

UNIVERSIDADE CATÓLICA DOM BOSCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA

Aperfeiçoamento de um tribômetro para avaliação do potencial  
de óleos vegetais como biolubrificantes

Autor: Daniel Augusto Dias Araujo  
Orientador: Profº. Dr. Marco Hiroshi Naka  
Co-Orientador: Profº. Dr. Uender da Costa Faria

Campo Grande  
Mato Grosso do Sul  
Agosto de 2018

UNIVERSIDADE CATÓLICA DOM BOSCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA

Aperfeiçoamento de um tribômetro para avaliação do potencial  
de óleos vegetais como biolubrificantes

Autor: Daniel Augusto Dias Araujo  
Orientador: Profº. Dr. Marco Hiroshi Naka  
Co-Orientador: Profº. Dr. Uender da Costa Faria

"Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM BIOTECNOLOGIA, no Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia da Universidade Católica Dom Bosco - Área de concentração: Biotecnologia Aplicada à Agropecuária "

Campo Grande  
Mato Grosso do Sul  
Agosto de 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Biblioteca da Universidade Católica Dom Bosco – UCDB, Campo Grande, MS, Brasil)

A663a Araujo, Daniel Augusto Dias  
Aperfeiçoamento de um tribômetro para avaliação do  
potencial de óleos vegetais como biolubrificantes  
/ Daniel Augusto Dias Araujo; orientador Marco Hiroshi  
Naka; coorientador Uender da Costa Faria.-- 2018.  
48 f.:

Dissertação (mestrado em biotecnologia) - Universidade Católica  
Dom Bosco, Campo Grande, 2018.

1. Lubrificação e lubrificantes. 2. Biomimetismo.  
3. Biotecnologia. I.Naka, Marco Hiroshi. II.Faria,  
Uender da Costa. III. Título.

CDD: 660.6



## **Aperfeiçoamento de um Tribômetro para Avaliação do Potencial de Óleos Vegetais como Biolubrificantes**

Autor: Daniel Augusto Dias Araújo


Orientador: Prof. Dr. Marco Hiroshi Naka

Coorientador: Prof. Dr. Uender da Costa Faria

TITULAÇÃO: Mestre em Biotecnologia

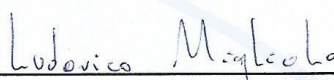
Área de concentração: Biotecnologia.

APROVADO em 31 de agosto de 2018.




---

Prof. Dr. Marco Hiroshi Naka - UCDB



---

Prof. Dr. Ludovico Migliolo - UCDB



---

Prof. Dr. Edilson Soares da Silveira - IFMS

## AGRADECIMENTOS

Ao apoio estrutural da Universidade Católica Dom Bosco - UCDB para utilização dos laboratórios, ao CNPq 445774/2014-2 e a Fundect 113/2014 pelo apoio financeiro por meio de bolsas e compra de materiais necessários para o desenvolvimento do projeto.

Aos professores do programa de pós-graduação em biotecnologia pelos conhecimentos transmitidos, ao professor Ludovico Migliolo pelos conselhos e auxílios no projeto, ao meu orientador Marco Hiroshi Naka pela paciência e pelos ensinamentos durante o projeto e ao meu co-orientador Uender da Costa Faria pelo auxílio no processo de colagem dos sensores.

Agradeço também a Ângela Alves Nunes, doutora em Biotecnologia e Biodiversidade da Rede Pró-Centro-Oeste pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS (2013-2018), pela ajuda nos experimentos e aos alunos de iniciação científica Rayanne Rocha Dadalto, Rodrigo Antonio Miranda e Jony Figueiredo Silva Filho, que auxiliaram o desenvolvimento do projeto.

## BIOGRAFIA DO AUTOR

DANIEL AUGUSTO DIAS ARAUJO, filho de Nizimar Araújo e Margaret Dias Araújo, nasceu na cidade de Campo Grande, estado de Mato Grosso do Sul, no dia 25 de dezembro de 1991. No segundo semestre do ano de 2010, ingressou no curso de Engenharia Mecatrônica pela Universidade Católica Dom Bosco, concluindo o mesmo em 2015. Durante este período, iniciou-se na área acadêmica como aluno bolsista (2013) no projeto de extensão Olimpíada Brasileira de Informática e Robótica (OBI/OBR), onde ministrou monitoria aos alunos do oitavo e nono ano do ensino fundamental para participarem da olimpíada. Posteriormente, participou como voluntário em dois projetos de iniciação científica (PIBIC), o primeiro sendo para avaliação do desempenho do processamento de imagens em sistema embarcado (primeiro semestre de 2014) e o segundo projeto (segundo semestre de 2014) para o desenvolvimento de um sistema de automação para agricultura de precisão, em que foi também utilizado como projeto de graduação (2015). Em abril de 2016 ingressou regularmente no Programa de pós-graduação em Biotecnologia na área de concentração Biotecnologia Aplicada à Agropecuária, na Universidade Católica Dom Bosco, realizando estudos na área de biolubrificação.

## SUMÁRIO

	Página
LISTA DE GRÁFICOS .....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xii
FIGURAS DO APÊNDICE .....	xiv
RESUMO .....	xv
ABSTRACT .....	xvii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS GERAIS.....	4
2.1 Objetivos específicos .....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 Biolubrificante .....	5
3.2 Superfície texturizada .....	6
3.3 Biotribologia .....	7
3.4 Tribômetro .....	7
3.5 Curva de Stribeck.....	10
3.6 Instrumentação .....	12
3.6.1 Extensômetro.....	12
3.6.2 Pastilha termoelétrica.....	13
3.6.3 Módulo Relé .....	13
3.6.4 Sensor de temperatura .....	14
3.6.5 Microcontroladores.....	14

3.6.6 Driver de potência .....	15
3.7 Filtro de Kalman.....	15
4. METODOLOGIA .....	17
4.1 Material.....	17
4.1.1 Extensômetro.....	17
4.1.2 Patilha termoeletrica.....	17
4.1.3 Módulo Relé .....	18
4.1.4 Sensor de temperatura .....	19
4.1.5 Microcontroladores.....	19
4.1.6 Circuito de acionamento do motor do tribômetro .....	21
4.1.7 Colagem dos extensômetros .....	22
4.1.8 Aquisição dos dados .....	22
4.2 Métodos.....	23
4.2.1 Processo de colagem dos extensômetros .....	23
4.2.2 Calibração do equipamento .....	24
4.2.2.1 Sensor de atrito .....	24
4.2.2.2 Controle e monitoramento de temperatura.....	25
4.2.3 Preparação do equipamento.....	26
4.2.4 Preparação dos dados.....	27
4.2.5 Tratamento dos dados .....	28
5. RESULTADOS .....	34
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	39
7. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO .....	42
APÊNDICE .....	49
Configuração da comunicação do software .....	49
Configuração e preparação para aquisição de dados .....	52
Aquisição e coleta dos dados.....	56



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Ensaios de atrito realizados com filtro e sob os mesmos parâmetros de teste.

Gráfico 2. Separações dos picos de coeficiente para análise. Picos 1, 2 e 3 positivos representam a ida (avanço) do corpo de prova sobre a superfície. Picos 4, 5 e 6 negativos representam a volta (retorno) do corpo de prova sobre a superfície.

Gráfico 3. Média de coeficiente de atrito sob os mesmos parâmetros e com desvio padrão de amostras.

Gráfico 4. Média de coeficiente de atrito sob os mesmos parâmetros e com desvio padrão de população.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplos de topografia de superfície texturizada; esquerda, vistas em perspectiva; direita, perfis de linha.

Figura 2. Dois principais tipos de tribômetro com carga aplicada perpendicular à superfície; (a) pino-sobre-disco limitado a um sentido de rotação e (b) pino-sobre-prato com movimento recíproco linear (vai e vem).

Figura 3. Coeficiente de atrito nos testes com óleo biodiesel B5 (soja), óleo diesel convencional, óleo de mamona e óleo de coco.

Figura 4. Tribômetro - vista frontal com indicação do sentido de atuação da força normal e força de atrito (a) e ilustração da vista lateral com detalhe do contato entre a superfície texturizada e o corpo de prova (b).

Figura 5. Curva de Stribeck dividida pelas três regiões de lubrificação. Relação entre coeficiente de atrito e número de Sommerfeld (S).

Figura 6. Localização de fixação dos extensômetros do tribômetro; sensor da força de atrito (a) e sensor da força normal (b).

Figura 7. Princípio de funcionamento da pastilha termoelétrica.

Figura 8. Princípio de chaveamento da ponte h; primeira etapa fechamento das chaves S1 com um sentido de corrente (a) e segunda etapa fechamento das chaves S2 com sentido de corrente oposto (b).

Figura 9. Extensômetro Kyowa KFG-3-120-C1-11.

Figura 10. Fixação da pastilha termoelétrica de efeito Peltier no recipiente.

Figura 11. Módulo Relé.

Figura 12. Sensor de temperatura DS18B20.

