



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA**

---

**FELIPE EGYDIO AGUIAR NASCIMENTO**

**ANÁLISES EXPERIMENTAIS DE RESÍDUOS GLICÉRICOS COMO  
SUBPRODUTO DA INDÚSTRIA DE BIODIESEL**

**DOURADOS – MS  
2018**

FELIPE EGYDIO AGUIAR NASCIMENTO

ANÁLISES EXPERIMENTAIS DE RESÍDUOS GLICÉRICOS COMO  
SUBPRODUTO DA INDÚSTRIA DE BIODIESEL

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Energia da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal da Grande Dourados como parte integrante das exigências para obtenção do título de Bacharel Engenheira de Energia.

**Orientador: Prof. Msc. Antônio Carlos Caetano de Souza**

Dourados, MS  
2018

Dedico este trabalho à minha família, por sempre estarem presente em todos os momentos da minha vida. Em especial, aos meus pais Vera Lucia e Fabio Egydio, minha filha Julia e aos meus avós Maria e Valdeci por me incentivarem e apoiar em todos os momentos da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por ser fundamental em minha vida e por ter me concebido a sabedoria e por não me deixar fraquejar diante de toda dificuldade, para realização deste trabalho.

Aos meus pais **Fabio** e **Vera**, por serem primordiais para que conseguisse concluir um sonho tão esperado. Agradeço por cada palavra, gesto, paciência, incentivo e persistência ao longo da busca de minha formação, sempre serei eternamente grato, à eles pela tamanha confiança e amor, amo vocês.

A minha filha **Julia** por existir em minha vida e me fazer a persistir ainda mais em busca dos meus objetivos, a perseverança diante de todas as dificuldades encontradas foi pensando em você.

Agradeço em especial aos meus avós **Valdeci** e **Maria**, por me apoiarem em cada dificuldade que passei durante todo esse processo e de formação, por cada incentivo, conselho, risadas, choros, pelo ombro amigo sincero que sempre pude contar, só tenho a agradecer a eles sempre estarem presentes em minha vida, amo vocês.

Aos meus amigos por sempre estarem juntos nos bons e maus momentos dentro desta caminhada e ao companheirismo diante todas as fases vivida, só tenho a agradecer pelo carinho.

A II turma de Engenharia de Energia de 2010, pela amizade em sala e aos divertimentos em trabalhos, congressos, aulas que tivemos ao longo do curso.

A todos os professores do curso de Engenharia de Energia pelo conhecimento adquirido durante a minha formação, em especial ao meu grande orientador professor Msc. Antônio Carlos Caetano de Souza, e ao professor Dr. Fernando Augusto Alves Mendes e professor Dr. Augusto Salomão Bornschlegell (instrutores), e aos técnicos dos laboratórios de Engenharia de Energia, em especial ao técnico José Carlos.

Enfim, agradeço à todos que contribuíram diretamente e indiretamente para que conseguisse realizar este trabalho.

**Obrigado a todos!**

*Não se pode ensinar tudo a alguém.  
Pode-se, apenas, ajudá-lo a encontrar  
por si mesmo.*

*Galileu Galilei*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 – Esquema de produção do glicerol. ....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 2 - Fórmulas químicas do glicerol: a)empírica, b)molecular, c)estrutural. ....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 3 - Processo de produção de biodiesel e recuperação de álcool da glicerina. ....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 4 - Reações envolvidas na transesterificação de triacilglicerídeos.....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 5 - Fluxograma da Destilação e Clareamento da Glicerina. ....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 6 - Fluxograma da Destilação Wurster&amp; Sanger da Glicerina. ....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 7 - Purificação da Glicerina pelo Método de Troca-Iônica. ....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 8 - Produtos da valorização do glicerol. ....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 9 - Distribuição do consumo de glicerol pelos diferentes setores industriais no Brasil.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 10 - Representação esquemática dos viscosímetros rotativos: disco, cone-disco e cilindro.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 11 - Representação esquemática do viscosímetro capilar e de Stokes .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 12 – Glicerinas bruta, loira e pura, com os metais imersos. ....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 13: Fluidos com aspecto gelatinoso de diferentes ângulos. ....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 14 - Escala do pH das fitas analisadas (0-7). ....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 15 - Escala do pH das fitas analisadas (7-14). ....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 16 - Viscosímetro de Stokes. ....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 17 - Balanço de forças e visualização das linhas de corrente em uma esfera em queda livre. Referencial deslocando-se com a esfera num fluido estacionário .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 18 - Coeficiente de arrasto para esfera.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 19 - (a, b, c, d, e) – ‘a’ alumínio, ‘b’ aço galvanizado, ‘c’ aço inox 430, ‘d’ aço inox 304, ‘e’ aço inox 316. ....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 20 - (a, b, c, d, e) – ‘a’ alumínio, ‘b’ aço galvanizado, ‘c’ aço inox 430, ‘d’ aço inox 304, ‘e’ aço inox 316. ....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 21 - (a, b, c, d, e) – ‘a’ alumínio, ‘b’ aço galvanizado, ‘c’ aço inox 430, ‘d’ aço inox 304, ‘e’ aço inox 316. ....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 22 – Teste na glicerina pura. ....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 23 – Teste na glicerina loira. ....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 24 – Teste na glicerina bruta.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 25: Protótipo do viscosímetro de Stokes. ....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 26: Protótipo do viscosímetro de Stokes. ....</b>	<b>47</b>

<b>Figura 27 - (a, b, c, d) – Medições dos diâmetros dos rolamentos e esferas. ('a' D externo), ('b' largura), ('c' D interno), ('d' D esfera). .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 28 - Balança com as esferas de diferentes diâmetros. ....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 29 - Amostra de esferas já pesadas. ....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 30 - Esferas descendo pelo tubo do viscosímetro de Stokes. ....</b>	<b>50</b>

**LISTA DE TABELAS**

<b>TABELA 1 - Principais propriedades físico-químicas do glicerol. ....</b>	<b>15</b>
<b>TABELA 2 – Dados do viscosímetro de Stokes. ....</b>	<b>51</b>
<b>TABELA 3 – Massas específicas dos fluidos estudados (kg/m<sup>3</sup>). ....</b>	<b>51</b>
<b>TABELA 4 – Dados de literatura existente. ....</b>	<b>51</b>
<b>TABELA 5 – Resultados Glicerina Bruta a 27°C. ....</b>	<b>52</b>
<b>TABELA 6 - Resultados Glicerina Loira a 27°C. ....</b>	<b>53</b>
<b>TABELA 7 – Resultados Glicerina Pura a 27°C. ....</b>	<b>54</b>
<b>TABELA 8 – Resultados Glicerina Pura a 23°C. ....</b>	<b>55</b>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1 A primeira fase .....	12
1.2 A segunda fase .....	12
1.3 Justificativa .....	12
1.4 Objetivos.....	12
1.4.1 Objetivo Geral.....	12
1.4.2 Objetivos Específicos.....	12
1.5 Estrutura do trabalho .....	13
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
2.1 Glicerina .....	14
2.2 Processo de produção de biodiesel.....	16
2.3 Processo de transesterificação de óleos e gorduras .....	18
2.4 Processo de Purificação da Glicerina .....	18
2.4.1 Método Convencional.....	19
2.4.2 Método da troca iônica.....	20
2.5 Conceito da indústria gliceroquímica .....	23
2.6 O uso do Bioglicerol no Brasil.....	24
2.7 Levantamento comercial.....	25
2.8 Conceitos de corrosão.....	26
2.9 Conceitos de viscosidade .....	29
<b>CAPITULO 3 – METODOLOGIA .....</b>	<b>32</b>
3.1 Experimento de corrosão .....	32
3.2 Conceito de pH .....	33
3.3 Viscosímetro de Stokes .....	35
<b>CAPITULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>40</b>
4.1 Análise do experimento de corrosão .....	40
4.2 Análise do pH .....	44
4.3 - Experimento Viscosímetro de Stokes.....	46
4.4 Limitações do projeto.....	56
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>57</b>
5.1 Considerações finais.....	57
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>59</b>

## RESUMO

O presente trabalho traz informações sobre o glicerol (também chamado de glicerina pura) e resíduos glicéricos (também chamados de glicerina bruta e glicerina loira) como subprodutos do processo de transesterificação visando produção de biodiesel, e informações sucintas sobre a cadeia produtiva da produção, comercialização e utilização destes dois produtos. Adicionalmente, este trabalho também apresenta alguns experimentos realizados no LAPICOL (Laboratório de Processos Industriais, Combustíveis e Lubrificantes), localizado no prédio de laboratórios do curso de Engenharia de Energia. Os experimentos neste trabalho analisam os parâmetros de pH, que demonstra a acidez da mistura, e de corrosão, que busca uma melhor compreensão sobre o processo de corrosão na glicerina pura e nos resíduos glicéricos em diferentes tipos de metais, e ainda propõem uma montagem de um viscosímetro de Stokes, para obter as viscosidades das glicerinas (bruta, loira e pura). Para concluir, este trabalho apresenta aspectos diversos da análise de corrosão em metais, medição de massa específica, e medição de pH e seus subprodutos (da glicerina), medição de viscosidade (dinâmica) que deverão ser aperfeiçoados futuramente, a fim de melhorar os trabalhos no laboratório para fins de ensino e pesquisa. Nos experimentos chegou-se a resultados relevantes (coerentes com a literatura) na corrosão e medição de pH, já no viscosímetro necessita-se de uma comparação com outros modelos de viscosímetros, pois os resultados ficaram aquém (discrepantes da literatura) do esperado.

**Palavras-chave:** Glicerol, corrosão, viscosidade, resíduo glicérico.

## ABSTRACT

The present work presents information on glycerol (also called pure glycerin) and glyceride residues (also called crude glycerin and blond glycerin) as by-products of the transesterification process for the production of biodiesel, and brief information on the production chain, commercialization and use of these two products. In addition, this paper also presents some experiments carried out at LAPICOL (Laboratory of Industrial Processes, Fuels and Lubricants), located in the laboratory building of the Energy Engineering course. The experiments in this work analyze the pH parameters, which demonstrates the acidity of the mixture, and corrosion, which seeks a better understanding of the corrosion process in pure glycerine and glyceride residues in different types of metals, and also proposes an assembly of a Stokes viscometer, to obtain the viscosities of the glycerins (crude, blonde and pure). To conclude, this work presents several aspects of the analysis of corrosion in metals, specific mass measurement, and measurement of pH and its by-products (glycerin), viscosity measurement (dynamic), which should be improved in the future in order to improve the work in the laboratory for teaching and research purposes. In the experiments, the results (consistent with the literature) were reached in corrosion and pH measurement, whereas in the viscometer a comparison with other viscosimeter models was necessary, since the results were below (contrary to literature) the expected results.

**Keywords:** Glycerol, corrosion, viscosity, glycerol residue.

## 1 INTRODUÇÃO

O presente projeto de monografia apresentado ao curso de Engenharia de Energia/UFGD tem como um dos objetivos fazer uma breve revisão sobre a glicerina pura e os resíduos glicéricos (glicerina bruta e loira), através de bibliografias e artigos que tratam do tema proposto. Este trabalho também visa apresentar experimentos utilizando glicerol e resíduos e resíduos glicéricos como subproduto da indústria do biodiesel. Podemos analisar que varias formas de produção e conversão de energia foram desenvolvidas e aperfeiçoadas ao longo da história e têm provido às necessidades humanas.

A produção de biodiesel teve um crescimento gerando um grande excedente de glicerina, em geral, 10% em massa do produto da reação de transesterificação é representado pela glicerina bruta que apresenta impurezas como: água, metanol e material orgânico não glicerol, o que lhe confere um baixo valor comercial. Em função do aumento na demanda desse biocombustível, surge a necessidade de estudos para novas aplicações desse subproduto, o qual, se descartado ao meio ambiente, pode ter alto impacto ambiental (SANTOS *et al.*, 2017).

Desse modo, a necessidade de ocorrer um tratamento na glicerina, para que seja alcançado um valor determinado agregado, faz-se de grande utilidade, onde acaba existindo alguns tratamentos que já estão em uso, ou seja, em escala industrial, sendo utilizados para a neutralização da glicerina, alguns ácidos.

O crescente incentivo para a produção do biodiesel, ao mesmo tempo em que reflete as primeiras ações neste caminho, também provocou um aumento brusco do volume do glicerol, que não consegue ser totalmente absorvido pelo mercado, fazendo com que a mesma tenha descarte inadequado prejudicando o “princípio verde” que cerca os biocombustíveis. Entretanto, novas formas de utilização têm surgido como alternativa na produção de novas fontes de energia renováveis, bastando agora determinar qual dentre os diversos meios de produção é o mais viável econômico, social e ambientalmente para se implantar.

Portanto, estão disponíveis para o uso e comércio da glicerina em concentrações adequadas às aplicações em indústrias. Pois, apesar dessas inúmeras aplicações industriais, outra possibilidade viável e que deve ser considerada é a utilização da glicerina como uma alternativa para o óleo combustível.

... A queima em caldeiras, visando o aproveitamento do seu poder calorífico, é uma das finalidades mais empregadas ultimamente, porém, a liberação de compostos tóxicos, como a acroleína, durante a queima da glicerina, é um problema ambiental que pode inviabilizar esse processo (DE BONI, 2008).

Sendo assim, a pesquisa foi dividida em duas fases:

### 1.1 A primeira fase

Foi a de revisão bibliográfica sobre o assunto a ser trabalhado na prática, por meio de artigos e buscando as informações necessárias para uma melhor percepção e desempenho da parte empírica do trabalho, estando presente nos capítulos 1 e 2.

### 1.2 A segunda fase

Foi com a preparação adequada de todo o material para os três experimentos, tanto da corrosão quanto o do viscosímetro de Stokes, e depois a finalização dos experimentos, ou seja, finalização de todo o experimento de corrosão e análises, e também toda a discussão envolvendo o viscosímetro de Stokes e os seus resultados.

Contudo, no decorrer da pesquisa, buscamos analisar a corrosão de diferentes metais na glicerina pura e nos resíduos glicéricos, em determinado espaço de tempo, também foi realizada a medição de pH nos recipientes contendo o glicerol do experimento de corrosão. Outro experimento que vem a ser apresentado ao longo deste trabalho é o de encontrar a viscosidade dinâmica, em um viscosímetro de Stokes, vindo assim a comparar com a literatura já existente, e fazer as considerações pertinentes.

### 1.3 Justificativa

Este tema foi escolhido devido ao aumento na produção de biodiesel no mundo e mais especificamente em nosso país, gerando assim cada vez mais o subproduto que é a glicerina.

### 1.4 Objetivos

#### 1.4.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é explicar os conceitos da glicerina pura e resíduos glicéricos oriundos da indústria do biodiesel por meio da prática.

#### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Análise bibliográfica sobre a cadeia da glicerina;
- Experimentos sobre corrosão de diferentes tipos de metais nos três tipos de glicerina, e também;
- Experimento de viscosidade, utilizando um viscosímetro de Stokes, e;
- Medição de pH.

### 1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho está dividido nos seguintes tópicos:

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: Neste capítulo são abordados os conceitos da glicerina, a indústria e o mercado da glicerina e o conceito sobre corrosão, viscosidade (viscosímetro de Stokes) e medição de pH

Capítulo 3 – Metodologia – Neste capítulo temos o estudo da metodologia de pesquisa sobre corrosão, viscosidade e medição do pH.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões – Neste capítulo temos as análises dos experimentos de corrosão, viscosidade e medição de pH.

Capítulo 5 – Conclusões – Neste capítulo temos as considerações finais, limitações do projeto e também indicações de melhorias e sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Glicerina

A glicerina pode ser identificada por diferentes nomes, dependendo do grau de pureza ou refinamento em que ela se apresenta. Com isso, o termo glicerol identifica apenas a substância pura, mas o termo glicerina é usual para nomear as misturas contendo diferentes quantias ou grau de pureza com relação ao glicerol (NASCIMENTO, 2014).

Contudo, o nome químico oficial desta substância pura, segundo a nomenclatura da União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), é *1,2,3-propanotriol*. Outros nomes usados são (NASCIMENTO, 2014):

- Propano -1,2,3-triol;
- Propanotriol;
- Glyceritol;
- Glyrol;
- Álcool polihídrico;
- Trihidroxi propano;
- Glicil álcool.

Desde o final dos anos 40 o glicerol tem sido produzido a partir da epiclorigidrina (Figura 1) obtida a partir do propileno (e este de combustíveis fósseis) (BEATRIZ, 2011).

