17	75,43	73,08	75,11	77,21	87,98	89,87	94,07
Veículo 18	64,65	66,32	63,44	62,89	61,78	70,78	75,72
Veículo 19	60,43	60,82	58,05	62,22	59,23	61,47	62,76
Veículo 20	67,85	66,09	67,98	70,10	88,79	91,80	100,07

Neste trabalho, avaliou-se a interferência de um fator que pode influenciar significativamente no teor de ferro presente no óleo lubrificante usado: quilometragem percorrida pelo veículo. Como pode ser observado na Tabela 19 e Figuras 31 e 32, a presença do contaminante metálico ferro aumentou com o passar do tempo de utilização do óleo lubrificante. Analisando o Figuras 31 e 32 pode-se observar que antes de atingir o acúmulo de 30.000 Km acumulados o óleo lubrificante já ultrapassa o teor de ferro máximo especificado.

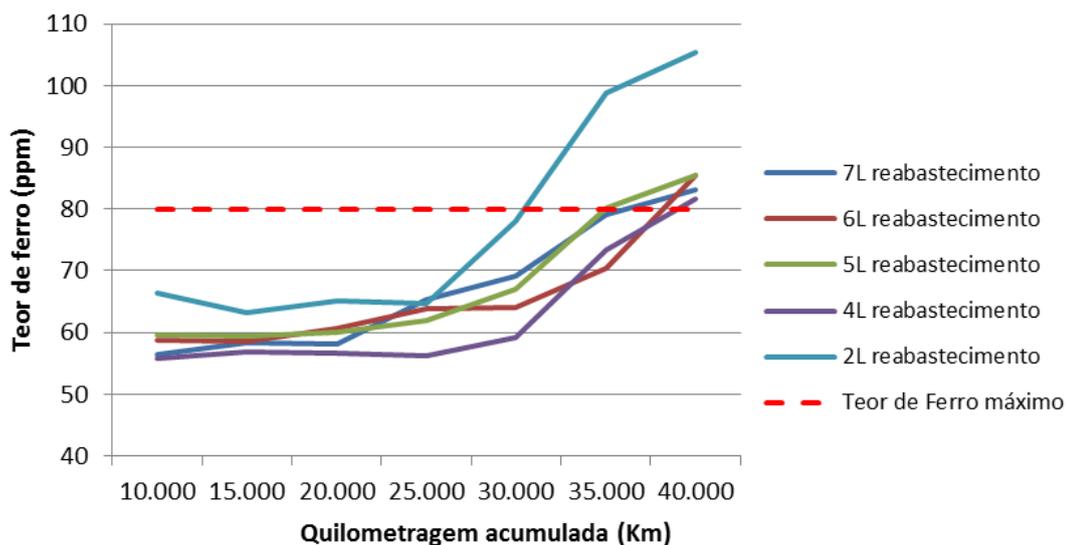


Figura 31 – Avaliação do teor de ferro no óleo lubrificante com acumulo de rodagem.

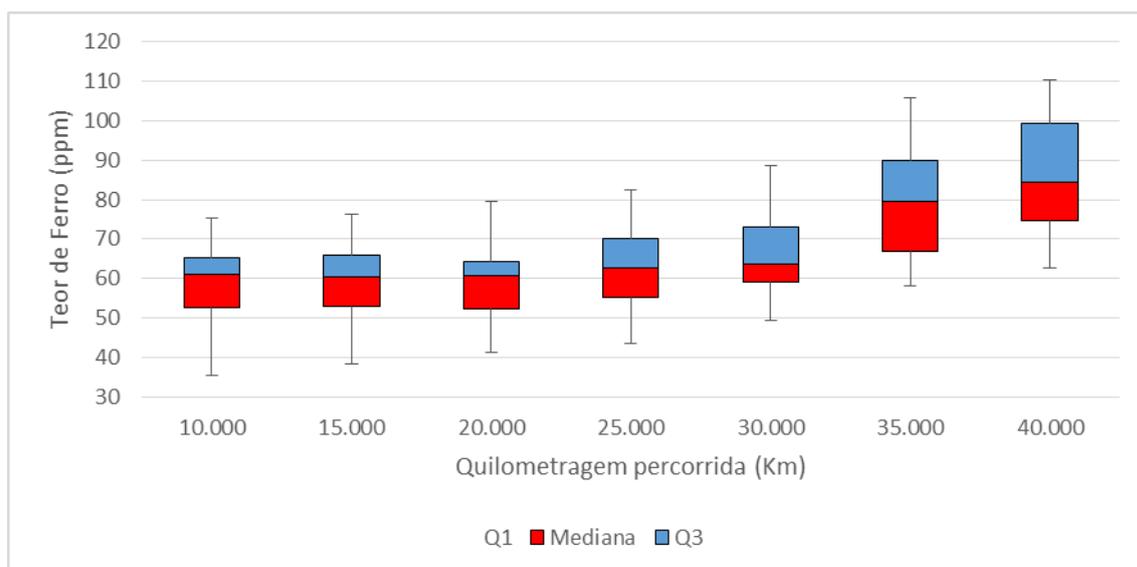


Figura 32 – Avaliação do teor de ferro no óleo lubrificante com acumulo de rodagem utilizando *box plot*.

É importante destacar que neste caso o reabastecimento de óleo lubrificante influenciou o teor de ferro encontrado no óleo, uma vez que os veículos que tiveram menor reabastecimento de óleo (2 Litros) foram os que tiveram um aumento considerável do teor de ferro no óleo lubrificante a partir de 25.000 Km acumulados.