Figura 13. Arquitetura do Arduino MEGA 2560.

Figura 14. Kit Control Chip com microcontrolador AT89S52.

Figura 15. Circuito de acionamento do motor do tribômetro com interface para ajuste de parâmetros dos testes de atrito.

Figura 16. Kit de extensometria Lynx modelo ADS0500-8.

Figura 17. Pendrive para acesso ao software.

Figura 18. Calibração dos sensores da força de atrito e força normal.

Figura 19. Circuito de controle e monitoramento da temperatura do recipiente com óleo vegetal.

Figura 20. Montagem da bancada de testes com circuito de acionamento do motor (a), circuito de controle e monitoramento da temperatura do recipiente (b) e kit de extensometria para aquisição dos dados (c).

Figura 21. Aplicação do filtro de Kalman no teste de atrito.

Figura 22. Superfícies utilizadas nos ensaios de atrito. Texturização da pata da lagartixa em formato circular (a), asa da coruja em perfil ramificado (b) e superfície lisa (c).

Figura 23. Sensores de medição de deformação substituídos.

Figura 24. Coeficientes de atrito no avanço (a) e no retorno (b) do corpo de prova sobre as superfícies texturizada. Testes com a superfície da pata da lagartixa com perfil circular (1), superfície da asa da coruja em perfil ramificado (2) e superfície lisa (3).

## LISTA DE ABREVIATURAS

$\mu$  - Coeficiente de atrito.

$\eta$  – Viscosidade.

°C – Grau Celsius.

A/D – Conversor analógico para digital.

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

DC – Direct Current (Corrente Contínua).

DP A – Desvio padrão de amostras.

EEPROM - Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory (memória somente leitura programável e apagável eletricamente).

Fa – Força de atrito.

F<sub>n</sub> – Força normal.

FUNDECT – Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul.

g – Grama.

HFRR - High Frequency Reciprocating Rig (equipamento recíproco de alta frequência).

Hz – Hertz.

IP – Internet protocol adress (endereço de protocolo da internet).

K – Ganho.

kB – Quilobyte.

m/s<sup>2</sup> - Metro por segundo ao quadrado.

MHz – Mega Hertz.

min – Minuto.

mm – Milímetro.

mm/s – Milímetro por segundo.

mN – Mili Newton.

mV – Mili Volt.

P – Erro da covariância.

Pe – Carga aplicada.

Q – Covariância dos valores dos estados.

R – Covariância dos valores das saídas.

RAM – Random Access Memory (memória de acesso aleatório).

$R^2$  - Coeficiente de determinação.

S – Sommerfeld.

V – Volts.

Ve – Velocidade.

$x_1$  – Estimativa.

z – Série de medições.

## FIGURAS DO APÊNDICE

Figura A1. Configuração do IP de comunicação do computador que será conectado ao kit de extensometria para aquisição dos dados.

Figura A2. Configuração do IP do drive de aquisição para comunicação com o computador.

Figura A3. Configuração da rede de comunicação entre o computador e o kit de extensometria.

Figura A4. Parâmetros para aquisição dos dados dos testes de atrito.

Figura A5. Configuração das entradas analógicas do kit de extensometria.

Figura A6. Calibração dos canais utilizados do kit de extensometria.

Figura A7. Simulação de aplicação da força normal.

Figura A8. Dados do ensaio de atrito.

Figura A9. Propriedades do gráfico dos testes de atrito.

Figura A10. Exportação de dados dos testes de atrito.

## RESUMO

Tem crescido consideravelmente o estudo de novos lubrificantes que sejam menos agressores ao meio ambiente e que atendam algumas demandas específicas. O estudo do atrito, desgaste e lubrificação em materiais e sistemas biológicos é chamado de biotribologia. Com este estudo podemos avaliar as condições de aplicação de óleos vegetais em lubrificação. Esta aplicação nos traz a vantagem de ser menos agressivo ao meio ambiente devido à baixa toxicidade dos óleos vegetais, comparado aos óleos minerais e sintéticos. Este projeto tem por objetivo aperfeiçoar um equipamento responsável por fazer testes de atrito, chamado tribômetro. Estes testes avaliam o potencial de aplicação de um determinado óleo em lubrificação. Em testes iniciais com o tribômetro, verificou-se a necessidade de aperfeiçoamento do equipamento para uma maior precisão nos resultados. Este aperfeiçoamento consiste em testes de repetibilidade e avaliações do estado de seus componentes eletrônicos, substituindo o necessário, com o intuito de reduzir os níveis de ruídos. Foi constatado, a partir de testes de repetibilidade, que os sensores que coletavam os dados estavam danificados, talvez devido a instalação de forma inadequada, não conseguindo fornecer resultados confiáveis, logo tiveram de ser substituídos, passando por um cuidadoso processo de colagem e, para verificação da confiabilidade, os sensores passaram novamente por testes de repetitividade. Com os dados de atrito, calcula-se o coeficiente de atrito dos óleos e com isso o desempenho de lubrificação. Neste desempenho, a viscosidade é um fator que afeta significativamente a lubrificação, devido sua forte influência da temperatura. Para controlar este fator, foi melhorado um sistema eletrônico para o controle da temperatura, utilizando pastilhas termoelétricas de efeito Peltier para alteração da temperatura dos óleos, juntamente com sensor de temperatura encapsulado para o monitoramento em tempo real da temperatura do óleo biolubrificante durante os testes. Foi constatado que o circuito de acionamento da pastilha termoelétrica ocasionava queima de componentes eletrônicos, devido à alta passagem de corrente elétrica, próxima de 2 Amperes. Para solução deste problema, o circuito de

acionamento da pastilha foi substituído por um relé de acionamento em que liga ou desliga o fluxo de corrente elétrica da pastilha conforme necessário. Para este sistema de controle de temperatura, foi utilizado um arduíno Mega 2560 para a comunicação entre o sensor de temperatura e a pastilha termoelétrica, acionada a partir de um relé também conectado ao arduíno. Com as manutenções e aperfeiçoamentos do tribômetro, foram feitos testes com óleo de soja para que se tenha um controle para futuros testes com outros óleos vegetais. Foram feitos cinco testes em cinco variações de temperatura e em três superfícies diferentes. As faixas de temperatura foram 25, 30, 35, 40 e 45 °C. As superfícies utilizadas foram obtidas a partir de impressão 3D. Com isso, obteve-se uma superfície lisa sem textura para o controle, uma superfície com textura da pata da lagartixa com perfil circular e uma superfície com textura da asa da coruja com perfil ramificado. Esta última apresentou menor coeficiente de atrito até 35 °C e depois ficou similar com a superfície de controle. Como a intenção é reduzir o coeficiente de atrito, qualquer superfície com coeficiente maior que o coeficiente da superfície de controle é descartado. Portanto, devido ao menor coeficiente de atrito até certa temperatura, a superfície com textura da asa da coruja com perfil ramificado foi a que melhor se comportou. Como pode ser observado nos resultados, a volta do corpo de prova gerou, em sua maioria, maior coeficiente de atrito do que na ida. Esse resultado pode ter sido influenciado devido ao sentido de impressão em que a impressora 3D trabalha, deixando pequenas “saliências microscópicas” na texturização. Como o objetivo era aperfeiçoar o equipamento de medição de atrito, os testes foram conclusivos e confirmaram a confiabilidade do tribômetro.

Palavras-chave: Biomimetismo; Biolubrificante; Tribômetro.



## ABSTRACT

There has been considerable growth in the study of new lubricants that are less aggressive to the environment and meet some specific demands. The study of friction, wear and lubrication in biological materials and systems is called biotribology. With this study we can evaluate the conditions of application of vegetable oils in lubrication. This application brings us the advantage of being less aggressive to the environment due to the low toxicity of the vegetable oils, compared to the mineral and synthetic oils. This project aims to perfect a team responsible for making friction tests, called tribometer. These tests evaluate the application potential of a particular oil in lubrication. In initial tests with the tribometer, the need for improvement of the equipment was verified for a greater precision in the results. This improvement consists of repeatability tests and evaluations of the state of its electronic components, replacing what is necessary, in order to reduce noise levels. It was found from repeatability tests that the sensors that collected the data were damaged, perhaps due to improper installation, not being able to provide reliable results, soon had to be replaced, through a careful gluing process and, for reliability, the sensors were again tested for repeatability. With the friction data, the coefficient of friction of the oils is calculated and thus the lubrication performance. In this performance, viscosity is a factor that significantly affects lubrication due to its strong influence of temperature. To control this factor, an electronic system for temperature control has been improved, using peltier thermoelectric pellets to change the temperature of the oils, together with encapsulated temperature sensor for the real-time monitoring of the biolubricant oil temperature during the tests. It was verified that the circuit of the activation of the thermoelectric pellet caused the burning of electronic components, due to the high electric current passing, close to 2 Amperes. To solve this problem, the chip drive circuit has been replaced by a drive relay in which it turns the electric current flow of the chip on or off as needed. For this temperature control system, a Mega 2560 arduino was used for the communication between the temperature

sensor and the thermoelectric insert, driven from a relay also connected to the arduino. With the maintenance and improvements of the tribometer, tests were done with soybean oil to have a control for future tests with other vegetable oils. Five tests were done on five temperature variations and on three different surfaces. The temperature ranges were 25, 30, 35, 40 and 45 °C. The surfaces used were obtained from 3D printing. This yielded a smooth textureless surface for control, a textured surface of the circular-profile gecko's paw, and a textured surface of the owl's wing with a branched profile. The latter presented a lower coefficient of friction up to 35 °C and then it was similar to the control surface. Since the intention is to reduce the coefficient of friction, any surface with coefficient greater than the coefficient of the control surface is discarded. Therefore, due to the lower coefficient of friction up to a certain temperature, the textured surface of the wing of the owl with branched profile was the one that best behaved. As can be observed in the results, the return of the test specimen generated, for the most part, a higher coefficient of friction than in the one going. This result may have been influenced due to the printing sense in which the 3D printer works, leaving small "microscopic protrusions" in the texturing. As the objective was to perfect the friction measurement equipment, the tests were conclusive and confirmed the reliability of the tribometer.