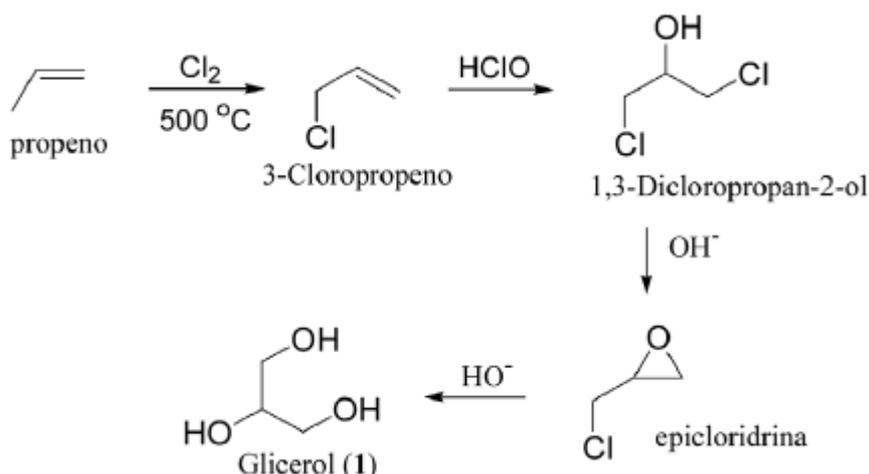


Figura 1 – Esquema de produção do glicerol.  
Fonte: (BEATRIZ, 2011)

O glicerol pode ser alcançado a partir de fermentação biológica por síntese química; readquirido como subproduto da fabricação de sabão; por hidrogenação da sacarose na presença de um catalisador sob alta pressão e temperatura, durante a fabricação de bioetanol; e como subproduto em métodos de transesterificação de óleos vegetais e animais para a produção de biodiesel, pois é o componente estrutural de muitos lipídios (NASCIMENTO, 2014).

O glicerol tem as fórmulas da Figura 2 e suas principais propriedades físico-químicas são listadas na Tabela 1.

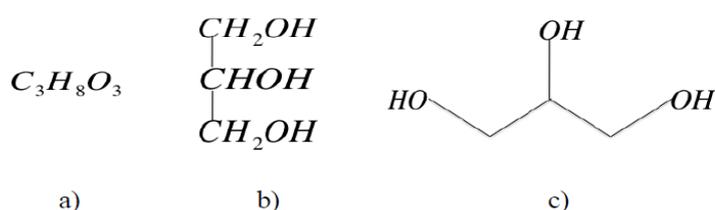


Figura 2 - Fórmulas químicas do glicerol: a) empírica, b) molecular, c) estrutural.  
Fonte: (CORDOBA, 2011).

TABELA 1 - Principais propriedades físico-químicas do glicerol.

PROPRIEDADE	UNIDADE	VALOR
Peso molecular	kg/kmol	92,09
Temperatura da fusão	°C	17,8
Temperatura de auto-ignição	°C	370
Temperatura de ebulição (101,3KPa)	°C	290
Massa específica (25°C)	kg/m <sup>3</sup>	1262
Temperatura de inflamação	°C	177
Calor específico (26°C)	J/(mol.K)	218,9
Calor de dissolução <sup>1</sup>	kJ/mol	5,8
Ponto de fulgor	°C	160
Calor de formação <sup>2</sup>	kJ/mol	667,8
Condutividade térmica	W/(m.K)	0,28

<sup>1</sup> É a variação de entalpia observada na dissolução de 1 mol da substância em solvente suficiente para se considerar a solução como diluída.

<sup>2</sup> É a quantidade de calor liberada ou absorvida na síntese de 1 mol da substância a partir de seus elementos no estado padrão (forma alotrópica mais estável, a 25°C e 1atm).

Fonte: (CORDOBA, 2011).

## 2.2 Processo de produção de biodiesel

Foi feito um anúncio importante pelo Ministério de Minas e Energia (MME) para o setor energético nacional. A obrigatoriedade de mistura de biodiesel no combustível comum passou de 8% para 10%, em março de 2017, após aprovação do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE, órgão responsável) em dezembro de 2016.

A expectativa era elevar o percentual para B10 apenas em março de 2019, mas em novembro do ano passado, o CNPE decidiu antecipar o aumento. Segundo o MME, com a nova mistura, a perspectiva é que a demanda por biodiesel cresça em 1 bilhão de litros neste ano de 2018 (fato esta em andamento). Além disso, a adoção do novo percentual contribui para a redução na importação de óleo diesel, além de movimentar a agroindústria nacional.

De acordo com o aumento na produção do biodiesel, haverá um excedente de glicerina no mercado mundial, levando em consideração que ela representa cerca de 10% do subproduto formado na reação de transesterificação desse biocombustível (COELHO, 2018).

A transesterificação é um dos processos para a produção do biodiesel, que é baseado em uma reação química que, sinteticamente, é a reação de um óleo vegetal com um álcool simples, em geral, metanol ou etanol. A reação é catalisada por um ácido ou uma base, podendo ser utilizado o hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio (NaOH ou KOH) entre outros catalisadores. Nessa reação, as moléculas principais dos óleos e gorduras, os chamados triacilgliceróis, são separados em ésteres e glicerina (LARSEN, 2009). Além da transesterificação temos também a esterificação e a hidroesterificação.

A esterificação é um processo reversível, tendo como principal produto um éster específico. Dentre os métodos diversos que podem ser utilizados para sintetizar os ésteres, um bom exemplo é a reação de esterificação de Fischer (1895), na qual, sob aquecimento, um ácido carboxílico reage com um álcool (produzindo éster e água).

A hidroesterificação vem a ser uma alternativa ao processo convencional de produção de biodiesel, favorece a utilização de matérias-primas (óleos de plantas oleaginosas, resíduos gordurosos industriais, óleos de frituras e até *soapstocks*<sup>1</sup>) de qualquer teor de ácidos graxos e umidade.

Na Figura 3 é mostrado um fluxograma do processo de produção de biodiesel e o tratamento inicial dado ao resíduo glicérico, oriundo desse tipo de processo, que vem misturado à água, aos ácidos graxos e sabões, necessitando de um tratamento para separá-los.

<sup>1</sup> Borrás de óleos salinas formadas com o tratamento de óleos e gorduras

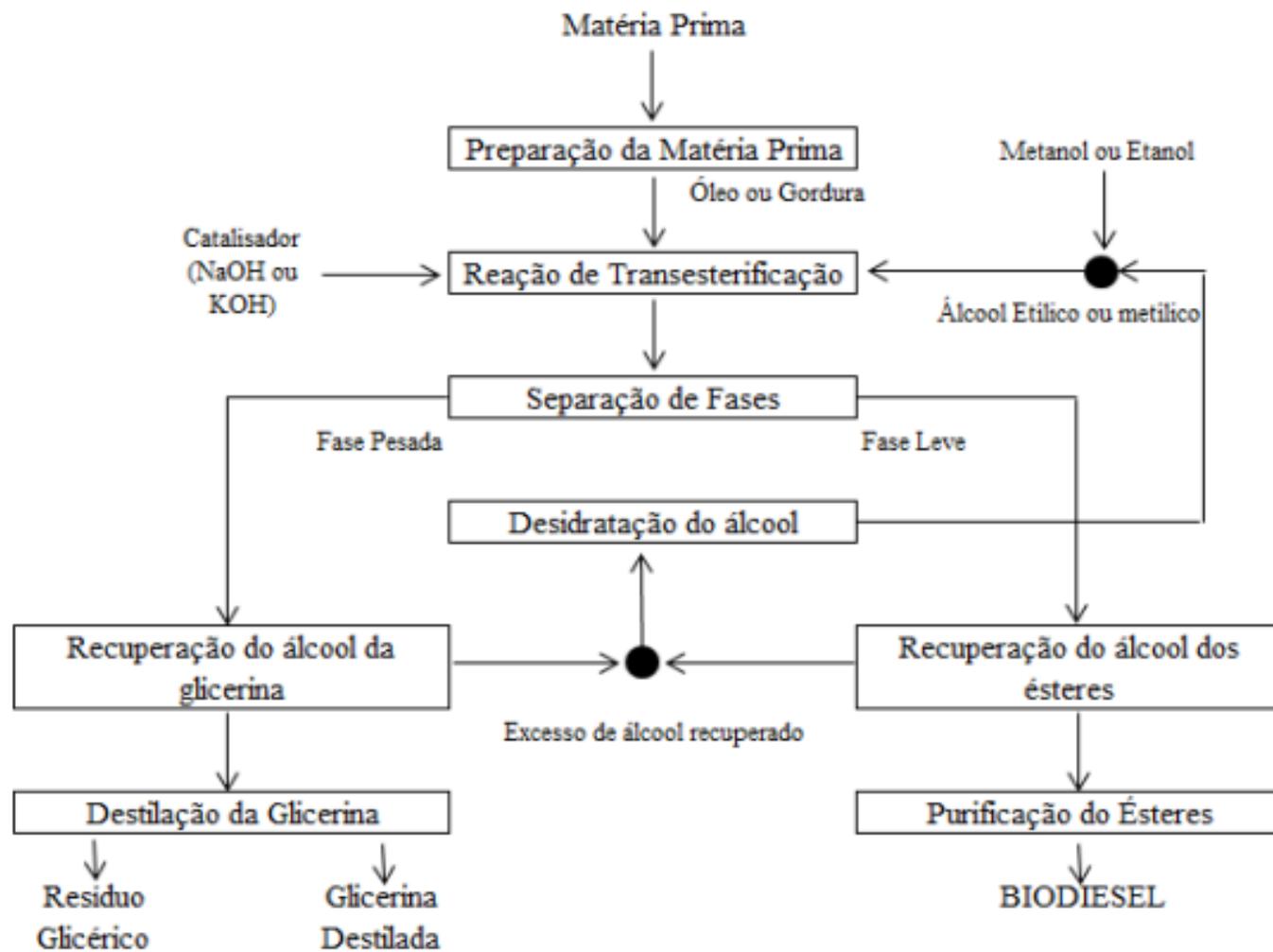


Figura 3 - Processo de produção de biodiesel e recuperação de álcool da glicerina.  
 Fonte: (RÚPOLO; LEVENDOSK, 2015).



evaporada, pode atingir uma pureza de 60 a 80% e aumentar para 99,5%, se seguir para uma destilação a vácuo ou para uma adsorção contínua. A neutralização, usualmente com ácido clorídrico, fosfórico ou sulfúrico, promove a sua purificação a “glicerina loira” que, depois de ser evaporada, pode atingir uma pureza de 60 a 80% e aumentar para 99,5%, se seguir para uma destilação a vácuo ou para uma adsorção contínua (MARÇON, 2010).

#### 2.4.1 Método Convencional

O método convencional de purificação da glicerina consiste na adição de solução ácida à glicerina bruta até alcançar um pH igual a 4 ou 4,5 para eliminar sabões e outras impurezas orgânicas, seguida de filtração dos ácidos graxos formados. O filtrado é neutralizado com NaOH até um pH 6,5. Assim, após esse tratamento, a glicerina bruta contém ainda algumas impurezas tais como água, cloreto de sódio (NaCl), álcool (metanol ou etanol) e resíduos de outras substâncias orgânicas. Após a neutralização, o filtrado é evaporado até 80% de glicerol em massa (TAQUEDA *et al.*, 2007).

A evaporação é uma das operações de maior consumo energético, geralmente, efetuada em evaporadores de múltiplos efeitos, utilizando baixas pressões (6,226 kPa no primeiro efeito e 2,489 kPa no segundo efeito). Durante a evaporação da água concentram-se o glicerol e o sal, sendo que este último começa a cristalizar e por isso precisa ser continuamente removido, mediante uma saída no fundo do evaporador para evitar incrustações no equipamento (NASCIMENTO, 2014).

O sal restante dissolvido na glicerina concentrada é sedimentado em tanques cônicos durante seis horas para separação. Em seguida, a glicerina sobrenadante é armazenada e pode ser vendida como glicerina de alta pureza. Para obter uma glicerina com grau USP (pureza acima de 99%), efetua-se o refino da mesma por meio de destilação (SPITZ *et al.*, 1990).

A glicerina é destilada sob alto vácuo de 0,600-1,330 kPa absoluto. Injeta-se vapor durante a destilação para manter a temperatura abaixo dos 200°C. Isto é feito para prevenir a polimerização e a decomposição da glicerina, que se inicia a 204°C (NASCIMENTO, 2014).

Uma condensação controlada do vapor separa a glicerina do vapor d'água. A glicerina condensada, com até 99% de pureza sofre desodorização por sopro de vapor, em um vaso sobre alto vácuo, sendo finalmente clareada com carvão ativado e filtrada para se obter glicerina acima de 99% de pureza (ÁVILA FILHO *et al.*, 2006).

Todo o esquema do processo convencional pode ser visualizado nas Figuras 5 e 6.

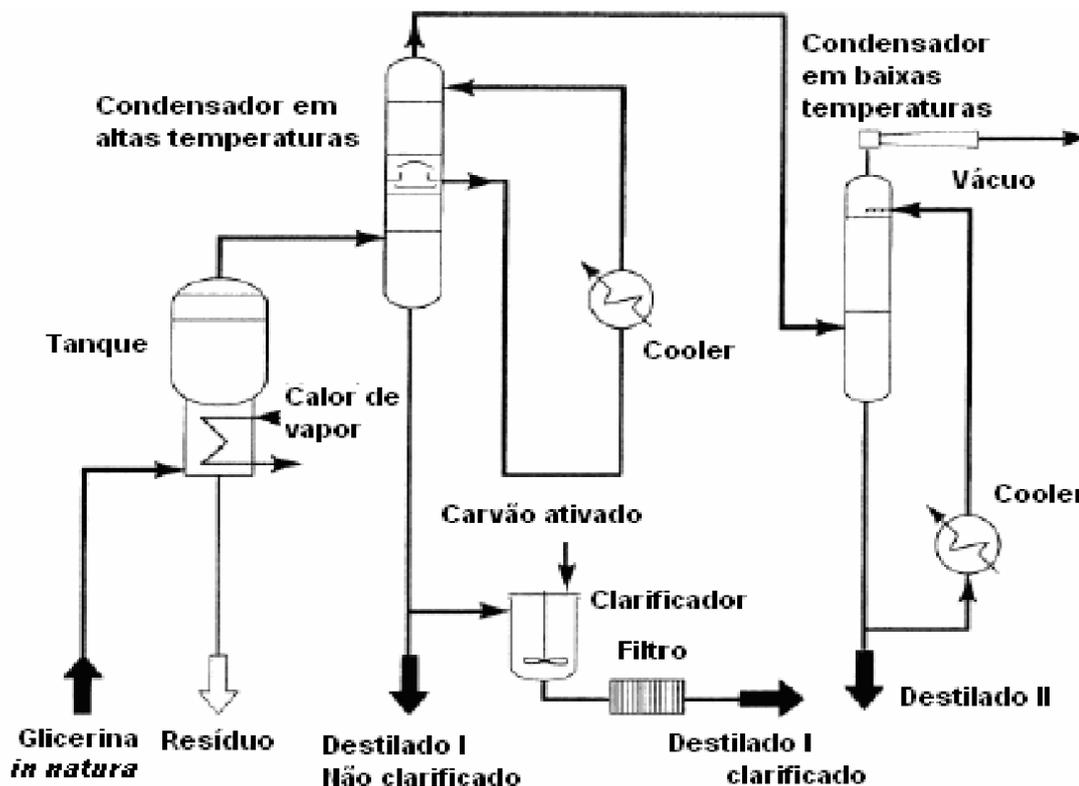


Figura 5 - Fluxograma da Destilação e Clareamento da Glicerina.  
Fonte: (NASCIMENTO, 2014).

#### 2.4.2 Método da troca iônica

Este método de purificação da glicerina está recebendo grande aceitação por causa da simplicidade das operações e baixo consumo de energia. Tornou-se possível pela disponibilidade de resinas de troca iônica adequadas para o processo e especialmente por se refinar a glicerina obtida por transesterificação, que é praticamente isenta de sais (ÁVILA FILHO *et al.*, 2006).

O tratamento da glicerina bruta é similar ao processo convencional até a obtenção do filtrado neutralizado. Em seguida, é feita a purificação por troca iônica, que consiste na passagem de material pré-filtrado por sucessivos leitos de resinas (OPPE, 2008).

