



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**DAVID LUCAS GOMES LEITE**

**ESTUDO E ANÁLISE DO PROCESSO DE RERREFINO DE ÓLEO LUBRIFICANTE  
USADO**

CAMPINA GRANDE - PB

2020

**DAVID LUCAS GOMES LEITE**

**ESTUDO E ANÁLISE DO PROCESSO DE RERREFINO DE ÓLEO LUBRIFICANTE  
USADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Tavernard Pereira Neto

Coorientador: José Nilton Silva

Área de concentração: Desenvolvimento de processos químicos.

CAMPINA GRANDE - PB

2020

L533e Leite, David Lucas Gomes.  
Estudo e análise do processo de rerrefino de óleo lubrificante usado /  
David Lucas Gomes Leite. - Campina Grande, 2021.  
71 f. : il. Color

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade  
Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2020.  
"Orientação: Prof. Dr. Antônio Tavernard Pereira Neto, Prof. Dr. José  
Nilton Silva".  
Referências.

1. Processos Químicos e Sustentabilidade. 2. Recuperação de Óleos  
Residuais. 3. Resíduos de Óleo Lubrificante. 4. Aproveitamento de Óleo  
Lubrificante. I. Pereira Neto, Antônio Tavernard. II. Silva, José Nilton.  
III. Título.

CDU 66.011:502.1(043)

**DAVID LUCAS GOMES LEITE**

**ESTUDO E ANÁLISE DO PROCESSO DE RERREFINO DE ÓLEO LUBRIFICANTE  
USADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (PPGEQ/CCT/UFCG), como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

Aprovado em 23/11/2020

**EXAMINADORES:**



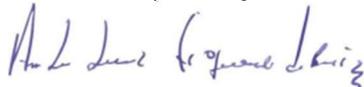
---

Prof. Dr. Antônio Tavernard Pereira Neto  
Orientador – (UAEQ/CCT/UFCG)



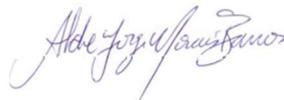
---

Prof. Dr. José Nilton Silva  
Coorientador – (UAEQ/CCT/UFCG)



---

Prof. Dr. André Luiz Fiquene de Brito  
Examinador Interno – (UAEQ/CCT/UFCG)



---

Prof. Dr. Aldre Jorge Morais Barros  
Examinador Externo – (UAEB/CDSA/UFCG)

Ata de apresentação da 487ª Dissertação de **Mestrado** do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Ao vigésimo terceiro dia do mês de novembro de dois mil e vinte às 15:00horas por videoconferência, reuniu-se a **Banca Examinadora** nas formas e termos do Art. 1º e 2º do Regulamento Interno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. Antônio Tavernad Pereira Neto (**Orientador /UFCG**), Prof. Dr. José Nilton Silva (**Orientador /UFCG**), Prof. Dr. André Luiz Fiquene de Brito (Examinador Interno /UFCG), e o Prof. Dr. Aldre Jorge Morais Barros (Examinador Externo /UFCG), para exame da **Dissertação de Mestrado** intitulada “**Estudo e análise do processo de rerrefino de óleo lubrificante usado**”, do aluno **David Lucas Gomes Leite**. Após a explanação do candidato o Orientador passará a palavra aos componentes da Banca Examinadora. Terminada a arguição a Banca Examinadora, após reunião secreta, a atribuir os conceitos aqui transcritos: Prof. Dr. Antônio Tavernad Pereira Neto Aprovado, Prof. Dr. José Nilton Silva Aprovado, Prof. Dr. André Luiz Fiquene de Brito Aprovado, e o Prof. Dr. Aldre Jorge Morais Barros Aprovado. De acordo com o **Artigo 57 do Regulamento Interno do PPGEQ** o candidato foi considerado Aprovado. Encerrada a sessão secreta o Orientador informará o resultado do consenso. Nada mais havendo a tratar foi encerrada a sessão, para constar eu Maricé Pereira da Silva – Secretária do PPGEQ, lavrei a presente Ata que assino com os membros da Banca Examinadora e o candidato.

Secretária: Maricé Pereira da Silva

Orientador: Antônio Tavernad p. neto

Orientador: José Nilton Silva

Examinador: André Luiz Fiquene de Brito

Examinador: Aldre Jorge Morais Barros

Candidato: David Lucas G. Leite

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar a saúde e a paz para chegar até aqui.

À minha mãe Luiza por todo o amor, incentivo e apoio incondicional.

À minha esposa Priscila por todo amor, companheirismo e apoio nessa jornada.

A esta instituição, todo o seu corpo docente e administrativo, que proporcionaram as condições necessárias.

Ao professor Nilton Silva, por todo o tempo dedicado, orientação, ajuda, conselhos, ensinamentos, amizade e exemplo dado durante a realização desse trabalho, bem como em todo tempo na universidade.

Ao professor Antônio Tavernard por me aceitar como seu orientando.

Aos professores Aldre Jorge e André Fiquene por participarem de forma bastante ativa e contributiva da banca avaliadora.

Ao meu amigo Thalys, por não medir esforços para me ajudar, sempre que necessário.

Aos meus amigos e colegas do LIEP, por todo o apoio e amizade durante essa etapa.

A todos que fizeram parte, direta ou indiretamente, desta etapa da minha vida, o meu muito obrigado!

*“Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo”*

LEITE, DAVID LUCAS GOMES. **Estudo e análise do processo de rerrefino de óleo lubrificante usado.** 2020. 70 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2020.

## RESUMO

Nos dias de hoje, além de vislumbrar o lucro, otimização nos processos e economia de energia e materiais, as empresas estão cada vez mais empenhadas em aplicar nas suas atividades o desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, o rerrefino de óleo lubrificante usado ganha uma grande relevância, visto que este está diretamente associado à economia de petróleo como matéria-prima, à economia de energia nos processos, bem como evita a contaminação ambiental pelo descarte inadequado e ilegal de óleo lubrificante usado. Neste trabalho, realizou-se um estudo com a finalidade de verificar a influência de cada etapa do processo tradicional de rerrefino de óleo lubrificante usado. Foram coletados óleos lubrificantes usados de oficinas automotivas do município de Campina Grande e realizou-se, em laboratório, o processo tradicional de rerrefino, composto pelas etapas de desidratação e extração de leves, destilação a vácuo, tratamento químico, neutralização, clarificação e filtração. Os óleos residuais coletados, os provenientes de cada uma dessas etapas e os óleos rerrefinados finais obtidos foram caracterizados e comparados com os padrões exigidos pelas normas NBR e ASTM. Foi possível obter óleos rerrefinados que se enquadram na maioria dos padrões de qualidade impostos pelas normas técnicas e os resultados obtidos de rendimento dos processos de rerrefino e das caracterizações realizadas permitiram que fosse observada a influência de cada etapa do processo tradicional de rerrefino de óleo lubrificante usado, bem como a importância de cada uma para o processo como um todo.

Palavras chave: Recuperação; Lubrificação; Sustentabilidade; Resíduos; Aproveitamento.

LEITE, DAVID LUCAS GOMES. **Study and analysis of the re-refining process of used lubricating oil.** 2020. 70 p. Dissertation (Master degree in Chemical Engineering) – Federal University of Campina Grande, Paraíba, 2020.

## ABSTRACT

Nowadays, in addition to envisioning profit, optimizing processes and saving energy and materials, companies are increasingly committed to applying sustainable development in their activities. In this context, the re-refining of used lubricating oil gains great relevance, since it is directly associated with the saving of petroleum as a raw material, with the saving of energy in the processes, as well as avoiding environmental contamination by the inappropriate and illegal disposal of lubricating oil. used. In this work, a study was carried out with the purpose of verifying the influence of each stage of the traditional process of re-refining used lubricating oil. Used lubricating oils were collected from automotive workshops in the city of Campina Grande and the traditional re-refining process was carried out in the laboratory, consisting of the stages of dehydration and light extraction, vacuum distillation, chemical treatment, neutralization, clarification and filtration. The collected residual oils, those from each of these stages and the final re-refined oils obtained were characterized and compared with the standards required by the NBR and ASTM standards. It was possible to obtain re-refined oils that meet most of the quality standards imposed by the technical norms and the results obtained from the performance of the re-refining processes and the characterizations carried out allowed the influence of each stage of the traditional process of re-refining of used lubricating oil to be observed. , as well as the importance of each one for the process as a whole.

Keywords: Recovery; Lubrication; Sustainability; Waste; Use.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação entre os tipos de cadeia carbônica e as propriedades do óleo. ....	22
Figura 2 – Esquema de refino de petróleo para produção de óleo lubrificante básico.....	26
Figura 3 – Esquema ilustrativo da composição do óleo lubrificante comercial.....	28
Figura 4 – Relação entre os tipos de aditivos, suas composições e funções no óleo comercial. .....	29
Figura 5 – Escala utilizada para determinação de Cor ASTM.....	31
Figura 6 – Exemplos de viscosímetros capilares.....	32
Figura 7 – Especificação dos óleos básicos segundo NBR e ASTM .....	35
Figura 8 – Ilustração do esquema de logística reversa do óleo lubrificante. ....	38
Figura 9 – Fluxograma do processo ácido-argila. ....	41
Figura 10 – Fluxograma do processo evaporador de filme. ....	42
Figura 11 – Fluxograma do processo destilação-hidrogenação .....	42
Figura 12 – Fluxograma dos processos realizados no presente estudo. ....	45
Figura 13 – Aparato utilizado para armazenamento de OLUC. ....	46
Figura 14 – Recipiente para o qual os óleos foram coletados.....	46
Figura 15 – Estufa utilizada para desidratação e retirada de leves do óleo. ....	46
Figura 16 – Sistema utilizado no processo de destilação à vácuo.....	46

Figura 17 – Óleo sulfonado em sistema de agitação/aquecimento.....	47
Figura 18 – Separação entre óleo sulfonado e borra ácida.....	47
Figura 19 – Processo de clarificação e neutralização de OLUC. ....	48
Figura 20 – Filtração para separação do óleo rerrefinado da mistura argila/cal .....	48
Figura 21 – Da esquerda para direita, exemplos de óleo com aspecto límpido e isento de impurezas e de óleo turvo, respectivamente. ....	49
Figura 22 – Aparato utilizado para as análises de densidade .....	49
Figura 23 – Bureta semiautomática utilizada para determinação do TAN. ....	51
Figura 24 – Sistema utilizado nas análises de viscosidade cinemática. ....	51
Figura 25 – Mufla e cadinho utilizados para calcinações nas análises de teor de cinzas. ....	51
Figura 26 – Da esquerda para a direita - 1° OLUC 1; 2° ODEST 1; 3° OSULF 1; 4° ORRF 1. A mancha localizada abaixo corresponde a um óleo lubrificante novo. ....	55
Figura 27 – Da esquerda para a direita - 1° OLUC 2; 2° ODEST 2; 3° OSULF 2; 4° ORRF 2. A mancha localizada abaixo corresponde a um óleo lubrificante novo. ....	56
Figura 28 – Da esquerda para a direita - 1° OLUC 3; 2° ODEST 3; 3° OSULF 3; 4° ORRF 3. A mancha localizada abaixo corresponde a um óleo lubrificante novo. ....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teores de água e leves para cada amostra de OLUC.....	52
Tabela 2 – Rendimentos percentuais de ODEST obtidos de cada amostra de OLUC desidratado.....	52
Tabela 3 – Rendimentos percentuais de OSULF obtidos de cada amostra de ODEST tratado. ....	53
Tabela 4 – Rendimentos percentuais de ORRF obtidos para cada amostra de OSULF neutralizada, clarificada e filtrada .....	54
Tabela 5 – Rendimentos do processo de rerrefino realizado para cada amostra de OLUC .....	55
Tabela 6 – Densidades calculadas das amostras de OLUC, ODEST, OSULF e ORRF .....	58
Tabela 7 – TAN calculado para as amostras de OLUC, ODEST e ORRF.....	59
Tabela 8 – Viscosidades cinemáticas a 40° C e a 100° C calculadas para as amostras de OLUC, ODEST, OSULF e ORRF.....	61
Tabela 9 – Índices de Viscosidade calculados para OLUC, ODEST, OSULF e ORRF.....	63
Tabela 10 – Teores de cinzas calculado para as amostras de OLUC, ODEST, OSULF e ORRF .....	63

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação entre os tipos de óleo e suas respectivas aplicações. ....	24
Quadro 2 – Composição esperada do OLUC .....	30
Quadro 3 – Equipamentos utilizados para a realização do presente trabalho .....	43
Quadro 4 – Reagentes e substâncias utilizados para a realização do presente trabalho.....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas

**ASTM** – *American Society for Testing and Materials*

**GLP** – Gás Liquefeito de Petróleo

**LABFREN** – Laboratório de Fontes Renováveis de Energia

**LIEP** – Laboratório de Integração Engenharia e Processos

**NBR** – Norma Brasileira

**ODEST** - Óleo Destilado

**OLUC** - Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado

**ORRF** - Óleo Rerrefinado

**OSULF** - Óleo Sulfonado

**RR** – De rerrefino

**TAN** - Número Total de Acidez

**UFMG** – Universidade Federal de Campina Grande

**VC 40** – Viscosidade cinemática a 40°C

**VC 100** – Viscosidade cinemática a 100°C

**VI** – Índice de viscosidade

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>18</b>
	<b>2.1. Geral</b> .....	<b>18</b>
	<b>2.2. Específicos</b> .....	<b>18</b>
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
	<b>3.1. Óleos lubrificantes</b> .....	<b>19</b>
	3.1.1. Classificação quanto à origem .....	20
	3.1.1.1. Óleos lubrificantes minerais .....	20
	3.1.1.2. Óleos Lubrificantes sintéticos .....	21
	3.1.2. Aplicações dos óleos lubrificantes.....	23
	<b>3.2. Refino de petróleo e produção do óleo lubrificante</b> .....	<b>24</b>
	<b>3.3. Composição do óleo lubrificante</b> .....	<b>28</b>
	<b>3.4. Requisitos de qualidade do óleo lubrificante</b> .....	<b>30</b>
	3.4.1. Aparência .....	30
	3.4.2. Cor.....	31
	3.4.3. Viscosidade cinemática.....	31
	3.4.4. Índice de viscosidade .....	32
	3.4.5. Ponto de fulgor.....	32
	3.4.6. Ponto de fluidez .....	33
	3.4.7. Índice de acidez.....	33
	3.4.8. Corrosividade ao cobre .....	33
	3.4.9. Estabilidade à oxidação.....	34
	3.4.10. Teor de cinzas .....	34
	<b>3.5. O rerrefino de óleo lubrificante usado</b> .....	<b>34</b>
	3.5.1. Conceito .....	34
	3.5.2. Importância do rerrefino .....	34
	3.5.3. Legislação aplicável ao rerrefino .....	36
	3.5.4. Logística reversa e rerrefino de OLUC.....	37
	3.5.5. Etapas do processo de rerrefino.....	38
	3.5.5.1. Desidratação .....	38
	3.5.5.2. Destilação .....	39
	3.5.5.3. Desasfaltamento.....	39

3.5.5.4.	<i>Tratamento químico</i> .....	39
3.5.5.5.	<i>Neutralização e clarificação</i> .....	39
3.5.5.6.	<i>Filtração</i> .....	40
3.5.6.	Tecnologias e processos de rerrefino .....	40
3.5.6.1.	<i>Processo ácido argila</i> .....	40
3.5.6.2.	<i>Processo evaporador de filme</i> .....	41
3.5.6.3.	<i>Processo de destilação hidrogenação</i> .....	41
<b>4.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>43</b>
<b>4.1.</b>	<b>Materiais utilizados</b> .....	<b>43</b>
<b>4.2.</b>	<b>Procedimentos</b> .....	<b>44</b>
4.2.1.	Coleta do óleo lubrificante usado .....	44
4.2.2.	Desidratação e retirada de leves.....	45
4.2.3.	Destilação a vácuo .....	45
4.2.4.	Tratamento químico .....	46
4.2.5.	Neutralização e clarificação .....	47
4.2.6.	Caracterização das amostras de óleo.....	48
4.2.6.1.	<i>Aspecto</i> .....	48
4.2.6.2.	<i>Densidade a 20°C</i> .....	48
4.2.6.3.	<i>Número total de acidez</i> .....	49
4.2.6.4.	<i>Viscosidade cinemática a 40°C e a 100°C</i> .....	49
4.2.6.5.	<i>Índice de viscosidade</i> .....	50
4.2.6.6.	<i>Teor de cinzas</i> .....	50
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>52</b>
<b>5.1.</b>	<b>Desidratação</b> .....	<b>52</b>
<b>5.2.</b>	<b>Destilação a vácuo</b> .....	<b>52</b>
<b>5.3.</b>	<b>Tratamento químico</b> .....	<b>53</b>
<b>5.4.</b>	<b>Neutralização, clarificação e filtração</b> .....	<b>54</b>
<b>5.5.</b>	<b>Caracterização dos óleos</b> .....	<b>55</b>
5.5.1.	Aspecto .....	55
5.5.2.	Densidade.....	57
5.5.3.	Número total de acidez .....	59
5.5.4.	Viscosidade cinemática a 40°C e a 100°C .....	60

5.5.5.	Índice de viscosidade .....	62
5.5.6.	Teor de cinzas .....	63
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>65</b>
<b>7.</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>67</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>68</b>
	<b>ANEXO.....</b>	<b>71</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os óleos lubrificantes são produtos que podem ser de origem mineral, tendo como matéria prima o petróleo, ou sintética. Eles são amplamente empregados na indústria, nos sistemas automotivos e em outras aplicações, principalmente, de redução de atrito entre peças móveis, evitando o desgaste prematuro destas (AL-ZAHRANI; PUTRA, 2013). A composição química dos óleos lubrificantes consiste basicamente na mistura de um óleo básico com aditivos, os quais possuem a função de conferir ao óleo comercial características específicas e podem ser detergentes, dispersantes, melhoradores de viscosidade, antidesgaste, abaixador de ponto de fluidez, dentre outros (YANG, 2016).

Visto o grande desenvolvimento industrial, tem-se um conseqüente aumento no número de máquinas em geral. O número de veículos, como carros, motos, caminhonetes e caminhões em circulação é sempre cada vez mais elevado. Tudo isso contribui para que demanda mundial de óleos lubrificantes, inegavelmente, aumente de forma drástica ao longo do tempo.