Keywords: Biomimetism; Biolubricant; Tribometer.

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de óleos vegetais como biolubrificantes tem como vantagem, o fato de serem menos agressivos ao meio ambiente, comparados aos óleos minerais e sintéticos, devido à sua baixa toxicidade (DEARNLEY, 2007). Segundo Berti e colaboradores (2009), um dos problemas da contaminação do ambiente aquático é devido a pequena solubilidade dos óleos e graxas. Segundo a norma da ABNT NBR 10004 sobre resíduos sólidos, os óleos lubrificantes constituem a Classe I – perigosos, considerado tóxico devido a um grande número de constituintes perigosos.

Desta forma, tem crescido consideravelmente o estudo de matérias-primas para serem utilizadas como lubrificantes que agredam menos o meio ambiente (HEIKAL et al., 2017; KANIA et al., 2015; NAGENDRAMMA e KAUL, 2012; SRIPADA et al., 2013). Portanto, o estudo de novos biolubrificantes são de grande interesse para o atendimento de demandas, como por exemplo, fluidos de perfuração por conta das várias propriedades físico-químicas que reduzem o atrito e também pela alta biodegradabilidade (KANIA et al., 2015), para as indústrias têxteis e de curtumes pelo baixo impacto ambiental (LAZZERI et al., 2006), aplicações automotivas (MOBARAK et al., 2014), ou em aplicações que podem apresentar riscos para o meio ambiente (NAGENDRAMMA e KAUL, 2012), tais como vazamento de óleo de máquinas que operam em rios ou canais, ou até mesmo em terras agrícolas.

Para a utilização de óleos vegetais como lubrificante, é necessário analisar seu potencial de aplicação a partir de uma avaliação de suas características tribológicas. Estas características estão relacionadas a tribologia, que é a ciência que estuda a lubrificação, cujas características mais importantes são o atrito e o desgaste. O termo tribologia vem do grego *tribos* que significa deslocamento relativo e *logos* que significa estudo, remetendo ao estudo do atrito e do desgaste (HIRAYAMA, 2012).

A avaliação das características tribológicas depende de testes de atrito, para avaliar o nível de atrito com o uso de óleo vegetal ou de desgaste, por meio da taxa de desgaste. A questão do desgaste está mais atrelada às propriedades mecânicas superficiais, embora o fluido lubrificante também tenha um papel importante. Desta forma, para avaliação de um lubrificante, o atrito fornece informações mais relevantes. Válido ressaltar que o biolubrificante isoladamente não é suficiente para uma avaliação tribológica, visto que há uma interação entre fluido (lubrificante) e superfícies que influenciam no desempenho do atrito e do desgaste, ou seja, da lubrificação como um todo.

O objetivo deste projeto é aperfeiçoar um equipamento de medição de atrito, chamado tribômetro, para os testes de atrito com óleo vegetal, de maneira que se melhore a confiabilidade dos dados. Este aperfeiçoamento consiste em testes de repetibilidade e avaliações do estado de seus componentes eletrônicos, substituindo o necessário, com o intuito de reduzir os níveis de ruídos. Para os testes de atrito, foram utilizadas três diferentes superfícies, sendo uma lisa e duas texturizada por meio de impressão 3D. As texturizações utilizadas foram inspiradas na pata da lagartixa em formato circular e da asa da coruja em perfil ramificado. Essas superfícies fazem parte de um outro projeto que tem o foco na funcionalização de superfícies ótimas de lubrificação baseadas em biomimetismo.

O tribômetro utilizado neste trabalho foi construído com apoio da chamada do Edital CNPq Universal de 2011 e que passou por aprimoramento e testes com apoio do Edital FUNDECT 11/2014 UNIVERSAL. Para fins de avaliar o efeito do aperfeiçoamento do equipamento, utilizou-se nos testes, óleo de soja refinado, devido ao seu baixo custo e apenas para verificação das melhorias do equipamento.

Um parâmetro muito importante para os resultados dos testes de atrito é a viscosidade do óleo lubrificante. Trata-se de um parâmetro de grande influência na lubrificação e que possui forte dependência com a temperatura, visto que a viscosidade dos fluidos líquidos diminui conforme o aumento da temperatura (BRUNETTI, 2004). Considerando esta dependência, outra finalidade deste projeto foi de aperfeiçoar a implantação de um sistema de controle de temperatura no tribômetro, para uma melhor análise de atrito dos óleos vegetais em diferentes temperaturas. Este sistema consiste no acionamento de uma pastilha termoeletrica que tem a função de aquecer o óleo lubrificante quando necessário, a partir de um

monitoramento em tempo real obtido por meio de um sensor de temperatura encapsulado, localizado internamente no recipiente onde é depositado o óleo lubrificante a ser analisado.

Embora existam pesquisas relacionadas aos óleos vegetais utilizados como biolubrificantes (CAVALCANTI et al., 2018; Da SILVA et al., 2015; DIAZ et al., 2017; FERNANDES et al., 2018; GRECO-DUARTE et al., 2017; HEIKAL et al., 2017; KANIA et al., 2015; MCNUTT e HE, 2016; MOBARAK et al., 2014; OCHOLI et al., 2017), não foi encontrado muitos relatos da utilização de óleos extraídos de frutos oriundos do cerrado sul-mato-grossense para aplicações em lubrificação. Desta forma, percebe-se a importância do aperfeiçoamento desse tipo de equipamento, com o intuito de levantar-se uma base de dado desses óleos que estão presentes no contexto regional no qual está inserido esse projeto.

## 2. OBJETIVOS GERAIS

Aperfeiçoar o equipamento de medição de atrito para levantar um perfil tribológico do óleo de soja refinado com intuito de utilizá-lo como controle dos resultados de outros óleos vegetais.

### 2.1 Objetivos específicos

- a) Avaliar possíveis problemas no tribômetro a partir de testes de repetibilidade na aquisição de dados de atrito;
- b) Melhorar o sistema de monitoramento e controle da temperatura para os testes de atrito;
- c) Obter o coeficiente de atrito nos testes com óleo de soja refinado em três diferentes superfícies e em diferentes temperaturas, para validação do sistema de medição.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Biolubrificante

Lubrificante é uma substância aplicada entre duas superfícies em contato, com a finalidade de formar uma película protetora que impede o contato sólido direto entre as superfícies, reduzindo assim o atrito e o desgaste entre elas (MOBARAK et al., 2014). Os lubrificantes apresentam-se principalmente em três diferentes estados: sólido como o grafite, pastoso como a graxa, ou líquido como o óleo.

O termo biolubrificante geralmente considera os lubrificantes com alta biodegradabilidade e baixa toxicidade (MOBARAK et al., 2014). O mercado para biolubrificantes é limitado por conta de falta de conhecimento de seu potencial técnico e seu alto custo de produção, quando comparados aos óleos lubrificantes convencionais (BART et al., 2012). Com isso, pouco se tem investigado sobre as potencialidades dos óleos vegetais em termos de lubrificação.

Contudo, devido à preocupação dos efeitos causados no meio ambiente, tem-se percebido um aumento na busca por alternativas que possibilitem a utilização de produtos menos agressores e que apresentem diminuição na emissão de poluentes (BART et al., 2012; HEIKAL et al., 2017; MOBARAK et al., 2014; NAGENDRAMMA e KAUL, 2012).

Para a aplicação de óleos vegetais na lubrificação, torna-se necessário estudos mais aprofundados, visando identificar os componentes naturais presentes em sua composição. A obtenção do perfil graxo do óleo vegetal pré-selecionado nos fornece informações básicas para a seleção de possíveis óleos a serem utilizados na lubrificação (KANIA et al., 2015).