Com a passagem do material através do leito de resinas, ocorre a eliminação de traços de ácidos graxos livres, a cor, o odor e outras impurezas minerais presentes. A concentração subsequente da solução purificada de glicerina é feita através de evaporação, com o uso de evaporadores de múltiplo efeito, de modo a se obter no final uma glicerina com pureza de aproximadamente 99%. Uma descoloração final é feita pela passagem do material através de um leito de carvão ativado seguido por filtração (ÁVILA FILHO *et al.*, 2006).

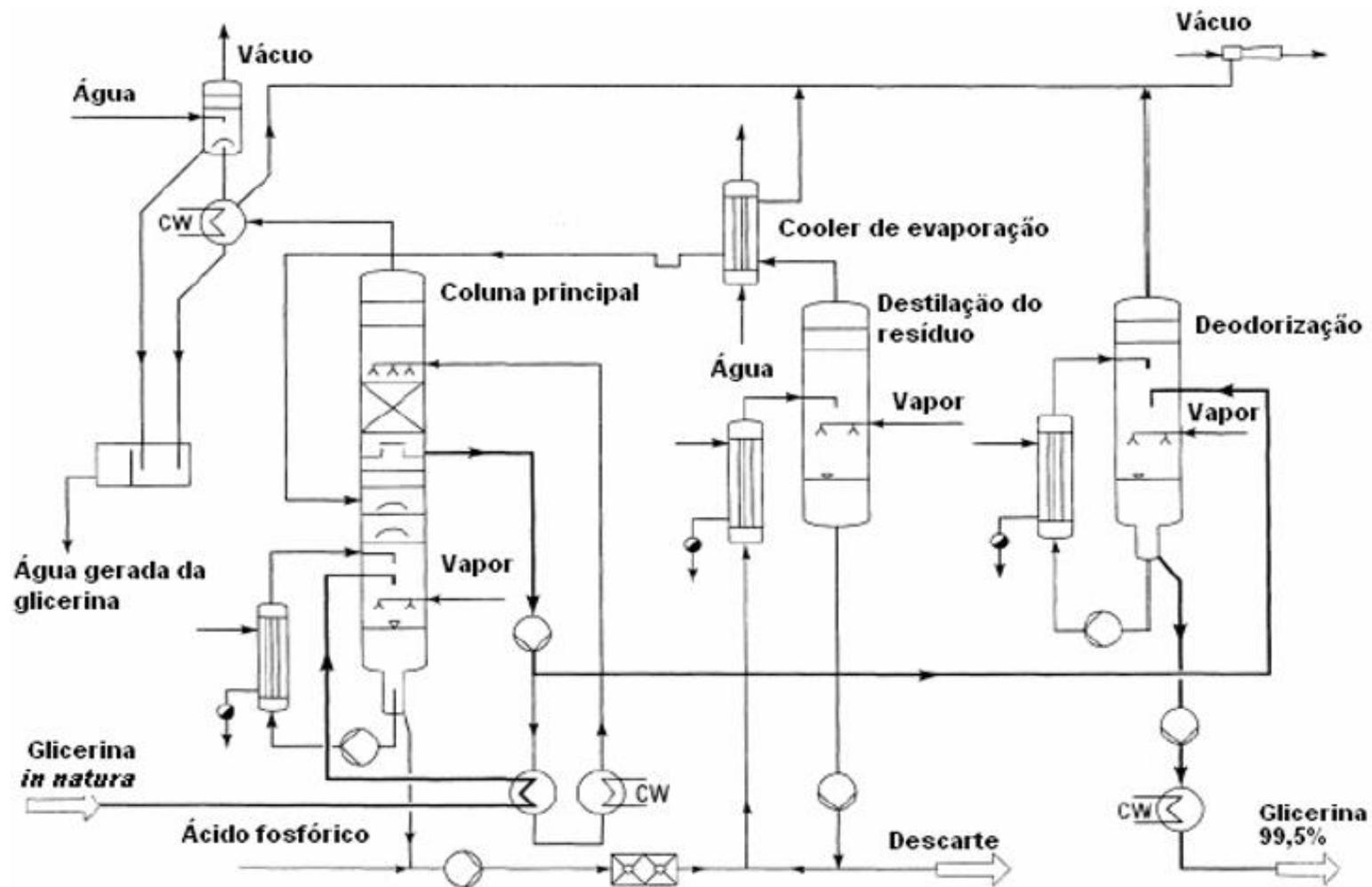


Figura 6 - Fluxograma da Destilação Wurster & Sanger da Glicerina.  
 Fonte: (GERVAJIO, 2005).

O produto final é uma glicerina de alto grau de pureza (GERVAJIO, 2005). O esquema do processo de troca iônica pode ser visualizado na Figura 7.

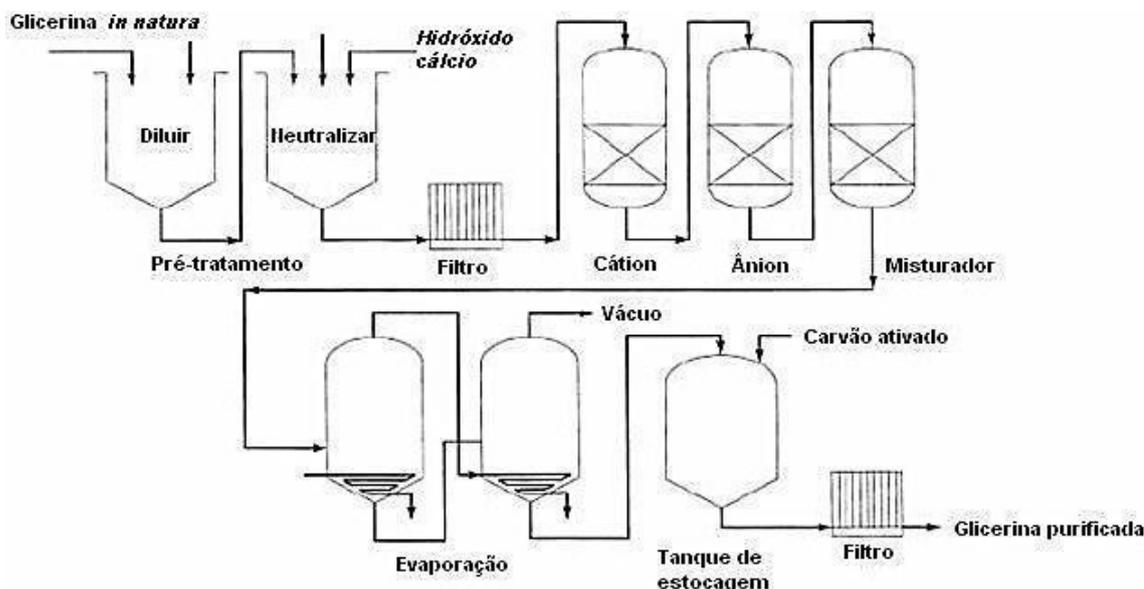


Figura 7 - Purificação da Glicerina pelo Método de Troca-Iônica.  
Fonte: (GERVAJIO, 2005).

As resinas de troca iônica são ativadas e regeneradas por um ácido diluído (sulfúrico ou clorídrico) que carrega a resina com o íon hidrogênio. Trabalham sobre o ciclo hidrogênio e os cátions são similarmente removidos pela troca do íon hidrogênio sobre o grupo sulfônico da resina (NASCIMENTO, 2014).

As resinas de troca iônica comumente são feitas de aminas alifáticas e fenol com formaldeído. Tem uma alta capacidade de remover a coloração das soluções de glicerina. Trabalham com o ciclo da hidroxila (NASCIMENTO, 2014).

Asher *et al.* (1995) afirmaram que a glicerina deve ser alimentada livre de turbidez e matérias coloidais, diluída a 30% (a temperatura ambiente) ou 40% (a 80°C) em água para possibilitar a difusão, reduzir a viscosidade e abaixar a concentração de sais.

Geralmente a troca iônica efetua-se em dois estágios (catiônica e aniônica) e uma resina mista, a qual é um sistema de passo múltiplo de um sistema contendo camadas de resinas aniônicas e catiônicas (NASCIMENTO, 2014).

Certas impurezas não ionizadas não são removidas por esse processo, mas estão presentes em quantidades insignificantes. A solução purificada contendo só água e glicerina é evaporada para ser concentrada ao grau desejado. O método convencional oferece maior flexibilidade (NASCIMENTO, 2014).

No entanto, utiliza uma demanda maior de energia em virtude das altas temperaturas e

pressões. O método de troca iônica requer menos energia, mas não pode ser usado com água glicélica da que contenha cloreto, devido à contaminação na resina de troca iônica (GERVAJIO, 2005).

## 2.5 Conceito da indústria gliceroquímica

Gliceroquímica é a parte da química que se dá a transformação da glicerina, em particular quanto à sua modificação química. As propriedades físicas da glicerina podem ser bem compreendidas a partir da sua estrutura molecular, que permite uma série de ligações de hidrogênio: uma molécula de água pode realizar até três ligações de hidrogênio, enquanto uma molécula de glicerol pode realizar até seis dessas ligações. Fora isso, a presença de um grupo OH ligado a cada um dos três átomos de carbono permite o glicerol realizar uma vasta variedade de reações químicas (UMPIERRE; MACHADO, 2013).

Na Figura 8 apresenta resumidamente alguns produtos de maior valor agregado resultantes de uma gama variada de reações e processos químicos à base de glicerol.

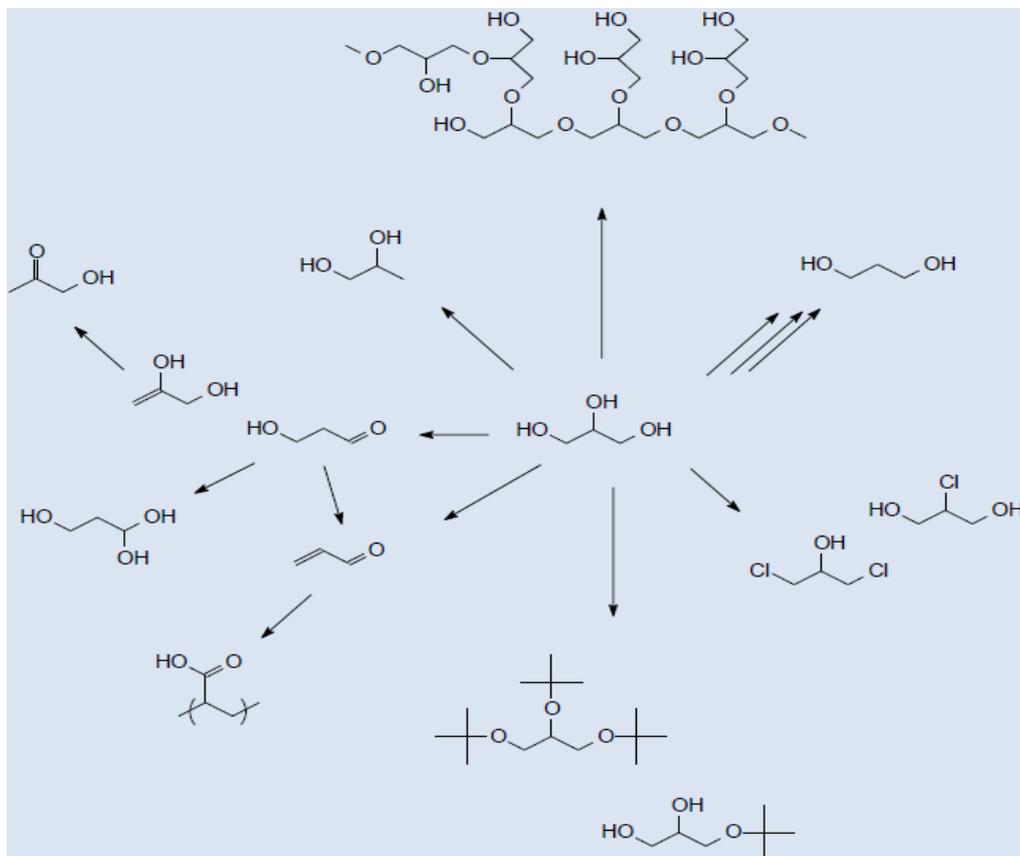


Figura 8 - Produtos da valorização do glicerol.

Fonte: (UMPIERRE; MACHADO, 2013).

Entretanto, ao invés de ser tratado pelos métodos apresentados acima para um maior valor agregado, a maior parte deste subproduto produzido é diretamente consumido na indústria alimentícia, de medicamentos, produtos de higiene, produtos de limpeza, de cosméticos. A conversão do glicerol na indústria é realizada por processos fermentativos de baixo rendimento, caros e ambientalmente inviáveis pelas normas atuais (UMPIERRE; MACHADO, 2013).

Portanto, essas rotas utilizam fortes oxidantes como permanganato de potássio ou quantidades estequiométricas de ácidos crômico e nítrico. Essas rotas não são aceitas pelas legislações ambientais, mesmo nos níveis de produção convencionais, com isso a introdução do biodiesel no mercado, esses níveis foram largamente dilatados (UMPIERRE; MACHADO, 2013).

A indústria gliceroquímica, cria uma opção renovável ao petróleo, gerando um ciclo sustentável, partindo da produção de biodiesel até à matéria prima para a produção de produtos do cotidiano, sendo que, a indústria gliceroquímica atualmente possui uma posição modesta no mercado comparado à petroquímica, porém, as iniciativas de pesquisa, desenvolvimento de tecnologia e investimentos nesse setor, podem garantir resultados surpreendentes (UMPIERRE; MACHADO, 2013).

## 2.6 O uso do Bioglicerol no Brasil

No ano de 2017 foi fundamental para o setor biocombustíveis no Brasil, com a promulgação da Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, que dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Política essa, integrante da política energética nacional, que tem como maior objetivo promover a expansão adequada a produção e do uso de biocombustíveis no país, com maior ênfase na regularidade do abastecimento de combustíveis. Com isso, o RenovaBio passará a previsibilidade necessária para a participação competitiva dos biocombustíveis no mercado nacional de combustíveis, ajudando assim a redução de emissões de gases causadores do efeito estufa e com os compromissos do Brasil no âmbito do Acordo de Paris (COP21) (COELHO, 2018).

Significativos avanços também ocorreram no setor de biodiesel em 2018. O percentual obrigatório de 10% de adição de biodiesel ao diesel passou a vigorar a partir de 1º de março deste ano. Decisão esta que foi tomada em reunião extraordinária do CNPE, realizada em 9 de setembro de 2017. O B10 fará sua estreia oficial no Leilão 59, em fevereiro de 2018. A produção de biodiesel em 2018 (até o final do ano) será superior a 5 bilhões de litros

(COELHO, 2018).

O aumento da produção de biodiesel poderá ser consolidado se forem encontradas novas aplicações e mercado para o glicerol produzido.

A distribuição do consumo do glicerol nos diferentes setores industriais brasileiros pode ser vista na Figura 9.

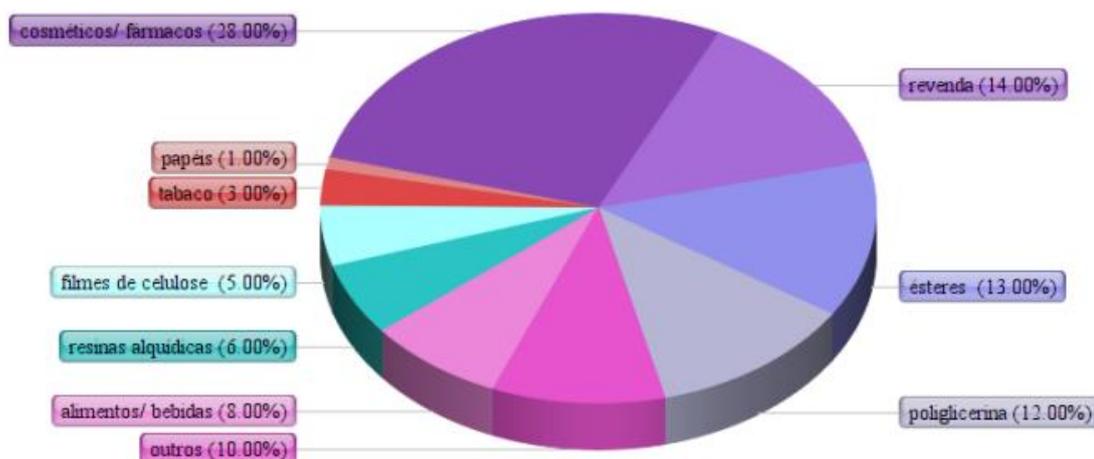


Figura 9 - Distribuição do consumo de glicerol pelos diferentes setores industriais no Brasil.