Ao longo do uso dos óleos lubrificantes, ocorre a degradação dos aditivos, aparecimento de fuligem, contaminação com substâncias externas e oxidação, de modo que sua vida útil vai esgotando e eles tenham que ser trocados (SILVEIRA et al, 2010).

Tendo em vista os fatos supracitados, surgem grandes dilemas tanto na esfera ambiental quanto na econômica. Se despejados no meio ambiente ou queimados de forma inadequada, óleos lubrificantes usados podem causar grande poluição aquática, atmosférica e dos solos (SILVEIRA, 2006). Outro fator a se considerar é que óleos lubrificantes são derivados do petróleo, o qual é um recurso mineral não-renovável. Dessa forma, visto que a quantidade de petróleo disponível no mundo é decrescente e que a demanda por óleos lubrificantes é sempre crescente, torna-se inviável economicamente e insustentável ambientalmente que a obtenção de óleo lubrificante básico seja unicamente proveniente do refino de petróleo (SILVA, 2014).

Diante deste cenário, surgem os processos de rerrefino como uma grande solução para a problemática supracitada, visto que colocam os óleos lubrificantes usados num ciclo de logística reversa, utilizando-os como matéria prima para a obtenção de novos óleos básicos (SILVA, 2014).

A utilização do rerrefino tem mostrado grande relevância econômica e ambiental. Economicamente, o processo de rerrefino é vantajoso, visto que o custo financeiro e energético de obter uma quantidade de óleo lubrificante básico a partir do rerrefino de óleo usado é consideravelmente menor do que obtê-la a partir do refino de petróleo (JAFARI;

HASSANPOUR, 2015). No que tange o aspecto ambiental, o rerrefino propicia uma maior sobrevida às reservas de petróleo, uma vez que diminui a utilização deste como matéria prima, e evita que o óleo usado seja queimado indevidamente, causando a poluição atmosférica por dioxinas e óxidos de enxofre, ou descartado no meio ambiente, causando contaminação dos solos, poluição dos lençóis freáticos, formação de camada de óleo sobre as águas de rios e mares, diminuindo a taxa de fotossíntese, e desequilíbrios no ecossistema em geral (RAMOS, 2001).

Existem no mercado, várias alternativas de processos para realização do rerrefino do óleo usado, dentre as quais pode-se citar o processo ácido-argila, evaporação pelicular, torre ciclônica de destilação, desasfaltamento com extração por solvente, dentre outros. Esses processos, no geral, são constituídos por etapas de desidratação, destilação, desasfaltamento, tratamento químico, neutralização, extração por solventes, clarificação por argilas, ou combinações de algumas destas (ALMEIDA, 2011; JAFARI; HASSANPOUR, 2015). Pode-se afirmar que nenhuma dessas técnicas tem vantagem absoluta sobre as outras, cada uma possui vantagens e desvantagens, as quais devem ser avaliadas caso a caso (HSU; LIU, 2011).

Tendo em vista o exposto acima, pode-se afirmar que é de fundamental importância que se tenha um conhecimento detalhado acerca das etapas do processo de rerrefino, de modo que se saiba a influência de cada uma nas características do óleo que passa por elas. Sendo assim, este presente estudo vem realizar em laboratório um processo de rerrefino de óleo lubrificante usado contendo as etapas de desidratação, destilação a vácuo, tratamento ácido, neutralização e clarificação, analisar as características do óleo antes e depois de cada etapa, no que diz respeito ao aspecto, densidade, acidez, teor de cinzas, viscosidade a 40°C e a 100°C e índice de viscosidade e, ao final, comparar as características do óleo rerrefinado obtido com as dos padrões de qualidade exigidos pelas normas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Geral**

Avaliar a influência de cada etapa do processo tradicional de rerrefino de óleo lubrificante usado, observando as características do óleo inicial, do óleo proveniente das etapas de destilação e tratamento ácido e do óleo rerrefinado final.

### **2.2. Específicos**

- Coletar amostras de resíduos de óleo lubrificante usado de pontos de troca de óleo no município de Campina Grande;
- Caracterizar os óleos residuais coletados;
- Estruturar uma unidade de rerrefino em escala piloto composto pelas etapas de desidratação, destilação, tratamento ácido, neutralização e clarificação;
- Realizar os processos de desidratação, destilação, tratamento ácido, neutralização e clarificação das amostras de resíduo de óleo lubrificante coletados;
- Caracterizar os óleos lubrificantes após cada etapa do processo de rerrefino;
- Realizar a avaliação da influência de cada etapa do processo de rerrefino estudado.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Os óleos lubrificantes podem apresentar diferentes classificações, composições, aplicações e processos de produção. Além disso possuem parâmetros de qualidade objetivos, definidos em normas, os quais são usados para seu controle de qualidade, bem como para avaliar a eficiência de processos de rerrefino existentes.

#### **3.1. Óleos lubrificantes**

Os óleos lubrificantes, de modo geral, são produtos que foram desenvolvidos com a finalidade de diminuir o atrito entre peças móveis de máquinas e equipamentos em geral (PÉCORA, 2004). O mecanismo pelo qual ocorre essa lubrificação consiste na formação de uma fina película que impede que as peças metálicas entrem em contato direto. O processo de lubrificação é de extrema importância nos motores a combustão interna e nos sistemas de transmissão de equipamentos (GÂNDARA, 2000).

De acordo com Pécora (2004), os lubrificantes, além da função da redução de atrito em peças metálicas móveis, possuem algumas outras funções e utilidades que os fazem imprescindíveis. Podem-se citar:

- **Refrigeração:** Superfícies em movimento relativo apresentam um calor gerado devido ao atrito. O óleo lubrificante atua como um meio de transferência de energia térmica, removendo esse calor gerado. Em motores de combustão interna, existe um sistema de arrefecimento, no qual o óleo que é aquecido pelo contato com os vários componentes móveis é resfriado e volta para o ciclo;
- **Limpeza:** Nos motores de combustão interna, ocorre que, na combustão, são geradas partículas que, por sua vez, podem se depositar no fundo do cárter e causar incrustações. Os óleos lubrificantes tem a propriedade de manter tais partículas em suspensão e impedir que isso aconteça;
- **Proteção contra corrosão:** Na composição do óleo lubrificante comercial estão presentes aditivos anti-corrosivo e anti-desgaste. Eles são responsáveis por evitarem a oxidação de metais do motor e sua consequente depreciação;
- **Vedação da câmara de combustão:** Além de todas as outras funções supracitadas, os óleos também têm a propriedade de isolar a câmara de combustão, não permitindo a entrada

de contaminantes externos, bem como o vazamento de lubrificante (AZEVEDO; CARVALHO; FONSECA, 2004).

### 3.1.1. Classificação quanto a origem

Quanto à origem, os óleos lubrificantes podem ser classificados como óleos minerais ou óleos sintéticos. Sabe-se que a diversidade de aplicações, bem como características referentes à composição são o que os diferenciam (CIGOLINI; et al., 2013).

#### 3.1.1.1. *Óleos minerais*

De acordo com Canchumani (2013), o óleo lubrificante mineral é assim denominado por ser obtido de uma fração de hidrocarbonetos provenientes do refino do petróleo, o qual é um mineral. Quanto a esses hidrocarbonetos presentes na constituição dos óleos minerais, tem-se os parafínicos, os quais possuem cadeias carbônicas abertas saturadas e ramificadas, e os naftênicos, os quais possuem cadeias alicíclicas ligadas. As propriedades dos óleos minerais são definidas pelas proporções entre os tipos de hidrocarbonetos presentes (CLARILUB, 2014).

Segundo Almeida (2011), quando se tem uma grande proporção de hidrocarbonetos parafínicos, obtém-se óleos com uma maior estabilidade à oxidação. Quando se tem uma grande proporção de hidrocarbonetos naftênicos, os óleos resultantes possuem uma menor sensibilidade à variação de temperatura (ALMEIDA, 2011).

Tendo em vista essa característica, os óleos com grande proporção naftênica são mais indicados para condições de baixa temperatura, pois a sua viscosidade é preservada. Todavia, com essa matéria-prima escassa, a utilização de óleos naftênicos vem diminuindo, sendo mais comercializados no seu lugar óleos mistos e até mesmo óleos lubrificantes sintéticos (CANCHUMANI, 2013).

Outra classificação existente para os óleos lubrificantes minerais os divide em 3 grupos e tem como parâmetro os índices de viscosidade e teores de enxofre (MOHAMMED, 2013). De acordo com essa classificação, os óleos dividem-se em 3 grupos os quais são:

- Grupo I: Possuem índices de viscosidade entre 85 e 95. O teor de enxofre, em massa, é maior do que 0,3%. A obtenção desse tipo de óleo é feita utilizando-se os processos de extração de aromáticos e desparafinização por solvente, seguidos de hidroacabamento. Por

serem os óleos menos nobres, estes por sua vez são destinados principalmente para a formulação de óleos automotivos (ZAMBONI, 2009; PIO, 2010).

- Grupo II: Possuem índices de viscosidade entre 96 e 119. O teor de enxofre, em massa, é menor do que 0,3%. A obtenção desse tipo de óleo é feita utilizando-se o processo de hidrorrefino. Estes são óleos mais nobres comparando-se aos do grupo I e, tendo isso em vista, eles podem ser empregados na formulação de óleos de motores. Dentre as propriedades desse grupo de óleos, podem-se citar a boa estabilidade à oxidação, a baixa volatilidade e o alto ponto de fulgor (ZAMBONI, 2009; PIO, 2010).

- Grupo III: Possuem índices de viscosidade entre 126 e 135. O teor de enxofre, em massa, é menor do que 0,3. A obtenção desse tipo de óleo é feita utilizando-se os processos de hidroprocessamento e refino. Dentre as propriedades desse grupo de óleos, podem-se citar a sua boa estabilidade química, bem como grande uniformidade molecular. Óleos desse grupo são bastante aplicados em rotas sintéticas de fabricação de óleos lubrificantes, servindo como óleo base (ZAMBONI, 2009; PIO, 2010).

De acordo com Souza (2015), os tipos de cadeia carbônica das moléculas de hidrocarbonetos presentes nos óleos lubrificantes, suas ilustrações, bem como as propriedades as quais eles conferem aos óleos resultantes estão dispostos na Figura 1.

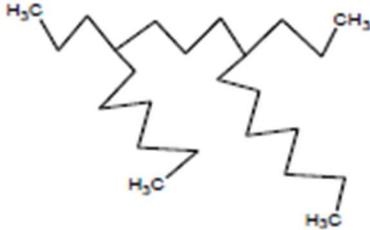
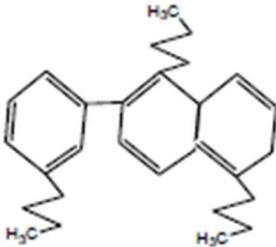
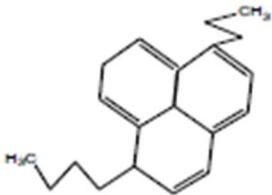
### **3.1.1.2. Óleos lubrificantes sintéticos**

Essa classe de óleos lubrificantes necessita de reações químicas e rotas sintéticas no seu processo de obtenção, diferente dos óleos minerais, que, já existem quimicamente na natureza e necessitam apenas de processos físicos para refiná-los. Eles permitem um maior controle na sua produção bem como a obtenção de vários tipos de cadeias moleculares distintas, as quais propiciam variadas características físicas e químicas aos óleos. (GOMES, 2012; GUIMARÃES, 2006).

Guimarães (2006) citou cinco categorias de óleos lubrificantes sintéticos, as quais são:

I. Hidrocarbonetos mistos-sintéticos: Compostos por hidrocarbonetos do tipo polialfaoleofinas (PAO) e hidrocraqueados. Tem como matéria prima o óleo mineral, o qual é processado, recebendo um tratamento químico que retira os radicais livres e impurezas. O resultado é um óleo lubrificante composto de substâncias mais estáveis a oxidação e com cadeias moleculares mais uniformes (GUIMARÃES, 2006).

Figura 1: Relação entre os tipos de cadeias carbônicas e as propriedades do óleo.

Tipo de cadeia orgânica	Ilustração	Propriedades
Parafínica de cadeia linear		<p>Pouca variação da viscosidade com a temperatura. Boa resistência à oxidação. Alto ponto de fluidez.</p>
Parafínica de cadeia ramificada		<p>Pouca variação da viscosidade com a temperatura. Boa resistência à oxidação. Baixo ponto de fluidez.</p>
Anéis naftênicos com pequenas ramificações		<p>Pouca variação da viscosidade com a temperatura. Boa resistência à oxidação. Baixo ponto de fluidez. Torna-se um pseudo plástico em baixas temperaturas.</p>
Anéis aromáticos com pequenas ramificações		<p>A viscosidade varia muito com a temperatura. Facilmente oxidável. O ponto de fluidez varia de acordo com a estrutura.</p>
Anéis naftênicos com grandes ramificações		<p>A viscosidade varia pouco com a temperatura. Boa resistência à oxidação. Baixo ponto de fluidez.</p>
Anéis aromáticos com grandes cadeias laterais		<p>A viscosidade varia pouco com a temperatura. Boa resistência à oxidação (dependendo do número de anéis aromáticos). Baixo ponto de fluidez.</p>

Fonte: SOUZA, 2015

II. Poliálcois: Composto de moléculas orgânicas do tipo polialquilenoglicóis. Suas principais aplicações estão na produção de lubrificantes especiais, fluidos de freios, óleos hidráulicos e fluidos de cortes. (GUIMARÃES, 2006).

III. Diésteres: Composto de moléculas de ésteres, as quais são formadas a partir da reação de ácidos carboxílicos com álcoois. São muito utilizados também para a fabricação de graxas lubrificantes. Sua principal aplicação se dá em turbinas de aviação civil, onde é utilizado em grande escala. Essa utilização dá-se por conta da sua ótima resistência a altas e baixas temperaturas e rotações elevadíssimas. Devido a aplicação supracitada, essa é a categoria de óleo sintético mais usado mundialmente (GUIMARÃES, 2006).

IV. Óleos de silicone: Compostos de moléculas de fenilpolisiloxanos, metilpolisiloxanos e fluorossilicones. Uma propriedade que torna esse tipo de óleo atraente é o fato de ser bastante inerte quimicamente. Assim, para sistemas que possuam riscos de contaminação por solventes sob altas temperaturas, esse tipo de óleo é uma ótima saída. (GUIMARÃES, 2006).

V. Poliésteres Perfluorados: Compostos de moléculas de flúor e fluoroclorocarbonos. Assim como os óleos de silicone, são quimicamente inertes, todavia em temperaturas acima de 260 °C eles tendem a sofrer craqueamento térmico e liberar vapores tóxicos. (MOLYKOTE, 2014).

### 3.1.2. Aplicações dos óleos lubrificantes

O desenvolvimento tecnológico tem sinalizado ao que vem ser chamado de terceira revolução industrial, onde grande parcela da produção mundial será realizada por máquinas, enquanto as atividades humanas serão restritas às relações interpessoais que envolvam negociação, programação e planejamentos. (COUTINHO, 1992). Tendo em vista essa indústria por máquinas, pode-se inferir que óleos lubrificantes se mostram de suma importância, visto que ele tem a principal função de preservar as partes internas de motores e articulações mecânicas, a fim de diminuir o desgaste devido ao atrito e corrosão, que são favorecidos por altas temperaturas. Além disso, os lubrificantes também auxiliam nos processos de refrigeração, limpeza, transmissão de força mecânica, vedação, isolamento térmico e isolamento elétrico (KUPAREVA; MAKI-ARVELA; YU MURZIN, 2013).

Praticamente todo equipamento que trabalha com peças ou componentes em movimento utiliza um fluido lubrificante para evitar o desgaste de suas partes móveis, na maioria das vezes

um óleo de origem mineral formulado a partir do petróleo (CUTTLER, 1975). Quadro 1, pode-se observar uma divisão entre alguns tipos de óleos com relação às suas aplicações específicas:

Quadro 1: Relação entre os tipos de óleos e suas respectivas aplicações.

<b>Tipos</b>	<b>Aplicação</b>
Óleos de circulação inibida	sistemas hidráulicos/mancais
Óleos de engrenagens	redutores/multiplicadores
Óleos de turbina	sistemas circulatórios
Óleos para compressores	cilindros e mancais
Óleos de corte	corte e resfriamento
Óleos de impregnação	preparo e acabamento de fibras naturais e sintéticas
Óleos para transformação de calor	aplicado até 300 <sup>F</sup>
Óleos de extensão para borracha	para uso em pneus
Óleos neutros	indústria alimentícia

Fonte: (GÂNDARA, 2000)

### **3.2. Refino de petróleo e produção do óleo lubrificante**

Ao longo dos séculos, o ser humano, no decorrer do seu desenvolvimento, já utilizou vários tipos de fonte de energia para realizar suas atividades. O petróleo, bem como seus subprodutos de refino é uma das fontes largamente usada pela humanidade, tanto para geração de energia, bem como como matéria prima para insumos industriais. O óleo lubrificante é um dos vários subprodutos provenientes do processamento do petróleo. O descobrimento, bem como utilizações primárias do petróleo são conhecidos há séculos, porém, o início de sua extração comercial, começou no século XX, e as tecnologias associadas a isso vem se aprimorando ano a ano. Assim, o crescimento desenfreado da indústria do petróleo ocorreu há poucas décadas, em virtude do grande potencial energético e de produção de matérias primas (NEIVA, 1986).