Pode-se destacar que o teor de ferro nos primeiros quilômetros acumulados apresenta um bom comportamento, com baixa dispersão e valores absolutos dentro do limite proposto pelo fabricante do veículo, no entanto a partir dos 30.000 Km o comportamento do teor de ferro além de apresentar maior dispersão dos resultados, quantitativamente apresenta valores absolutos elevados acima do permitido pelo manual técnico do fabricante do veículo. Aos 35.000 Km acumulados observou-se que 50% dos resultados encontrados estavam acima do limite proposto (Figura 32), o que prejudica o bom funcionamento do motor devido à presença de particulado sólido no circuito de lubrificação.

Diversos fatores podem influenciar o aumento desse desgaste como, por exemplo, a qualidade do percurso realizado pelo veículo, o modo como o motorista conduz o veículo, a presença de contaminantes (fuligem, poeira, água, ácidos, etc) presentes no lubrificante e, o ferro surge devido ao desgaste das peças que constituem os motores desses automóveis, tais como, cilindros, pistões, engrenagens, anéis, eixos, bomba de óleo, virabrequim, pontos de apoio etc.

Silveira (2010) utilizando espectrometria por absorção atômica com chama, estabeleceu em seu trabalho de pesquisa uma relação interessante entre o teor de ferro e o ano de fabricação do veículo. Através dos seus resultados pode-se concluir que a variável ferro surge muito cedo, aos 25.000 Km de uso no veículo mais antigo da frota.

#### 5.1.3.2 Avaliação do teor de cobre

O Cobre é um metal conhecido como elemento de sacrifício, encontrado normalmente nas análises de óleo quando há desgaste em buchas, dutos de refrigeração do óleo lubrificação, arruelas de pressão (anéis de pressão), guias de válvulas, bielas, anéis de pistão, rolamentos, luvas, mancais principais.

Os resultados obtidos da análise de cobre no óleo lubrificante estão apresentados na Tabela 20. Através da avaliação do teor de cobre no óleo lubrificante em diferentes períodos de utilização, nota-se um elevado valor

absoluto no início da operação e que após os 20.000 apresenta valores absolutos menores, no entanto com maior dispersão.

Tabela 20 – Teor de cobre presente no óleo lubrificante API CI com acúmulo de rodagem.

Veículo	Quilometragem rodada (Km)						
	10.000 (ppm)	15.000 (ppm)	20.000 (ppm)	25.000 (ppm)	30.000 (ppm)	35.000 (ppm)	40.000 (ppm)
Veículo 1	29,04	29,81	30,13	27,94	28,44	31,49	42,69
Veículo 2	28,17	27,10	27,66	17,36	23,61	31,59	39,99
Veículo 3	26,45	28,78	27,92	11,46	15,48	15,46	16,64
Veículo 4	28,29	29,12	29,21	10,32	12,46	13,62	18,32
Veículo 5	29,43	28,22	28,12	9,38	10,39	11,34	15,56
Veículo 6	29,02	28,97	27,64	26,34	27,64	33,43	43,54
Veículo 7	28,11	28,78	28,03	15,48	15,99	15,87	16,64
Veículo 8	27,92	28,32	27,88	11,94	12,56	14,76	18,33
Veículo 9	27,32	28,98	29,75	19,45	26,64	29,54	31,54
Veículo 10	28,41	27,75	28,53	14,62	16,08	17,07	18,76
Veículo 11	29,53	30,63	29,77	12,59	28,49	33,47	42,85
Veículo 12	26,23	26,93	27,34	9,42	13,44	16,34	18,53
Veículo 13	27,15	26,31	26,79	7,93	8,76	9,91	9,93
Veículo 14	28,76	27,64	28,59	15,24	16,86	17,53	19,54
Veículo 15	29,42	29,75	28,49	11,86	15,65	16,79	19,37
Veículo 16	28,33	27,22	27,58	28,61	33,91	43,51	41,79
Veículo 17	29,31	29,13	29,93	6,27	7,38	8,43	9,51
Veículo 18	27,28	28,36	27,87	8,45	8,73	8,92	9,16
Veículo 19	28,33	29,59	30,14	6,83	7,17	8,01	8,52
Veículo 20	29,21	28,32	28,71	19,32	23,54	32,34	44,51

Analisando a informação demonstrada na Tabela 20, atribui-se ao fato de óleos lubrificantes de motor ciclo diesel possuírem uma alta carga de aditivos para suportar altas temperaturas de operação e ambientes críticos de trabalho. Como já mencionado anteriormente, os aditivos reagem quimicamente com o cobre e suas ligas, o que influencia significativamente no prematuro aparecimento deste contaminante. As Figuras 33 e 34 ilustram os resultados obtidos para o teor de cobre presente no óleo lubrificante após acúmulo de quilometragem. Foi possível observar que no início da operação de rodagem (10.000 Km) o teor de cobre já se encontrava próximo do limite estabelecido. No entanto, a partir dos 20.000 Km houve uma queda significativa do teor de

cobre com um aumento exponencial após 25.000 Km acumulados onde, partir dos 35.000 Km os valores absolutos ultrapassam o limite estabelecido pelo fabricante do equipamento (Figura 33 e 34).