Fonte: (PEITER et al., 2016)

Pode-se notar que a maior utilização é no setor de cosméticos e fármacos que, com a introdução de um grande volume de glicerol no país, é imperioso que sejam desenvolvidas novas aplicações para este produto, visando sua aplicação no Brasil e no mercado internacional.

## 2.7 Levantamento comercial

Diante do levantamento comercial realizado neste trabalho no site de compra e procura *Alibaba.com*, pudemos ter informações sobre o comércio do glicerol no Brasil e no mundo (bruto e purificado), tais informações como nome do produto, quantidades, preço, porcentagem de purificação e especificações do produto.

A cotação do resíduo glicérico (glicerina bruta), em 2008, estava aproximadamente em R\$ 105,00/t, a bidestilada (96%) era em torno de R\$ 2.100,00/t, e que a glicerina farmacêutica (pura) (>99,5%) era comercializada por R\$ 2.500,00/t. As principais impurezas presentes na glicerina do biodiesel (resíduo glicérico (glicerina bruta)) são catalisador, álcool, ácidos graxos, sais e água. Tais impurezas dependem do tipo da oleaginosa e do tipo de catálise

empregada na produção do biodiesel (BEATRIZ et al. (2011)).

Nota-se que há muita variação nos preços até mesmo dentro do mesmo país de venda, nota-se que no Brasil mesmo podemos encontrar no porto de Santos glicerina vendida a US\$ 80 (preço FOB (“Free on Board”)) com pureza de 80%, como também a US\$ 185 (preço FOB (“Free on Board”)) com a mesma pureza. Como não se tem um conhecimento tão a fundo sobre o produto, não se pode dar uma conclusão sobre o porquê da diferença, mas pode-se encontrar informações deste tipo umidade e impurezas como cinzas, metanol, NaCl, etc. No levantamento buscou-se da glicerina bruta a mais purificada que fosse encontrada que chega a 99,9% de pureza no porto de Qingdao na China, com preço entre US\$ 700-1200/tonelada (preço FOB (“Free on Board”)), com especificações como ponto de fusão, densidade relativa, viscosidade, teor de cinzas, ponto de ignição dentre outras.

## 2.8 Conceitos de corrosão

A corrosão pode ser dita como a deterioração de metais causada por processos eletroquímicos das reações de oxirredução. Para uma melhor compreensão desse processo, é capital que seja esclarecido os seguintes conceitos (INFOESCOLA, 2018):

- A Oxidação é a perda de elétrons.
- A Redução é o ganho de elétrons.
- A Reação de oxirredução é a que ocorre transferência de elétrons, entre os átomos envolvidos.

Por isso, a corrosão em geral, é gerada pelo oxigênio, sendo que os metais têm uma maior capacidade de oxidação do que o oxigênio, desta forma, o oxigênio tende a ganhar elétrons. A corrosão está presente em nossa sociedade, e representando grandes perdas econômicas, pois todo tipo de corrosão se relaciona á diminuição do tempo de vida de um determinado material, existindo três formas do meio agir sobre o material, danificando-o; por isso, a corrosão é classificada em: *eletroquímica, química e eletrolítica* (PEREIRA, 2013).

Corrosão metálica pode ser definida como sendo a transformação de um material metálico ou liga metálica pela sua interação química ou eletroquímica num determinado meio de exposição, aliada ou não a esforços mecânicos, resultando na formação de produtos de corrosão e na liberação de energia. Uma vez iniciado o processo de corrosão, este tende a continuar progressivamente, levando à rápida destruição do metal. A corrosão química ocorre em altas temperaturas e em ausência

de um eletrólito. O processo de corrosão eletroquímica é mais frequente na natureza, envolvendo necessariamente a presença de um eletrólito e a transferência de elétrons. Esse processo espontâneo ocorre devido à diferença de potencial químico entre o metal e o meio, envolvendo a reação desses materiais com substâncias não metálicas (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, etc) presentes no meio (SANDRES, 2004; GENTIL, 2007 *apud* AMBROZIN *et al.* 2009 *apud* PEREIRA, 2013).

Portanto, esse processo se dá em alguns casos, onde é formada por reações de oxidação pela própria película, agindo como uma camada protetora, retardando o processo corrosivo, a formação desta película de óxido do próprio metal acaba protegendo o substrato impedindo a progressão do efeito corrosivo destrutivo.

Esta película só será prejudicial caso a continuidade superficial do metal seja alterada ou rompida por agentes mecânicos, físicos ou químicos (SANDRES, 2004; GENTIL, 2007 *apud* AMBROZIN *et al.* 2009 *apud* PEREIRA, 2013).

Trazendo a problemática da corrosão dos metais para as indústrias, sendo que quando ocorre, há uma substituição essencial dessas peças que foram danificadas devido a esse processo da corrosão, levando a perda de produção, ou seja, com essa danificação nas peças há necessidade da parada de produção, ocasionando um menor rendimento e lucratividade.

A corrosão dos metais provoca um grande prejuízo para as indústrias, uma vez que são necessárias substituições de peças danificadas, o que leva à parada na produção, e, conseqüentemente, menor rendimento e lucratividade. Estima-se que os países industrializados gastam em torno de 4% do PIB por ano em decorrência dos efeitos do processo de corrosão (NOGUEIRA *et al.*, 2012 *apud* PEREIRA, 2013).

A corrosão ocorre em diferentes tipos e através de diversas estruturas, sua caracterização auxilia no esclarecimento do mecanismo, ou seja, na aplicação de medidas de proteção adequadas. Sendo assim, suas particularidades fundamentais das diferentes formas de corrosão são (PEREIRA, 2013):

- a) **Uniforme:** a corrosão eletroquímica que se processa em toda a extensão da superfície, ocorrendo então à perda uniforme de espessura, considerada a uma das mais fáceis de controlar, de proteger, de ver e também é a mais comum;
- b) **Por placas:** tipo de corrosão localizada, com formação de placas com escavações, devido aos seus descolamentos, que se desprendem gradativamente em metais passivados, onde é formada inicialmente a película protetora, que se desprende por já estar muito espessa pela ação da gravidade.
- c) **Alveolar:** Também é um tipo de corrosão localizada, sendo muito profunda e o

diâmetro do alvéolo é maior do que a sua profundidade geralmente menor que o seu diâmetro.

- d) **Puntiforme ou Por Pites:** é a forma mais destrutiva de corrosão, sendo que é muito difícil identificá-la, pois, geralmente se forma embaixo da corrosão generalizada e também a perda percentual de peso da estrutura é muito pequena. Portanto, essa forma se diferencia da alveolar, porque diferente dos alvéolos, sua profundidade é maior do que o diâmetro.
- e) **Intergranular ou intercrystalina:** Se processa entre os grãos da rede cristalina do material metálico, sob certas condições os contornos se tornam muito reativos. O qual perde também suas propriedades mecânicas.
- f) **Intragranular (ou transgranular ou transcristalina:** se processa nos grãos dentro da rede cristalina, perdendo também as propriedades mecânicas e gerando trincas, podendo fraturar à menor sollicitação mecânica, que pode ocorrer também corrosão sob tensão fraturante (CTF).
- g) **Filiforme:** Na forma de finos filamentos, mas não profundos, que se propagam em diferentes direções, não se ultrapassando, pois admite-se que o produto de corrosão, em estado coloidal, apresentando carga positiva, daí a repulsão. Geralmente ocorre em superfícies metálicas revestidas com tintas ou com metais.
- h) **Por esfoliação:** Se processa de forma paralela à superfície metálica. Frequentes em chapas ou componentes extrudados que tiveram seus grãos alongados e achatados, gerando condições para que inclusões ou segregações, presentes no material, sejam transformadas devido ao trabalho mecânico, em plaquetas alongadas.
- i) **Grafítica ou Grafitização:** essa corrosão é do tipo seletiva. Se processa em ferro fundido cinzento em temperatura ambiente, usados para água, esgoto e drenagem. A área corroída fica com um aspecto escuro, típico do grafite, que pode ser facilmente retirada com uma espátula.
- j) **Em frestas:** Se processa em função da diferença da concentração de íons ou gases dissolvidos na concentração eletrolítica entre duas regiões na mesma peça. A corrosão vai ocorrer na região que possui a menor concentração.
- k) **Denzificação:** Essa é do tipo seletiva, típica de latões (Cu-Zn). Há a corrosão preferencial do Zn (anodo), restando o cobre (cátodo), com sua cor avermelhada, que contrasta com a cor amarelada do latão.
- l) **Empolamento pelo Hidrogênio:** O hidrogênio atômico, H, no estado nascente,

tem grande capacidade de difusão no material metálico e por ter pequeno volume atômico difunde-se rapidamente. No resfriamento a peça forma H<sub>2</sub> pois é pressionada devido a contração que sofre, fazendo o H difundir e se juntar a outro H, concentrando bolhas.

- m) **Em torno do cordão de solda:** Ocorre em aços inoxidáveis não estabilizados ou com teores maiores que 0.03% de carbono, processando-se intergranulamente.

Portanto, a importância da compreensão dos tipos de corrosão é de grande importância, para desenvolver a análise do experimento de corrosão que iremos apresentar a baixo.

## 2.9 Conceitos de viscosidade

A viscosidade pode ser considerada como espessura de um fluido. Ela é resultado da interação entre as diferentes moléculas de um determinado fluido. No caso do atrito entre sólidos em movimento, a viscosidade definirá a energia necessária para fazer um fluxo de fluido.

Os viscosímetros são instrumentos utilizados para medir a viscosidade de líquidos podendo ser classificados em dois grupos: *primário e secundário*.

Os viscosímetros primários, os aparelhos realizam uma medida direta da tensão e da taxa de deformação da amostra de fluido. Aparelhos com diversos arranjos podem ser arquitetados para este fim: entre eles há o de disco, de cone-disco e de cilindro rotativo. Os respectivos esquemas estão mostrados na Figura 10. O símbolo  $\Omega$  refere-se à rotação (rpm) aplicada e T ao torque (Nm) medido, que surge da tensão oriunda da deformação do fluido.

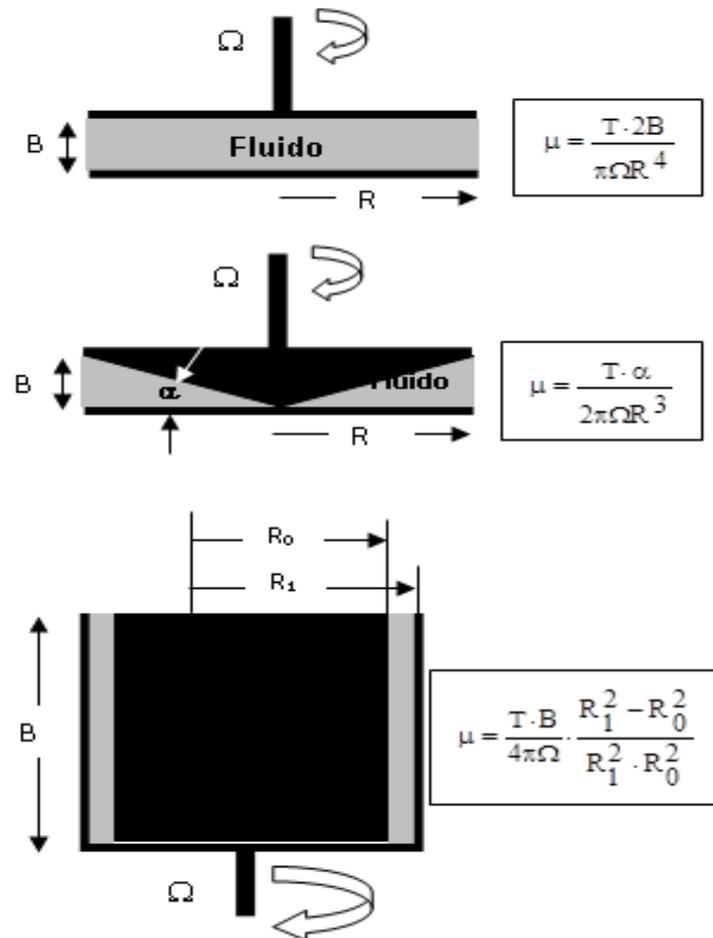


Figura 10 - Representação esquemática dos viscosímetros rotativos: disco, cone-disco e cilindro. Fonte: (UNICAMP, 2018).

Os viscosímetros do grupo secundário concluem a razão entre a tensão aplicada e a taxa de deformação por meios não diretos, isto é, sem aferir a tensão e deformação diretamente. Neste grupo pode-se incluir o viscosímetro capilar, onde a viscosidade é alcançada por meio da medida do gradiente de pressão, e o viscosímetro de Stokes, onde ela é determinada pelo tempo de queda livre de uma esfera, conforme mostrado nas representações esquemáticas na Figura 11.

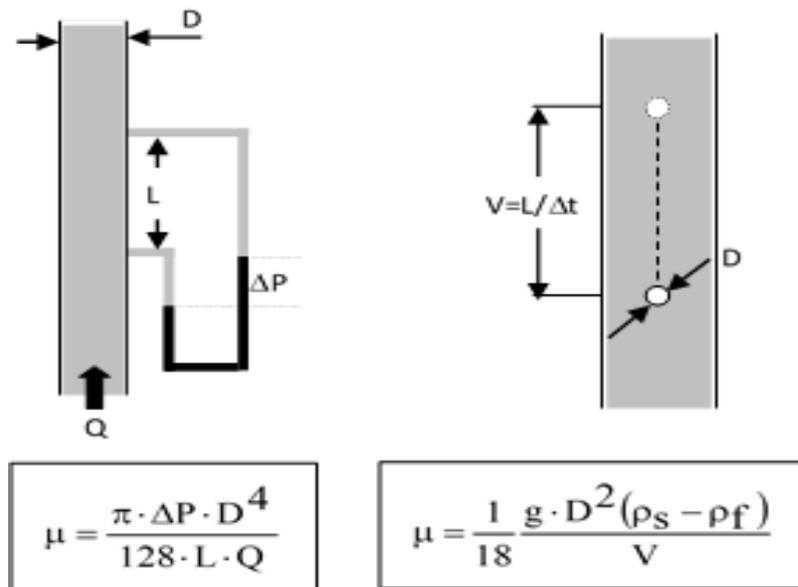


Figura 11 - Representação esquemática do viscosímetro capilar e de Stokes. Fonte: (UNICAMP, 2018).

No viscosímetro capilar acima  $Q$ ,  $L$ ,  $\Delta P$  e  $D$  são, respectivamente, a vazão volumétrica, a distância entre as tomadas de pressão, o diferencial de pressão e o diâmetro do tubo capilar. Esta analogia aplica-se para um escoamento de Poiseuille, isto é, um escoamento em regime laminar e hidrodinamicamente desenvolvido.

Como os viscosímetros primários realizam medidas diretas da taxa de deformação e da tensão eles podem ser aplicados para ensaios tanto de fluidos Newtonianos como de fluidos com comportamento tensão versus deformação não-linear e/ou visco-elástico. Os viscosímetros secundários, por outro lado, aplicam-se principalmente a fluidos Newtonianos, por medirem a viscosidade indiretamente. Esta é a principal diferença entre eles. Outros aspectos que os diferenciam podem ser citados:

- a) O volume requerido de amostra nos viscosímetros de disco e cone-disco são menores;
- b) A faixa operacional nos viscosímetros de disco e cone-disco é maior;
- c) O custo do viscosímetro de Stokes é menor. Entretanto, é o que necessita de maior volume de fluido e apenas trabalha com líquidos translúcidos.
- d) Pelo fato de requererem o menor volume de fluido, os viscosímetros de disco e cone-disco são os que mais facilmente se adaptam para ensaios em temperaturas diferentes da temperatura ambiente. (UNICAMP 2018).

## CAPITULO 3 – METODOLOGIA

### 3.1 Experimento de corrosão

O presente experimento de corrosão se deu através da imersão de diferentes tipos de metais, classificando-se em três tipos de glicerina: **Bruta, Loira e a Pura**.