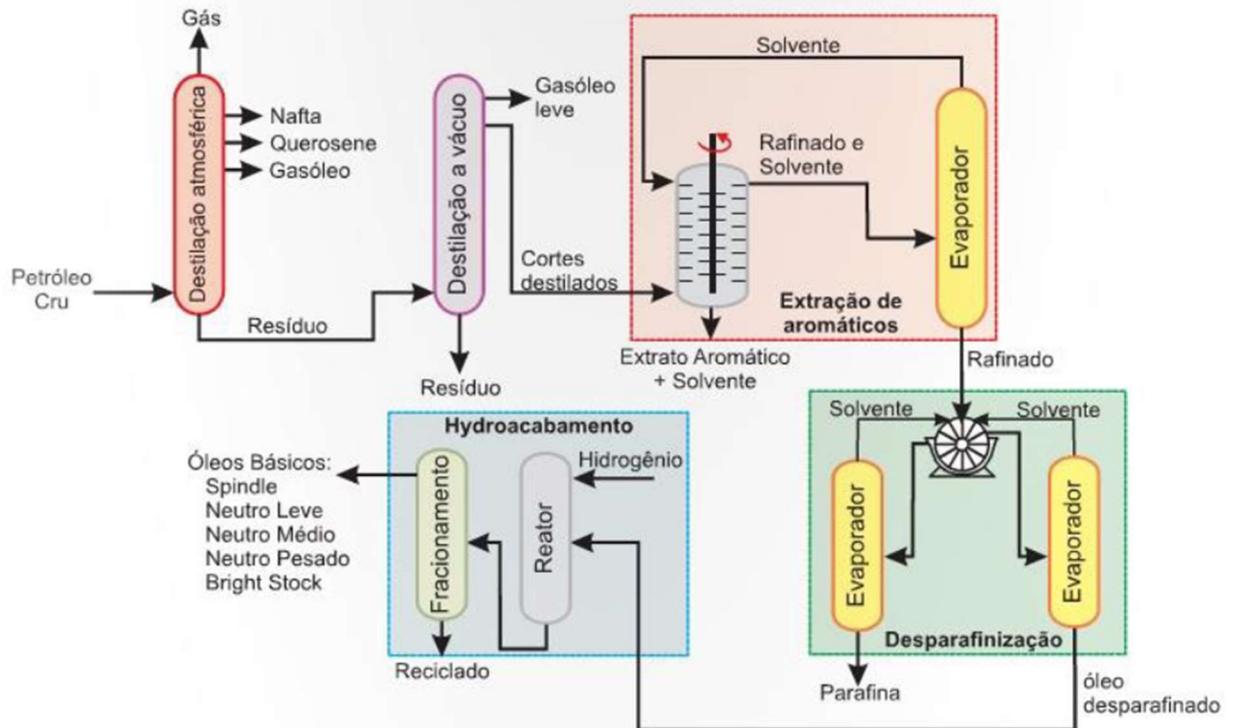
Assim que o petróleo cru é extraído, ele passa por processos de eliminação de água, dessalgação, extração de areia bem como outras impurezas do processo de extração. Feito isso, o petróleo está pronto para ser mandado para a refinaria, onde passará pelos processos pelos quais todos os seus derivados, inclusive os óleos lubrificantes minerais, são produzidos (BRASIL; ARAUJO; SOUZA, 2014).

A sequência de processos pelos quais o petróleo passa desde a chegada à refinaria até a saída de cada derivado é denominada esquema de refino. Cada planta apresenta um esquema de refino que deve se adequar ao tipo de petróleo a ser processado, bem como a prioridade dos derivados os quais se quer produzir. Para a produção de óleos lubrificantes, os esquemas de refino são compostos, geralmente, das etapas de destilação primária, destilação à vácuo, viscorredução, craqueamento térmico, craqueamento catalítico, coqueamento retardado, hidrocrackeamento, desasfaltação a solvente e produção de lubrificantes (BRASIL; ARAUJO; SOUZA, 2014). Assim, uma planta que visa a produção de óleos lubrificantes deve ser composta por estas etapas supracitadas, uma combinação de algumas dessas. Um exemplo de possível esquema de refino focado na produção de lubrificantes está ilustrado na Figura 2.

A destilação primária ou destilação atmosférica leva este nome porque se dá em uma torre que opera em pressão atmosférica. O óleo entra na torre depois de passar por um pré-aquecimento e é fracionado em várias partes, por meio de vaporizações e condensações sucessivas. Tem como parâmetro de separação a diferença de ponto de ebulição, ou seja, a volatilidade de cada uma das partes. Esse processo ocorre no interior da torre de destilação atmosférica através de inúmeros pratos, cada um apresentando uma temperatura diferente a qual vai diminuindo à medida que a temperatura na torre aumenta. Quanto mais leves, consequentemente voláteis, as frações, estas tenderão a se localizar nos pratos mais superiores na torre. De forma análoga, quanto mais pesadas, consequentemente menos voláteis, as frações, estas tenderão a ficar nos pratos mais inferiores da torre. O produto que sai ao fundo da torre é denominado resíduo atmosférico e este, por sua vez, é encaminhado para uma torre de destilação à vácuo (BRASIL; ARAUJO; SOUZA, 2014).

Na destilação à vácuo, tem-se como carga de entrada o “fundo de barril” da destilação atmosférica, resíduo atmosférico, como carga de entrada, e como carga de saída alguns gasóleos recuperados, bem como o resíduo de vácuo ou resíduo pobre. Na torre de vácuo, o resíduo atmosférico é submetido à uma pressão reduzida, o que faz com que se diminua a temperatura de ebulição de alguns hidrocarbonetos presentes, possibilitando que estes sejam separados pelo processo físico de destilação sem que sejam craqueados termicamente. O mecanismo de separação dos componentes na torre de vácuo é o mesmo da torre atmosférica (BRASIL; ARAUJO; SOUZA, 2014). Neste processo, uma das correntes de saída formada é a que dará origem ao óleo lubrificante. As frações mais pesadas provenientes desse processo servirão de carga de entrada nas unidades de craqueamento térmico e catalítico (FARAH, 2012).

Figura 2: Esquema de refino de petróleo para produção de óleo lubrificante básico.



Fonte: Lima (2016)

Tendo passado pelas destilações que são processos físicos de separação, os resíduos desses processos passam por processos químicos, ou seja, que há transformação das moléculas presentes. Essa transformação química, nesses processos, se dá por meio da quebra de moléculas de hidrocarbonetos maiores para formar hidrocarbonetos menores, com o intuito de se obter correntes mais leves, como gás combustível, gás liquefeito de petróleo e gasolina. Essa quebra de moléculas, chamada craqueamento, pode ocorrer nas formas térmica e catalítica (BRASIL; ARAUJO; SOUZA, 2014).

No craqueamento térmico, a quebra das moléculas ocorre unicamente pela ação da temperatura e pode ser de fase gasosa, líquida ou mista. No de fase gasosa usa-se temperaturas elevadas e pressões mais baixas que de fase líquida e se produz gasolina com maior octanagem e menor estabilidade que o craqueamento líquido. Sua carga de entrada é o gasóleo proveniente da destilação. A carga é levada a uma alta temperatura na fornalha, e segue para as câmaras de reação e expansão. Após a vaporização, parte da carga é reconduzida à torre de fracionamento a vácuo. Nessa torre, a carga é separada em gasolina craqueada, metano, eteno, butano e outros. As frações mais pesadas que saem pelo fundo da torre servem de carga para outros craqueamentos (NEIVA, 1986).

No craqueamento catalítico utiliza-se de catalisadores para acelerar as reações de craqueamento. Tais catalisadores torna o processo mais eficiente energeticamente, pois faz com

que se necessite de uma mais baixa temperatura para haver a quebra das moléculas de hidrocarbonetos. Alguns catalisadores bem utilizados são argila bentonítica e sílica. Os catalisadores são introduzidos na torre de fracionamento, juntamente com a carga oriunda das torres de destilação à vácuo ou atmosférica. Assim como no craqueamento térmico os produtos mais voláteis saem pela parte superior da torre e os menos voláteis servem de carga para outras conversões (NEIVA, 1986).

A desasfaltação é um processo que tem como objetivo separar os asfaltenos de frações mais pesadas, geralmente residuais, dos processos de refino. O processo consiste em misturar a carga de entrada com um solvente o qual irá absorver os asfaltenos, submeter à agitação e, posteriormente, promover a separação do óleo desasfaltado e do solvente rico em asfaltenos. Os solventes mais usados nestes processos são o furfural, o nitrobenzeno e o fenol. O óleo tratado nesta operação (desasfaltado) servirá como carga para a produção de óleos lubrificantes e o resíduo asfáltico é empregado na produção de asfalto de rua (BRASIL; ARAUJO; SOUZA, 2014).

Para se obter o óleo lubrificante acabado, é necessário que o óleo desasfaltado passe por alguns processos de tratamento, os quais são desaromatização, desparafinação e acabamento. A carga tratada que se tornará óleo lubrificante é proveniente dos gasóleos e do resíduo da destilação à vácuo, ou ainda do óleo desasfaltado (SHREVE, 1890).

A desaromatização consiste a extração de hidrocarbonetos aromáticos no óleo, com o objetivo de reduzir a taxa de variação de viscosidade com relação a temperatura, conferindo uma maior estabilidade ao óleo. O processo consiste em fazer passar o óleo em contracorrente com um solvente de grande afinidade com aromáticos, o qual pode ser o fenol ou o furfural (SHREVE, 1890).

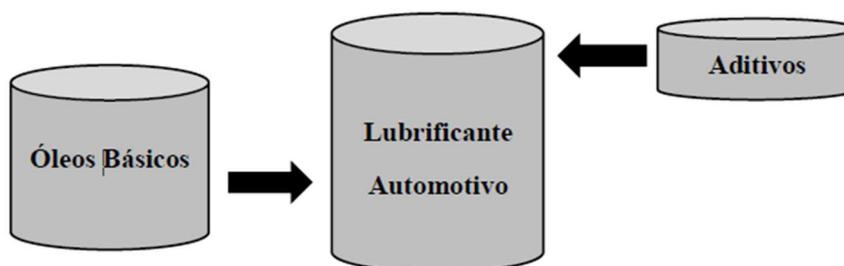
A desparafinação consiste na eliminação de moléculas parafínicas do óleo, com o objetivo de abaixar o ponto de fluidez do óleo. Essa separação é promovida a partir de solventes como dióxido de enxofre líquido, propano, ácido cresílico, éter dicloroetílico, fenol e nitrobenzeno, com mecanismo parecido com o da desaromatização (FARAH, 2012).

A hidrogenação catalítica consiste no tratamento do óleo com gás hidrogênio sob alta pressão e na presença de catalisador, com a finalidade de saturar duplas ligações presentes nas cadeias dos hidrocarbonetos. Representa o processo de acabamento dos óleos lubrificantes, melhorando suas características de coloração, corrosividade e estabilidade a oxidação. Os óleos lubrificantes minerais têm características básicas que influenciam na finalidade de sua aplicação e a composição de um determinado tipo de petróleo a ser refinado é que define qual a sua melhor utilização (BRASIL; ARAUJO; SOUZA, 2014).

### 3.3. Composição do óleo lubrificante

Óleos lubrificantes, minerais ou sintéticos, são derivados de petróleo, empregados em fins automotivos ou industriais, que são compostos basicamente de dois tipos de componentes principais, os quais são óleo básico e aditivos, como ilustrado na Figura 3, os quais vão sempre variar de acordo com a característica desejável para cada aplicação (MOHAMMED,2013).

Figura 3: Esquema ilustrativo da composição do óleo lubrificante comercial



Fonte: LIMA, 2016

Acerca de sua composição química, óleos básicos consistem em misturas complexas de hidrocarbonetos saturados (alcanos e cicloalcanos) e aromáticos, com mais de 15 átomos de carbono por molécula. Sua obtenção decorre do refino de petróleo, onde se fazem importantes processos de remoção ou redução de compostos aromáticos, sulfurados, nitrogenados, oxigenados e parafinas lineares, pois são substâncias que conferem aos óleos propriedades não desejáveis (FARAH, 2012).

De acordo com a aplicação a qual cada óleo lubrificante é destinado, a este são adicionados aditivos específicos para conferir ao óleo comercial resultante características necessárias ao fim para o qual o óleo é destinado que não são atendidas pelo óleo básico. Ou seja, aditivos possuem a função de melhorar, ou conferir, propriedades específicas, não atendidas pelo óleo básico. Aditivos, no geral, podem ser divididos em dois grupos. De um lado temos os aditivos que modificam características físicas, tais como índice de viscosidade e ponto de fluidez. Do outro lado, temos os que possuem efeito de natureza química, tais como antioxidantes, detergentes e antidesgastantes (AL-ZAHRANI; PUTRA, 2013).

Na Figura 4, tem-se uma lista exemplificativa com alguns aditivos utilizados, bem como a função de cada um deles:

Figura 4: Relação entre tipos de aditivos, suas composições e funções no óleo comercial

<b>Tipo de aditivo</b>	<b>Componentes principais</b>	<b>Funções</b>
<b>Melhorador de índice de viscosidade</b>	Polialquimetacrilatos, Copolímeros de Olefinas	Reduzir a tendência de variação da viscosidade com a variação de temperatura
<b>Abaixador de ponto de fluidez</b>	Polimetacrilatos, Poliacrilamidas	Impedir que os óleos congelem, mantendo sua fluidez sob baixas temperaturas
<b>Antiespumante</b>	Siliconas, Polímeros sintéticos	Minimizar a formação de espumas que tendem a se formar devido a agitação dos óleos lubrificantes e prejudicam a eficiência do produto.
<b>Antioxidante</b>	Ditiofosfatos de zinco, Fenóis	Retardar a oxidação dos óleos lubrificantes
<b>Detergente/ Dispersante</b>	Sulfonatos, Fosfonatos,	Impedir a formação de depósitos de produtos de combustão e oxidação, mantendo-os em suspensão no próprio óleo
<b>Anticorrosivo</b>	Ditiofosfatos de zinco, Sulfonatos	Neutralizar os ácidos que se formam durante a oxidação e que provocam a corrosão de superfícies metálicas

Fonte: SEQUEIRA, 1994

Diferentemente dos combustíveis, tais como gasolina, diesel, querosene e GLP, o óleo lubrificante está entre os poucos derivados de petróleo que não são totalmente consumidos durante o seu uso. Todavia, mesmo não sofrendo combustão completa, assim como os outros derivados de petróleo supracitados, quando usados, os lubrificantes passam a apresentar na sua composição algumas substâncias químicas que acusam a sua degradação. Pode-se citar compostos oxigenados, como ácidos orgânicos e cetonas (CONAMA, 2005).

Além dos produtos de degradação citados acima, pode-se encontrar no óleo usado restos de aditivos que ainda não foram consumidos, bem como metais de desgaste das máquinas lubrificadas (chumbo, cromo, bário e cádmio), e contaminantes como água, combustível não queimado, poeira e outras impurezas. Algumas substâncias prejudiciais tais como ascaréis e solventes clorados por vezes, podem ser encontradas no óleo usado, afetando as características do básico original e aumentando os riscos de um processamento posterior (COSTA, 2009).

Denomina-se recuperação, a remoção dos aditivos restantes e dos contaminantes provenientes do seu uso. Esse processo tem como objetivo aproveitar os hidrocarbonetos presentes no óleo usado que podem servir de matéria prima para produzir novos óleos básicos

(COSTA, 2009). No que diz respeito ao aproveitamento da carga para a produção de óleos básicos, pode-se dizer que óleos usados apresentam de 65 à 80%, em massa, de óleo básico, o que é um número bastante expressivo se comparado à fração mássica de lubrificante que se pode extrair do refino do petróleo cru, que é de 10 à 17%. Quanto aos requisitos de qualidade, os óleos básicos recuperados devem obedecer aos mesmos critérios que os básicos do primeiro refino (CUTTLE, 1975).

De acordo com Cuttler (1975), pode-se esperar, a partir das frações do óleo usado, os seguintes rendimentos representados no Quadro 2:

Quadro 2: Composição esperada do óleo lubrificante usado ou contaminado

<b>FRAÇÃO</b>	<b>RENDIMENTO ( %)</b>
Contaminantes leves	1 a 6
Pesados, resíduos de destilação	10 a 15
Óleo básico	60 a 80
Água	0 a 10
Aditivos	até 15
Produtos de oxidação do óleo	5 a 8
Partículas	1 a 3

Fonte: (GÂNDARA; G.M.F, 2000)

### **3.4. Requisitos de qualidade do óleo lubrificante**

Os requisitos de qualidade de um óleo lubrificante são definidos por necessidades do motor ou do equipamento que o utiliza, por aspectos econômicos ou ligados ao meio ambiente. Esses requisitos levam a um conjunto de especificações para os óleos lubrificantes formulados (TÁVORA; QUELIAS, 2003). O cumprimento de tais especificações está relacionado ao conjunto de características dos óleos básicos atrelado aos aditivos que o complementam.

#### **3.4.1. Aparência**

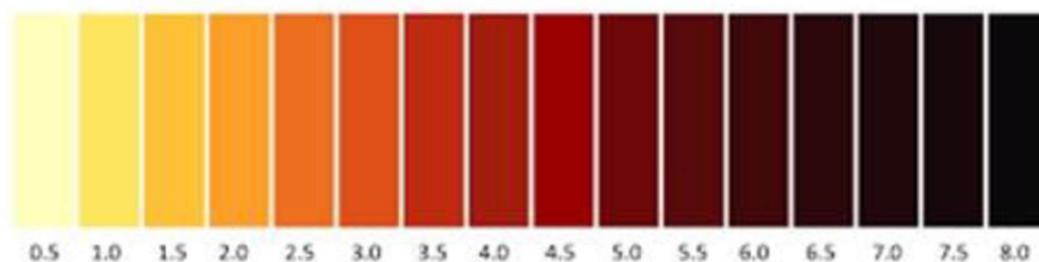
A aparência do óleo lubrificante é uma indicação macroscópica do nível de pureza do óleo. O óleo com um elevado grau de pureza é o que não apresenta contaminantes visíveis a olho nu. A análise da aparência do óleo é realizada de forma visual. Um óleo para atender a

expectativa exigida pelas normas deve apresentar um aspecto límpido e isento de impurezas (SIMEPETRO, 2020)

### 3.4.2. Cor

A cor, que é um dos mais primários e simples dos aspectos de qualidade, está ligada à pureza do óleo lubrificante com relação a produtos de oxidação e asfaltenos. As etapas do refino do petróleo nas quais esse requisito passa a ser atendido são a destilação fracionada, onde são separados os asfaltenos, e o acabamento, onde são removidos os produtos de oxidação (LIMA, 2016). O método mais utilizado para determinação desse parâmetro é o descrito na norma ASTM D1500, no qual a amostra é colocada em um recipiente contra uma fonte de luz e comparada com vidros coloridos com valores correspondentes que variam de 0,5 a 8, como representado na Figura 5 (ANP, 1999).