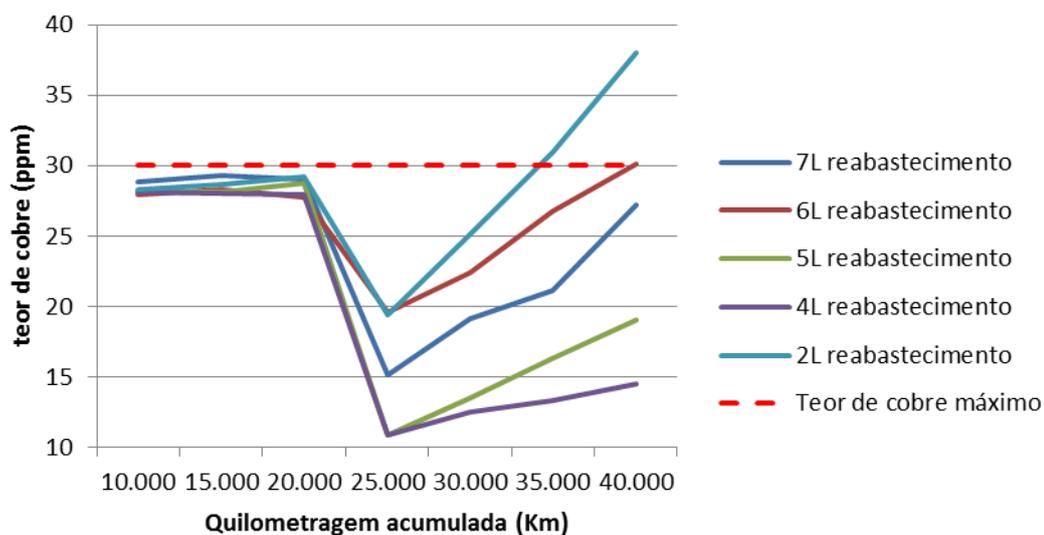


Figura 33 – Avaliação do teor de cobre no óleo lubrificante com acúmulo de rodagem.

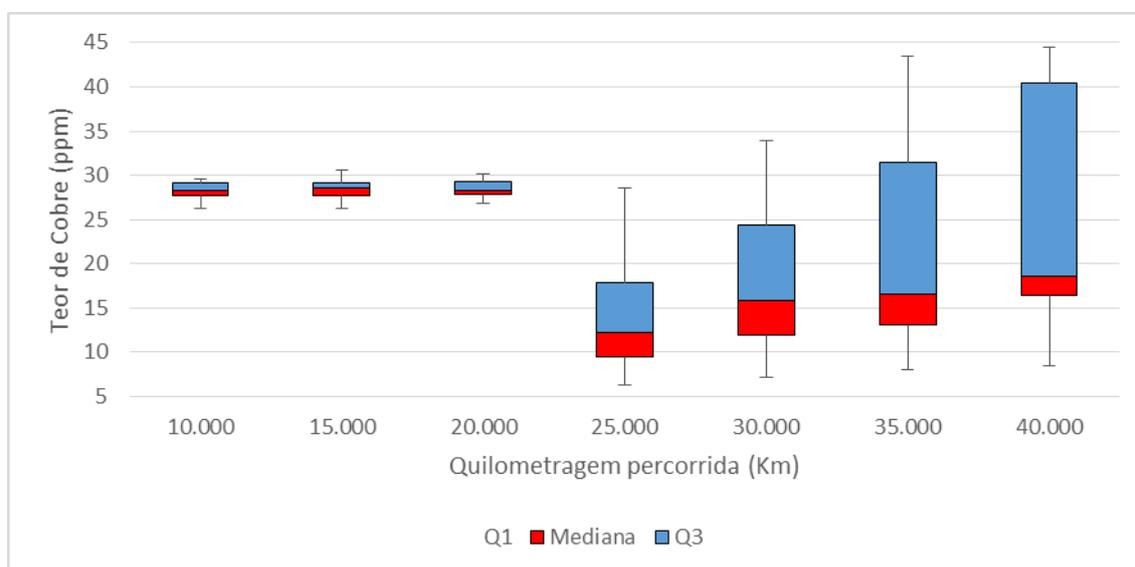


Figura 34 – Avaliação do teor de cobre no óleo lubrificante com acúmulo de rodagem utilizando *box plot*.

Pereira (2015) avaliou a presença de metais em lubrificante de motor ciclo diesel utilizando misturas com diversas proporções de biodiesel.

Avaliando o resultado encontrado, o autor concluiu que o motor que estava utilizando a mistura com 100% de biodiesel apresentou níveis alarmantes de cobre e explica que este fato é devido ao maior ataque corrosivo do biodiesel aos metais dos componentes do motor, especificamente os mancais. Fato este que pode explicar o surgimento prematuro do cobre nas análises.

### 5.1.3.3 Avaliação do teor de silício

O aparecimento do silício está associado a sujeira comum de poeira da estrada e de outras fontes, as quais contêm altos níveis de sílica, sendo assim o silício elevado a partir da análise espectrométrica significa a presença de contaminante externo. Isso explica as informações da Tabela 21 que apresenta os resultados obtidos para o teor de silício nas amostras analisadas. Observa-se que o teor do silício possui uma tendência visível de aumento no decorrer do uso do óleo lubrificante.

Tabela 21 – Teor de silício presente no óleo lubrificante API CI com acúmulo de rodagem

Veículo	Quilometragem rodada (Km)						
	10.000 (ppm)	15.000 (ppm)	20.000 (ppm)	25.000 (ppm)	30.000 (ppm)	35.000 (ppm)	40.000 (ppm)
Veículo 1	9,75	8,9-	1-,32	1-,11	9,-1	11,12	11,26
Veículo 2	6,21	6,34	12,59	12,35	15,37	15,33	16,69
Veículo 3	4,32	8,64	9,25	8,45	13,18	17,35	16,46
Veículo 4	2,33	3,21	6,43	12,34	9,34	9,68	1-,32
Veículo 5	4,45	4,27	4,67	3,98	6,76	9,34	9,54
Veículo 6	9,23	12,68	12,54	13,95	15,45	17,34	21,34
Veículo 7	4,21	8,45	1-,34	13,54	22,97	13,45	13,56
Veículo 8	2,32	2,43	2,31	4,9-	5,53	1-,34	9,99
Veículo 9	6,95	6,49	7,36	9,83	9,97	14,99	18,34
Veículo 1-	5,98	7,64	8,56	9,92	9,-1	1-,68	11,83
Veículo 11	1-,5	12,99	12,95	13,-9	11,-7	11,49	13,-7
Veículo 12	4,9-	4,49	5,33	5,29	6,97	7,19	8,-7
Veículo 13	4,32	5,27	5,95	6,79	7,73	8,56	9,21
Veículo 14	5,32	6,49	6,34	6,77	7,43	7,93	8,12
Veículo 15	2,23	3,26	3,61	3,23	6,23	6,45	6,95
Veículo 16	1-,22	8,53	15,56	17,34	28,43	21,4-	13,71
Veículo 17	8,71	7,91	14,13	21,69	13,73	19,28	12,11