- Bruta: Resíduo glicérico formado após a transesterificação. Geralmente contém 40 a 60% de glicerol (40-60°), sendo que os componentes restantes são frações de reagentes que não reagiram (triglicerídeos, alcoóis), catalisadores, ácidos graxos, água, etc.
- Loira: Produto de diversos processos desenvolvidos na planta industrial utilizando glicerina bruta visando à extração de frações de reagentes que não foram reagidos e catalisadores. Contém 80% de glicerol (80°).
- Pura: A glicerina utilizada foi uma glicerina bi-destilada grau USP (99,9°), adquirida em uma loja de produtos de limpeza de Dourados-MS.

A maioria das plantas de produção de biodiesel no Brasil comercializa a glicerina loira para indústrias de refino de glicerina pura.

Inicialmente se teve a preparação adequada de todo o material, onde foram usados recipientes de vidro (15 copos americanos), para o preparo dos metais e a glicerina, em todos os recipientes foram adicionados à mesma quantidade de fluido (150 ml).

Confirme observado na Figura 12 (da direita para a esquerda), os seguintes materiais com sua corrosão avaliada na primeira coluna são chapas de alumínio comercial, na segunda é o aço galvanizado<sup>1</sup>, na terceira é o aço inox 430<sup>2</sup>, na quarta é o aço inox 304<sup>3</sup>, e na quinta é o aço inox 316<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> Aço galvanizado é o aço com tratamento superficial de zinco ou ligas de zinco.

<sup>2</sup> Aço inoxidável 430 é um aço ferrítico que contém, no mínimo, 10,5% de Cromo, podendo conter também Níquel, Molibdênio, entre outros elementos.

<sup>3</sup> Aço inoxidável 304 é um aço austenítico que contém, no mínimo, 18% de Cromo e 8% de Níquel.

<sup>4</sup> Aço inoxidável 316, contém a mesma composição do aço inoxidável 304, além de conter 2 a 3% de Molibdênio.



Figura 12 – Glicerinas bruta, loira e pura, com os metais imersos.

Já na parte dos fluidos na mesma figura (de cima para baixo) temos a glicerina bruta (40-60% (pureza)) na primeira linha, na segunda loira e na terceira a pura.

Sendo assim, os recipientes eram revisados com frequência para a troca do fluido que no caso da glicerina bruta, pois ela fica com um aspecto gelatinoso como pode ser visto na Figura 13. A gelificação ocorria devido ao contato de algumas substâncias com o ar, como alguns ácidos graxos e sabões.

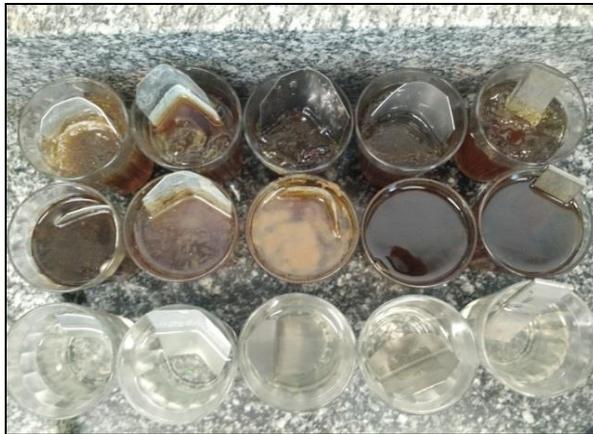


Figura 13: Fluidos com aspecto gelatinoso de diferentes ângulos.

As frações de glicerina pura e loira utilizadas neste experimento eram trocadas semestralmente devido ao acúmulo de poeira.

E por fim, após quase 1 ano e 5 meses de experimento, foi feita a retirada dos metais dos recipientes, para as devidas análises, nota-se os diferentes tipos de corrosão nas Figura 19 a 21 de ('a' a 'e').

### 3.2 Conceito de pH

Foi feito um teste de pH nas três gliceras, junto ao experimento de corrosão, com tiras indicadoras (Figuras 14 e 15). As tiras foram imergidas por dois segundos em cada um dos quinze recipientes onde estavam as gliceras.



Figura 14 - Escala do pH das fitas analisadas (0-7).



Figura 15 - Escala do pH das fitas analisadas (7-14).

### 3.3 Viscosímetro de Stokes

No viscosímetro de Stokes as variáveis:  $g$ ,  $D$ ,  $\rho_s$ ,  $\rho_f$  e  $V$  são, respectivamente, a aceleração da gravidade, o diâmetro da esfera, a massa específica da esfera, a densidade do fluido e a velocidade terminal de queda livre, isto é, a razão entre a distância  $L$  e o intervalo de tempo  $\Delta t$ . Esta analogia aplica-se unicamente para esferas em queda livre em meio infinito com  $Re$  inferior a uma unidade. A Figura 16 apresenta um viscosímetro de Stokes para fins de entendimento:



Figura 16 - Viscosímetro de Stokes. Fonte: (UNICAMP, 2018)

Neste viscosímetro é possível notar, o tubo por onde desce o que será analisado, os sensores que captam a passagem do objeto, acoplados a uma interface, esta que seria ligada a um computador recolhendo todos os dados por meio eletrônico.

Algumas características do viscosímetro de Stokes são:

- Grande quantidade de fluido necessário.
- Longo período de execução de trabalho e com muitas repetições.
- Limitação em usar esferas muito pequenas, devido a enxergar a olho elas passando pelas marcações e também pelos resultados.

O princípio de funcionamento do viscosímetro visto baseia-se na aferição da velocidade de queda livre de uma esfera por meio do fluido do qual se deseja obter a viscosidade.

A esfera, sendo lançada no fluido estacionário, ficará sujeita a um conglomerado de forças definidas pela equação denominada “BBO” (BASSIN, BOUSINESQ & OSSEN) (BRUNETTI, 2008).

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\frac{\pi}{6} d^3 \rho_s \frac{dV}{dt}}_{\text{Aceleração Esfera}} &= - \underbrace{3\pi \cdot \mu \cdot d \cdot V}_{\text{Arrasto}} - \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{6} d^3 \rho_f \frac{dV}{dt}}_{\text{Massa Virtual}} \\
 - \underbrace{\frac{3}{2} d^2 \sqrt{\pi \rho_f \cdot \mu} \int_0^t \frac{dV}{d\tau} \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}}}_{\text{Força de Basset}} &+ \underbrace{\frac{\pi}{6} d^3 (\rho_s - \rho_f) \cdot g}_{\text{Peso- Empuxo}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Onde D é o diâmetro da esfera (em m), dV/dt a aceleração da esfera e  $\rho_s$  e  $\rho_f$  as massas específicas da esfera e do fluido, respectivamente. Uma solução geral para esta equação integral-diferencial pode ser localizada em (BRUNETTI, 2008).

Força de Basset é a força pautada nas mudanças na camada limite que abrange a partícula, que acontecem devido à aceleração ou desaceleração da partícula.

As equações são bastante simplificadas devido a ser um fluido uniforme, objeto de teste uniforme (esfera), dentre outros, portanto se torna uma equação mais simples de se resolver.

Neste viscosímetro, a uma distância equivalente a 50 diâmetros do ponto de lançamento da esfera, ela atinge a velocidade terminal, isto é, dV/dt é nulo. A Eq. (1) se reduz então a um balanço entre a diferença de peso e a força de arrasto – Empuxo, conforme ilustra a Figura 17 (BRUNETTI, 2008).

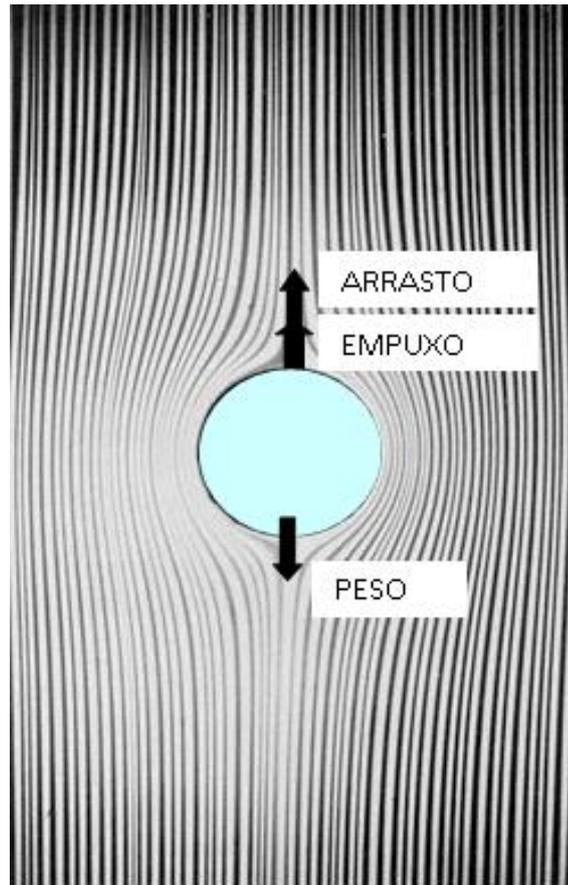


Figura 17 - Balanço de forças e visualização das linhas de corrente em uma esfera em queda livre. Referencial deslocando-se com a esfera num fluido estacionário. Fonte: (UNICAMP, 2018).

A força de arrasto pode ser expressa em termos do coeficiente de arrasto,  $C_D$ , (BRUNETTI, 2008).

$$Re = \rho * V * d / \mu \quad (2)$$

$$v = \mu / \rho = \rho / \mu = 1 / \nu$$

$$Re = 1 / v * V * d$$

$$Re = V * d / v \quad (3)$$

Sendo:

Re = número de Reynolds;  
V = Velocidade;  
d= diâmetro da esfera;  
 $\mu$ = viscosidade dinâmica;  
v= viscosidade cinemática.

$$C_D = \frac{3\pi\mu dV}{\frac{\rho_f V^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4}} \equiv \frac{24}{\text{Re}_D} \quad (4)$$

$$\text{Onde - } \text{Re}_D = \frac{\rho \cdot d \cdot V}{\mu},$$

Ficando o balanço de forças para o escoamento permanente dado por,

$$C_D \cdot \frac{1}{2} \rho_f V^2 \cdot \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_s - \rho_f) g \quad (5)$$

Esta solução foi obtida analiticamente pela primeira vez em 1851, por Stokes. Ela é avaliada um dos grandes sucessos na área de Fluidos, pois antevê, com precisão, o arrasto de uma esfera a partir de alicerces teóricos. Evidentemente a legitimidade da solução é restrita a escoamentos com falta de inércia, isto é, para regimes com Reynolds  $< 1$ . Uma comparação entre a Eq. (1) e dados experimentais é mostrada na Figura 18:

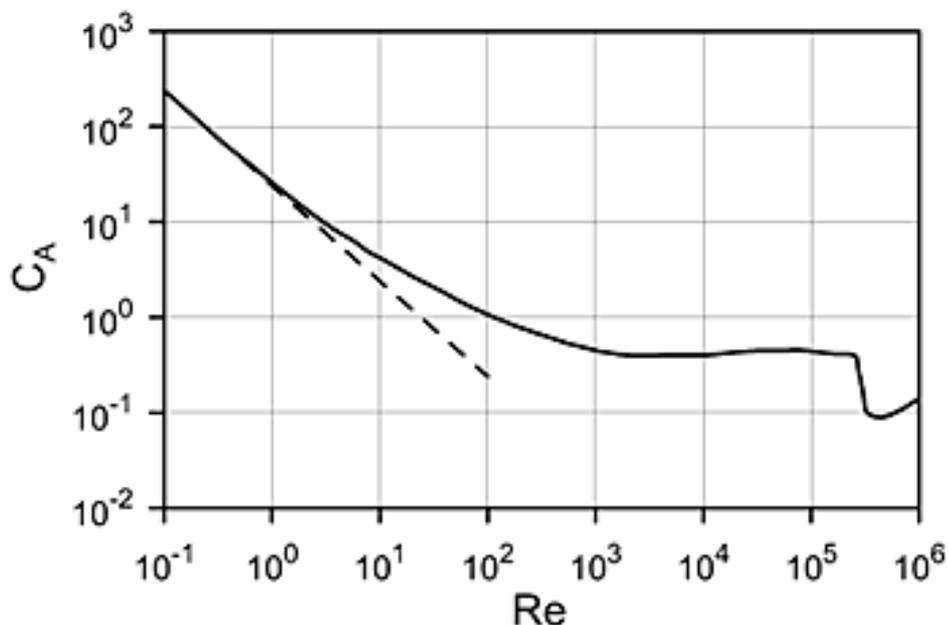


Figura 18 - Coeficiente de arrasto para esfera. Fonte: (UNICAMP, 2018).

Deve-se salientar que a equação (5) aplica-se para um meio infinito. A apresentação da superfície do viscosímetro origina um aumento no coeficiente de arrasto e deve ser retificado como proposto por Landenberg, em Brodkey 1967 (BRUNETTI, 2008).

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_D} \left( 1 + 2.0144 \frac{d}{D} \right) \quad (6)$$

onde  $D_t$  é o diâmetro do tubo do viscosímetro. A analogia aplica-se unicamente para esferas lançadas na linha de centro do canal.

Trocando-se a equação (6) na equação (5) e resolvendo para  $\mu$ , resulta-se na expressão de trabalho para o viscosímetro de Stokes, equação (7), desde que  $\text{Re}_D$  seja  $< 1$ .

$$\mu = \frac{1}{18} \cdot \frac{g \cdot D^2 (\rho_s - \rho_f)}{V \cdot \left( 1 + 2,1044 \frac{d}{D} \right)} \quad (7)$$

## CAPITULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Análise do experimento de corrosão

Nesta Figura 19 ('a' a 'e'), há os diferentes tipos de metais, que foram imersos na glicerina bruta.

Deve-se salientar antes de tudo que as principais marcas de corrosão se darão, na superfície do fluido, onde se tem a mistura do fluido com o oxigênio do ar.

Nota-se que no alumínio (Figura 19 'a') não houve corrosão, e o que se vê seria mais sujeira e a parte gelatinosa da glicerina bruta, já no aço galvanizado (Figura 19 'b'), se vê a olho nu que houve uma leve corrosão. Aços inox 430 (Figura 19 'c') 304 (Figura 19 'd') e 316 (Figura 19 'e') vê-se que não houve nenhum tipo de corrosão.

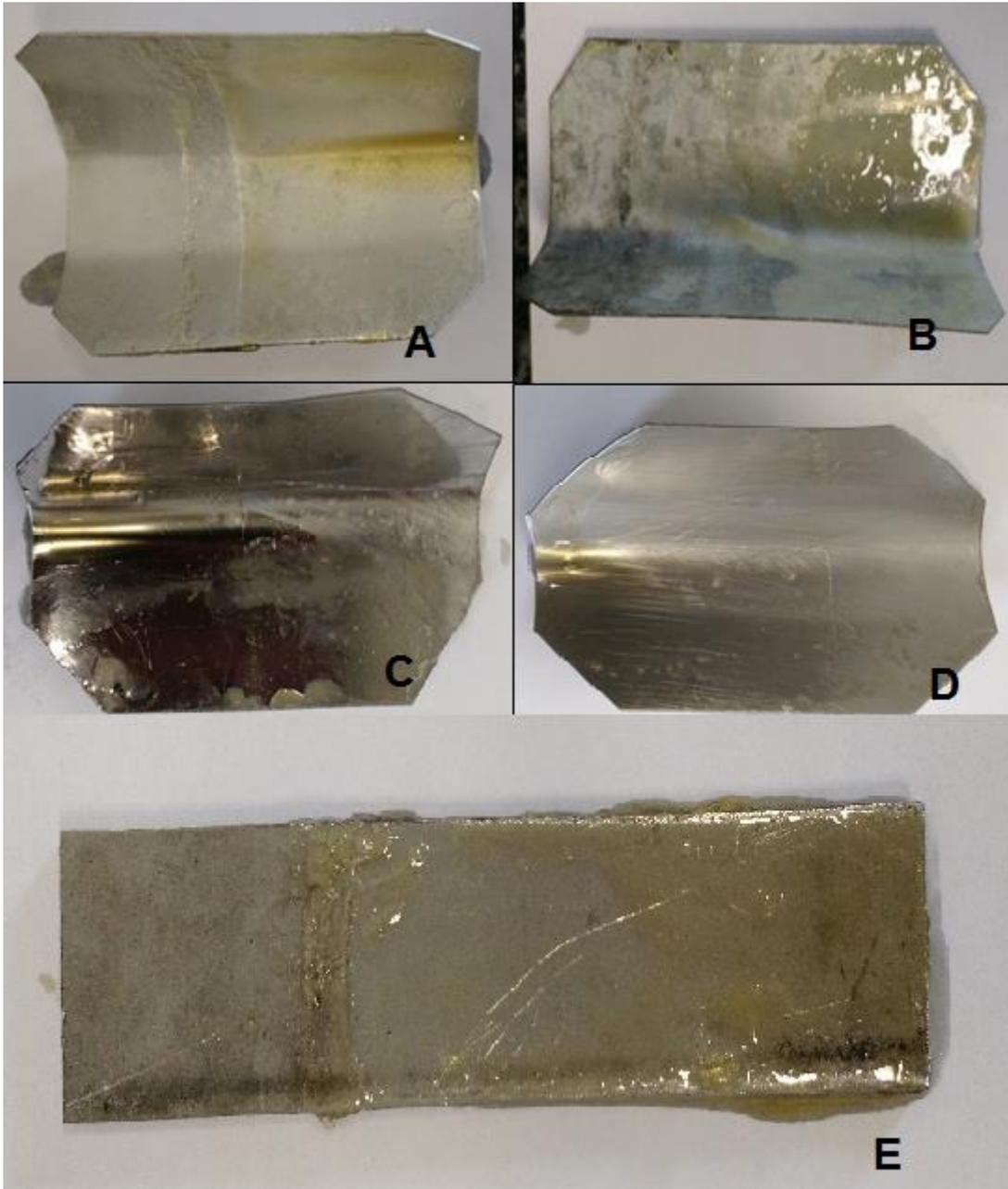


Figura 19 - (a, b, c, d, e) – ‘a’ alumínio, ‘b’ aço galvanizado, ‘c’ aço inox 430, ‘d’ aço inox 304, ‘e’ aço inox 316.