Figura 5: Escala utilizada para determinação de Cor ASTM.



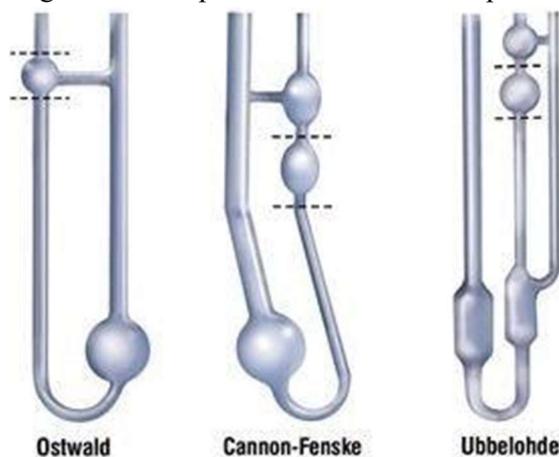
Fonte: Lima, 2016

### 3.4.3. Viscosidade cinemática

A viscosidade do óleo lubrificante é o parâmetro que indica a sua resistência ao escoamento. É a mais significativa propriedade física de um lubrificante (CARRETEIRO; BELMIRO, 2006). A interpretação da viscosidade possui relevância em todos os aspectos da lubrificação. Quando se dá a partida em um motor à baixa temperatura, um óleo muito viscoso impedirá a correta lubrificação, por ser mais lenta sua chegada em todas as partes do motor, aumentando o atrito das partes móveis e, conseqüentemente, o seu desgaste. Já em um motor em alta temperatura, um óleo de baixa viscosidade pode revelar-se pouco viscoso, provocando queda na pressão de óleo e vazamento para a câmara de combustão, entre outras situações (GUIMARÃES, 2006). O procedimento mais realizado para determinação da viscosidade é baseado em medir o tempo de escoamento de um volume determinado de líquido por um

viscosímetro de vidro a uma temperatura rigorosamente controlada. Os principais tipos de viscosímetro de vidro estão ilustrados na Figura 6. A viscosidade é determinada pelo produto entre o tempo de escoamento e a constante de calibração do viscosímetro (PÉCORA, 2004).

Figura 6: Exemplos de viscosímetros capilares.



Fonte: LIMA, 2016

#### 3.4.4. Índice de viscosidade

O índice de viscosidade é um parâmetro que mede a resistência à variação da viscosidade do óleo com a variação da temperatura. Um alto índice de viscosidade significa que é pequena a variação da viscosidade com a temperatura, o que é desejável para os óleos em cujas aplicações estão sujeitos à fortes variações de temperaturas (SOUZA, 2015). Essa propriedade guarda relação com a natureza do petróleo de origem (parafínico ou naftênico), sendo maior nos óleos advindos dos naftênicos que dos parafínicos. O índice de viscosidade pode ser calculado por uma relação matemática que envolve o valor das viscosidades em diferentes temperaturas (ASTM, 2004).

#### 3.4.5. Ponto de fulgor

O ponto de fulgor é um parâmetro que fornece informações acerca de possíveis presenças de compostos voláteis e inflamáveis no óleo. Essa propriedade consiste na menor temperatura, obtida sobre determinadas condições de aquecimento, na qual o produto se vaporiza em quantidade suficiente para formar com o ar uma mistura capaz de inflamar-se momentaneamente quando se aplica uma chama sobre a mesma. A importância desse parâmetro

está no fato de que é uma informação importante e deve ser levada em conta para segurança no armazenamento do óleo (LIMA, 2016).

#### 3.4.6. Ponto de fluidez

O ponto de fluidez é a propriedade que consiste na menor temperatura na qual o óleo lubrificante flui quando sujeito a resfriamento sob condições determinadas de teste. É principalmente controlado para avaliar o desempenho nas condições de uso em que o óleo é submetido a baixas temperaturas ou em climas frios (LIMA, 2016; DESIDERATO, 2009).

#### 3.4.7. Índice de acidez

O índice de acidez é a propriedade que mede a quantidade de substâncias ácidas presentes no óleo. Esse parâmetro indica a eficiência do processo de neutralização dos resíduos ácidos resultantes do tratamento do óleo. Também pode dar uma ideia do nível de degradação oxidativa do óleo (LIMA, 2016; DESIDERATO, 2009).

#### 3.4.8. Corrosividade ao cobre

A corrosividade ao cobre é outro parâmetro importante a se considerar do óleo lubrificante, visto que dá uma indicação relativa do grau de corrosividade deste. Para determiná-lo, uma lâmina de cobre é imersa no óleo aquecido, por um determinado tempo, e de acordo com a descoloração da lâmina em comparação com uma tabela é determinado o grau de corrosividade. Essa propriedade pode dar uma ideia da presença e do teor de mercaptanas presentes no óleo (LIMA, 2016).

#### 3.4.9. Estabilidade à oxidação

A estabilidade a oxidação do lubrificante indica a capacidade de resistência á oxidação do óleo quando submetido a longos períodos de estocagem ou sob condições dinâmicas de uso. É uma característica muito importante a ser levada em conta, visto que indica a vida útil do óleo quando em serviço (LIMA, 2016; DESIDERATO, 2009)

#### 3.4.10. Teor de cinzas

O teor de cinzas é o parâmetro que indica a quantidade de cinzas presentes no óleo. Quanto maior o teor de cinzas, pode-se inferir que se tem uma maior presença de compostos metálicos solúveis em água ou óleo bem como de outros materiais tais como poeira e ferrugem. Essa propriedade pode indicar a eficiência da etapa de filtração do óleo (SEQUEIRA, 1994).

As especificações para cada tipo de óleo lubrificante básico, limites máximos e mínimos e as normas nacionais e internacionais correspondente aos métodos de caracterização de óleos lubrificantes estão representados na Figura 7.

### 3.5. O rerrefino de OLUC

#### 3.5.1. Conceito

A resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA nº 362/05) traz em seu escopo que o rerrefino é a categoria de processos industriais de remoção de contaminantes, produtos de degradação e aditivos dos óleos lubrificantes usados ou contaminados, conferindo aos mesmos, características de óleos básicos. Com relação ao óleo lubrificante básico, entende-se como o principal constituinte do óleo lubrificante acabado, que atenda a legislação pertinente. O óleo lubrificante usado ou contaminado, por sua vez, consiste, no óleo lubrificante acabado que, em decorrência do seu uso normal ou por motivo de contaminação, tenha se tornado inadequado à sua finalidade original (CONAMA, 2005)

#### 3.5.2. Importância do processo de rerrefino

Pode-se estimar, atualmente, que o consumo mundial de óleo lubrificante é de 42 milhões de toneladas e que são geradas 22 milhões de toneladas de óleo usado por ano. Disso tudo, apenas 1 milhão de toneladas vão para o processo de rerrefino. Em 2010, apenas 36% de todo óleo lubrificante usado teve como destino o rerrefino. Esse percentual é consideravelmente baixo.

Figura 7: Especificação dos óleos básicos segundo NBR e ASTM

CARACTERÍSTICAS	SPINDLE RR	NEUTRO LEVE RR	NEUTRO MÉDIO RR	NEUTRO PESADO RR	Método
Aparência	Límpida	Límpida	Límpida	Límpida	Visual
Cor ASTM, máx.	2,0	3,0	4,0	4,5	ASTM D1500
Viscosidade Cinemática, cSt a 40°C	8 a 18	26 a 32	50 a 70	-	NBR 10441 ASTM D445
Viscosidade Cinemática, cSt a 100° C	-	-	-	9,6 a 12,9	NBR 10441 ASTM D445
Índice de Viscosidade, min.	-	95	95	95	NBR 14358 ASTM D2270
Ponto de Fulgor, °C, min.	155	200	215	226	NBR 11341 ASTM D92
Ponto de Fluidez, °C, máx.	-3	-3	-3	-3	NBR 11349 ASTM D97
Índice de Acidez Total, mg KOH/g, máx.	0,05	0,05	0,05	0,05	NBR 14248 ASTM D974
Cinzas, % peso, máx.		0,02	0,02	0,02	NBR 9842 ASTM D482
Resíduo de Carbono Ramsbottom, % peso, máx.	0,2	0,3	0,3	0,3	NBR 4318 ASTM D189
Corrosividade ao cobre, 3h a 100° C, máx.	1	1	1	1	NBR 14359 ASTM D130

Fonte: Lima (2016)

O processo de recuperação propicia uma sobrevida às reservas de petróleo e evita que o óleo usado contamine o meio ambiente através de despejos criminosos. Porém, deve-se atentar para o tratamento posterior da borra ácida, que consiste em um subproduto gerado no processo de rerrefino que, se não receber tratamento adequado pode causar vários impactos ambientais. Assim, embora o rerrefino do óleo usado seja uma exigência legal, há posições discordantes quanto a este direcionamento, devido aos efeitos danosos da borra ácida (GÂNDARA, 2000).

O rerrefino de óleos lubrificantes usados constitui possui uma grande importância ambiental, visto que reduz a contaminação direta, bem como aumenta a vida útil do petróleo como matéria prima, diminuindo sua demanda (TÁVORA; QUELIAS, 2003).

Quando havia grande disponibilidade de petróleo a baixo custo, o processo de rerrefino era economicamente inviável, pois usava-se sem limitações o óleo básico de primeira refinação (PIO, 2010). Porém, essa prática causava muito prejuízo ao meio ambiente, visto que havia muito descarte dos rejeitos. Hoje a exigência ambiental é muito maior e o rerrefino tem se mostrado uma ferramenta eficaz na redução da poluição, do desperdício, bem como no aumento da produção de lubrificantes e melhor aproveitamento energético, pois a energia gasta nesse processo é menos da metade da gasta na produção a partir do óleo de primeira destilação (COSTA, 2009).

### 3.5.3. Legislação aplicável ao rerrefino

A gestão do ciclo do óleo lubrificante apresenta uma grande relevância tanto ambiental/econômica, dessa forma ela interessa à estrutura estatal. Além da natural complexidade de coordenar as ações dos órgãos federais, estaduais e municipais inerente à gestão ambiental, o contexto do óleo lubrificante usado ou contaminado requer, adicionalmente, a absorção das regras e competências dos órgãos reguladores das atividades econômicas ligadas ao petróleo. (CONAMA, 2005)

Apesar dessa dificuldade, foi possível criar um sistema harmônico e claro para a gestão desse resíduo perigoso, que estabelece uma conceituação comum e, principalmente, gera a necessidade de ação coordenada entre as competências limítrofes. Todo esse sistema está assentado na máxima que diz que todo o óleo lubrificante usado ou contaminado coletado deverá ser destinado à reciclagem por meio do processo de rerrefino. (CONAMA, 2005)

O próprio artigo estabelece as três únicas exceções à regra geral. Na exceção tratada no parágrafo primeiro, o encaminhamento do OLUC para outro processo de reciclagem exigirá que este tenha comprovada eficácia ambiental equivalente ou superior ao rerrefino, de forma qualitativa a obtenção de óleo básico que atenda as especificações da ANP) e quantitativa (rendimento em massa de igual ou superior a 70%), a ser aferida pelo órgão ambiental competente. A exceção expressa no parágrafo segundo, permite aos geradores industriais o processamento do óleo lubrificante usado ou contaminado, por si ou por terceiros, para a fabricação de produtos, exceto combustíveis, a serem consumidos exclusivamente pelos próprios geradores, sendo expressamente vedada a comercialização de tais produtos.

Finalmente, a terceira exceção decorre da inviabilidade técnica de envio de óleo lubrificante usado ou contaminado ao rerrefino (§ 3º do art. 3º), hipótese praticamente inexistente já que a rede de coleta abrange 90% dos municípios brasileiros. Como se vê, pois, as exceções somente confirmam a regra geral. Cabe destacar ainda que, como decorrência da máxima orientadora do sistema, outras duas regras expressas na Resolução CONAMA nº 362/2005 devem sempre ser lembradas e observadas no licenciamento de atividades em que sejam gerados óleos lubrificantes usados ou contaminados, inclusive no que tange à exceção do § 2º do art. 3º:

Art. 12. Ficam proibidos quaisquer descartes de óleos usados ou contaminados em solos, subsolos, nas águas interiores, no mar territorial, na zona econômica exclusiva e nos sistemas de esgoto ou evacuação de águas residuais.

Art. 13. Para fins desta Resolução, não se entende a combustão ou incineração de óleo lubrificante usado ou contaminado como formas de reciclagem ou de destinação adequada (CONAMA, 2005).

#### 3.5.4. Logística reversa e rerrefino de OLUC

Dentro de um contexto de globalização e no intuito de adaptarem-se da melhor forma possível às exigências de mercado, cada vez mais as empresas vêm procurando meios para obtenção de vantagens competitivas. Neste contexto, a logística pode ser citada como uma das ferramentas que contempla uma série de vantagens, pois configura-se como um arranjo complexo onde se encontram informações, tecnologias e sistemas os quais visam buscar caminhos mais ágeis e econômicos para a organização. (STOCK, 1998)

A conscientização ambiental aliada aos preceitos de produtividade nas empresas demonstra o esforço para obtenção do lucro considerando práticas ecologicamente sustentáveis. Dentro dessa idéia, surgiram os direcionamentos de esforços para obtenção de renda por meio da reutilização de bens contemplando o que se chama de logística reversa. Como exemplo de cadeia reversa pode ser citado a do rerrefino de óleos lubrificantes, constituindo uma grande responsabilidade na sustentabilidade ambiental. Na Figura 8 pode ser observado um esquema do ciclo de logística reversa do óleo lubrificante no Brasil. A Organização das Nações Unidas realizou várias pesquisas na década de noventa e concluiu que a solução mais segura com relação à disposição dos óleos lubrificantes é o rerrefino. Essa cadeia procura suprir a

necessidade que a maioria das empresas tem em dar fim satisfatório em seus resíduos (RAMOS, 2001).

Figura 8: Ilustração do esquema de logística reversa do óleo lubrificante



Fonte: Leite, 2017

### 3.5.5. Etapas do processo de rerrefino

O rerrefino, na sua qualidade de processo industrial que promove a remoção de contaminantes e produtos de oxidação e aditivos para conferir ao produto final as mesmas características do óleo básico, é realizado em etapas, sendo que cada uma delas tem sua fundamental importância para que, ao final do processo, todas as características requeridas do óleo básico sejam atingidas. O processo de rerrefino pode ser dividido nas seguintes etapas:

#### 3.5.5.1. *Desidratação*

Após ser descarregado numa caixa receptora, o óleo usado passa por um peneiramento e por uma filtração para a retenção de partículas grosseiras. A desidratação é iniciada com um pré-aquecimento do óleo até 80°C antes de ser enviado aos desidratadores. A água e os solventes evaporados são condensados e separados em um separador de fases. Os solventes são aproveitados como combustível para os fornos e a água é enviada para tratamento (ETE) (MARTINS; FREIRE; SANTOS, 2013).

#### 3.5.5.2. *Destilação*

O óleo desidratado é enviado para a próxima etapa de fornos e suas frações são novamente divididas em neutros médios e leves e óleos spindles, constituintes do óleo lubrificante, sendo que essas frações seguem no processo (DESIDERATO, 2009).

#### 3.5.5.3. *Desasfaltamento*

O óleo destilado é bombeado para outro forno, onde é aquecido a uma temperatura de 380°C, e enviado para os evaporadores de película. Nesta etapa, é separada a fração asfáltica do óleo sob alto vácuo (1 mBar). A fração asfáltica é composta pela maior parte degradada do OLOC. Na sua composição encontramos polímeros, metais, resinas, e compostos de carbono. Esta fração é empregada na fabricação de mantas e produtos asfálticos em geral (MARTINS; FREIRE; SANTOS, 2013; DESIDERATO, 2009).

#### 3.5.5.4. *Tratamento químico*

O óleo proveniente do desasfaltamento ainda possui alguma quantidade de componentes oxidados. Para extraí-los, aplica-se pequena quantidade de ácido sulfúrico, que promove a aglomeração dos contaminantes que decantam, gerando a borra ácida, um resíduo poluente se lançado ao ambiente. De acordo com Solomons (2001), o ácido sulfúrico é um forte agente oxidante, o que explica a sua grande reatividade com compostos orgânicos e inorgânicos. A borra ácida é lavada com água, neutralizada e desidratada, transformando-se em combustível pesado de alto poder calorífico. A água ácida gerada na lavagem desta borra é neutralizada com lama cal e cal virgem, transformando-se em gesso para corretivo de solo. A água neutralizada é enviada para tratamento (LIMA, 2016).

#### 3.5.5.5. *Neutralização e clarificação*

Após a sulfonação, o óleo é bombeado para os reatores de clarificação, onde é adicionada argila descorante (absorvente natural). A mistura óleo/argila é aquecida para promover a absorção de compostos indesejáveis. No final, é adicionada cal para corrigir a acidez do óleo (GUIMARÃES, 2006).

### **3.5.5.6.** *Filtração*

A mistura óleo/argila/cal passa por filtros prensa para separar a fração sólida. A argila com cal impregnada com óleo é empregada em indústrias cerâmicas e cimenteiras. O óleo ainda passa por filtros de mais fina para eliminar as partículas remanescentes. No final, é obtido o óleo básico mineral rerrefinado com as mesmas características de óleo básico virgem (GUIMARÃES, 2006).

Após estas etapas, o óleo é armazenado em tanques. Para atender às especificações de viscosidade, cor, ponto de fulgor, etc., cada lote é analisado e corrigido pelo laboratório. O processo de rerrefino visa eliminar 23% dos contaminantes, somada a perda de 12% referente à incorporação do óleo ao material adsorvente (ALVES, 2011).

### **3.5.6.** *Tecnologias e processos de rerrefino*

Os processos de rerrefino são os que tem por finalidade a remoção de contaminantes, produtos de degradação e aditivos dos óleos lubrificantes usados ou contaminados, conferindo-lhes características de óleos básicos, conforme legislação específica. Existem inúmeras técnicas para realização do rerrefino de OLUC, porém todas têm em comum a flexibilidade para atender às diferentes composições do óleo usado ou contaminado, a extração da máxima quantidade de óleo básico possível bem como o fornecimento de óleo básico dentro das especificações estabelecidas pelo órgão regulador da indústria do petróleo (ALMEIDA, 2011).