<b>Veículo 18</b>	4,94	5,72	5,94	6,19	6,58	7,71	8,39
<b>Veículo 19</b>	5,25	5,37	6,24	6,23	6,67	6,73	6,79
<b>Veículo 2-</b>	5,23	6,57	6,92	7,38	7,39	8,93	9,16

O que torna o silício prejudicial nos óleos lubrificantes é a sua dureza, ou seja, ele pode riscar muito facilmente a superfície metálica do motor. O silício dentro do óleo lubrificante é bastante prejudicial, porque o óleo lubrificante opera justamente separando superfícies para diminuir o desgaste e, se houver uma quantidade considerável de sílica no óleo lubrificante, este terá efeito abrasivo gerando ainda mais partículas metálicas no sistema. As Figura 34 e 35 apresentam os resultados para o teor de silício encontrado nas amostras coletadas para diferentes períodos de rodagem.

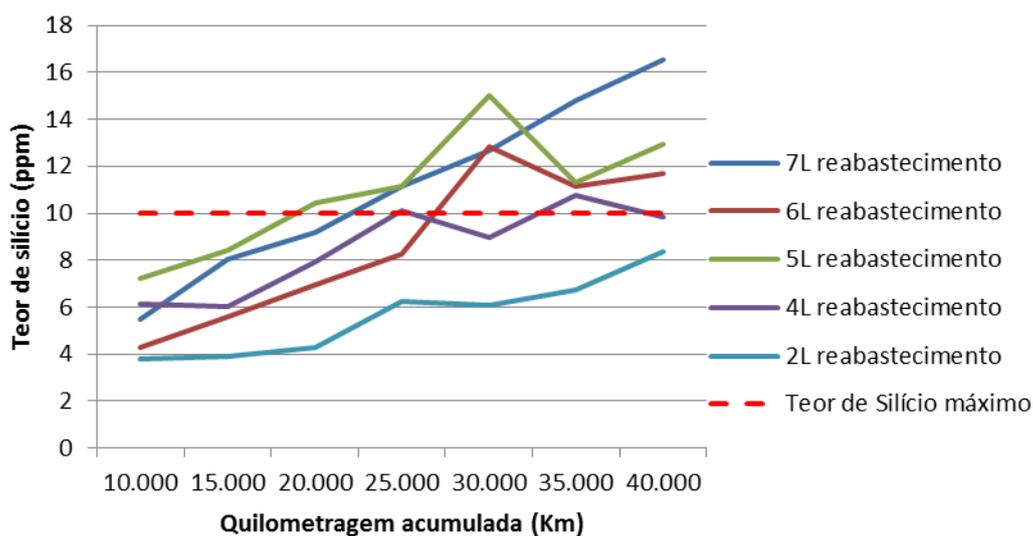


Figura 35 – Avaliação do teor de silício no óleo lubrificante com acúmulo de rodagem.

Através da Figura 35 é possível observar que logo no início do acompanhamento, acumulados 20.000 o teor máximo de silício é atingido. Um fator que pode ser associado ao aumento do teor de silício é o percurso utilizados pelos veículos que muitos deles são percorridos em ambientes com elevada concentração de spray marinho.

A Figura 36 ilustra a tendência de crescimento dos valores absolutos do teor de silício como também o aumento da dispersão ao longo do período de utilização, atingindo níveis alarmantes a partir dos 25.000 Km de utilização,

tanto em valores absolutos, pois quase 50% dos resultados estão acima do limite estabelecido pelo fabricante do veículo como em dispersão dos resultados.

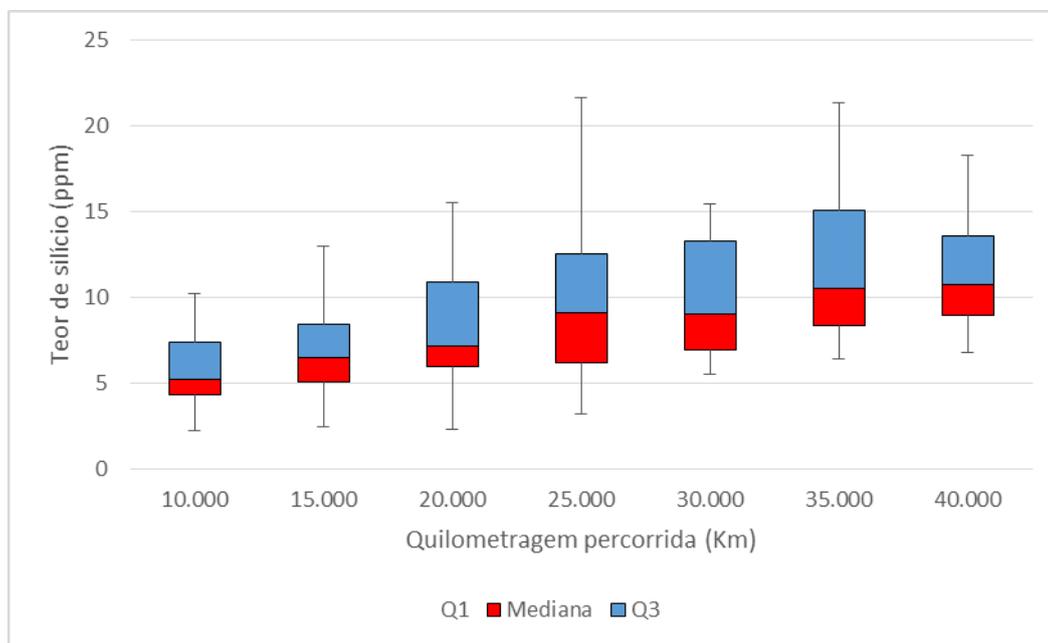


Figura 36 – Avaliação do teor de silício no óleo lubrificante com acúmulo de rodagem utilizando *box plot*.