Já na Figura 20, temos os metais que foram imersos na glicerina loira:

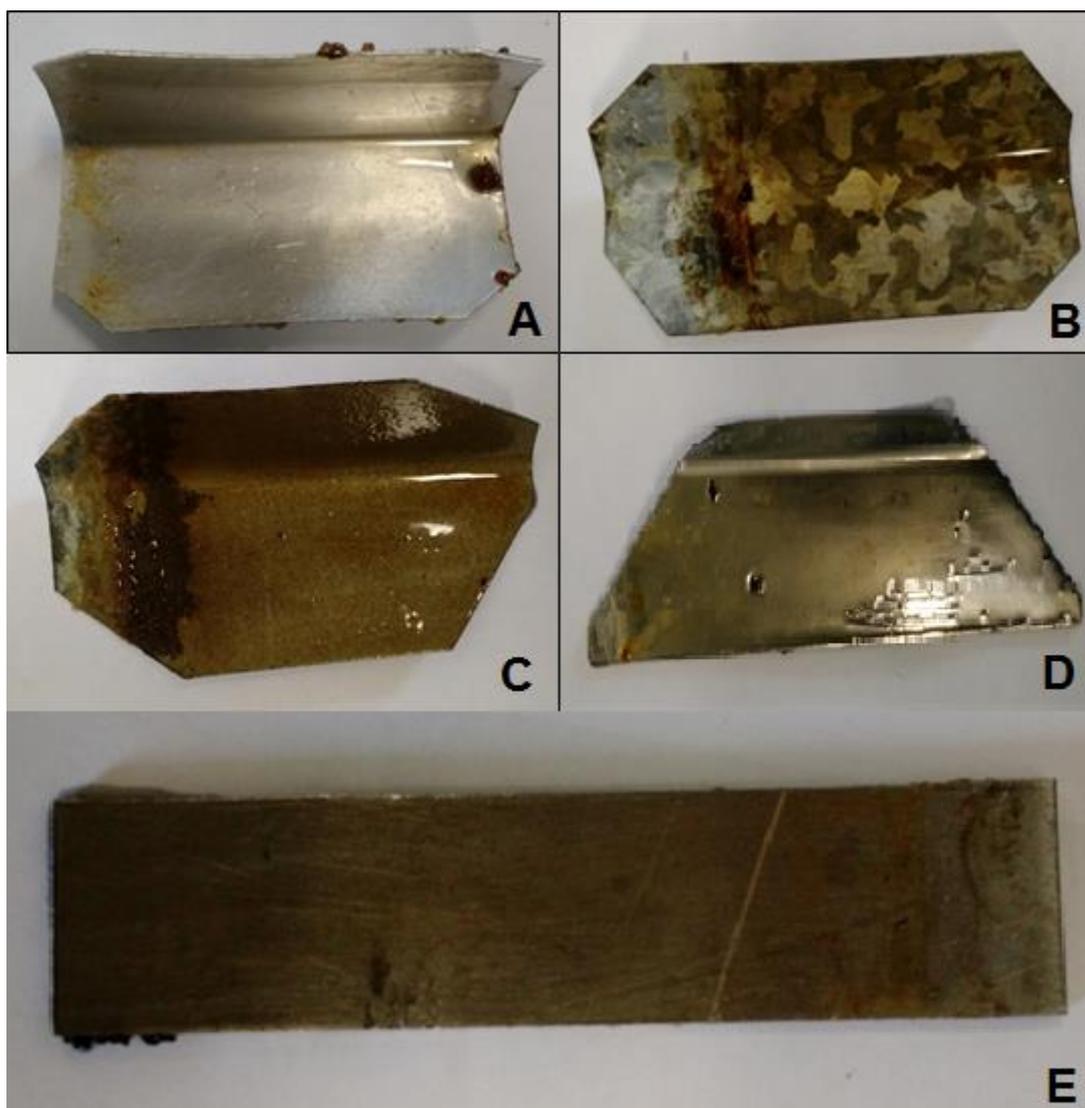


Figura 20 - (a, b, c, d, e) – ‘a’ alumínio, ‘b’ aço galvanizado, ‘c’ aço inox 430, ‘d’ aço inox 304, ‘e’ aço inox 316.

Nota-se que no alumínio (Figura 20 ‘a’) não houve corrosão, apenas sujeira e a parte gelatinosa da glicerina loira, no aço galvanizado tem (Figura 20 ‘b’), se vê um aspecto maior de corrosão, que é fácil de ver (vide manchas na chapa de metal e coloração), que houve corrosão, mas como não usamos um microscópio (limitações dos experimentos), não podemos definir o quanto e que tipo de corrosão se deu em tal metal. No aço inox 430 (Figura 20 ‘c’) podemos ver que houve leve corrosão na parte que estava na superfície do recipiente, a outra parte da mancha se dá devido à sujeira da glicerina (gelatinosa). Já nos aços inox 304 (Figura 20 ‘d’) e 316 (Figura 20 ‘e’), vê-se que não houve nenhum tipo de corrosão, vemos também a glicerina no seu aspecto mais gelatinoso. Vale ressaltar que na glicerina loira, formou-se uma camada gelatinosa fina, menos que na observada na glicerina bruta.

Na Figura 21 (‘a’ até ‘e’), veremos a ultima fileira do experimento de corrosão, as

chapas de metais que foram imersas na glicerina pura.

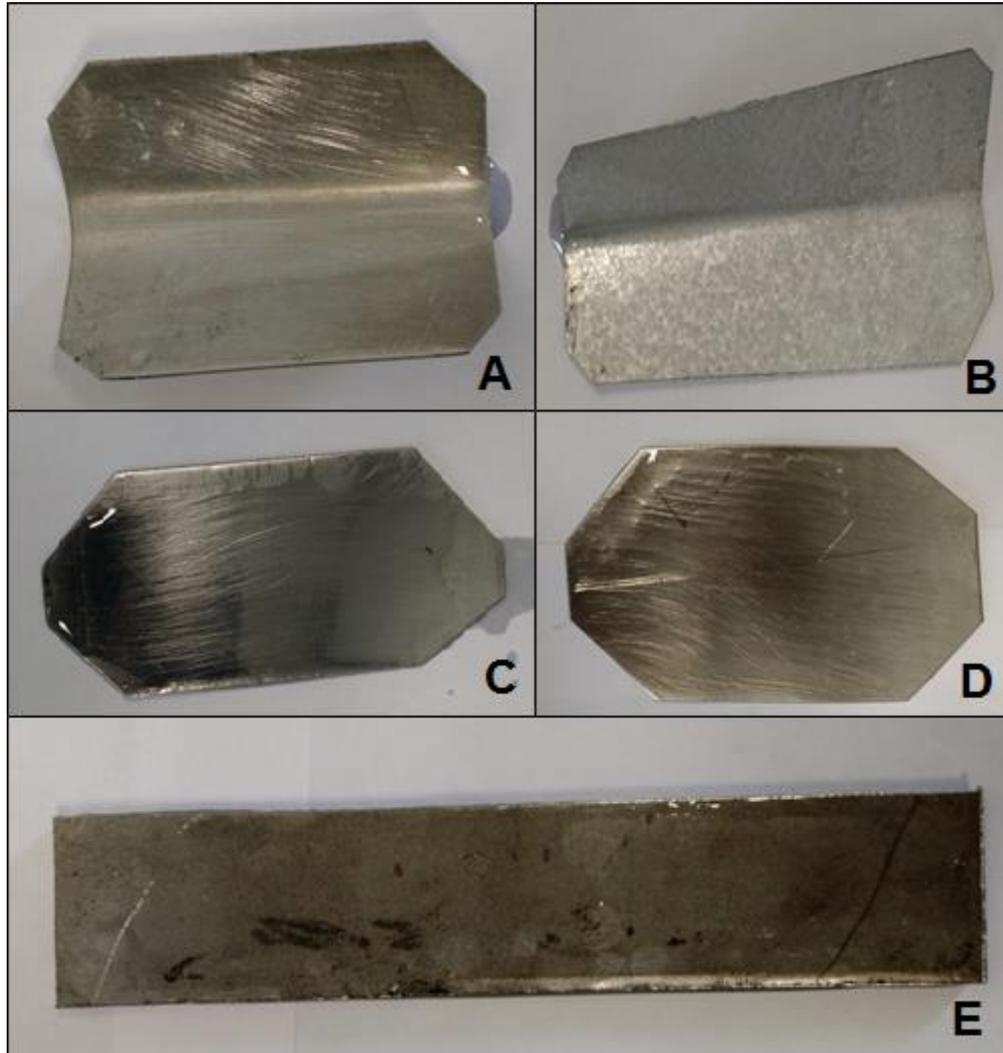


Figura 21 - (a, b, c, d, e) – ‘a’ alumínio, ‘b’ aço galvanizado, ‘c’ aço inox 430, ‘d’ aço inox 304, ‘e’ aço inox 316.

Nas placas imersas na glicerina pura, nota-se que não houve nenhum tipo de corrosão visível, e nem mesmo o aspecto gelatinoso, pois com a pura isso não acontece, e nem a sujeira, devido a sua coloração incolor.

Logo podemos dizer que a glicerina loira é a que mais apresenta corrosão nos materiais estudados, isto visto nas fotos tiradas no experimento e analisadas no laboratório. Em seguida temos a glicerina bruta, e posteriormente à pura (resultados pertinentes junto a literatura vista na revisão bibliográfica).

Pelos tipos de corrosões analisadas podemos dizer que houve corrosão por esfoliação (Se processa de forma paralela à superfície metálica. Frequentes em chapas ou componentes extrudados que tiveram seus grãos alongados e achatados, gerando condições para que

inclusões ou segregações, presentes no material, sejam transformadas devido ao trabalho mecânico, em plaquetas alongadas), baseado no que foi visto nas páginas 27 e 28.

#### 4.2 Análise do pH

Analisando as Figuras 22 e 23, pode-se dizer que o pH de ambas as glicerinas (loira e pura) foi 6, e na Figura 24 (glicerina bruta) o pH foi entre 13 e 14, resultados coerentes com os encontrados na literatura, quando foi feita a revisão bibliográfica. Esta diferença entre os pH, das glicerinas, deve-se a impurezas contidas nos resíduos glicéricos (bruta e loira), como ácidos graxos, água, sabão, dentre outras.

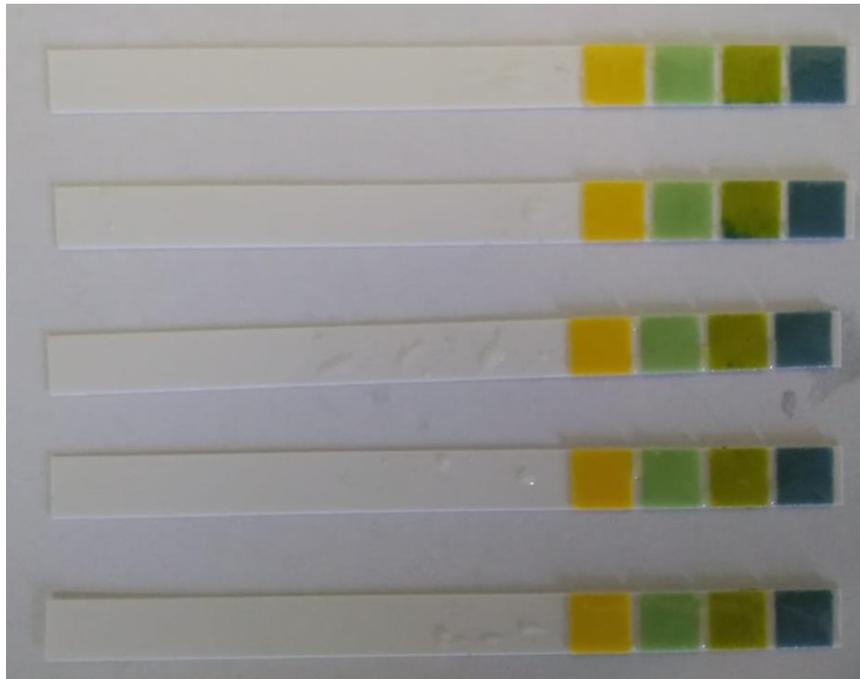


Figura 22 – Teste na glicerina pura.

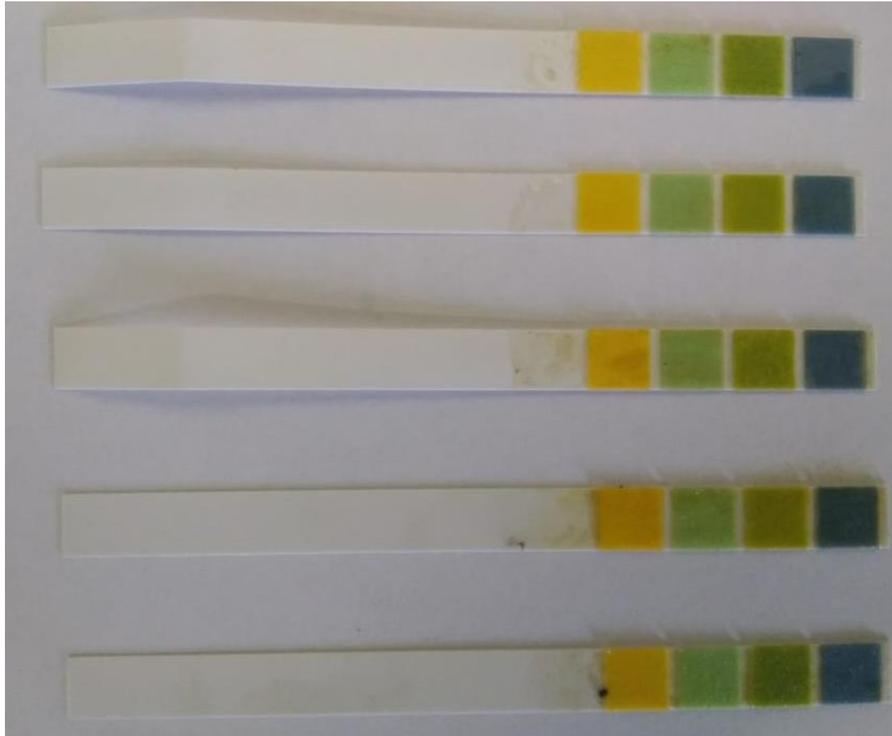


Figura 23 – Teste na glicerina loira.