Dentre as tecnologias mais utilizadas para o rerrefino de OLUC, pode-se citar as seguintes:

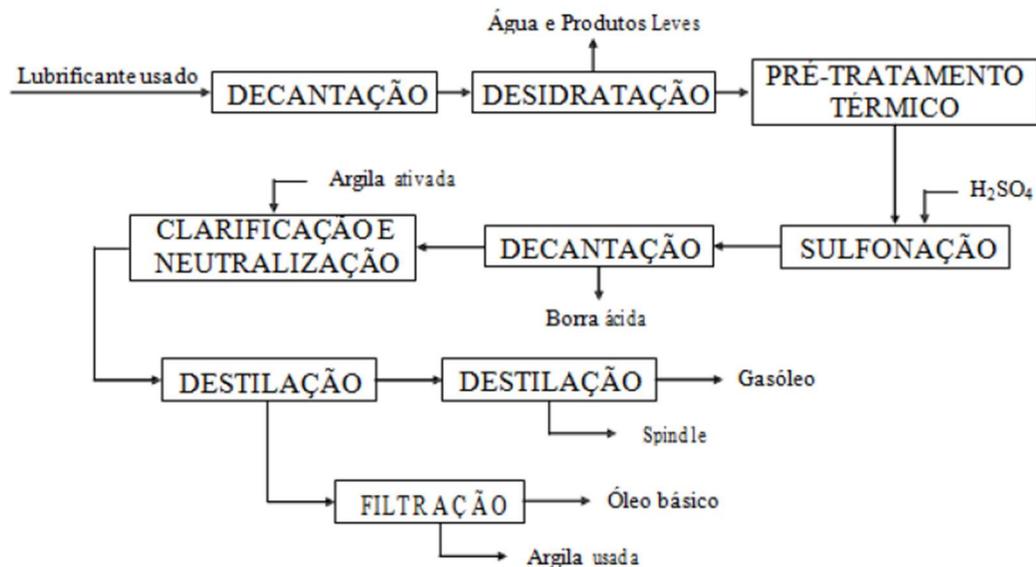
#### **3.5.6.1.** *Processo ácido-argila*

Este processo, cujo fluxograma está representado na Figura 9, foi desenvolvido na Alemanha por Bernd Meiken. Muitos rerrefinadores no Brasil usam esse processo. O inconveniente é o alto custo de produção, tendo em vista o maior consumo de ácido sulfúrico e argila ativada, geração de maior quantidade de borra ácida (poluente de difícil eliminação) e rendimento em torno de 60%. A vantagem é poder tratar pequenas quantidades de óleo usado e as instalações requerem menores investimentos iniciais (GUIMARÃES, 2006).

Um avanço tecnológico desse processo foi a introdução do pré-tratamento térmico, aplicável diretamente ao óleo usado, o qual é submetido a um vácuo de 20 mm de Hg,

temperatura de 350°C e um tempo de residência em torno de 15 minutos. Assim consegue-se, a degradação dos aditivos e esse procedimento gera as seguintes vantagens: redução de 50% no consumo de ácido sulfúrico; redução em torno de 1% no consumo de argila ativada; redução de 40% na quantidade do ácido residual formado; aumento de 4% no rendimento do processo (COSTA, 2009).

Figura 9: Fluxograma do processo ácido-argila



Fonte: ALVES, 2011

### 3.5.6.2. Processo evaporador de filme

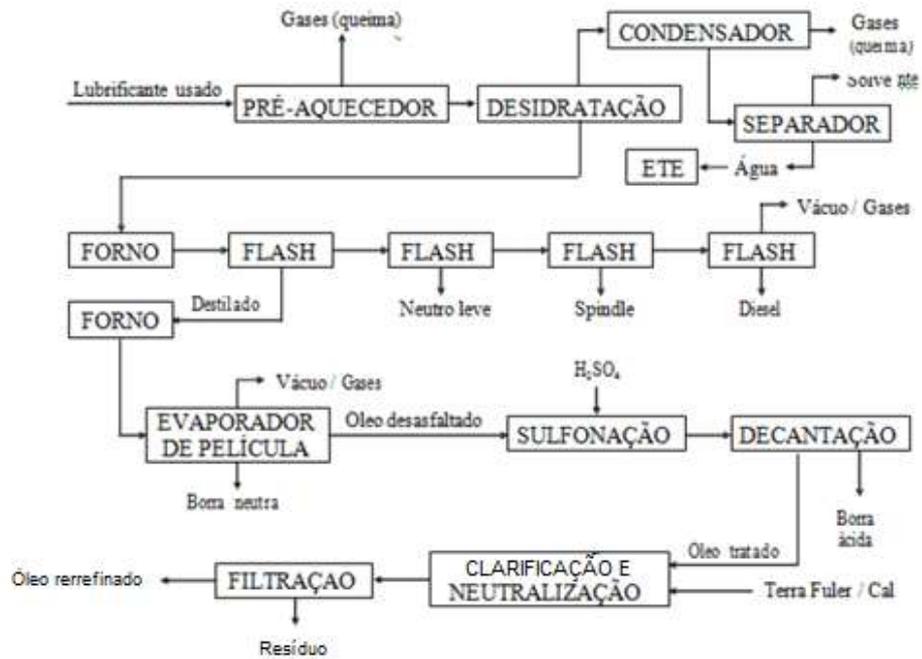
Este método foi desenvolvido e patentado pela Pflauser & Co Ltda., nos Estados Unidos. Inicialmente houve uma adaptação ao rerrefino, uma vez que esse processo era utilizado no reaproveitamento de produtos químicos e recuperação de solventes. O fluxograma deste processo está representado na Figura 10. A utilização do processo evaporador de filme, conforme, nas atividades industriais de rerrefino envolve as seguintes seqüências: desidratação, destilação *flash*, desasfaltação (no reator de evaporador de filme), sulfonação, clarificação, neutralização e filtração (GUIMARÃES, 2006).

### 3.5.6.3. Processo de destilação hidrogenação

Processo desenvolvido por técnicos holandeses e americanos. Este processo tem a grande vantagem de eliminar o uso de ácido sulfúrico e incluir técnicas modernas que permitem

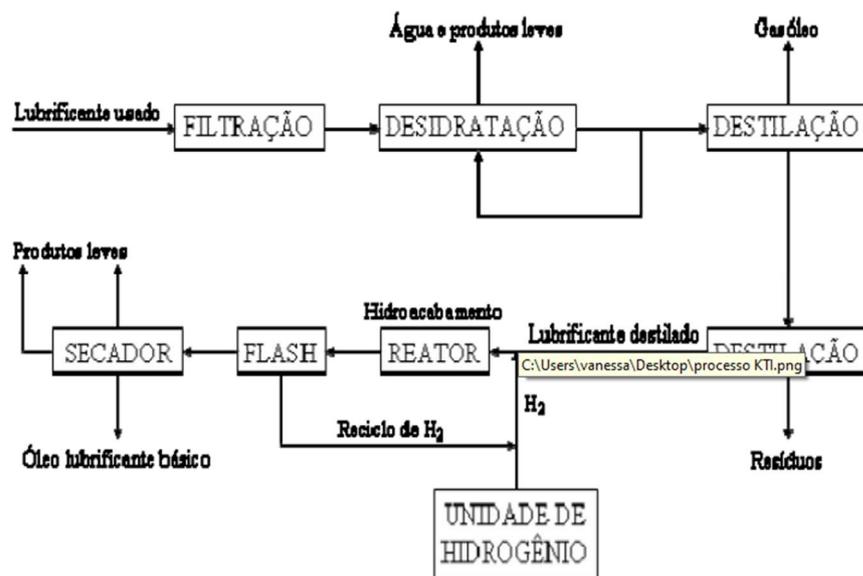
completa automatização e se obter um produto de alta qualidade. Neste processo, cujo fluxograma está representado na Figura 11, não há formação de borras ácidas ou argilosas, o que constitui sua principal vantagem com relação aos processos anteriores, isto é, menores perdas e consequentemente maior rendimento (GUIMARÃES, 2006; MARTINS; FREIRE; SANTOS, 2013).

Figura 10: Fluxograma do processo evaporador de filme



Fonte: ALVES, 2011

Figura 11: Fluxograma do processo destilação-hidrogenação



Fonte: ALVES, 2011

#### 4. MATERIAIS E METODOS

A metodologia experimental do presente trabalho consistiu em realizar em laboratório, com óleos lubrificantes automotivos usados coletados em três oficinas mecânicas do município de Campina Grande, um processo de rerrefino em escala piloto composto pelas etapas de desidratação, destilação a vácuo, desasfaltamento, neutralização e clarificação, bem como caracterizar o óleo residual inicial, os óleos provenientes de cada etapa e o óleo rerrefinado final, para avaliar a influência de cada etapa. Os procedimentos e análises foram realizados no Laboratório de Integração Engenharia e Processo (LIEP) e no Laboratório de Fontes Renováveis de Energia (LABFREN), ambos pertencentes à Unidade Acadêmica de Engenharia Química no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Todas as análises de caracterização foram realizadas em triplicata e, para contabilização do resultado, foram tomadas as médias aritméticas simples das triplicatas.

##### 4.1. Materiais utilizados

Para montagem da unidade de rerrefino em escala piloto e realização dos procedimentos e caracterizações, foram utilizados os equipamentos constantes no Quadro 3 e reagentes e substâncias constantes no Quadro 4.

Quadro 3: Equipamentos utilizados para realização do presente trabalho

<b>Equipamentos utilizados</b>
Estufa
Manta aquecedora
Bomba de vácuo
Agitador com aquecedor
Bureta semiautomática
Mufla
Viscosímetro automático Canon Fenske com banho termostático
Kitassato
Funil de Buchner
Papel filtro
Picnômetro
Cadinhos de porcelana

Tubos de ensaio
Balão de fundo redondo
Condensador
Erlenmeyer

Fonte: Autor (2020)

Quadro 4: Reagentes e substâncias utilizados para realização do presente trabalho

<b>Reagentes e substâncias utilizados</b>
Ácido sulfúrico
Hidróxido de cálcio
Hidróxido de sódio
Álcool etílico
Éter etílico
Fenolftaleína
Terra fuller

Fonte: Autor (2020)

## 4.2. Procedimentos

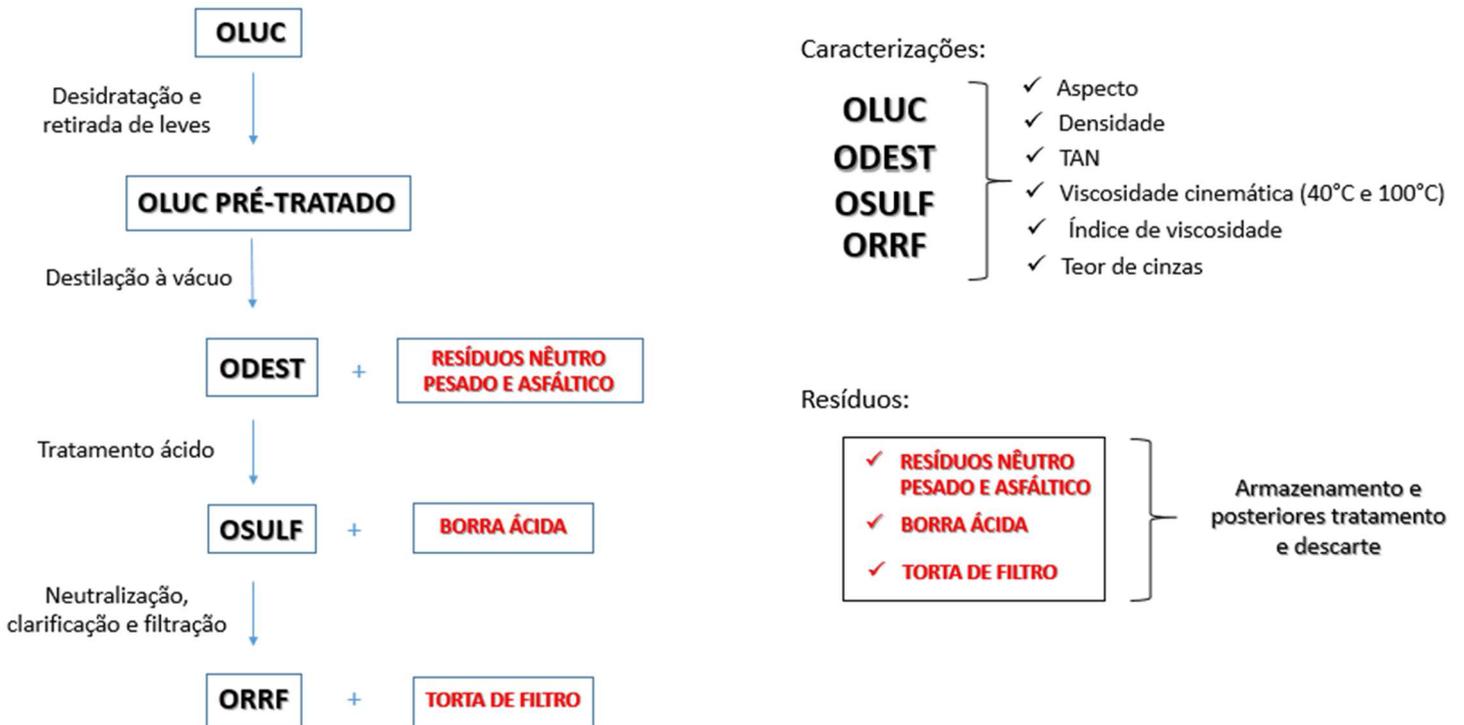
O fluxograma da Figura 12 representa, de forma esquemática, todos os procedimentos realizados com cada amostra, bem como as caracterizações realizadas com estas, os resíduos gerados e a destinação destes.

### 4.2.1. Coleta do OLUC

A amostras de OLUC utilizadas no experimento foram coletadas em três oficinas mecânicas automotivas do município de Campina Grande. Nessas oficinas, todo óleo usado retirado dos carros, ao se realizar as trocas de óleo, é armazenado em um barril fechado, como pode ser visualizado na Figura 13, para, posteriormente, ser vendido para empresas que realizam seu reaproveitamento.

No ato da coleta, os óleos foram agitados para homogeneização e, em seguida, retirados para embalagens previamente limpas e secas, como pode ser visualizado na Figura 14, e tampados para serem levados ao laboratório.

Figura 12: Fluxograma dos processos realizados no presente estudo.



Fonte: Autor (2020)

#### 4.2.2. Desidratação e retirada de leves

Este foi o primeiro procedimento realizado com os óleos no laboratório, com a finalidade de condicioná-los para o processo de destilação. O método utilizado nesta etapa segue o mesmo utilizado nos experimentos de Desiderato (2009). Tomou-se 300 mL de cada amostra de óleo em um Becker e colocou-se em uma estufa a 150° C por 24h, conforme pode ser visualizado na Figura 15.

#### 4.2.3. Destilação a vácuo

Ao sair da estufa, os óleos foram submetidos a um processo de destilação a vácuo a uma temperatura de 250°C, medida com um termômetro de mercúrio, e uma pressão de 360 mmHg, aferida no sensor de pressão da bomba de vácuo. O sistema utilizado para realização dessa etapa está ilustrado na Figura 16. O método utilizado nesta etapa segue o mesmo utilizado nos experimentos de Desiderato (2009).

Figura 13: Aparato utilizado para armazenamento de OLUC.



Fonte: Autor (2020)

Figura 14: Recipiente para o qual os óleos foram coletados.



Fonte: Autor (2020)

Figura 15: Estufa utilizada para desidratação e retirada de levas do óleo.



Fonte: Autor (2020)

Figura 16: Sistema utilizado no processo de destilação à vácuo



Fonte: Autor (2020)

As amostras de ODEST seguiram para a etapas seguintes e os resíduos asfálticos foram armazenados para serem devidamente descartados.

#### 4.2.4. Tratamento químico

Os óleos provenientes do processo de destilação foram submetidos ao tratamento químico. O método utilizado nesta etapa segue o mesmo utilizado nos experimentos de Desiderato (2009). Nesta etapa, transferiu-se o óleo destilado para um Becker a adicionou-se a este aproximadamente 2% v/v de ácido sulfúrico P.A. As misturas ODEST/ácido sulfúrico foram submetidas a um aquecimento com agitação a 50°C por uma hora. O aparato utilizado nesta etapa pode ser visto na Figura 17.

Após esse tempo, a misturas de óleo destilado e ácido sulfúrico, denominadas óleo sulfonado, foram colocadas em um funil de decantação e deixadas por 24 horas, conforme pode

ser visto na Figura 18. No dia seguinte, realizou-se a separação das fases superior, OSULF, e inferior, borra ácida.

A borra ácida foi armazenada para ser devidamente tratada e descartada. O óleo tratado quimicamente seguiu para as etapas seguintes.

Figura 17: OSULF em sistema de agitação/aquecimento



Fonte: Autor (2020)

Figura 18: Separação entre OSULF e borra ácida.



Fonte: Autor (2020)

#### 4.2.5. Neutralização e clarificação

O método utilizado nesta etapa segue o mesmo utilizado nos experimentos de Desiderato (2009). Nesta etapa, adicionou-se aproximadamente 3% m/v de hidróxido de cálcio às amostras de OSULF, para neutralização, e aproximadamente 5 g de argila do tipo terra fuller para clarificação. As misturas óleo/terra fuller/argila foram colocadas em um balão de fundo redondo e aquecidas em uma manta aquecedora a 200°C por uma hora, como pode ser visto na Figura 19.

Logo após, as misturas supracitadas foram submetidas a uma filtração à vácuo. As filtrações foram realizadas com o auxílio de um sistema funil de buchner/kitassato/bomba de vácuo e um papel de filtro qualitativo de 80g/m<sup>2</sup>, para permitir a passagem do óleo e reter a parte sólida (cal + argila), como pode ser visto na Figura 20. Os óleos obtidos nessa filtração correspondem aos óleos rerrefinados.