### 3.2 Superfície texturizada

Outro quesito, também de grande interesse, é avaliar o comportamento do óleo vegetal em diferentes superfícies texturizadas, com o propósito de verificar sua eficiência de adsorção. A formação do biofilme de óleo lubrificante é fundamental para a proteção contra desgaste entre as superfícies de contato. No trabalho de Costa e Hutchings (2007) foi investigado os efeitos das características geométricas da textura, conforme Figura 1, visando aprimorar o desempenho de lubrificação.

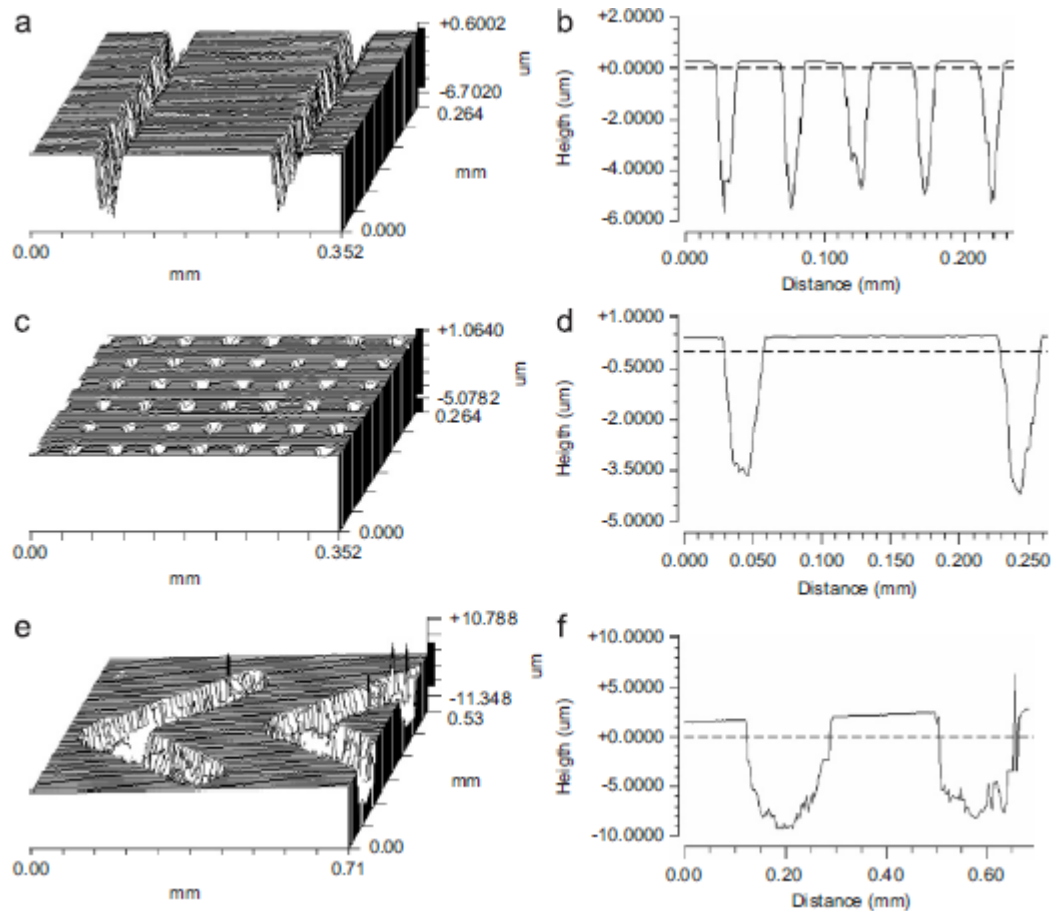


Figura 1. Exemplos de topografia de superfície texturizada; esquerda, vistas em perspectiva; direita, perfis de linha.  
Fonte: Costa e Hutchings (2007).



Para o presente projeto, foram utilizadas técnicas de biomimetismo, ou seja, as texturas foram fabricadas a partir de reprodução inspirada na natureza. Estas texturas foram impressas com o uso de uma impressora 3D, em que se utiliza como material de adição o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno).

### 3.3 Biotribologia

Tribologia é uma palavra originada do Grego (*Tribo*: deslizamento e *logia*: estudo), que significa o estudo entre superfícies em contato sob deslizamento relativo entre elas. Trata-se de uma área da ciência que estuda o atrito, o desgaste e a lubrificação (NEVES et al., 2011).

O termo biotribologia foi citado pela primeira vez por Dowson (1973), que define como o estudo da tribologia associado a sistemas biológicos, como por exemplo, próteses ortopédicas e dentárias. Um levantamento de perfil biotribológico é necessário durante a investigação de novos lubrificantes de origem vegetal, como óleo extraído de frutos ou de origem animal, como o líquido sinovial, que segundo Martins e colaboradores (2007), trata-se de um líquido viscoso das cavidades articulares com a função de lubrificação.

### 3.4 Tribômetro

Tribômetro é um equipamento utilizado nos estudos relacionados à tribologia e que serve para medição de atrito e desgaste entre superfícies. Em outras palavras, ele é usado para a avaliação do potencial de um lubrificante ou o desempenho de um par tribológico em termos de lubrificação. O par tribológico é o conjunto das duas superfícies em contato e movimento relativo deslizante entre elas.

O funcionamento do tribômetro consiste em obter o coeficiente de atrito e desgaste, dependendo de sua configuração, entre superfícies que se encontram em movimento na direção de escorregamento entre si, enquanto é aplicada uma carga constante perpendicular à sua superfície. O coeficiente de atrito é obtido a partir dos dados de força de atrito e força normal, medidas pelos sensores de deformação do tribômetro. A força de atrito é a força atuante na direção de escorregamento entre as superfícies e a força normal é a força constante aplicada perpendicular à superfície.

Dentre os tipos de tribômetro encontrados, em geral podem ser classificados em dois tipos, sendo pino-sobre-prato ou pino-sobre-disco (NEVES et al., 2012). Estes modelos se distinguem pelo tipo de movimento, sendo limitado a um sentido no modelo pino-sobre-disco e movimento recíproco (vai e vem) no pino-sobre-prato, conforme Figura 2. Além disso, no pino-sobre-disco, o teste é feito por um corpo de prova que fica em contato com uma base giratória em formato de disco. Já no modelo pino-sobre-prato, o teste é feito com um corpo de prova perpendicular a uma superfície plana, com deslizamento recíproco.

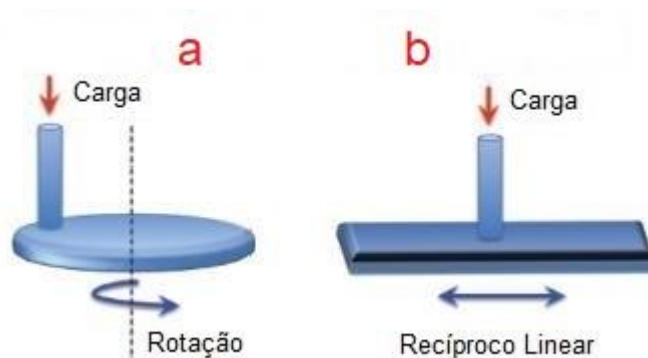


Figura 2. Dois principais tipos de tribômetro com carga aplicada perpendicular à superfície; (a) pino-sobre-disco limitado a um sentido de rotação e (b) pino-sobre-prato com movimento recíproco linear (vai e vem).

Fonte: Adaptação de Neves et al. (2012).

Segundo Neis (2012), o tribômetro pode auxiliar na avaliação de atrito e desgaste entre diferentes metais, polímeros ou cerâmicos. Na bioengenharia, o uso deste equipamento destaca-se na avaliação de desempenho de materiais de próteses (CROCKETT et al., 2009) e materiais biológicos, como a cartilagem articular (NAKA et al., 2006).

Nos testes de atrito, a duração do ensaio, intensidade de carga normal e velocidade de execução, são parâmetros reconfiguráveis, ou seja, que podem ser alterados conforme o objetivo do teste ou análise. Em testes de lubrificação, a alteração destes parâmetros interfere no valor do coeficiente de atrito, pois este coeficiente é obtido por meio da razão entre força de atrito e força normal. Há

também a influência da velocidade que pode alterar o regime de lubrificação, conforme será observado no tópico acerca da Curva de Stribeck.

No trabalho de De Farias e colaboradores (2011), foi feito um ensaio de lubricidade utilizando um equipamento de sonda de deslizamento alternado de alta frequência (HFRR) com uma carga aplicada de 2 N, temperatura de aproximadamente 60 °C e duração do ensaio de 4500 segundos. Nota-se, conforme Figura 3, que com o biodiesel de soja B5 obteve-se um coeficiente de atrito médio de 0,10.