Em 2010, Silveira observou claramente o surgimento prematuro do silício em outro ambiente de trabalho, ele analisou o lubrificante utilizado nos motores de tratores agrícolas operando em usinas de cana-de-açúcar, local este bastante propenso a contaminação por silício do lubrificante. O autor concluiu que a probabilidade de confiabilidade na operação do motor ciclo diesel que equipava os tratores estudados decresceu de 80% em 387 horas, para 60% em 445 horas, 20% em 537 horas, permanecendo com esse valor até a troca do óleo lubrificante com 577 horas de uso.

De uma forma geral pode-se destacar que o reabastecimento dos veículos até 35% para um acúmulo de rodagem de 40.000 Km não demonstrou afetar estatisticamente os resultados obtidos para os teores de metais acumulados no óleo lubrificante. Além disso, os teores de metais máximos não foram atendidos com garantia até a drenagem total do óleo API CI especificada pelo fabricante que deve ocorrer após 30.000 Km.

## 6 CONCLUSÕES

De uma forma geral pode-se concluir através do estudo realizado que a extensão do intervalo de drenagem do óleo lubrificante API CI deve ser avaliada caso a caso, uma vez que as condições ambientes e técnicas de utilização do veículo podem influenciar diretamente os resultados de qualidade do óleo ao decorrer de sua utilização.

Em relação a viscosidade, os valores obtidos indicam uma forte influência dos reabastecimentos, pois os resultados para esta variável são satisfatórios quando observados no período em que houveram maiores abastecimentos e, a partir dos 30.000 Km volta a subir em valores absolutos apresentando maior dispersão, o que torna o sistema de lubrificação ineficiente perigoso.

A metodologia empregada para o envelhecimento do óleo se mostrou eficaz para nossos objetivos, pois, analisando algumas de suas propriedades, podemos comprovar na prática os fatos decorrentes de sua degradação termo-oxidativa, como acréscimo viscosidade. A oxidação surge no início da operação, pois é uma variável que sofre forte influência da função da temperatura, tempo de exposição, catalisador, contato com o ar e pelas características próprias do lubrificante. Percebe-se um comportamento parecido com o da viscosidade, bastante influenciado pelos reabastecimentos.

Para os metais de desgaste, ferro e cobre observamos comportamentos diferentes, dada a particularidade e funcionalidade que estes metais possuem no motor. O teor de ferro apresenta tendência clara de crescimento e aumento da dispersão com a utilização, no presente trabalho atingindo valores críticos ao bom funcionamento do motor a partir dos 30.000 Km. Já o cobre apresentou baixa dispersão no início da análise, no entanto com valores absolutos elevados, próximo ao limite máximo permitido pelo fabricante do motor, isso se deu devido à alta maleabilidade deste metal, que o faz surgir tão precocemente. Com um sistema de filtragem eficiente no óleo lubrificante, com o passar do tempo este metal volta a apresentar níveis saudáveis, independente da dispersão, como ocorre no presente.

O contaminante externo silício apresentou um comportamento já esperado, com clara tendência de aumento de quantidade absoluta e dispersão ao longo da utilização, e, assim como o ferro, atingindo níveis críticos a partir dos 30.000 Km quando quase metade dos resultados para este metal estão acima do limite preestabelecido.

Os reabastecimentos intermediários de óleo lubrificante pontuados neste trabalho influenciam significativamente a viscosidade e a oxidação, o que sugere a utilização deste procedimento ao longo da utilização do óleo para corrigir pontualmente dispersões destas variáveis.

Desta forma, levando em consideração os motores analisados e o lubrificante API CI, conclui-se que não é seguro a utilização dos óleos lubrificantes nos motores diesel avaliados que equipam os veículos em regime de transporte urbano em período de drenagem superior ao recomendado pelo fabricante, pois tanto a variação das características físicas (viscosidade e oxidação) quanto os contaminantes metálicos (ferro, cobre e silício) mostraram um comportamento a partir dos 30.000 Km nos resultados obtidos de alta dispersão e elevados valores absolutos. Os efeitos desta extensão podem ser catastróficos para o motor, pois o óleo lubrificante está quimicamente alterado, não havendo assim nenhuma garantia de redução de atrito com consequente controle de desgaste.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentre os trabalhos futuros, existe a possibilidade de integração com diversas outras variáveis e, especificamente as variáveis relacionadas à outras propriedades físico-químicas do óleo lubrificante como acidez e alcalinidade, que apontariam uma contaminação por combustível no óleo lubrificante.

Outra possibilidade, sendo esta alinhada com o atual momento do país em relação aos combustíveis fósseis é realizar um estudo para avaliar a qualidade do óleo lubrificante de motor ciclo diesel abastecido com diferentes tipos de combustível, em proporções variadas de Biodiesel.

A utilização de um lubrificante de melhor desempenho, de preferência sintético seria bastante válido para observar se há possibilidade de extensão do período de drenagem.

Existe uma série de possibilidades que podem ser exploradas, que com certeza trarão muitos benefícios aos frotistas, se for rompida essa barreira inicial da inserção de ferramentas de manutenção preditiva interatividade na rotina da garagem.

## 8 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, V. A.; GOMES, M. L. B. Servidores Técnicos Administrativos, Modelo de Walton. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 33, Salvador. Anais... Salvador: ENEGEP, 2-13.