Figura 19: Processo de clarificação e neutralização de OLUC



Fonte: Autor (2020)

Figura 20: Filtração para separação do óleo rerrefinado da mistura argila/cal



Fonte: Autor (2020)

#### 4.2.6. Caracterização das amostras de óleo

##### 4.2.6.1. *Aspecto*

O aspecto dos óleos foi verificado por uma análise visual. O que se espera para um óleo rerrefinado é que este seja límpido e isento de impurezas. Exemplos de diferentes aspectos de óleo lubrificante podem ser visualizados na Figura 21.

##### 4.2.6.2. *Densidade a 20°C*

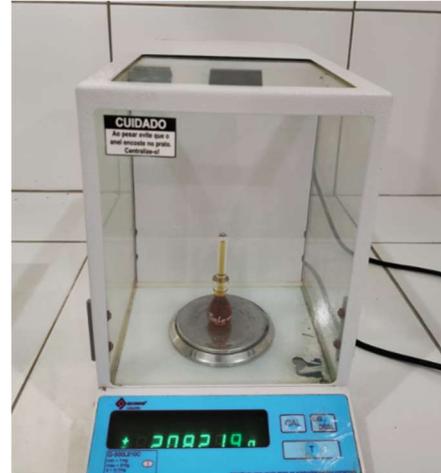
As determinações de densidade foram feitas de acordo com FUNASA (2001). As análises foram realizadas com um auxílio de um picnômetro de 5 mL e uma balança de precisão. A massa da amostra de óleo a ser analisada foi determinada a partir da diferença entre as massas do picnômetro cheio com a amostra e do picnômetro vazio. A temperatura do óleo nas condições do experimento foi medida por um termômetro de mercúrio. A densidade foi calculada pelo quociente entre a massa da amostra e o volume da amostra, o qual corresponde ao volume do picnômetro. O aparato utilizado para estas caracterizações está representado na Figura 22.

Figura 21: Da esquerda para direita, exemplos de óleo com aspecto límpido e isento de impurezas e de óleo turvo, respectivamente.



Fonte: Autor (2020)

Figura 22: Aparato utilizado para as análises de densidade



Fonte: Autor (2020)

#### 4.2.6.3. *Número total de acidez*

As determinações de TAN foram realizadas de acordo com a NBR 14248 adaptada. Utilizou-se o método titulométrico. Inicialmente pesou-se, em um erlenmeyer 1g do óleo a ser analisado e adicionou-se 20 mL de uma mistura éter etílico/álcool etílico (2:1), para dissolver o óleo, e 2 mL de solução de fenolftaleína. Em seguida, titulou-se essa mistura com uma solução padronizada de hidróxido de sódio 0,01 mol/L até o aparecimento da cor rosa. Para contabilizar corretamente o resultado do TAN, realizou-se também uma prova de branco, procedendo-se com a titulação da mistura álcool/éter com fenolftaleína. O volume de titulante utilizado para o cálculo do TAN de cada amostra foi a diferença entre os volumes usados para a amostra e para o branco. O aparato utilizado para essa caracterização está ilustrado na Figura 23.

#### 4.2.6.4. *Viscosidade cinemática a 40° C e a 100° C*

As medidas de viscosidade cinemática foram realizadas de acordo com a NBR 10441, utilizando-se um viscosímetro Canon Fenske automático, que se encontra ilustrado na Figura 24. Nessa determinação, um volume determinado do óleo analisado é puxado para cima através de um capilar de forma automática, de forma que passa por duas marcações, ao longo do trajeto pelo capilar. Então, o óleo é solto e, através de sensores, detecta-se o tempo que o óleo leva para percorrer a distância entre uma marca à outra. Esse procedimento ocorreu mediante controle rigoroso de temperatura, que se obteve mergulhando o viscosímetro em um banho

termostático. A viscosidade cinemática foi dada pelo produto entre o tempo medido de escoamento e a constante viscosimétrica do aparelho.

#### **4.2.6.5.** *Índice de viscosidade*

O índice de viscosidade é calculado através de uma relação matemática entre as viscosidades cinemáticas a 40° C e a 100° C. Calculou-se o índice de viscosidade, para todas as amostras, de acordo com ASTM (2004), usando seguinte fórmula, a qual se aplica a óleos com viscosidade cinemática a 100°C menor ou igual a 70 mm<sup>2</sup>/s e maior ou igual a 2 mm<sup>2</sup>/s:

$$VI = [(L-U)/(L-H)] \times 100$$

Onde:

VI = Índice de viscosidade

L = Viscosidade do óleo padrão (IV = 0) a 40°C, cuja viscosidade a 100°C é igual à do óleo em análise.

U = Viscosidade do óleo em análise a 40°C

H = Viscosidade cinemática do óleo padrão (IV = 100) a 40°C, cuja viscosidade a 100°C é igual à do óleo em análise.

Os parâmetros L e H dependem da viscosidade cinemática à 100°C e podem ser obtidos no Anexo A.

#### **4.2.6.6.** *Teor de cinzas*

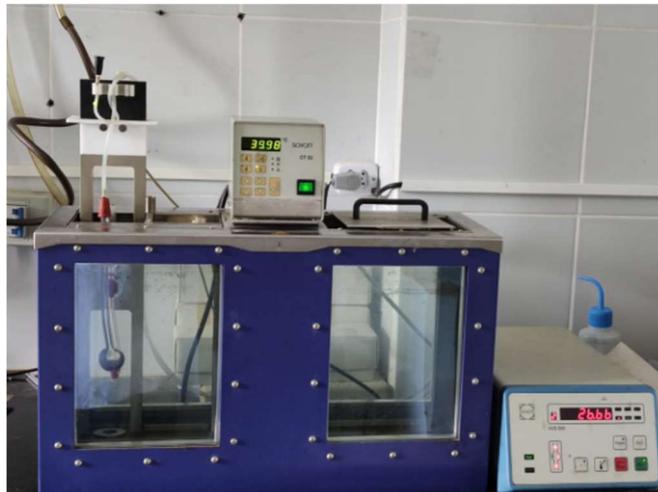
As determinações de teor de cinzas foram feitas de acordo com a NBR 9842, utilizando-se um cadinho de porcelana e uma mufla, ilustrados na Figura 25. Primeiramente, calibrou-se o cadinho, calcinando-o em uma mufla a uma temperatura de 775°C por aproximadamente 3 horas. Depois de resfriado, pesou-se o cadinho em uma balança analítica. Sendo determinada a massa do cadinho, colocou-se neste 2 g da amostra de óleo e levou-se à mufla a uma temperatura de 775°C até que se restasse apenas cinzas e carbono. Então, o cadinho com as cinzas foi resfriado e pesado novamente na balança analítica.

Figura 23: Bureta semi automática utilizada para determinação do TAN.



Fonte: Autor (2020)

Figura 24: Sistema utilizado nas análises de viscosidade cinemática.



Fonte: Autor (2020)

Figura 25: Mufla e cadinho utilizados para calcinações nas análises de teor de cinzas.



Fonte: Autor (2020)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos dos procedimentos e análises realizados estão descritos nos subtópicos a seguir.

### 5.1. Desidratação

Os teores de água e leves encontrados para cada amostra de OLUC analisada estão representados na Tabela 1.

Tabela 1: Teores de água e leves para cada amostra de OLUC.

Amostra	OLUC 1	OLUC 2	OLUC 3
Teor de água e leves (%)	1,66	0,51	1,60

Fonte: Autor (2020)

Os resultados apresentados acima estão dentro do previsto por Gândara (2000). Este resultado mostra a relevância do processo de desidratação, visto que grande parte destes leves corresponde ao teor de água, a qual, se não for retirada previamente, pode vaporizar-se antes do óleo ao longo do aquecimento, no processo de destilação, e causar um aumento repentino de pressão no sistema, o que é indesejável, visto que o processo de destilação a vácuo ocorre em pressão controlada.

### 5.2. Destilação a vácuo

Os rendimentos de ODEST obtidos após a destilação à vácuo das amostras de OLUC estão representados na Tabela 2:

Tabela 2: Rendimentos percentuais de ODEST obtidos de cada amostra de OLUC desidratado.

Amostra	OLUC 1	OLUC 2	OLUC 3
Rendimento de ODEST (%)	81,42	64,29	86,29

Fonte: Autor (2020)

De acordo com Desiderato (2009), pela temperatura em que se realizou a destilação (250°C), pode-se afirmar que o ODEST obtido corresponde à fração do óleo básico denominada óleo neutro médio. As frações correspondentes ao óleo neutro pesado e à parte asfáltica não

foram destiladas, pois precisariam de uma temperatura na faixa dos 380°C. Dessa forma o ODEST não precisou ser submetido a um processo de desasfaltamento. Os óleos destilados obtidos apresentaram uma coloração castanho médio e o resíduo, composto pela fração asfáltica juntamente com a de óleo neutro pesado, que restou no balão de fundo redondo apresentou uma coloração próxima ao preto e aspecto de muito denso e viscoso.

A partir dos rendimentos de ODEST obtidos, pode-se observar que o OLUC 2, por ter apresentado uma menor quantidade de destilado a 250°C e 360 mmHg, é a amostra com maior teor de hidrocarbonetos pesados, fração asfáltica e que, provavelmente, sofreu maior degradação oxidativa, evaporação de leves e contaminação ao longo do uso. As amostras de OLUC 2 e OLUC 3 apresentaram rendimentos próximos e maiores que a de OLUC 2, permitindo-se inferir que se tratam de amostras de OLUC menos degradadas e podem fornecer um melhor rendimento na recuperação do óleo básico por rerrefino. Desiderato (2009), ao realizar este procedimento nas mesmas condições de temperatura e pressão, obteve um rendimento de aproximadamente 60%, o que se aproxima do resultado do OLUC 2. O rendimento observado em todas as amostras está de acordo com o previsto por Gândara (2000), conforme pode ser visto no Quadro 2.

### 5.3. Tratamento químico do ODEST

Nessa etapa, o ácido sulfúrico concentrado que foi adicionado reagiu com os contaminantes, tais como metais e compostos inorgânicos, presentes no ODEST, formando a borra ácida, a qual se aglomerou e decantou no funil de separação. Após 24 horas de sedimentação, os rendimentos percentuais de OSULF, os quais são numericamente iguais aos volumétricos em mililitros, obtidos para cada amostra de 100 mL de ODEST foram os representados na Tabela 3.

Tabela 3: Rendimentos percentuais de OSULF obtidos de cada amostra de ODEST tratado.

Amostra	ODEST 1	ODEST 2	ODEST 3
Rendimento de OSULF (%)	86	83	86

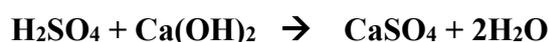
Fonte: Autor (2020)

Os dados da Tabela 5 mostram que o ODEST 2 é o que possuía maior teor de substâncias metálicas, inorgânicas e componentes oxidados presentes, os quais reagiram com o ácido sulfúrico, formando borra ácida e diminuindo o rendimento de OSULF. Ao realizar o mesmo

procedimento, Desiderato (2009) obteve um rendimento de aproximadamente 90% nessa etapa, o que se aproxima dos números obtidos para o ODEST 1 e o ODEST 3.

#### 5.4. Neutralização, clarificação e filtração

O hidróxido de cálcio utilizado nesta etapa reage com o ácido sulfúrico na proporção de 1:1 conforme a reação:



Dessa forma, o número de mols de hidróxido de cálcio a serem adicionados deve ser igual ao número de mols de ácido sulfúrico adicionados no tratamento químico. Utilizou-se uma aproximação que parte do princípio de que, no tratamento químico, a quantidade de ácido sulfúrico adicionada está em abundante excesso, de modo que a pequena quantidade de ácido que reage com as impurezas e fica na borra ácida pode ser desprezada. Dessa forma, calculou-se que a massa de hidróxido de cálcio necessária para neutralização é de 2,96 g.

O aquecimento a 200°C da mistura OSULF/cal/argila teve como finalidade a ativação da argila e a evaporação da água proveniente do ácido sulfúrico e da cal. Os rendimentos de óleo rerrefinados final obtidos para cada amostra de OSULF neutralizada, clarificada e filtrada estão representados na Tabela 4.

Tabela 4: Rendimentos percentuais de ORRF obtidos para cada amostra de OSULF neutralizada, clarificada e filtrada.

Amostra	OSULF 1	OSULF 2	OSULF 3
Rendimento de ORRF (%)	88,37	89,16	88,37

Fonte: Autor (2020)

Calculou-se o rendimento do processo de rerrefino, levando em conta o produto dos rendimentos de cada etapa para cada amostra de OLUC inicial. O resultado está representado na Tabela 5.

O rendimento obtido por Desiderato (2009) ao aplicar a mesma metodologia foi de aproximadamente 41%, o que mais se aproxima do resultado obtido com o rerrefino do OLUC 2. Pode-se inferir que tanto o OLUC utilizado por Desiderato (2009) quanto o OLUC 2 utilizado no presente trabalho sofreram, ao longo do seu uso, muito mais degradação oxidativa,

evaporação de leves e contaminação com substâncias pesadas do que os OLUC 1 e OLUC 3 deste presente trabalho.

Tabela 5: Rendimentos percentuais do processo de rerrefino realizado para cada amostra de OLUC

Amostra	OLUC 1	OLUC 2	OLUC 3
Rendimento do processo de rerrefino (%)	62	48	66

Fonte: Autor (2020)

## 5.5. Caracterizações das amostras de óleo

As amostras de OLUC, ODEST, OSULF e ORRF foram analisadas e os resultados obtidos foram comparados aos padrões de qualidade exigidos para o óleo básico.

### 5.5.1. Aspecto

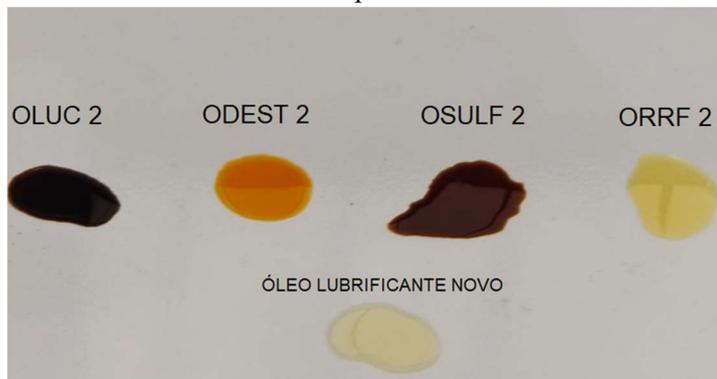
O aspecto de cada amostra de OLUC, ODEST, OSULF e ORRF analisada pode ser visualizado nas figuras 26, 27 e 28.

Figura 26: Da esquerda para a direita - 1° OLUC 1; 2° ODEST 1; 3° OSULF 1; 4° ORRF 1. A mancha localizada abaixo corresponde a um óleo lubrificante novo.



Fonte: Autor (2020)

Figura 27: Da esquerda para a direita - 1° OLUC 2; 2° ODEST 2; 3° OSULF 2; 4° ORRF 2. A mancha localizada abaixo corresponde a um óleo lubrificante novo.



Fonte: Autor (2020)

Figura 28: Da esquerda para a direita - 1° OLUC 1; 2° ODEST 1; 3° OSULF 1; 4° ORRF 1. A mancha localizada abaixo corresponde a um óleo lubrificante novo.



Fonte: Autor (2020)

O aspecto das amostras de óleo lubrificante fornece indícios acerca de contaminações por fragmentos de carbono, produtos de oxidação, fuligem proveniente da combustão incompleta, contaminação por óleo mais escuro, dentre algumas outras possibilidades.

Pode-se observar que as amostras de OLUC, antes de passar pelo processo de rerrefino, sofreram violenta degradação oxidativa e contaminação, de modo que não mais atendia o requisito de possuir aspecto límpido e isento de impurezas exigido pelos padrões de qualidade. Pelo contrário, apresentava uma cor escura, bem como aspecto sujo e com impurezas.

Após passar pela destilação a vácuo, observa-se, em todas as amostras de ODEST, um nítido clareamento com relação ao OLUC inicial, visto que os produtos de oxidação, fuligem, asfaltenos e até mesmo a fração mais pesada de hidrocarbonetos, os quais conferem ao óleo uma coloração escura, não vaporizam nas condições de temperatura e pressão as quais o óleo inicial foi submetido na destilação.

Após o tratamento químico, todas as amostras de óleo sofreram uma piora no aspecto e cor devido a reação do ácido sulfúrico com os hidrocarbonetos. Além de reagir com metais e substâncias inorgânicas que presentes, eliminando tais impurezas e formando a borra ácida, este ácido, de acordo com Solomons (2001), por ser um forte agente oxidante, reage com algumas moléculas de hidrocarbonetos, oxidando-as e causando o aspecto escurecido do OSULF.

Após os processos de neutralização, clarificação e filtração, as amostras de ORRF obtiveram aspectos parecidos com o de um óleo lubrificante novo, ou seja, límpido e isento de impurezas. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que a argila terra fuller, por possuir propriedades adsorventes, tem a capacidade de adsorver residuais produtos de oxidação, fuligem e partículas que fornecem cor que ainda se encontravam presentes no OSULF, após o tratamento químico. Pode-se observar, em todos os casos, que a etapa de clarificação foi a crucial para que as amostras de ORRF atendessem ao requisito de aspecto exigido pelos padrões de qualidade.

A amostra de ORRF 1 e ORRF 2 apresentaram características de aspecto e cor semelhantes. O ORRF 3 apresentou uma coloração um pouco mais escurecida, o que pode ser atribuído ao fato de a etapa de clarificação não ter sido eficiente o suficiente. Desiderato (2009), ao realizar em laboratório, com uma amostra de OLUC, o mesmo processo de rerrefino realizado neste trabalho, obteve um resultado semelhante ao obtido nos OLUC 1 e 2, no que diz respeito ao aspecto do ORRF resultante.

#### 5.5.2. Densidade

As densidades calculadas das amostras analisadas estão representadas na Tabela 6. As amostras de OLUC foram as que apresentaram a maiores valores de densidade, o que pode ser explicado pelo fato de que, ao longo do uso ocorrem o aparecimento de fuligem, produtos de oxidação, contaminação por substâncias mais densas, bem como evaporação de leves. Tudo isso contribui para que o óleo lubrificante usado seja mais denso que o óleo novo.