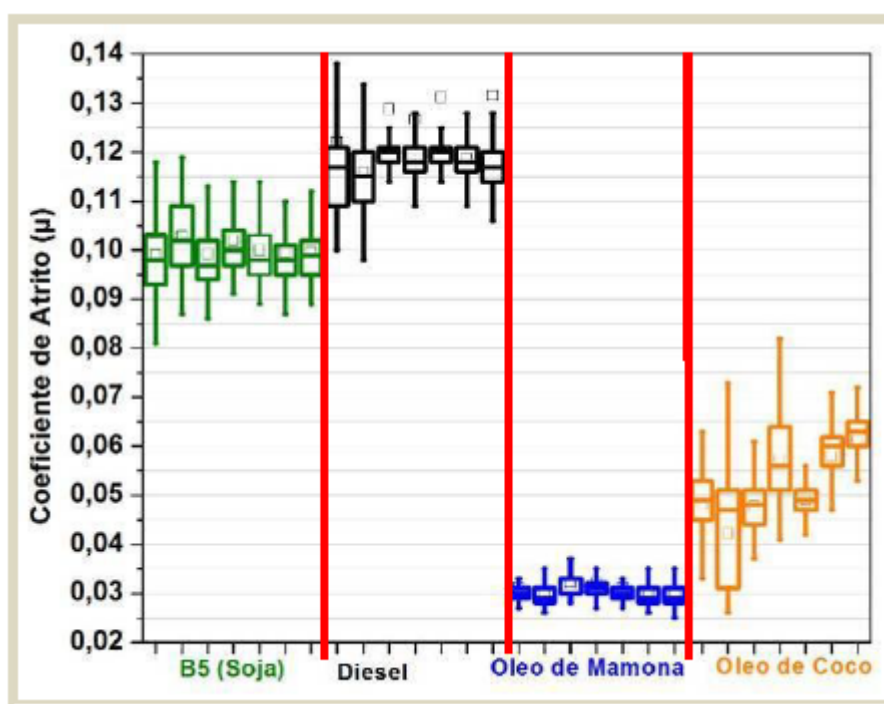


Figura 3. Coeficiente de atrito nos testes com óleo biodiesel B5 (soja), óleo diesel convencional, óleo de mamona e óleo de coco.

Fonte: De Farias et al. (2011).

Foi utilizado um tribômetro de movimento recíproco linear, desenvolvido na própria Universidade (UCDB), a partir da chamada do Edital CNPq Universal 2011. Este equipamento possui um recipiente onde o óleo vegetal é depositado em que é possível parafusar diferentes superfícies texturizadas (Figura 4). O motor do tribômetro é acionado a partir de um driver de potência.

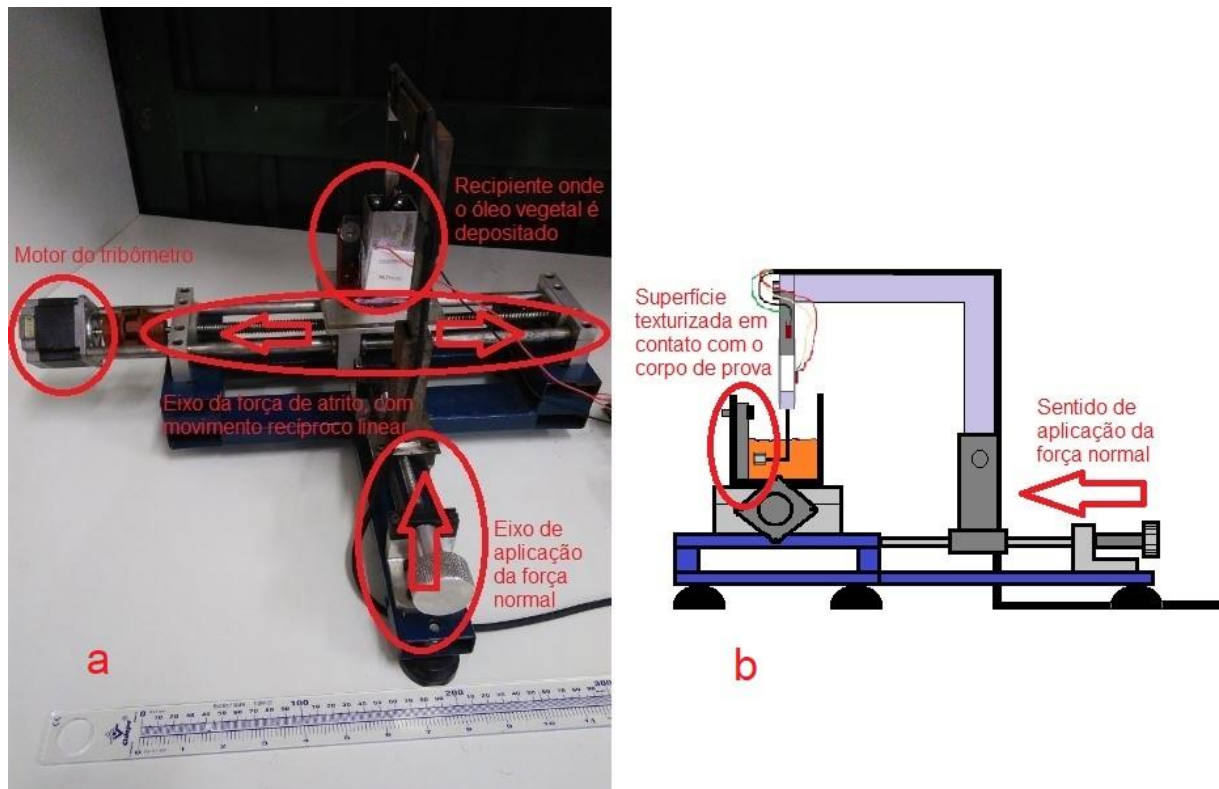


Figura 4. Tribômetro - vista frontal com indicação do sentido de atuação da força normal e força de atrito (a) e ilustração da vista lateral com detalhe do contato entre a superfície texturizada e o corpo de prova (b).  
Fonte: Próprio autor.

### 3.5 Curva de Stribeck

Segundo Neves e colaboradores (2013), a avaliação do regime de lubrificação de um lubrificante pode ser obtida por meio da curva de Stribeck. Nesta curva, observa-se as três principais regiões de lubrificação, sendo a limítrofe, a mista e a hidrodinâmica (Figura 5). Na região limítrofe, ocorre um maior desgaste entre as superfícies devido aos contatos das rugosidades, pelo fato do filme lubrificante ser quase insignificante. Na região mista, ocorre um desgaste médio devido ao aumento da espessura do filme lubrificante. Já na região hidrodinâmica, o desgaste é quase insignificante, devido a total separação das superfícies pelo fluido lubrificante. Para a obtenção desta curva, é necessário calcular o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) e o número de Sommerfeld (S).

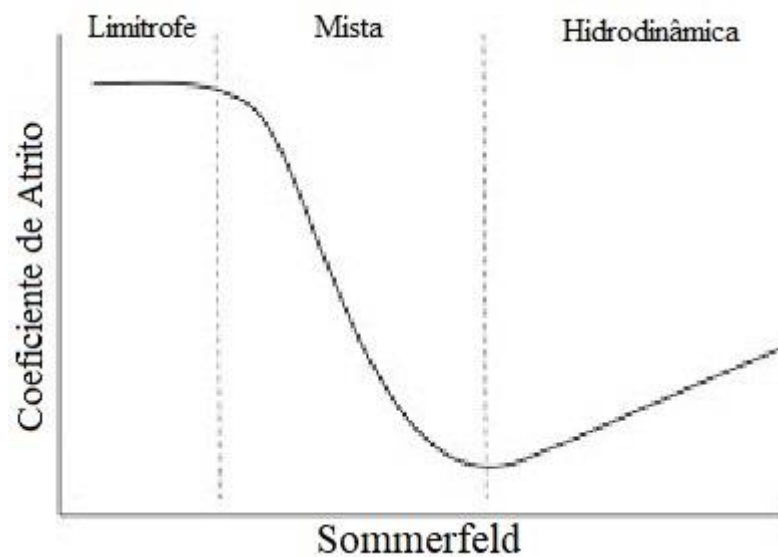


Figura 5. Curva de Stribeck dividida pelas três regiões de lubrificação. Relação entre coeficiente de atrito e número de Sommerfeld (S).  
Fonte: Adaptação de Dowson (1997).

Com os testes de atrito dos óleos lubrificantes, obtém-se o coeficiente de atrito. Este coeficiente tem relação ao grau de rugosidade das superfícies (HIRAYAMA, 2012), que indica uma maior ou menor resistência ao deslizamento entre o corpo de prova e a superfície de contato. Este coeficiente, representado por  $\mu$  (adimensional), é calculado a partir da força de atrito, representada por  $F_a$  (mN), e da força normal, representada por  $F_n$  (mN), conforme equações (1) e (2) a seguir. O coeficiente de atrito varia entre 0 e 1.

$$F_a = F_n * \mu \quad (1)$$

$$\mu = \frac{F_a}{F_n} \quad (2)$$

O número de Sommerfeld (S) é obtido por meio da equação (3), que relaciona a viscosidade ( $\eta$ ), a velocidade ( $V_e$ ) e a carga aplicada ( $P_e$ ).

$$S = \frac{\eta * V_e}{P_e} \quad (3)$$

A curva de Stribeck pode ser gerada a partir da alteração de parâmetros dos testes de atrito do tribômetro (Neves et. al., 2013). Com velocidade e carga

constante, como é o caso deste trabalho, o número de Sommerfeld variará de acordo com a viscosidade, que por sua vez, varia conforme a temperatura. Para estudos envolvendo as condições mais severas da lubrificação, ou seja, lubrificação limítrofe, é necessário trabalhar com baixos números de Sommerfeld (Neves et. al., 2013).