AMBROZIN, A. R. P.; KURI, S. E.; MONTEIRO, M. R. Corrosão metálica associada ao uso de combustíveis minerais e biocombustíveis. Química Nova, v. 32, n. 7, p. 191--1916, 2--9.

AMORIM, A. C. Lubrificação Industrial. SENAI-DR, Salvador-BA. 2-1p. il. (Rev. -1), 2--4.

ARAÚJO, M. Sistema de Lubrificação e Arrefecimento de Motores a Combustão Interna. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 6, Capina Grande. Anais... Paraíba: UFCP, p. 16-29. 2-1-.

KELLER, A. Medindo a saúde do seu motor. Auto entusiastas, 2-11. Disponível em: <http://autoentusiastas.com.br/2-11/-9/medindo-a-saude-do-seu-motor/>. Acesso em: 2- jun. 2-15, 16:3-:15.

BANNISTER, K. Lubrication for industry. 1st ed. – New York: Industrial Press Inc., 1996. 16- p. Inclui índice. ISBN: 978--781785624.

BAIN & COMPANY. Potencial de diversificação da indústria química brasileira. Relatório 3 – Óleos lubrificantes, 2-14. Disponível em: [http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/chamada\\_publica\\_FEPprospec0311\\_Relatorio\\_Final.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/chamada_publica_FEPprospec0311_Relatorio_Final.pdf) . Acesso em: 26 out. 2-15, 1-:1-:42.

BERTINATTO, R. Análise da contaminação e degradação do óleo lubrificante e desgaste de um motor otolizado alimentado por biogás. Apresentada originalmente como dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná-UNIOESTE. Cascavel, Paraná, 2-14.

BOSCH, R. Manual de tecnologia automotiva. Edgard Blucher, 2--5.

Bosch Automotive, 2-15. Disponível em: [http://br.bosch-automotive.com/pt/internet/parts/parts\\_and\\_accessories\\_2/service\\_parts\\_1/filters\\_1/oil\\_filters\\_1/oil\\_filters\\_1.html](http://br.bosch-automotive.com/pt/internet/parts/parts_and_accessories_2/service_parts_1/filters_1/oil_filters_1/oil_filters_1.html). Acesso em: -2 jul. 2-15, 18:22:41.

BORIN, A. Aplicação de quimiometria e espectroscopia no infravermelho no controle de qualidade de lubrificantes. Apresentada originalmente como dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP. Campinas, São Paulo, 2--3.

BRUNETTI, F. Motores de combustão Interna. v. 2 – São Paulo: Blucher, 2-12. 486 p. Inclui índice. ISBN: 97885212-7-92.

CADIMA, J. Estatística e delineamento. Instituto Superior de Agronomia – Universidade de Lisboa. 429 p., 2-15. Disponível em: <file:///F:/Mestrado/Disserta%C3%A7%C3%A3o%2-2-15/Artigos%2--%2-Google%2-Academico/Cadima,%2-J.%2-Estat%C3%ADstica%2-e%2-delineamento.pdf>. Acesso em: 1- set. 2-15, -9:55:1-.

CÂMARA, J. C. C. Motores de combustão interna. SENAI-DR, Salvador-BA. 148p. il. (Rev. --), 2--4.

CANECA, A. R.; PIMENTEL, M. F.; GALVÃO, R. K. H.; MATTA, C. E.; CARVALHO, F.; R.; MENDES, I. R.; PASQUINI, C.; ROHWEDDER, J. J. R. Assessment of infrared spectroscopy and multivariate techniques for monitoring the service condition of diesel-engine lubricating oils. *Talanta*, v. 7-, n. 2, p. 344-352, 2--6.

CARRETEIRO, R. P.; BELMIRO, P. N. A. Lubrificantes e lubrificação industrial. Rio de Janeiro: Interciência, 2--6. 5-4p. ISBN: 8571931585.

CHUN, S. M. Simulation of engine life time related with abnormal oil consumption. *Tribology International*, v. 44, n. 4, p. 426-436, 2-11.

Clube do diesel, 2--9. Disponível em: <http://www.clubedodiesel.com.br/?p=741>. Acesso em: 21 out. 2-15, 21:11:43.

COATES, J. P.; SHELLEY, P. H. Infrared spectroscopy in process analysis. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, 2--6.

COSTA, P. G. Bomba de óleo. Oficina e Cia, 2--2. Disponível em: <http://www.oficinaecia.com.br/bibliadocarro/biblia.asp?status=visualizar&cod=71> Acesso em: 13 out. 2-15, 22:3-:18.

DAVIM, J. P. Tribology for engineers: A practical guide. Woodhead Publishing, 2-11. 32- p. ISBN: 978-857-91147

DIABY, M.; OUSMANE, M.; SINGHAL, P.; SABLIER, M.; NÉGRATE, A.; FASSI, M.; ZYMLA, V. Impact factors for the degradation of engine oil causing carbonaceous deposits in the piston's grooves of Diesel engines. *Fuel*, v. 1-7, p. 9--1-1, 2-13.

DIAS, A. Guia do automóvel, 2-14. Disponível em: <http://www.carrosinfoco.com.br/carros/2-14/-7/sistema-de-lubrificacao-dos-motores-de-combustao-interna/>. Acesso em: 12 jun. 2-15, -8:32:11.

EVANS, C. Wear debris analysis and condition monitoring. *NDT International*, v. 11, n. 3, p. 132-134, 1978.

FERREIRA, D. F. Estatística multivariada – 1. ed. – Lavras: Ed. UFLA. 662 p.: il, 2--8.

FREITAS, F.; LELIS, A. P. R.; RIBEIRO, M. E. S.; SOUZA, R. G.; ALVES, A. G. O.; ERBETTA, C. D. C.; LASTRES, L. F.M. Estudo reológico de óleos lubrificantes automotivos por meio de reometria. Blucher Engineering Proceedings, v. 1, n. 1, p. 427-433, 2-13.