A amostra de OLUC 2 foi a amostra de óleo usado que apresentou a maior densidade, visto que é a mais rica em componentes mais pesados. Este dado corrobora com os resultados de rendimento dos processos de rerrefino realizados com as amostras de OLUC coletadas. O OLUC 2, por sua vez, foi o que apresentou um menor rendimento, o que pode ser explicado por razões semelhantes às deste ter apresentado maior densidade, como o fato deste ter sofrido maior degradação oxidativa, evaporação de leves ao longo do uso e maior contaminação, conseqüentemente, tornando-se mais rico em componentes mais pesados. As amostras de

OLUC 1 e OLUC 3 apresentaram densidades semelhantes, o que também já era esperado, por esse ponto de vista, visto que o rendimento dos processos de rerrefino realizados com estes foram próximos.

Tabela 6: Densidades calculadas das amostras de OLUC, ODEST, OSULF e ORRF

<b>Amostra</b>	<b>Densidade (g/mL)</b>
OLUC 1	0,861
ODEST 1	0,827
OSULF 1	0,834
ORRF 1	0,828
OLUC 2	0,880
ODEST 2	0,831
OSULF 2	0,834
ORRF 2	0,830
OLUC 3	0,859
ODEST 3	0,827
OSULF 3	0,832
ORRF 3	0,819

Fonte: Autor (2020)

Observa-se que as amostras de ODEST, com relação aos seus respectivos OLUC's, tiveram consideráveis diminuições na densidade. Isso se deve ao fato de que os componentes mais pesados das amostras de OLUC, tais como os produtos de oxidação, asfaltenos, hidrocarbonetos mais pesados e fuligem, possuem um maior ponto de ebulição do que os componentes mais leves. Dessa forma, estes componentes que contribuiriam para uma maior densidade ficam retidos no balão de fundo redondo e os ODEST's, conseqüentemente, apresentaram-se menos densos.

Apesar da diferença de densidade de seus respectivos OLUC's iniciais, as densidades dos ODEST's apresentaram-se semelhantes, o que pode ser atribuído ao fato de que, como o processo de destilação foi realizado nas mesmas temperatura e pressão para todas as amostras, as frações de hidrocarbonetos que foram vaporizadas e condensadas em todas elas foram semelhantes em pontos de ebulição e, conseqüentemente, em tamanho das moléculas e densidade destas.

As amostras de OSULF, obtidas após a etapa de tratamento químico, apresentaram densidades um pouco maior que os respectivos ODEST's. Isso se deve ao fato de que o ácido

sulfúrico, adicionado na etapa de tratamento químico, apresenta uma densidade consideravelmente maior do que a do óleo destilado, em torno de  $1,83 \text{ g/cm}^3$  na temperatura de trabalho, o que faz com que a densidade resultante dos OSULF's fique um pouco maior do que a do ODEST, mesmo possuindo menos contaminantes.

Os ORRF's, apresentaram densidades um pouco inferior às dos respectivos OSULF's obtidos no tratamento químico. Este resultado se deve ao fato de que a terra fuller adsorve algum resquício de contaminação mais pesada que o óleo que ainda resta após o tratamento químico. A diminuição de densidade do ORRF com relação ao OSULF também pode estar relacionada à evaporação de água, que ocorre no aquecimento à  $200^\circ\text{C}$ , e à eliminação do sulfato de cálcio, o qual é gerado na reação de neutralização, durante o processo de filtração.

A diminuição da densidade das amostras ORRF com relação às de OLUC iniciais está de acordo com os estudos realizados por Lima (2016) e Desiderato (2009), os quais também associaram esta diminuição a uma possível remoção de contaminantes.

### 5.5.3. Número total de acidez

Os TAN's calculados para cada amostra analisada estão representados na Tabela 7:

Tabela 7: TAN's calculados para as amostras de OLUC, ODEST e ORRF

<b>Amostra</b>	<b>TAN (mgKOH/góleo)</b>
OLUC 1	0,88
ODEST 1	0,71
ORRF 1	0,01
OLUC 2	1,34
ODEST 2	0,72
ORRF 2	-0,27
OLUC 3	0,90
ODEST 3	0,66
ORRF 3	-0,07

Fonte: Autor (2020)

As amostras de OLUC foram as que apresentaram maiores valores de TAN. Isto pode ser explicado pelo fato de que, ao longo do uso, os óleos sofreram severa degradação química, o que implica no aparecimento de vários componentes ácidos, tais como produtos de oxidação, sais de metais pesados e aditivos degradados. Tais componentes devem ser eliminados ou

neutralizados no processo de rerrefino. Dentre os OLUC's analisados, O OLUC 2 foi o que apresentou maior acidez, o que condiz com as outras análises realizadas, pelas quais já foi constatado que esta foi a amostra de OLUC que sofreu mais degradação e contaminação ao longo do seu uso, e reforça a ideia de que os produtos de degradação possuem caráter ácido.

As amostras de ODEST apresentaram queda na acidez, comparadas as suas respectivas amostras de OLUC, o que pode ser explicado pelo fato de que alguns componentes ácidos presentes no óleo usado são mais pesados e apresentam, à pressão de 360 mmHg, um ponto de ebulição mais elevado do que a temperatura na qual foi conduzida a destilação. Comparando as amostras de ODEST entre si, observa-se que, mesmo seus respectivos OLUC tendo acidez significativamente diferente, elas possuem um TAN próximo, o que pode ser atribuído ao fato de que as destilações de todas as amostras de OLUC ocorreram nas mesmas temperatura e pressão, assim, surge-se semelhança nos tipos de moléculas que sofreram vaporização e condensação nessas condições. Infere-se que as moléculas mais pesadas, as quais ficaram retidas no balão de destilação são as que conferem mais acidez.

As amostras de ORRF, por sua vez, apresentaram TAN dentro das especificações exigidas pelos padrões de qualidade da NBR 14248, os quais constam na Figura 7. A essa altura, os componentes ácidos do óleo que não foram eliminados nas etapas de destilação e tratamento químico neutralizam-se pela ação do reagente alcalino adicionado juntamente com a argila clarificante. Pode-se observar que nas amostras de ORRF 2 e ORRF 3, os TAN encontrados foram levemente negativos, o que implica dizer que a etapa de neutralização foi efetiva o suficiente para, além de neutralizar os componentes ácidos dos óleos, deixá-los levemente alcalinos. Desiderato (2009) ao realizar esse procedimento obteve um ORRF com TAN de 0,39 gKOH/g<sub>óleo</sub>, valor acima dos 0,05 gKOH/g<sub>óleo</sub> permitido pela NBR 14248, o que implica dizer que a etapa de neutralização realizada por este não foi efetiva.

#### 5.5.4. Viscosidade cinemática a 40°C e a 100°C

A viscosidade cinemática de cada amostra foi calculada pelo produto entre o tempo de escoamento de cada uma e a constante do viscosímetro. O viscosímetro utilizado possui uma constante igual a 0,2407 mm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>. Calculou-se, então, os valores de viscosidade cinemática a 40°C e a 100°C para cada amostra. Os resultados estão representados na Tabela 8:

Tabela 8: VC 40 e VC 100 calculadas para as amostras analisadas

<b>Amostra</b>	<b>VC 40 (mm<sup>2</sup>/s)</b>	<b>VC 100 (mm<sup>2</sup>/s)</b>
OLUC 1	69,86	11,39
ODEST 1	7,70	2,51
OSULF 1	10,36	2,94
ORRF 1	7,46	2,50
OLUC 2	106,10	14,65
ODEST 2	7,15	2,60
OSULF 2	0,90	10,94
ORRF 2	0,66	3,33
OLUC 3	67,02	12,25
ODEST 3	6,35	2,37
OSULF 3	9,60	2,73
ORRF 3	7,45	2,40

Fonte: Autor (2020)

As amostras de OLUC foram as que apresentaram maiores valores de viscosidade comparadas às demais. Este resultado pode ser explicado pelo fato de que, com a degradação do óleo, ocorre evaporação de leves, esgotamento de aditivos antidesgaste e surgem os produtos de oxidação que, por sua vez, possuem consistência resinosa. A amostra de OLUC 2, foi a que apresentou maiores valores de viscosidade cinemática, o que já era esperado, visto que as caracterizações de densidade e TAN, bem como os rendimentos obtidos no processo de rerrefino já constataram que esta é a amostra de OLUC mais degradada.

Com a destilação a vácuo, a maior parte dos componentes que causam um aumento na viscosidade não evaporam nas condições de temperatura e pressão utilizadas. Isso pode ser observado na prática com a diminuição acentuada dos valores de viscosidade das amostras de ODEST com relação aos seus respectivos OLUC's iniciais. Comparando as amostras de ODEST entre si, observa-se que as suas viscosidades cinemáticas apresentam valores relativamente próximos, mesmo seus respectivos OLUC's apresentando diferenças percentuais muito maiores para esse mesmo parâmetro.

Após o processo de tratamento químico, observou-se que os valores de viscosidade cinemática das amostras de OSULF apresentaram um aumento com relação às suas respectivas amostras de ODEST. A viscosidade é uma propriedade que é explicada quimicamente pelas interações intermoleculares. Ao se adicionar um excesso de ácido sulfúrico ao óleo, os íons H<sup>+</sup> e SO<sub>4</sub><sup>-</sup> provenientes da ionização do ácido interagem com os sítios ionizáveis das moléculas de

óleo, o que faz com que se aumente a intensidade das interações intermoleculares e, conseqüentemente a viscosidade.

Após as etapas de neutralização e clarificação, as viscosidades das amostras de ORRF voltaram a valores, bastante semelhantes às de seus respectivos ODEST's. Considerando as viscosidades à 40°C do ORRF 1 e do ORRF 3, observa-se que foi levemente abaixo da viscosidade mínima aceitável pela NBR 10441 para o óleo Spindle RR, conforme a Figura 7. Tendo em vista que as amostras de OLUC poderiam ter sido destiladas até 380°C, o que não foi feito por limitações dos equipamentos, pode-se inferir que com a possível incorporação da fração de óleo neutro pesado, as viscosidades do ORRF 1 e do ORRF 3 muito provavelmente seriam maiores a ponto de se enquadrar nos valores estabelecidos pela NBR 10441. O ORRF 2, de acordo com sua viscosidade cinemática observada, se encaixa na categoria Spindle RR, de acordo com a Figura 7. Desiderato (2009), ao realizar procedimento semelhante, obteve um ORRF com viscosidade 9,53 mm<sup>2</sup>/s, o qual se encaixa na categoria Spindle RR.

Pode se afirmar, observando-se os dados dessa análise, que a etapa de destilação é a decisiva para o enquadramento do parâmetro viscosidade do óleo básico rerrefinado.

#### 5.5.5. Índice de viscosidade

Os valores calculados de índice de viscosidade para as amostras analisadas encontram-se representados na Tabela 9. Os valores foram arredondados para o número inteiro mais próximo, de acordo com ASTM (2004).

Pode-se observar que para todas as amostras, até mesmo para o OLUC, os valores de índice de viscosidade calculados estão dentro do padrão exigido pela norma ASTM D2270, que coloca o valor de 95 como mínimo aceitável para esse parâmetro. Mesmo assim, pode-se observar que todas as amostras de ORRF apresentaram índices de viscosidade maior do que seu respectivo OLUC, o que é desejável, de acordo com Lima (2016), visto que quanto maior esse parâmetro, maior é a resistência do óleo a diminuição da viscosidade quando ocorre o aumento da temperatura a qual o óleo é submetido no motor. Comparando os OLUC's entre si, observa-se que o OLUC 2 foi o que apresentou o menor índice de viscosidade, o que reforça a ideia de que este foi o OLUC que sofreu maior degradação e contaminação, visto que ao longo do uso ocorre o consumo do aditivo melhorador de índice de viscosidade. O aumento do índice de viscosidade do óleo rerrefinado com relação ao óleo usado inicial também foi observado nos experimentos de Lima (2016) e Desiderato (2009).

Tabela 9: Índices de viscosidade calculados das amostras analisadas

<b>Amostra</b>	<b>VI</b>
OLUC 1	136
ODEST 1	181
OSULF 1	129
ORRF 1	167
OLUC 2	128
ODEST 2	198
OSULF 2	182
ORRF 2	223
OLUC 3	145
ODEST 3	197
OSULF 3	124
ORRF 3	148

Fonte: Autor (2020)

#### 5.5.6. Teor de cinzas

Os teores de cinzas das amostras analisadas estão representados na Tabela 10:

Tabela 10: Teores de cinzas calculados para as amostras analisadas

<b>Amostra</b>	<b>Teor de cinzas (%)</b>
OLUC 1	0,77
ODEST 1	0,07
OSULF 1	0,03
ORRF 1	0,03
OLUC 2	1,01
ODEST 2	0,09
OSULF 2	0,01
ORRF 2	0,01
OLUC 3	0,50
ODEST 3	0,08
OSULF 3	0,00
ORRF 3	0,00

Fonte: Autor (2020)

As amostras de OLUC apresentaram, disparadamente, os maiores teores de cinzas. Este resultado deve-se ao fato de que, ao longo do uso, o óleo lubrificante vai adquirindo materiais formadores de cinzas, tais como impurezas, ferrugem, sólidos estranhos e compostos inorgânicos solúveis em água, além das cinzas provenientes de aditivos metálicos. A amostra de OLUC 2 foi a que apresentou o maior teor de cinzas, fato que corrobora com todas as análises anteriores, que apontam esta amostra de OLUC como a mais degradada e contaminada.

Após a etapa de destilação, os teores de cinzas de todas as amostras tiveram diminuição de mais de 90%. Essa queda está atrelada ao fato de a grande maioria dos materiais formadores de cinzas não vaporizam nas condições de temperatura e pressão nas quais a destilação foi realizada. Pode-se observar que todos os ODEST's tiveram teores de cinzas próximos, mesmo os teores de cinzas de seus respectivos OLUC's sendo consideravelmente diferentes.

Após o tratamento químico, os teores de cinzas dos OSULF's tiveram diminuição considerável, comparando-se a seus respectivos ODEST's, chegando a próximo de zero. Tal resultado deve-se ao fato que o ácido sulfúrico reage com compostos inorgânicos e metálicos, os quais são dos principais formadores de cinzas, formando a borra ácida, a qual é separada dos OSULF's.

Após as etapas de neutralização e clarificação, as amostras de ORRF não apresentaram mudanças significativas no teor de cinzas, comparando-se aos seus respectivos OSULF's. Com isso, vê-se que essa etapa não é significativa no que diz respeito ao enquadramento do teor de cinzas do óleo tratado.

Observa-se pelo resultado obtido que os teores de cinzas dos ORRF's diminuíram drasticamente, comparando-se aos seus OLUC's iniciais. O ORRF 2 e ORRF 3 tiveram seus teores de cinzas dentro do limite permitido pela NBR 9842. O ORRF 1 mesmo apresentando uma redução no teor de cinzas maior que 90%, comparando-se ao OLUC 1, ainda sim, teve o valor deste parâmetro levemente acima do permitido pela norma.

Lima (2016), nos seus experimentos com rerrefino de OLUC, também obteve óleos rerrefinados com teores de cinzas zerados e próximos de zero. Desiderato (2009), ao realizar procedimento semelhante ao deste trabalho, obteve um óleo rerrefinado com teor de cinzas de 0,11%, valor acima do limite máximo permitido, o que pode ser atribuído a uma falta de efetividade na etapa de destilação ou na de tratamento ácido.

Pode-se concluir por esta análise que a etapa de destilação e a de tratamento ácido são as grandes determinantes para o enquadramento do teor de cinzas do óleo rerrefinado.

## 6. CONCLUSÕES

Utilizando o procedimento realizado neste trabalho, pode-se obter óleos básicos rerrefinados com características que obedecem aos padrões de qualidade de aspecto, acidez, viscosidade cinemática, índice de viscosidade e teor de cinzas exigidos pelas normas da NBR e ASTM;

Os processos de rerrefino realizados neste trabalho obtiveram rendimentos de 48, 62 e 68% de recuperação de óleo básico. Os rendimentos poderiam ter sido ainda maiores se a etapa de destilação do óleo tivesse sido conduzida até 380°C, para que fosse possível recuperação da fração de óleo neutro pesado, o que não foi feito por limitações dos equipamentos;

Os rendimentos a serem obtidos nos processos de rerrefino estão diretamente relacionados com grau de degradação e contaminação dos óleos usados a serem tratados, de forma de quanto mais degradados e contaminados, menor será o rendimento de óleo rerrefinado que pode ser obtido na recuperação;

As análises de aspecto demonstraram a importância da etapa de clarificação para o enquadramento das características de aspecto e cor do ORRF;

As análises de densidade permitiram observar que a diminuição da densidade do óleo a cada etapa, ao longo do processo de rerrefino, pode dar um forte indício de remoção de contaminantes e demonstraram que, quanto mais degradado e contaminado for o OLUC, maior tende a ser este parâmetro;

As análises de TAN demonstraram a importância da etapa de neutralização para o enquadramento do TAN do óleo básico rerrefinado e que, quanto mais degradado e contaminado for o OLUC, maior tende a ser este parâmetro;

As análises de viscosidade cinemática demonstraram que a destilação é a etapa do rerrefino determinante para o enquadramento da viscosidade do ORRF e que, quanto mais degradado e contaminado for o OLUC, maior tende a ser este parâmetro;

Os cálculos dos índices de viscosidade demonstraram que, quanto mais degradado e contaminado for o óleo, menor tende a este parâmetro e que o processo de rerrefino tem a capacidade de melhorar o índice de viscosidade do ORRF com relação ao OLUC inicial;

As análises de teor de cinzas demonstraram que as etapas de destilação e tratamento ácido são as determinantes para remoção das substâncias formadoras de cinzas e que, quanto mais degradado e contaminado for o OLUC, maior tende a ser este parâmetro;

A comparação das caracterizações realizadas com os OLUC's iniciais e os ORRF's obtidos ao final dos processos de rerrefino pode demonstrar que, mesmo OLUC's com

diferentes características e graus de degradação e contaminação, quanto submetidos a processos de rerrefino sob as mesmas condições, dão origem a ORRF's com características semelhantes;

O presente trabalho proporcionou um melhor entendimento acerca da influência de cada etapa do processo de rerrefino, e os conhecimentos adquiridos podem ser aplicados para se ter um melhor controle do processo como um todo.