### 3.6 Instrumentação

#### 3.6.1 Extensômetro

O extensômetro possui a função de medir deformações mecânicas em corpos de prova a partir de uma variação linear de sua resistência elétrica, porém é necessária a utilização de um equipamento que transforma a deformação em informação concreta (GRANTE, 2004). Os extensômetros são fixados perpendicularmente na superfície que deseja se obter a deformação mecânica e enviar estes dados para um dispositivo que faça a leitura. Estes sensores detectam a deflexão de duas molas planas, que se flexionam devido ao contato entre o corpo de prova e a parede do recipiente, representando o atrito e a carga normal entre as superfícies (Figura 6). Para o processo de leitura, o circuito é alimentado por uma fonte de energia e passa por um amplificador de voltagem para então ser lido em uma placa de aquisição de dados, na unidade de mV (Figura 6).

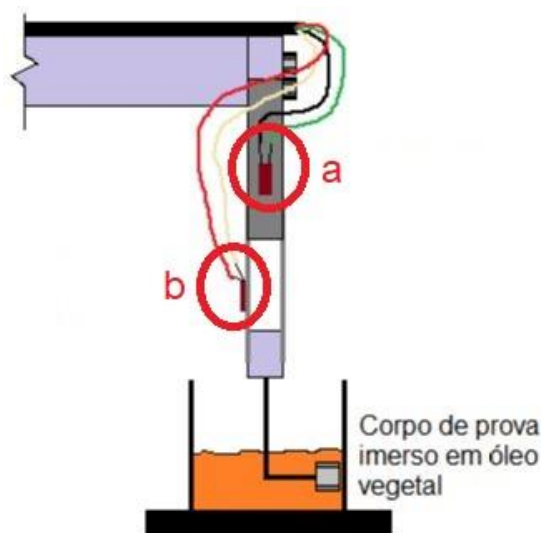


Figura 6. Localização de fixação dos extensômetros do tribômetro; sensor da força de atrito (a) e sensor da força normal (b).  
Fonte: Adaptação de Naka et al. (2005).

### 3.6.2 Pastilha termoeétrica

A pastilha termoeétrica de efeito Peltier funciona por meio da passagem de uma corrente elétrica, que acaba transportando o calor de um lado para o outro, dependendo do sentido da corrente, onde o calor é absorvido ou rejeitado (De OLIVEIRA, 2014). Ao mesmo tempo em que um lado esfria, o outro aquece, conforme Figura 7.



Figura 7. Princípio de funcionamento da pastilha termoeétrica.

Fonte: <https://projetogaragem.wordpress.com/2015/10/23/cooler-com-peltier-para-resfriamento-de-bebidas/>.

### 3.6.3 Módulo Relé

Trata-se de um interruptor eletromecânico, cujo funcionamento consiste quando há uma corrente elétrica circulando pela bobina do relé, criando um campo magnético que atrai a alavanca responsável pela mudança de estado dos contatos (MAIA, 2012), servindo para ligar ou desligar dispositivos. Este módulo é ligado em dois ou mais circuitos elétricos, isolando-os completamente, podendo inclusive trabalhar com tensões diferentes entre eles, como é o caso do tribômetro, que utiliza

5 V para alimentação do sensor de temperatura e 12 V para alimentação da pastilha termoeletrica. Este componente é fundamental, pois se a pastilha termoeletrica ficar ligada ou desligada por muito tempo, as temperaturas poderão ser maiores ou menores do que o necessário. Logo, ele funciona como uma espécie de interruptor com base nas informações detectadas pelos sensores de temperatura.

#### 3.6.4 Sensor de temperatura

Segundo De Menezes (2012), os sensores de temperatura “são semicondutores sensíveis à temperatura cuja função principal é exibir uma mudança grande, previsível e precisa em resistência elétrica quando submetidos a uma variação na temperatura de um corpo”. Conforme o sensor detecta temperatura inferior ao desejado, o microcontrolador manda o sinal para o relé que aciona a pastilha termoeletrica, alterando a temperatura do óleo vegetal. O monitoramento da temperatura em tempo real é fundamental para uma melhor avaliação de sua influência nas condições de lubrificação. Realizar o controle da temperatura tem por objetivo simular as condições reais de trabalho do biolubrificante. Este controle é um fator importante por alterar a viscosidade do lubrificante e também pelo fato de que temperaturas elevadas podem degradar o óleo lubrificante vegetal, inviabilizando sua utilização. O sensor utilizado para os testes possui uma precisão de  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  dentro de uma faixa de medição entre  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### 3.6.5 Microcontroladores

Trata-se de um componente eletrônico utilizado no controle de processos lógicos. Segundo Gimenez (2002), “o microcontrolador nada mais é do que um microprocessador implementado em um único circuito integrado, no qual estão integradas todas as unidades básicas de um computador”. Foram utilizados dois microcontroladores com kit de desenvolvimento, o ATMEGA2560 (arduíno MEGA 2560) e o AT89S52 (Control Chip CPU-8051-USB). O microcontrolador ATMEGA2560 de 8 bits possui 256 kB de memória flash para a programação, 8 kB de memória RAM, 4 kB de memória EEPROM e velocidade de clock de 16 MHz. O microcontrolador AT89S52 de 8 bits possui 8 kB de memória flash para a programação, 256 Bytes de memória RAM e velocidade de clock entre 0 Hz e 33 MHz.



### 3.6.6 Driver de potência

Para o controle do motor do tribômetro, é utilizado um circuito eletrônico chamado ponte H, que possui a função de chavear o circuito, conforme o sinal do microcontrolador, alterando o sentido da corrente e com isso o sentido de rotação do motor. Conforme Figura 8, na primeira etapa, fecham-se as chaves S1 permitindo a passagem de corrente em um sentido e na segunda etapa, fecham-se as chaves S2, permitindo a passagem de corrente no sentido oposto (RODRIGUEZ, 2016). Este controle se deve aos transistores do circuito que fazem o chaveamento eletrônico da corrente elétrica que aciona o motor do tribômetro, resultando no sentido de rotação do motor.

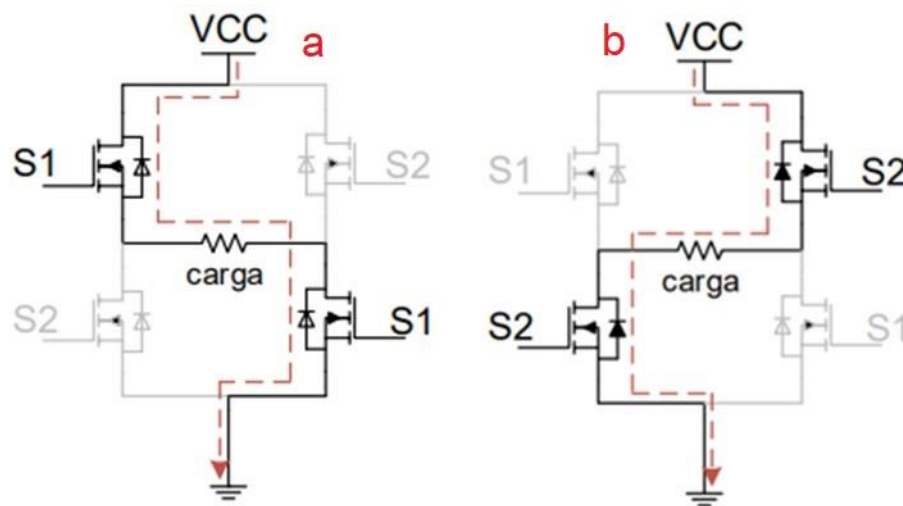


Figura 8. Princípio de chaveamento da ponte h; primeira etapa fechamento das chaves S1 com um sentido de corrente (a) e segunda etapa fechamento das chaves S2 com sentido de corrente oposto (b).

Fonte: Adaptação de Rodriguez (2016).