FREITAS, L. V. Análise multivariada no monitoramento do processo de produção de óleo diesel numa refinaria de petróleo. Apresentada originalmente como dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista-UNESP. Bauru, São Paulo, 2-12.

FYGUEROA, S. J. Mantenimiento de Motores Diesel. Consejo de Estudios de Postgrado. Universidad de Los Andes. Mérida, 1997.

GÂNDARA, M. F. G. Óleos lubrificantes minerais: uma análise das potencialidades da reutilização. Apresentada originalmente como dissertação de mestrado, Universidade Metodista de Piracicaba-UNIMEP. Santa Bárbara do Oeste, São Paulo, 2---.

GARCIA, M.; MUSSATO, C. Confiabilidade e tribologia automotiva – uma revisão. Blucher Engineering Proceedings, v. 1, n. 1, p. 615-626, 2-13.

GARCIA, M. B.; SCHWEIZER, G. R. S. Contribuição da Tribologia para a Redução do Consumo de Combustíveis e Emissões de Poluentes. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA, 7, São Paulo: AEA, 2--9.

GUIMARÃES, R. C.; CABRAL, J. A. S. Estatística. Centro, v. 29, p. 9, 1997.  
HAIR, J. F. et al. Multivariate data analysis. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2--6.

How Stuff Works, 2-15. Disponível em: <http://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment>. Acesso em: 14 mar. 2-15, 12:1-:43.

HULTMANN, R. J. Estudo de confiabilidade de pneus de rodagem. Apresentada originalmente como dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, UFPR. Curitiba, Paraná, 2-11.

KIM, Y.; KIM, N. Y.; PARK, S. Y.; LEE, D.; LEE, J. H. Classification and individualization of used engine oils using elemental composition and discriminant analysis. Forensic science international, v. 23-, n. 1, p. 58-67, 2-13.

KIMURA, R. K. Uso da técnica de análise de óleo lubrificante em motores diesel estacionários, utilizando-se misturas de biodiesel e diferentes níveis de contaminação do lubrificante. Apresentada originalmente como dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista-UNESP. Ilha Solteira, São Paulo, 2-1-.

KNOCHEN, M.; SIXTO, A.; PIGNALOSA, G.; DOMENECH, S.; GARRIGUES, S.; GUARDIA, M. Determination of insolubles in diesel lubricating oil by FIA-visible spectrometry. *Talanta*, v. 64, n. 5, p. 1359-1363, 2--4.

LARA, R. F.; AZCARATE, S. M.; CANTARELLI, M. A.; OROZCO, I. M.; CAROPRESE, M. E.; SAVIO, M.; CAMIÑA, J. M. Lubricant quality control: A chemometric approach to assess wear engine in heavy machines. *Tribology International*, v. 86, p. 36-41, 2-15.

LENG, J. A.; DAVIES, J. E. Ferrographic examination of unused lubricants for diesel engines. *Wear*, v. 122, n. 1, p. 115-119, 1988.

LUDEMA, K. C. Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology. CRC press, 1996.

MALPICA, L. G. T. Manutenção preditiva de motores de combustão interna, à gasolina, através da técnica de análise de lubrificantes. Apresentada originalmente como dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista-UNESP. Ilha Solteira, São Paulo, 2--7.

Manual Técnico do Volksbus 1723-, 2-1-/2-11.

MARTINS, J. Motores de combustão interna. 2.<sup>a</sup> ed. Porto: Publindústria, 2--6. 437 p. ISBN 972-8953-82-X.

MARTINS, S. L. M.; GODOY, L. P.; LOPES, L. F. D. Monitoramento do controle estatístico do processo utilizando ferramentas estatísticas. 6 ed. Espacios. Vol. 33, 16 p. 2-12.

MARTINS, S. L. M. Monitoramento do controle estatístico do processo utilizando ferramentas estatísticas. Apresentada originalmente como dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria-UFSM. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2-11.

MARUM, D. Oficina do G1. Disponível em: <http://g1.globo.com/carros/blog/oficina-do-g1/2.html>. Acesso em: 26 fev. 2-16, 2--5:13.

Mecânica de motores, 2-15. Disponível em: <http://cursosnillo.blogspot.com.br/p/mecanica-de-motores.html>. Acesso em: 3-jul. 2-15, 22:12:-1.

MOBIL OIL - Portugal - Lisboa, Lubrificação e manutenção preventiva de motores diesel, coleção técnica, 3<sup>a</sup> edição, 6 p., 198-.

MONTGOMERY, D. G. Design and Analysis of Experiments, 5th edition. John Wiley & Sons, INC. 699 p. 2---. ISBN: 978-471316497

MOUSA, M.; GOHAR, N. S. Monitoring the wear of internal combustion engines. El-Minia: Faculty of Engineering, El-Minia University, 2--6.

MYSHKIN, N. K.; MARKOVA, L. V.; SEMENYUK, M. S.; KONG, H.; HAN, H. G.; YOON, E. S. Wear monitoring based on the analysis of lubricant contamination by optical ferroanalyzer. *Wear*, v. 255, n. 7, p. 127--1275, 2--3.

MUNIZ, I. C. O Gerenciamento de Óleos Lubrificantes Usados ou Contaminados e suas Embalagens: Estudo de Caso de uma Empresa de Logística na Região Norte do Brasil. *Sistemas & Gestão*, v. 1-, n. 3, p. 442-457, 2-15.

NAJJAR, Y. Lubricants and fuels analysis as a guide for predictive maintenance in diesel engines. *Fuel*, v. 66, n. 3, p. 431-434, 1987.

NETO, J. M. M.; MOITA, G. C. Uma introdução à análise exploratória de dados multivariados. *Química Nova*, v. 21, n. 4, p. 467-469, 1998.