## **7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Tendo em vista que alguns parâmetros dos ORRF's obtidos neste estudo podem ser melhorados, pretende-se realizar estudos futuros visando melhorar a eficiência de cada etapa, realizando uma otimização das variáveis de processo;

O processo tradicional de rerrefino de óleo lubrificante gera alguns resíduos tóxicos os quais não podem ser simplesmente descartados no meio ambiente, como o resíduo asfáltico, a borra ácida e a torta de filtro contaminada. Pretende-se realizar estudos futuros visando o tratamento, aproveitamento e a recuperação de tais resíduos, tendo em vista a importância dos aspectos ambientais que devem ser levados em conta pela indústria;

Tendo em vista a existência de processos alternativos de rerrefino, pretende-se realizar estudos futuros desses outros processos, tendo como foco a otimização destes e, até mesmo, a comparação destes com o método tradicional estudado neste trabalho.

## 8. REFERÊNCIAS

AL-ZAHRANI, S. M.; PUTRA, M. D. **Used Lubricating oil regeneration by various solvents extraction techniques.** *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. N. 19, p. 536-539, 2013.

ALMEIDA, R. A. DE; **Estudo da recuperação de óleos minerais usados usando solventes polares.** 83p. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Universidade Federal de Campina Grande. 2011.

ALVES, V. G. C. **Rerrefino de óleo lubrificante automotivo.** Trabalho apresentado ao Programa de Iniciação Científica, IMESA. Assis-SP, 2011.

ANP. Portarias 129 e 130/1999. **Especificações óleos lubrificantes comerciais e rerrefinados.** Disponível em: < [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br). > Acessado em abril de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9842: Produtos de Petróleo – Determinação do Teor de Cinzas.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10441: Produtos de Petróleo, Líquidos Transparentes e Opacos – Determinação da Viscosidade Cinemática e Cálculo da Viscosidade Dinâmica.** Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14248: Produtos de Petróleo – Determinação do Número de Acidez e de Basicidade.** Rio de Janeiro, 2009.

ASTM International. **Standard Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40 °C and 100 °C;** ASTM Standard D2270; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2004.

AZEVEDO, J. B; CARVALHO, L. H; FONSECA, V. M. **Efeito da degradação em motor automotivo nas propriedades termogravimétricas de óleos lubrificantes minerais e sintéticos.** In CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3, 2005, Salvador. 2005. 6p.

BRASIL, N. I., ARAUJO, M. A. S., SOUZA, E. C. M. **Processamento de Petróleo e Gás.** 2a.ed. Rio de Janeiro: Universidade Petrobras, 2014. 300p.

CANCHUMANI, G. A. L. **Óleos lubrificantes usados: um estudo de caso de avaliação de ciclo de vida do sistema de rerrefino no brasil.** 156f. Dissertação (Doutorado em Planejamento Energético) - Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

CARRETEIRO, R., BELMIRO, P. **Lubrificantes & Lubrificação Industrial.** Interciência. Rio de Janeiro, Interciência, 2006.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente –. **Resolução Nº 362. Dispõe sobre o recolhimento, coleta e destinação final de óleo lubrificante usado ou contaminado.** Publicada no D.O.U nº 121, Seção 1, páginas 128-130, de 27 de junho de 2005.

COSTA M, J. C. **Monitoramento de lubrificantes através de reações de oxidação.** Monografia de conclusão de curso apresentada ao Departamento de Engenharia Química, UFRN. Natal-RN. 40p. 2009.

COUTINHO, L. **A terceira revolução industrial e tecnológica: as grandes tendências de mudança.** Economia e sociedade, v. 1, n. 8, p. 69-87, 1992.

CUTTLE, E. T. **Rerefining: economically attractive way to conserve lube oil.** Pilot Research and Development Co. Meiron Station, Pennsylvania. 1975.

DESIDERATO, P. R. M. **Rerrefino de óleo lubrificante usado.** Monografia de Conclusão de Curso de Licenciatura em Química, UNESP: Unesp. 33p. 2009.

FARAH, M.A. **Petróleo e seus derivados.** 1a ed. Rio de Janeiro: Universidade Petrobras, 2012, 282p.

FUNASA. **Manual Prático de Análise de Água.** Brasília: Ministério da Saúde, 2006. 147 p.

GÂNDARA, G.M.F; **Óleos Lubrificantes minerais, Uma Análise das Potencialidades de Reutilização.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. 2000.

LEITE, P. R. **Logística Reversa: Sustentabilidade e Competitividade.** 3ª ed. São Paulo: Saraiva, 2017. 480 p.

LIMA, E. A. A. **Avaliação e otimização do processo de recuperação de óleos lubrificantes automotivos usados.** Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química – Universidade Federal da Paraíba. 2016.

KUPAREVA, A.; MAKI-ARVELA, P.; YU MURZIN, D. **Technology for rerefining used lube oils applied in Europe: a review.** Journal of Chemical Technology and Biotechnology. N. 88, p. 1780-1793, 2013.

MARTINS, J. S.; FREIRE, M. S.; SANTOS, J. R. M.; SILVA, N.; CORDEIRO, D. O.; SANTOS, J. C. O. **Recuperação de lubrificantes usados em motores diesel utilizando solventes polares: 1-butanol e 2-propanol.** Anais do 5º Congresso Norte Nordeste de Química, Natal, 2013.

MELO, M. L. S. **Avaliação da Qualidade dos Óleos Básicos Rerrefinados Brasileiros e a Determinação de Metais por Espectrometria de Fluorescência de Raios X.** Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Química da Universidade de Brasília, 154p. 2015.

MOLYKOTE. L. Disponível em: < [www.lubrificantes.net](http://www.lubrificantes.net). > | Acessado em Março de 2020  
MOHAMMED. R. R. et al. **Waste lubricate oil treatment by extraction and adsorption.** Chemical Engineering Journal. V. 220, p. 343 -351, 2013.

NEIVA, Jucy. **Conheça o Petróleo.** 5a ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S/A, 1986. 308p.

PÉCOR, M. M. C. **Degradação Fotoquímica e Eletroquímica da Fração Aromática do Resíduo de Óleo Lubrificante.** 50p. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Química - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Paraná, 2004.

PIO, L. **Gerenciamento De Óleos Lubrificantes Usados Ou Contaminados**. Monografia, curso de Pós-Graduação —Lato sensu em Gestão Ambiental. Universidade Candido Mendes. 2010.

RAMOS, P. **Reciclagem de Óleos Lubrificante: Meio Ambiente Industrial**, Ano VI, ed. 31, n. 30, maio/junho de 2001.

SEQUEIRA JR., A. A . **Lubricant base oil and wax processing**. Chemical Series, v. 60, Marcel Dekker, Inc., 1994.

SHREVE, R. NORRIS & BRINK Jr. **Indústrias de Processos Químicos**. 4a.ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 1980. 717p.

SILVA, M. A. et al. Avaliação do gerenciamento de resíduos de óleos lubrificantes e suas embalagens em oficinas mecânicas da cidade de Pombal – PB, Brasil Evaluation of the waste management of lubricating oils and their packaging in car repair stations of. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**. P. 53-58, 2014.

SILVEIRA. E. L .C. et al. Determinação de contaminantes em óleos lubrificantes usados e em esgotos contaminados por esses lubrificantes. **Química Nova**. V.29, nº6. p 1193 – 1197. 2006.

SILVEIRA, E. L. C et al. Determinação de metais em óleos lubrificantes, provenientes de motores de ônibus urbano, utilizando as faas. **Química Nova**, v. 33, n. 9, p. 1863-1867, 2010.

SIMEPETRO. **Agência Nacional do Petróleo**. Disponível em < [http://www.simepetro.com.br/site/wp-content/uploads/2009/05/portaria\\_130.pdf](http://www.simepetro.com.br/site/wp-content/uploads/2009/05/portaria_130.pdf)> Acesso em 21 maio. 2020.

SOLOMONS, T. W. G & FRUHLE, C. B, **Química Orgânica**, 7º edição, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 2001.

SOUZA, F. O. **Desenvolvimento de método de extração-floculação por aplicação de ondas ultrassônicas em óleo lubrificante usado**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia – PPGEN - Universidade Federal do Espírito Santo, 2015.

STOCK, James R. **Reverse Logistics Programs**. Illinois: Council of Logistics Management, 1998.

TÁVORA, S.P.; QUELHAS, O. L. G. **Óleos lubrificantes usados - evolução das responsabilidades para coleta/destinação e alternativas para aplicações: uma contribuição para a tecnologia de produção mais limpa**. Revista Produção Online, ABEP/USP. v. 3, n. 2, 2003.

ZAMBONI, G.E. **Óleos Básicos**. Disponível em: < [www.lubes.com.br/revista/ed05n03.html](http://www.lubes.com.br/revista/ed05n03.html). > Acessado em: Outubro de 2016.

## ANEXO A – Valores de L e H para cálculo do índice de viscosidade

Kinematic Viscosity at 100°C, mm <sup>2</sup> /s	L		H		Kinematic Viscosity at 100°C, mm <sup>2</sup> /s	L		H		Kinematic Viscosity at 100°C, mm <sup>2</sup> /s	L		H		Kinematic Viscosity at 100°C, mm <sup>2</sup> /s	L		H		
	L	H	L	H		L	H	L	H		L	H	L	H		L	H			
2.00	7.994	6.394	7.00	78.00	48.57	12.0	201.9	108.0	17.0	369.4	180.2	24.0	683.9	301.8	42.5	1935	714.9			
2.10	8.640	6.894	7.10	80.25	49.61	12.1	204.8	109.4	17.1	373.3	181.7	24.2	694.5	305.6	43.0	1978	728.2			
2.20	9.309	7.410	7.20	82.39	50.69	12.2	207.8	110.7	17.2	377.1	183.3	24.4	704.2	309.4	43.5	2021	741.3			
2.30	10.00	7.944	7.30	84.53	51.78	12.3	210.7	112.0	17.3	381.0	184.9	24.6	714.9	313.0	44.0	2064	754.4			
2.40	10.71	8.496	7.40	86.66	52.88	12.4	213.6	113.3	17.4	384.9	186.5	24.8	725.7	317.0	44.5	2108	767.6			
2.50	11.45	9.063	7.50	88.85	53.98	12.5	216.6	114.7	17.5	388.9	188.1	25.0	736.5	320.9	45.0	2152	780.9			
2.60	12.21	9.647	7.60	91.04	55.09	12.6	219.6	116.0	17.6	392.7	189.7	25.2	747.2	324.9	45.5	2197	794.5			
2.70	13.00	10.25	7.70	93.20	56.20	12.7	222.6	117.4	17.7	396.7	191.3	25.4	758.2	328.8	46.0	2243	808.2			
2.80	13.80	10.87	7.80	95.43	57.31	12.8	225.7	118.7	17.8	400.7	192.9	25.6	769.3	332.7	46.5	2288	821.9			
2.90	14.63	11.50	7.90	97.72	58.45	12.9	228.8	120.1	17.9	404.6	194.6	25.8	779.7	336.7	47.0	2333	835.5			
3.00	15.49	12.15	8.00	100.0	59.60	13.0	231.9	121.5	18.0	408.6	196.2	26.0	790.4	340.5	47.5	2380	849.2			
3.10	16.36	12.82	8.10	102.3	60.74	13.1	235.0	122.9	18.1	412.6	197.8	26.2	801.6	344.4	48.0	2426	863.0			
3.20	17.26	13.51	8.20	104.6	61.89	13.2	238.1	124.2	18.2	416.7	199.4	26.4	812.8	348.4	48.5	2473	876.9			
3.30	18.18	14.21	8.30	106.9	63.05	13.3	241.2	125.6	18.3	420.7	201.0	26.6	824.1	352.3	49.0	2521	890.9			
3.40	19.12	14.93	8.40	109.2	64.18	13.4	244.3	127.0	18.4	424.9	202.6	26.8	835.5	356.4	49.5	2570	905.3			
3.50	20.09	15.66	8.50	111.5	65.32	13.5	247.4	128.4	18.5	429.0	204.3	27.0	847.0	360.5	50.0	2618	919.6			
3.60	21.08	16.42	8.60	113.9	66.48	13.6	250.6	129.8	18.6	433.2	205.9	27.2	857.5	364.6	50.5	2667	933.6			
3.70	22.09	17.19	8.70	116.2	67.64	13.7	253.8	131.2	18.7	437.3	207.6	27.4	869.0	368.3	51.0	2717	948.2			
3.80	23.13	17.97	8.80	118.5	68.79	13.8	257.0	132.6	18.8	441.5	209.3	27.6	880.6	372.3	51.5	2767	962.9			
3.90	24.19	18.77	8.90	120.9	69.94	13.9	260.1	134.0	18.9	445.7	211.0	27.8	892.3	376.4	52.0	2817	977.5			
4.00	25.32	19.56	9.00	123.3	71.10	14.0	263.3	135.4	19.0	449.9	212.7	28.0	904.1	380.6	52.5	2867	992.1			
4.10	26.50	20.37	9.10	125.7	72.27	14.1	266.6	136.8	19.1	454.2	214.4	28.2	915.8	384.6	53.0	2918	1007			
4.20	27.75	21.21	9.20	128.0	73.42	14.2	269.8	138.2	19.2	458.4	216.1	28.4	927.6	388.8	53.5	2969	1021			
4.30	29.07	22.05	9.30	130.4	74.57	14.3	273.0	139.6	19.3	462.7	217.7	28.6	938.6	393.0	54.0	3020	1036			
4.40	30.48	22.92	9.40	132.8	75.73	14.4	276.3	141.0	19.4	467.0	219.4	28.8	951.2	396.6	54.5	3073	1051			
4.50	31.96	23.81	9.50	135.3	76.91	14.5	279.6	142.4	19.5	471.3	221.1	29.0	963.4	401.1	55.0	3126	1066			
4.60	33.52	24.71	9.60	137.7	78.08	14.6	283.0	143.9	19.6	475.7	222.8	29.2	975.4	405.3	55.5	3180	1082			
4.70	35.13	25.63	9.70	140.1	79.27	14.7	286.4	145.3	19.7	479.7	224.5	29.4	987.1	409.5	56.0	3233	1097			
4.80	36.79	26.57	9.80	142.7	80.46	14.8	289.7	146.8	19.8	483.9	226.2	29.6	998.9	413.5	56.5	3286	1112			
4.90	38.50	27.53	9.90	145.2	81.67	14.9	293.0	148.2	19.9	488.6	227.7	29.8	1011	417.6	57.0	3340	1127			
5.00	40.23	28.49	10.0	147.7	82.87	15.0	296.5	149.7	20.0	493.2	229.5	30.0	1023	421.7	57.5	3396	1143			
5.10	41.99	29.46	10.1	150.3	84.08	15.1	300.0	151.2	20.2	501.5	233.0	30.5	1055	432.4	58.0	3452	1159			
5.20	43.76	30.43	10.2	152.9	85.30	15.2	303.4	152.6	20.4	510.8	236.4	31.0	1086	443.2	58.5	3507	1175			
5.30	45.53	31.40	10.3	155.4	86.51	15.3	306.9	154.1	20.6	519.9	240.1	31.5	1119	454.0	59.0	3563	1190			
5.40	47.31	32.37	10.4	158.0	87.72	15.4	310.3	155.6	20.8	528.8	243.5	32.0	1151	464.9	59.5	3619	1206			
5.50	49.09	33.34	10.5	160.6	88.95	15.5	313.9	157.0	21.0	538.4	247.1	32.5	1184	475.9	60.0	3676	1222			
5.60	50.87	34.32	10.6	163.2	90.19	15.6	317.5	158.6	21.2	547.5	250.7	33.0	1217	487.0	60.5	3734	1238			
5.70	52.64	35.29	10.7	165.8	91.40	15.7	321.1	160.1	21.4	556.7	254.2	33.5	1251	498.1	61.0	3792	1254			
5.80	54.42	36.26	10.8	168.5	92.65	15.8	324.6	161.6	21.6	566.4	257.8	34.0	1286	509.6	61.5	3850	1270			
5.90	56.20	37.23	10.9	171.2	93.92	15.9	328.3	163.1	21.8	575.6	261.5	34.5	1321	521.1	62.0	3908	1286			
6.00	57.97	38.19	11.0	173.9	95.19	16.0	331.9	164.6	22.0	585.2	264.9	35.0	1356	532.5	62.5	3966	1303			
6.10	59.74	39.17	11.1	176.6	96.45	16.1	335.5	166.1	22.2	595.0	268.6	35.5	1391	544.0	63.0	4026	1319			
6.20	61.52	40.15	11.2	179.4	97.71	16.2	339.2	167.7	22.4	604.3	272.3	36.0	1427	555.6	63.5	4087	1336			
6.30	63.32	41.13	11.3	182.1	98.97	16.3	342.9	169.2	22.6	614.2	275.8	36.5	1464	567.1	64.0	4147	1352			
6.40	65.18	42.14	11.4	184.9	100.2	16.4	346.6	170.7	22.8	624.1	279.6	37.0	1501	579.3	64.5	4207	1369			
6.50	67.12	43.18	11.5	187.6	101.5	16.5	350.3	172.3	23.0	633.6	283.3	37.5	1538	591.3	65.0	4268	1386			
6.60	69.16	44.24	11.6	190.4	102.8	16.6	354.1	173.8	23.2	643.4	286.8	38.0	1575	603.1	65.5	4329	1402			
6.70	71.29	45.33	11.7	193.3	104.1	16.7	358.0	175.4	23.4	653.8	290.5	38.5	1613	615.0	66.0	4392	1419			
6.80	73.48	46.44	11.8	196.2	105.4	16.8	361.7	177.0	23.6	663.3	294.4	39.0	1651	627.1	66.5	4455	1436			
6.90	75.72	47.51	11.9	199.0	106.7	16.9	365.6	178.6	23.8	673.7	297.9	39.5	1691	639.2	67.0	4517	1454			
												40.0	1730	651.8	67.5	4580	1471			
												40.5	1770	664.2	68.0	4645	1488			
												41.0	1810	676.6	68.5	4709	1506			
												41.5	1851	689.1	69.0	4773	1523			
												42.0	1892	701.9	69.5	4839	1541			
												70.0			4905	1558				

Fonte: ASTM (2004)