### 3.7 Filtro de Kalman

O filtro de Kalman trata-se de um filtro estatístico capaz de gerar valores próximos aos reais a partir de valores que foram contaminados com ruídos ou outras incertezas. Este filtro pode produzir estimativas da incerteza do valor previsto, além de uma média ponderada do valor previsto e o valor medido (CRUZ, 2013). Segundo Brown e Rutan (1985), pequenas mudanças nas condições experimentais podem interferir no experimento, levando a erros. Portanto, em todos os testes foi utilizado o

filtro de Kalman. Segundo Welch e Bishop (2006), as equações e parâmetros do filtro de Kalman são as seguintes:

$$P = P + Q \quad (4)$$

$$K = \frac{P}{P + R} \quad (5)$$

$$x_1 = x_1 + K * (z - x_1) \quad (6)$$

$$P = (1 - K) * P \quad (7)$$

Onde:

P = erro da covariância;

K = Ganho;

R = covariância dos valores das saídas;

Q = covariância dos valores dos estados;

z = série de medições,

$x_1$  = estimativa.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Material

#### 4.1.1 Extensômetro

Foram utilizados dois sensores chamados extensômetros, da marca Kyowa, modelo KFG-3-120-C1-11 (Figura 9). Estes sensores são fixados em molas planas paralelas e perpendiculares ao corpo de prova, representando a deformação mecânica com a ação da força normal (força aplicada perpendicular à superfície do recipiente) e da força de atrito (força aplicada paralela à superfície do recipiente).



Figura 9. Extensômetro Kyowa KFG-3-120-C1-11.

Fonte: Kyowa – distribuidor do componente.

Para uma correta fixação nas molas planas, os extensômetros passaram por um processo de colagem, descrito no item 4.2.1, que envolve tratamento térmico e resina de silicone protetora sobre os extensômetros.

#### 4.1.2 Pastilha termoeleétrica

Como os testes realizados no tribômetro propõem a elevação da temperatura, foi utilizada uma pastilha termoeleétrica de efeito Peltier modelo TEC1-12706. O lado da pastilha que aquece é o lado que fica em contato com o recipiente (Figura 10). Para uma maior eficiência e melhor dissipação de temperatura, foi aplicado pasta

térmica de silicone branca, que é utilizada como condutor de calor e auxilia em sua dissipação, marca IMPLASTEC, entre a superfície do recipiente e a pastilha Peltier.



Figura 10. Fixação da pastilha termoelétrica de efeito Peltier no recipiente.  
Fonte: Próprio autor.

#### 4.1.3 Módulo Relé

O módulo relé (Figura 11) foi utilizado para o controle de acionamento da pastilha termoelétrica, funcionando como um interruptor automático, ligando e desligando a pastilha conforme necessário.



Figura 11. Módulo Relé.  
Fonte: Robocore – distribuidor do componente.

#### 4.1.4 Sensor de temperatura

Para obter a temperatura do óleo lubrificante, é utilizado um sensor de temperatura encapsulado modelo DS18B20 para proteção contra o líquido (Figura 12) conectado à um microcontrolador.



Figura 12. Sensor de temperatura DS18B20.  
Fonte: Filipeflop – distribuidor do sensor.

#### 4.1.5 Microcontroladores

Foram utilizados dois microcontroladores, sendo um para o circuito de acionamento do motor do tribômetro (AT89S52) e outro para o controle da temperatura do óleo vegetal (ATMEGA2560). Ambos microcontroladores foram utilizados em conjunto com um kit de desenvolvimento que possui gravador integrado, ou seja, os kits são ligados diretamente ao computador para passar as instruções de operação ao microcontrolador. No caso do microcontrolador ATMEGA2560, foi utilizado o modelo já embutido no kit de desenvolvimento, conhecido como Arduino MEGA 2560, conforme Figura 13. O microcontrolador AT89S52 foi utilizado com o kit de desenvolvimento da Control Chip modelo CPU-8051-USB, conforme Figura 14.

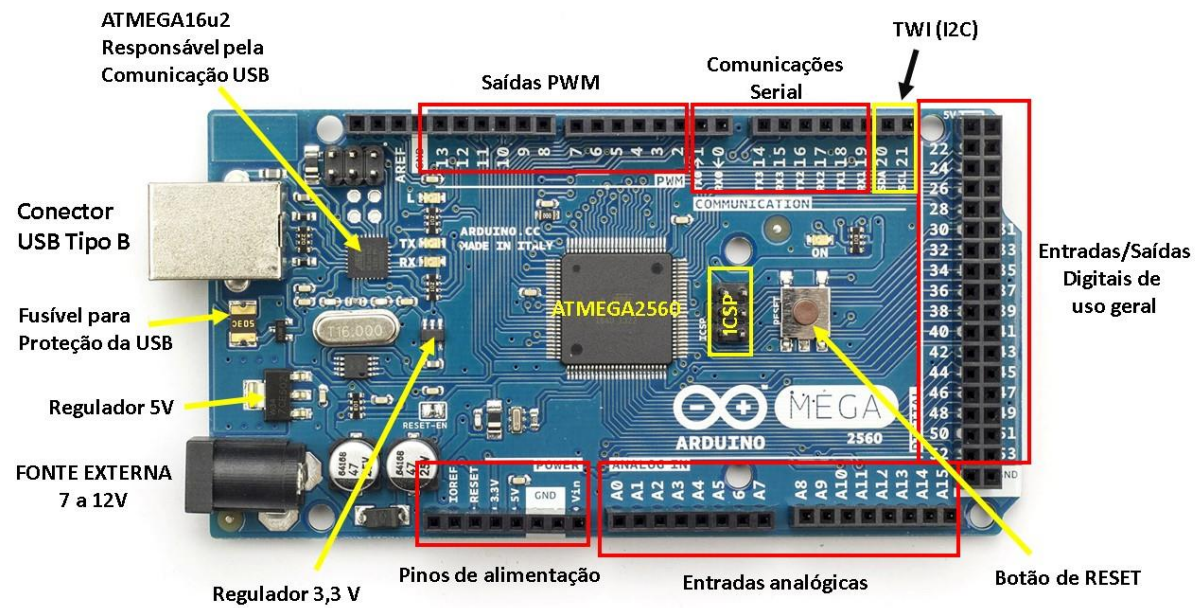


Figura 13. Arquitetura do Arduino MEGA 2560.  
 Fonte: <https://www.embarcados.com.br/arduino-mega-2560/>.



Figura 14. Kit Control Chip com microcontrolador AT89S52.  
 Fonte: Próprio autor.



#### 4.1.6 Circuito de acionamento do motor do tribômetro

Para a realização do movimento recíproco do tribômetro, foi necessária a utilização de um circuito de acionamento de seu motor. Este circuito consiste basicamente de um microcontrolador e um circuito eletrônico chamado de ponte H, conforme pode ser observado na Figura 15. O microcontrolador tem a função de interface amigável para configuração dos parâmetros dos testes, como a velocidade (mm/s), deslocamento (mm) e tempo de ensaio (min). Esta interface conta com um display lcd para a escolha dos parâmetros.