Notícias da oficina, 2-15. Disponível em: <http://www.noticiasdaoficinavw.com.br/v2/2-13/11/diagnosticos-e-reparos-no-cabecote-dos-motores-ea-111/>. Acesso em: 2- jul. 2-15, 12:1-:4-.

NOVOTNY, V. Application of ferrography to the condition monitoring of agricultural machinery. *Wear*, v. 9-, n. 2, p. 221-223, 1983.

OLIVEIRA, T. Uma breve visão sobre Boxplot. Disponível em: <http://blog.thalissonoliveira.com.br/?p=532>. Acesso em: 1- mar 2-16, 2-:34:12.

OWRANG, F.; MATTSSON, H.; OLSSON, J.; PERDERSEN, J. Investigation of oxidation of a mineral and a synthetic engine oil. *Thermochimica Acta*, v. 413, n. 1, p. 241-248, 2--4.

Paxlub, 2-15. Disponível em: [http://www.paxlub.com.br/tabelas/tabsimples/comp\\_desemp\\_API\\_diesel](http://www.paxlub.com.br/tabelas/tabsimples/comp_desemp_API_diesel). Acesso em: 22 set. 2-15, 22:43:3-.

PEREIRA, F. M. M. Estudo da degradação do óleo lubrificante em motores alimentados com Biodiesel B1--. Apresentada originalmente como dissertação de mestrado, Universidade Tecnológico Federal do Paraná-UTFP. Curitiba, Paraná, 2-15.

POSSAMAI, L. Eficácia da análise de amostras de óleo lubrificante por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado na detecção de desgaste em motores Diesel após amaciamento. Apresentada originalmente como dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP. Campinas, São Paulo, 2-11.

POUZAR, M.; CERNOHORSKY, T.; KREJCOVA, A. Determination of metals in lubricating oils by X-ray fluorescence spectrometry. *Talanta*, v. 54, n. 5, p. 829-835, 2--1.

Quatro rodas, 2-15. Disponível em: <http://quatorodas.abril.com.br/autoservico/autodefesa/deslizes-gol-517846.shtml>. Acesso em: 2- set. 2-15, 21:-3:21.

Reunidas Motores, 2-15. Disponível em: <http://www.reunidasmotores.com.br/dicas.php>. Acesso em: 1- out. 2-15, 19:13:11.

RODRIGUES, C. A. C. Lubrificação de motores diesel. Apresentada originalmente como dissertação de mestrado, Universidade do Porto-FEUP. Porto, 2--9.

ROUSSO, J. Lubrificação industrial. 4ª ed. Rio de Janeiro: CNI/DAMPI, 125 p. 199-.

ROYLANCE, B. J.; HUNT, T. M. The wear debris analysis handbook. Coxmoor publishing companys, 1999.

RUNGE, P. R. F.; DUARTE, G.; GEMPERLÉ, R. Lubrificação automotiva. Triboconcept, 1994. ISBN: 2-1-----33

SANTOS, F. Os sistemas de lubrificação e os lubrificantes nos equipamentos agrícolas. Vila Real. UTAD, v. 41, 1993.

SANTOS, J. C. O.; SOBRINHO, E. V.; SOUZA, A. G.; SANTOS, I. M. G.; CONCEIÇÃO, M. M. Estudo da degradação térmica de óleos lubrificantes automotivos por cromatografia gasosa/espectrometria de massa. In: Anais: 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Salvador. 2--5.

SILVEIRA, E. L. C.; CALAND, L. B.; MOURA, C. V. R.; MOURA, E. M. Determinação de contaminantes em óleos lubrificantes usados e em esgotos contaminados por esses lubrificantes. Química Nova, v. 29, n. 6, p. 1193, 2--6.

SILVEIRA, E. L. C.; COELHO, R. C.; NETO, J. M. M.; MOURA, C. V. R.; MOURA, E. M. Determinação de metais em óleos lubrificantes, provenientes de motores de ônibus urbano, utilizando a FAAS. Quim. Nova, v. 33, n. 9, p. 1863-1867, 2-1-.

SINATORA, A. Tribologia: Um resgate histórico e o estado da arte. Erudição apresentada como parte dos requisitos do concurso para professor titular do departamento de Engenharia Mecânica) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2--5.

TAYLOR, C. M. Lubrication regimes and the internal combustion engine. Tribology Series, v. 26, p. 75-75, 1993.

TAYLOR, R. I.; BELL, J. C. The Influence of Lubricant Degradation on Friction in the Piston Ring Pack. Tribology Series, v. 27, p. 531-536, 1994.

TAYLOR, R. I.; DIXON, R. T.; WAYNE, F. D.; GUNSEL, S. Lubricants & energy efficiency: life-cycle analysis. Tribology and Interface Engineering Series, v. 48, p. 565-572, 2--5.

TÁVORA, S. P.; QUELHAS, O. L. G. Óleos lubrificantes usados: evolução das responsabilidades pela coleta/destinação e alternativas para aplicações. Revista Produção Online, v. 3, n. 2, 2-1-.

TEXACO. Fundamentos da Lubrificação. Chevron do Brasil Ltda. 2--5.

TILLMAN, C. A. Motores de combustão interna e seus sistemas. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Pelotas – Rio Grande do Sul, 2-13.

VARELA, C. Princípios de funcionamento dos motores de combustão interna. IT – Departamento de Engenharia, IT 154 Motores e Tratores. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 9 p., 2--2.

VENKATESH, S. Engine wear and used oil analysis: a comparative study in high speed diesel engines. Wear, v. 27, n. 1, p. 83-89, 1974.

BASÍLIO, R. Visão técnica, 2-11. Disponível em: <https://f1visaotecnica.wordpress.com/2-11/-3/27/como-funciona-a-lubrificacao-de-um-motor/>. Acesso em: -2 set. 2-15, 13:43:45.