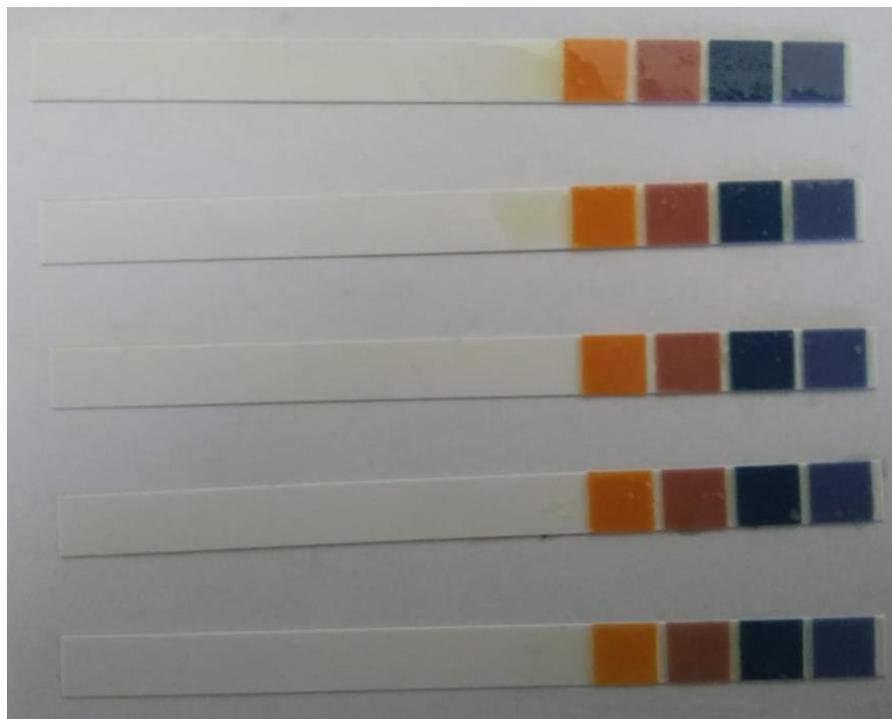


Figura 24 – Teste na glicerina bruta.

#### 4.3 - Experimento Viscosímetro de Stokes

Com a ajuda de dois técnicos da Universidade Federal da Grande Dourados, e os estagiários e alunos de Engenharia de Energia, lotados no bloco de laboratórios do curso de Engenharia de Energia, foi construído um viscosímetro de Stokes (Figuras 25 e 26) adaptado as nossas necessidades, para isso foi usado barras de ferro para esticar mangueiras de ‘nível’, mangueiras de nível, registros, funis, presilhas, (vide Figura 25).



Figura 25: Protótipo do viscosímetro de Stokes.

A mangueira é transparente, dois metros de comprimento, com uma polegada de diâmetro externo e 3/4 de polegada de diâmetro interno, quanto maior o diâmetro, mais fácil de dobrar, amassar, etc. Mas tinha que ser um de diâmetro grande mesmo senão haveria influência do pequeno diâmetro do tudo na medição da viscosidade.

Vale ressaltar que a relação entre o diâmetro interno da mangueira ( $D$ ) e o diâmetro da esfera ( $d$ ) é de:

$$\frac{d}{D} = \frac{10^3 \text{ mm}}{1,9 \cdot 10^2 \text{ mm}} = \frac{1}{19} \quad (8)$$

Foi esticada bem, colocando a armação metálica na parede como podemos ver, e colocou presilhas para garantir o aperto, pois no começo ocorreu pequenos vazamentos, e foi usada uma válvula grande o suficiente para encaixar bem com a mangueira.

A primeira montagem do viscosímetro foi realizada, com mangueiras de diâmetro menor. Após as primeiras tentativas do experimento, foi verificado com os cálculos realizados, que com o pequeno diâmetro da mangueira de nível, a superfície da mangueira estava interferindo nos resultados, uma vez que ela exercia uma força, sobre a esfera, devido aos vórtices criados pela esfera que descia ao meio da mangueira, e muitas vezes a esfera, encostava-se à parede. Logo se teve de fazer a substituição de tal mangueira por uma de maior diâmetro, assim melhorando todo o desempenho (aproximando-se da literatura existente) e resultado do experimento.



Figura 26: Protótipo do viscosímetro de Stokes.

Após a montagem, era preciso usar as esferas para poder realizar o experimento, as esferas usadas no trabalho, foram obtidas em oficinas de manutenções de equipamentos odontológicos, rolamentos substituídos por novos, e esses trocados foram cedidos pela empresa de manutenção preventiva de brocas.

No início foram utilizadas esferas de maior diâmetro (de 0,002 a 0,004m), onde nenhum dos resultados foi satisfatório (discrepância muito grande com a literatura existente, e  $Re > 1$ ). Essas esferas eram visíveis em todas as glicerinas, pois no início também foi utilizado à mangueira de menor diâmetro, logo era muito difícil à visualização das esferas (maiores) na mangueira (menor), portanto a troca por esferas de menor diâmetro naquele momento seria muito difícil, por isso, a troca de ambos os diâmetros se fez necessário, tanto o da mangueira, devido às interferências nos resultados, quanto o das esferas, que têm 0,001 metros (1 mm).

Os rolamentos são tão pequenos que não aparecem o nome do fabricante, nem o modelo do rolamento, isso se deve a ser um rolamento especial, que não aparece nos catálogos de empresas tradicionais, como a NSK, SKF, FAG, entre outras.

Não se teve custos ao obter os rolamentos, eles iriam para o lixo, pois é feita manutenção preventiva dos equipamentos odontológicos, mesmo que os rolamentos estejam em boas dimensões (vide Figura 27).

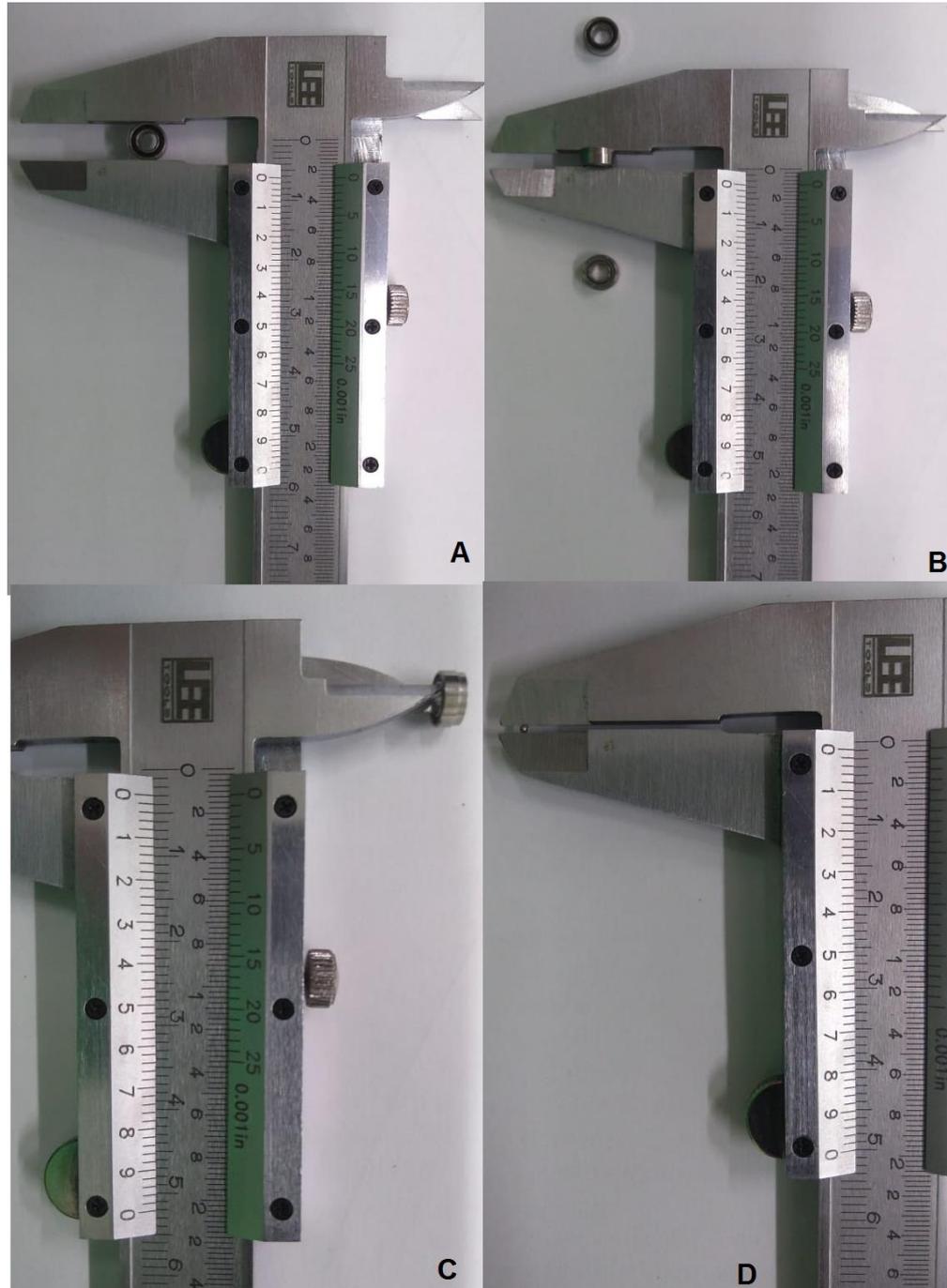


Figura 27 - (a, b, c, d) – Medições dos diâmetros dos rolamentos e esferas. ('a' D externo), ('b' largura), ('c' D interno), ('d' D esfera).

Na oficina mecânica da Engenharia de Energia, os rolamentos foram colocados em ‘morsas’ para serem destruídos, e as esferas retiradas do seu interior, para serem pesadas posteriormente na balança que tem 4 (quatro) casas decimais de precisão, no LENER (Laboratório de Energias Renováveis), segue as fotos da pesagem das esferas de diferentes diâmetros (Figura 28) e algumas amostram prontas para serem utilizadas (Figura 29).



Figura 28 - Balança com as esferas de diferentes diâmetros.



Figura 29 - Amostra de esferas já pesadas.

A próxima etapa deste experimento de viscosidade foi à medição do tempo gasto pelas esferas para percorrer determinados trechos marcados no tubo.

Para fins de cálculo foi desprezada a distância no início e no final do tubo, pois no início tem de se aguardar uma distância para a velocidade de descida estabilizar-se e no final há também interferência de outros fatores (fundo do viscosímetro (onde esta a válvula de

saída do fluido testado nas esferas), paredes da mangueira, funil (início da mangueira)).

Figura 30 apresenta fotos das esferas descendo pelo fluido dentro do tubo.



Figura 30 - Esferas descendo pelo tubo do viscosímetro de Stokes.

Vale ressaltar que tal experimento foi realizado por diversas vezes, uma vez que foram realizadas várias mudanças, até conseguir o melhor resultado possível, como já relatado anteriormente no texto.

A partir dos dados das (Tabelas 2 e 3) que foram encontrados por medições ou busca em literaturas, fizemos as análises pertinentes.

Nota-se que a variação da viscosidade (cinemática e dinâmica) da glicerina com a temperatura é muito grande (Tabela 4).

Com todos os dados em mãos, os cálculos, foram desenvolvidos e as discussões sobre os resultados (Tabelas 5 a 8)

O experimento foi realizado, com todo o equipamento pronto para realização, subia-se na escada e imergia a mão junto à esfera no funil com glicerina (não jogava ou soltava para não ocorrer interferência), com a estabilização do fluido soltava-se a esfera e ela ia percorrendo a mangueira na parte superior até a estabilização e conseqüentemente a tomada de tempo.

TABELA 2 – Dados do viscosímetro de Stokes.

<b>Distância entre os pontos inicial e final</b>	0,6	m
<b>Diâmetro da esfera</b>	0,001	m
<b>Massa específica do líquido</b>	1217,7	kg/m <sup>3</sup>
<b>Volume esfera</b>	5,236	10 <sup>-10</sup> m <sup>3</sup>
<b>Diâmetro externo da mangueira</b>	2,53	10 <sup>-2</sup> m
<b>Diâmetro interno da mangueira</b>	1,9	10 <sup>-2</sup> m

TABELA 3 – Massas específicas dos fluidos estudados (kg/m<sup>3</sup>).

<b>Glicerina pura (99% grau USP)</b>	1253,8
<b>Glicerina loira</b>	1217,7
<b>Glicerina bruta</b>	1095,7

Fonte: Santos (2017)

TABELA 4 – Dados de literatura existente.

Temperatura(°C)	Viscosidade	
	Cinemática (mm <sup>2</sup> /s)	dinâmica (N.s/m <sup>2</sup> )
20	1119,86	1,363
22,5	893,56	1,088
25	718,63	0,875
27,5	582,33	0,709
30	475,31	0,578
32,5	390,66	0,475
35	323,23	0,393
40	225,48	0,274
50	117,50	0,143
60	66,31	0,080
70	40,08	0,048
80	25,75	0,031
90	17,50	0,021

Fonte: Segur e Oberstar (1951)

TABELA 5 – Resultados Glicerina Bruta a 27°C.

Trecho	Massa ( $10^6$ kg)	Massa específica da esfera ( $10^{-3}$ kg/m <sup>3</sup> )	Peso ( $10^5$ N)	Força de arrasto ( $10^5$ N)	Velocidade ( $10^2$ m/s)	Viscosidade dinâmica (N.s/m <sup>2</sup> )	Número de Reynolds (-)
1	1,6	3,1	1,570	1,007	2,335	0,0458	0,5588
	1,6	3,1	1,570	1,007	2,388	0,0448	0,5844
	1,6	3,1	1,570	1,007	2,362	0,0452	0,5721
	1,6	3,1	1,570	1,007	2,348	0,0455	0,5654
	1,6	3,1	1,570	1,007	2,335	0,0458	0,5588
2	1,6	3,1	1,570	1,007	2,338	0,0457	0,5605
	1,6	3,1	1,570	1,007	2,449	0,0436	0,6149
	1,6	3,1	1,570	1,007	2,407	0,0444	0,5938
	1,6	3,1	1,570	1,007	2,364	0,0452	0,5730
	1,6	3,1	1,570	1,007	2,336	0,0458	0,5592
3	1,6	3,1	1,570	1,007	2,273	0,0470	0,5295
	1,6	3,1	1,570	1,007	2,333	0,0458	0,5579
	1,6	3,1	1,570	1,007	2,411	0,0443	0,5957
	1,6	3,1	1,570	1,007	2,336	0,0457	0,5596
	1,6	3,1	1,570	1,007	2,322	0,0460	0,5527
						<b>Média:</b> 0,0454	<b>Média:</b> 0,5691
						<b>Desvio Padrão:</b> 0,00082	<b>Desvio Padrão:</b> 0,02090

TABELA 6 - Resultados Glicerina Loira a 27°C.

Trecho	Massa (10 <sup>6</sup> kg)	Massa específica da esfera (10 <sup>-3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	Peso (10 <sup>5</sup> N)	Força de arrasto (10 <sup>6</sup> N)	Velocidade (10 <sup>3</sup> m/s)	Viscosidade dinâmica (N.s/m <sup>2</sup> )	Número de Reynolds (-)
	1,5	2,9	1,472	8,460	5,456	0,1646	0,0404
	1,6	3,1	1,570	9,441	5,665	0,1769	0,0390
1	1,5	2,9	1,472	8,460	5,716	0,1571	0,0443
	1,5	2,9	1,472	8,460	5,894	0,1524	0,0471
	1,6	3,1	1,570	9,441	5,716	0,1753	0,0397
	1,5	2,9	1,472	8,460	5,460	0,1645	0,0404
	1,6	3,1	1,570	9,441	5,617	0,1784	0,0383
2	1,5	2,9	1,472	8,460	5,715	0,1572	0,0443
	1,5	2,9	1,472	8,460	5,937	0,1513	0,0478
	1,6	3,1	1,570	9,441	5,714	0,1754	0,0397
	1,5	2,9	1,472	8,460	5,373	0,1672	0,0391
	1,6	3,1	1,570	9,441	5,414	0,1851	0,0356
3	1,5	2,9	1,472	8,460	5,502	0,1632	0,0410
	1,5	2,9	1,472	8,460	5,884	0,1527	0,0469
	1,6	3,1	1,570	9,441	5,455	0,1837	0,0362
						<b>Média:</b> 0,1670	<b>Média:</b> 0,0413
						<b>Desvio Padrão:</b> 0,01154	<b>Desvio Padrão:</b> 0,00387

TABELA 7 – Resultados Glicerina Pura a 27°C.

Massa ( $10^6$ kg)	Massa específica da esfera ( $10^{-3}$ kg/m <sup>3</sup> )	Peso ( $10^5$ N)	Força de arrasto ( $10^5$ N)	Velocidade ( $10^3$ m/s)	Viscosidade dinâmica (N.s/m <sup>2</sup> )	Número de Reynolds (-)
1,800	3,438	1,766	1,122	5,680	0,2097	0,0340
1,800	3,438	1,766	1,122	5,948	0,2002	0,0372
1,800	3,438	1,766	1,122	6,124	0,1945	0,0395
1,800	3,438	1,766	1,122	6,031	0,1974	0,0383
1,800	3,438	1,766	1,122	6,224	0,1913	0,0408
					<b>Média:</b> 0,1986	<b>Média:</b> 0,0380
					<b>Desvio Padrão:</b> 0,00701	<b>Desvio Padrão:</b> 0,00259

TABELA 8 – Resultados Glicerina Pura a 23°C.

Massa ( $10^6$ kg)	Massa específica da esfera ( $10^{-3}$ kg/m <sup>3</sup> )	Peso ( $10^5$ N)	Força de arrasto ( $10^5$ N)	Velocidade ( $10^3$ m/s)	Viscosidade dinâmica (N.s/m <sup>2</sup> )	Número de Reynolds (-)
1,800	3,438	1,766	1,122	4,712	0,2527	0,0234
1,800	3,438	1,766	1,122	4,800	0,2481	0,0243
1,800	3,438	1,766	1,122	5,065	0,2351	0,0270
1,800	3,438	1,766	1,122	5,081	0,2344	0,0272
1,800	3,438	1,766	1,122	4,796	0,2483	0,0242
					<b>Média:</b> 0,2411	<b>Média:</b> 0,0258
					<b>Desvio Padrão:</b> 0,00984	<b>Desvio Padrão:</b> 0,00212

Comparando os três tipos de glicerina com na mesma temperatura (Tabelas 5 a 7), se tem a com maior viscosidade (dinâmica) a glicerina pura, seguida da loira e, a glicerina bruta, com o Re na ordem contrária, glicerina bruta, loira e pura.

Como se pode observar a viscosidade aumenta com a diminuição da temperatura, a diferença entre as gliceras puras (Tabelas 7 e 8) somente com a diferença de 4°C (27 para 23°C), nota-se uma mudança dos valores obtidos da viscosidade dinâmica, conseqüentemente o Re também se altera.

Com os resultados obtidos, mesmo com as limitações, teve-se a convicção de que tudo foi praticado da maneira exata, e mesmo assim os resultados não se aproximaram tanto dos da literatura existente, nota-se que é necessário a calibração e melhoria dos equipamentos utilizados.

#### 4.4 Limitações do projeto

Com todas as limitações existentes, não há como esfriar ou aquecer o fluido. Para tentar mudar a temperatura do glicerol foi usado apenas o ar condicionado, mas o tubo poderia ser montado em algum outro lugar (externo, laboratório com aquecedor e (ou) ar condicionado mais potente).

Formação de bolhas no tubo, quando colocasse o fluido no viscosímetro formam bolhas em toda a extensão do tubo, sendo assim o viscosímetro só pode ser usado no dia seguinte, senão pode haver interferência devido à essas bolhas.

Em misturas, a tendência das frações mais densas irem para o fundo do tubo, interferindo assim no resultado no caso da glicerina bruta e loira

Resultados discrepantes da literatura mesmo certificando-se que todos os procedimentos adotados estavam corretos. Por isso é bom fazer comparações com outros tipos de viscosímetros.

Temos de salientar, que se tivéssemos analisado todas as chapas de metais junto a um microscópio, poderíamos dizer o grau de corrosão em cada chapa de metal, pois o que vemos a olho nu, muitas vezes no microscópio pode ser diferente.

## CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

### 5.1 Considerações finais

Nos experimentos realizados neste trabalho, vimos que, a olho nu, conseguimos visualizar corrosão em algumas chapas metálicas, mas não podemos afirmar com clareza (mesmo tendo identificado pela literatura) qual o grau de corrosão que se teve nas chapas dos metais, portanto, podemos continuar tal experimento com maior investimento e melhorias na estrutura para análise.

Já no experimento de viscosidade, realizado no de viscosímetro de Stokes, chegamos à conclusão de que necessita-se de uma melhoria no protótipo, e também de calibração de todo equipamento, visto que foram realizados com a maior certeza de acerto, mas os resultados obtidos no experimento ficaram pouco um distante dos resultados previstos na literatura.

### 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Por conta da importância dos experimentos realizados para o curso de Engenharia de Energia da UFGD surgem melhorias que podem ser feitas como:

1. Comparar os resultados obtidos neste trabalho com outros viscosímetros. No futuro pretende-se adquirir ou projetar outros tipos de viscosímetros.
2. Uso de sensores de ultrassom conectados a uma interface, sendo esta conectada a um computador, para detectar esferas menores em fluidos diversos, em especial aqueles mais escuros como a glicerina bruta e loira, inclusive a glicerina pura.
3. Projeto de sistema de aquecimento e (ou) resfriamento ou manutenção da temperatura do fluido em viscosímetro de esfera, pois não pode aquecer ou esfriar o fluido a ser testado e imediatamente colocá-lo no tubo devido a formação de bolhas, por isso, a vantagem de se usar outros viscosímetros.
4. A proposta em inserir mais duas mangueiras de mesmas dimensões e, no mínimo, mesmos diâmetros. Assim é possível comparar a queda de esfera usando diferentes fluidos. Ou colocar mangueiras de diâmetros maiores utilizando os mesmos fluidos, para comparar o desempenho do viscosímetro de Stokes. Mas temos que ver se é possível encontrar mangueiras de diâmetros maiores, mas que sejam transparentes, pois há mangueiras com malha de nylon, que serve para garantir a resistência mecânica. E como o nylon não é transparente, fica difícil (mas não

impossível) de ver a esfera caindo, esta malha de nylon não ocupa totalmente a superfície da mangueira, a superfície da mangueira alterna entre o transparente da mangueira e o branco opaco da malha de nylon.

5. Nós próximos experimentos, compararemos resultados obtidos com estas esferas de 1 mm com esferas maiores, mas desde que o número de Reynolds não supere uma unidade (provavelmente os resultados não ficaram conforme esperado por causa da superfície da esfera, que é muito pequena). Por isso a importância de obter mais resultados utilizando esferas de diferentes dimensões e compará-los. Claro que, o ideal é que as viscosidades fossem iguais, independente do tamanho da esfera, mas na prática ainda não podemos confirmar.
6. Sobre as esferas, mesmo com materiais diferentes e massas diferentes (esferas de aço são mais pesadas às de cerâmica), os resultados teriam que ser os mesmos.
7. Uso de esferas de rolamentos de diferentes diâmetros desde que  $Re > 1$ .
8. Estudar diferentes diâmetros internos de mangueiras, inclusive usar mangueiras mais grossas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, F. A. F. Condições de pré-tratamento do glicerol proveniente da produção de biodiesel utilizando planejamento experimental plackettburman. In: **Encontro Latino Americano De Iniciação Científica - INIC**, 15., 2011. Anais... São José dos Campos, SP: Universidade do Vale do Paraíba, 2011. Disponível em: <[http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\\_2011/anais/arquivos/0236\\_0543\\_01.pdf](http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2011/anais/arquivos/0236_0543_01.pdf)>. Acesso em: 28 Outubro de 2018.

ASHER, D. R.; SIMPSON D. W. Glycerol purification by ion exclusion. **Journal of Physical Chemistry** 60 (5), p. 518-521, 1995.

ÁVILA FILHO, S.; MACHADO, A. S.; SANTOS, E. P. Purificação da glicerina bruta vegetal. **I Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia do Biodiesel**, 2006. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2006/Co-Produtos/Purificacao4.pdf>>. Acesso em: 3 de Novembro de 2018.

BEATRIZ, A. ARAÚJO, Y. J. K. LIMA, D.P. **Glicerol: um breve histórico e aplicação em sínteses estereosseletivas**. Campo Grande-MS : Química Nova, 2011. 34 v.

**BIODIESELBR Glicerina, o tamanho do problema** – Ano1, nº3 -Fev/Mar 2008.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Prentice Hall Brasil, 2008. 2 ed.

CARDOSO, M. **Corrosão**. 2018. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/quimica/corrosao/>>. Acesso em: 30 out. 2018.

COELHO, José Mauro Ferreira. **Perspectivas para o setor de biocombustíveis do Brasil em 2018**. 2018. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=1160888>>. Acesso em: 30 out. 2018.

CORDOBA, A.M. **Estudo da combustão direta da glicerina bruta e loira como alternativa de aproveitamento energético sustentável**. São Carlos - SP, 2011. 275f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2011.

CUBAS, J. L. Neutralização da glicerina bruta obtida pela transesterificação dos óleos de crambe, cárcamo e soja. In: **Congresso brasileiro de plantas oleaginosas, óleos, gorduras e biodiesel**, 7., 2010, Belo Horizonte - MG. Anais... Belo Horizonte: UFLA, 2010.

DE BONI, L. A. B. **Tratamento da glicerina bruta e subprodutos obtidos da reação de transesterificação de sebo bovino utilizada para a produção de biodiesel**. 2008. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), ULBRA, Canoas - RS, 2008. Disponível em: <[http://www.deboni.he.com.br/trabalho\\_de\\_boni.pdf](http://www.deboni.he.com.br/trabalho_de_boni.pdf)>. Acesso em: 25 de Outubro de 2018.

LARSEN, A. C. **Co-digestão anaeróbia de glicerina bruta e efluente de fecularia**. 2009. 55 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, Cascavel - PR, 2009. Disponível em: <<http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/cp114920.pdf>>. Acesso em: 31 de

Outubro de 2018.

MACEDO, C. C. S.; ABREU, F. R.; TAVARES, A. P.; ALVES, M. B.; ZARA, L. F.;

NASCIMENTO, Felipe Egydio Aguiar. ASPECTOS DO GLICEROL DISPONÍVEL COMERCIALMENTE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA. In: ENEPEX, 1., 2014, Dourados - Ms. **Anais...**. Dourados - Ms: Encontro de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2014. v. 1, p. 1 - 17. Disponível em: <<http://eventos.ufgd.edu.br/enepex/anais/arquivos/126.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

RUBIM J. C.; SUAREZ, P. A. Z. New heterogeneous metal-oxides based catalyst for vegetable oil trans-esterification. **Journal of Brazilian Chemical Society** 17, p. 1291-1296, 2006.

MARÇON, R. O. **Pré-tratamento da glicerina bruta gerada na produção de biodiesel por transesterificação de óleos vegetais e gordura animal**. 2010. 122 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia). Universidade Federal do Tocantins – UFT, Palmas - TO, 2010.

OLIVEIRA, F. C. C.; SUAREZ, P. A. Z.; SANTOS, W. L. P. **Biodiesel: Possibilidades e desafios**. Química Nova na Escola 8, p. 3-8, 2008.

ONGARATTO, Diego Paulo. Avaliação da Estabilidade à Oxidação e do Ponto de Entupimento de Filtro d Frio de Biodieseis Derivados de Blendas de Sebo Bovino dom Óleo de Soja: **Revista de Iniciação Científica da ULBRA**. 2012. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/326436146\\_avaliao\\_da\\_estabilidade\\_a\\_oxidacao\\_e\\_do\\_ponto\\_de\\_entupimento\\_de\\_filtro\\_a\\_frio\\_de\\_biodieseis\\_derivados\\_de\\_blendas\\_de\\_sebo\\_bovino\\_com\\_oleo\\_de\\_soja\\_Revista\\_de\\_Iniciacao\\_Cientifica\\_da\\_ULBRA\\_v\\_1\\_n\\_10\\_2012](https://www.researchgate.net/publication/326436146_avaliao_da_estabilidade_a_oxidacao_e_do_ponto_de_entupimento_de_filtro_a_frio_de_biodieseis_derivados_de_blendas_de_sebo_bovino_com_oleo_de_soja_Revista_de_Iniciacao_Cientifica_da_ULBRA_v_1_n_10_2012)>. Acesso em: 29 nov. 2018.

OPPE, E.E.G. **Desidratação por Destilação Azeotrópica da Glicerina obtida como Subproduto da Produção do Biodiesel**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, 2008. São Paulo – SP.

PEITER, G.C. ALVES, H. J. SEQUINEL, R. BAUTITZ, I. R. **Alternativas para o uso do glicerol produzido a partir do biodiesel**. 2016. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/46501>>. Acesso em: 22 out. 2018.

PEREIRA, Amanda Petronilha. **Resistência a corrosão de aços austeníticos utilizados em meio a glicerina ácida em uma planta de produção de biodiesel**. 2013. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2013. Cap. 3.

RÚPOLO, Marcelli Purcino; LEVENDOSK, Matheus Cellim. **Projeto De Planta Piloto Para Produção E Purificação Do Biodiesel**. 2015. 51 f. Monografia (Graduação em Engenharia Química), Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas-MG, 2015. Cap. 3. Disponível em: <[https://www.unifal-mg.edu.br/enhariaquimica/system/files/imce/TCC\\_2015\\_2/TCC%20%20II%20-%20Matheus%20e%20Marcelli.pdf](https://www.unifal-mg.edu.br/enhariaquimica/system/files/imce/TCC_2015_2/TCC%20%20II%20-%20Matheus%20e%20Marcelli.pdf)>. Acesso em: 30 nov. 2018.

SANTOS, Michel Acosta dos. **Análise técnica do uso do resíduo glicérico e da glicerina como fonte de energia renovável**. 2017. 102 f. Monografia (Graduação em Engenharia de

Energia) - Curso de Engenharia de Energia, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS, 2017.

SEGUR, J. B.; OBERSTAR, Helen E.. Viscosity of Glycerol and Its Aqueous Solutions. **Industrial & Engineering Chemistry**, [s.l.], v. 43, n. 9, p.2117-2120, set. 1951. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/ie50501a040>. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/pdfplus/10.1021/ie50501a040>>. Acesso em: 20 out. 2018.

SILVA, C. X. A.; GONÇALVES, V. L. C.; MOTA, C. J. A. **Gliceroquímica: Novos produtos e processos a partir da glicerina de produção de Biodiesel**. Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2009. Disponível em: <<http://submission.quimicanova.s bq.org.br/qn/qnol/2009/vol32n3/07-QN09048.pdf>>. Acesso em 2 de Novembro de 2018.

SPITZ, P.; FRIES, J. The hierarchy of patient outcomes. In: B. SPILKER (Ed.) **Quality of life assessments in clinical trials**. (p.25-35). New York-EUA: Raven Press, 1990.

SUAREZ, P. A. Z.; MENEGHETTI, S. M. P.; MENEGHETTI, M. R.; WOLF, C. R. Transformação de triglicerídeos em combustíveis, materiais poliméricos e insumos químicos: algumas aplicações da catálise na oleoquímica. **Química Nova** 30, p. 667-676, 2007.

TAQUEDA, M.E.S; OPPE, E.E.G; SALVAGNINI, W.M. Desidratação da Glicerina obtida a partir do Biodiesel por Destilação Azeotrópica com Tolueno. In: **4º Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas**, 2007, Varginha - MG. CD do Congresso, 2007.

UMPIERRE, A. P.; MACHADO, F.. **Glycerochemistry and Glycerol Valorization**. Revista Virtual de Química, [s.l.], v. 5, n. 1, p.107-109, 2013. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20130010>. Disponível em: <<http://rvq.s bq.org.br/imagebank/pdf/v5n1a10.pdf>>. Acesso em: 13 dez. 2018.

UNICAMP. **Determinação da Viscosidade EM 847 – Laboratório Calor e Fluidos - DE/FEM: Determinação da viscosidade: métodos de stokes e do copo ford**. 2018. Faculdade de Engenharia Mecânica; Departamento de Energia. Disponível em: <[http://aneste.org/em-847-laboratrio-de-calor-e-fluidos.html#6.\\_REFER%C3%84NCIAS.>](http://aneste.org/em-847-laboratrio-de-calor-e-fluidos.html#6._REFER%C3%84NCIAS.>). Acesso em: 21 out. 2018.

VIANA, M. B. **Produção de biogás a partir de glicerol oriundo de biodiesel**. Dissertação (Mestrado em Ciência)Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo- SP. 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-01092011-162845/pt-br.php>>. Acesso em 10 de Novembro de 2018.