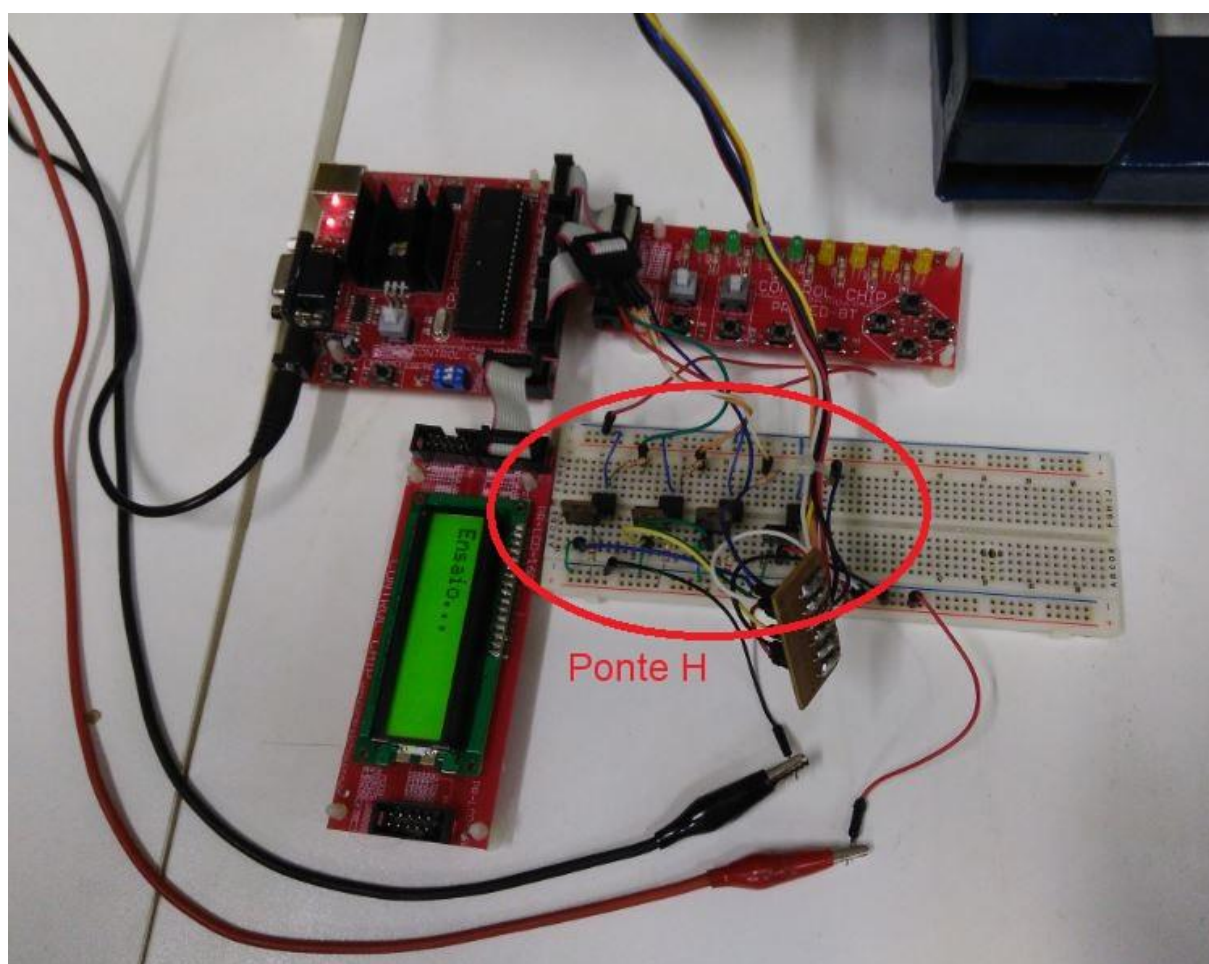


Figura 15. Circuito de acionamento do motor do tribômetro com interface para ajuste de parâmetros dos testes de atrito.

Fonte: Próprio autor.

#### 4.1.7 Colagem dos extensômetros

Para a colagem dos extensômetros, são necessários alguns materiais, como álcool isopropílico, lixa de metal de número 220 a 400, adesivo epóxi KBR-610 formado por dois componentes, fita adesiva FK-1, película de teflon, resina de silicone RK e presilhas de pressão. O processo de colagem é descrito no item 4.2.1.

#### 4.1.8 Aquisição dos dados

Para a aquisição dos dados, foi utilizado o kit de extensometria Lynx modelo ADS0500-8 (Figura 16) interligado ao software Lynx Aqdados 7.2. Este kit conta com amplificadores de instrumentação com entrada diferencial e ganho selecionável por chaves internas entre cinco valores fixos: x1, x100, x200, x300 e x600, filtro passa-baixas de 2ª ordem tipo Butterworth com frequência de corte em 35 Hz, conversor A/D com resolução de 12 bits, taxa máxima de aquisição de 500 amostras/segundo, independentemente da quantidade de canais ativos e comunicação por protocolo IP com interface padrão Ethernet 10baseT.



Figura 16. Kit de extensometria Lynx modelo ADS0500-8.  
Fonte: Próprio autor.



Para o acesso do software Lynx AqDados 7.2 e o Lynx AqDAnalysis, é necessário a utilização de um pendrive (Figura 17) que funciona como chave de acesso.



Figura 17. Pendrive para acesso ao software.

## 4.2 Métodos

### 4.2.1 Processo de colagem dos extensômetros

O processo de colagem dos extensômetros, segundo Barreto Jr. (2000), consiste inicialmente no preparo da superfície por meio de uma limpeza com solvente para eliminar todo resíduo oleoso presente na superfície onde os extensômetros serão fixados. No presente projeto, foi utilizado álcool isopropílico como solvente. Para uma melhor aderência na colagem, é necessária a utilização de lixa de metal, com o intuito de aumentar a rugosidade, permitindo uma maior área de contato e adesão. Adicionalmente, o processo de lixamento permite a eliminação de camadas oxidadas e de impurezas, que podem prejudicar a colagem.

Após preparar a superfície desejada para a colagem, é usado novamente o solvente para a limpeza da superfície. Os extensômetros são colados com o adesivo epóxi misturados na proporção 1:1 e cobertos por uma fita adesiva, que serve para proteger o extensômetro durante o processo de cura do mesmo, em uma faixa de temperatura entre 120 e 175 °C durante duas horas. Para este processo de cura, é necessário aplicar uma pressão constante sobre a fita adesiva. Para este propósito, é utilizada uma película teflon por cima do adesivo e uma presilha para manter esta pressão. A película teflon é utilizada para que a presilha não grude na fita adesiva.

Por fim aplica-se uma resina de silicone, que se polimeriza ao contato com o ar, oferecendo proteção e aumentando a vida útil do extensômetro. Foi utilizado como presilha um prendedor de roupas de madeira e a temperatura para o processo de cura foi de 150 °C durante duas horas em um forno elétrico.

#### 4.2.2 Calibração do equipamento

##### 4.2.2.1 Sensor de atrito

Antes de iniciar os testes de atrito, é necessário calibrar os sensores de atrito (extensômetros) do tribômetro. Esta calibração é feita adicionando pesos mortos conhecidos aos sensores para simular sua variação. Os pesos foram mensurados com o uso de uma balança analítica. Os dados obtidos foram analisados por meio de uma regressão linear, em que obtemos o valor do  $R^2$ , que representa a correlação dos dados, e a equação de calibração, que foi utilizada durante os testes para converter os dados em dados de força (N).

Primeiramente, foi selecionado quatorze pesos aleatórios entre 0 gramas e 6 gramas. É de extrema importância que sejam utilizados os mesmos pesos para calibrar o sensor que representa a força normal e o sensor que representa a força de atrito.

Foram anotados os valores dos pesos para se obter os valores de força correspondente. Estas forças são obtidas a partir da multiplicação do valor do peso pelo valor da aceleração da gravidade, ou seja, aproximadamente 9,81 m/s<sup>2</sup>. Como o peso foi dado em gramas, o valor convertido será em mili Newton (mN).

As medições foram feitas cinco vezes com cada peso selecionado para minimizar o erro de leitura e melhorar a calibração. Estes dados foram obtidos em tensão elétrica, dado em volts e feito uma média entre eles. Os resultados foram convertidos em milivolts para facilitar a interpretação dos dados.

Após a obtenção da força (mN) de cada peso e da tensão (mV) que esta força representa no sensor, plotou-se o gráfico de calibração referente ao sensor que representa a força de atrito e o sensor que representa a força normal (Figura 18).

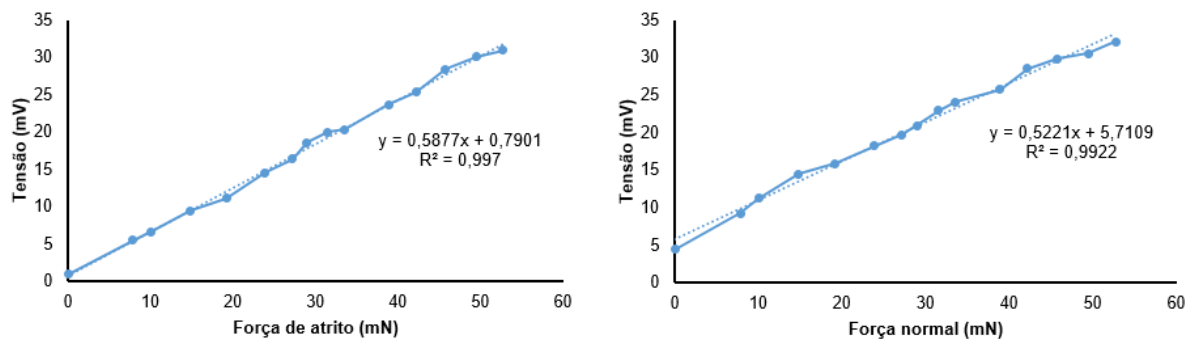


Figura 18. Calibração dos sensores da força de atrito e força normal

Analizando o peso máximo utilizado na calibração, a força normal máxima que pode ser aplicada nos testes é de aproximadamente 52 mN, devido a calibração. Dentro destes valores, a partir da utilização da equação de calibração, o sensor que representa a força de atrito possui uma correlação linear de 99,70% e o sensor que representa a força normal possui 99,22% de correlação linear, conforme os dados obtidos pela regressão linear.

#### 4.2.2.2 Controle e monitoramento de temperatura

Para o monitoramento em tempo real da temperatura do óleo lubrificante, foi utilizado um sensor de temperatura encapsulado para proteção contra o líquido. Para a obtenção da informação do valor da temperatura, foi utilizado um Arduino Mega 2560 para realizar a comunicação com o sensor.

Em cada teste executado, estabeleceu-se uma temperatura de trabalho (valor de referência), utilizando o Arduino para o envio de sinais para um módulo relé que controla a pastilha termoeletrica, ligando (valor de temperatura atual inferior ao valor de referência) ou desligando (valor de temperatura atual superior ao valor de referência) quando necessário. A precisão da temperatura de referência foi de  $\pm 0,7$  °C. Foram selecionadas as faixas de temperatura de 25, 30, 35, 40 e 45 °C. Este circuito de monitoramento e controle entre o Arduino Mega 2560, o módulo relé, a pastilha termoeletrica e o sensor de temperatura são apresentados na Figura 19.

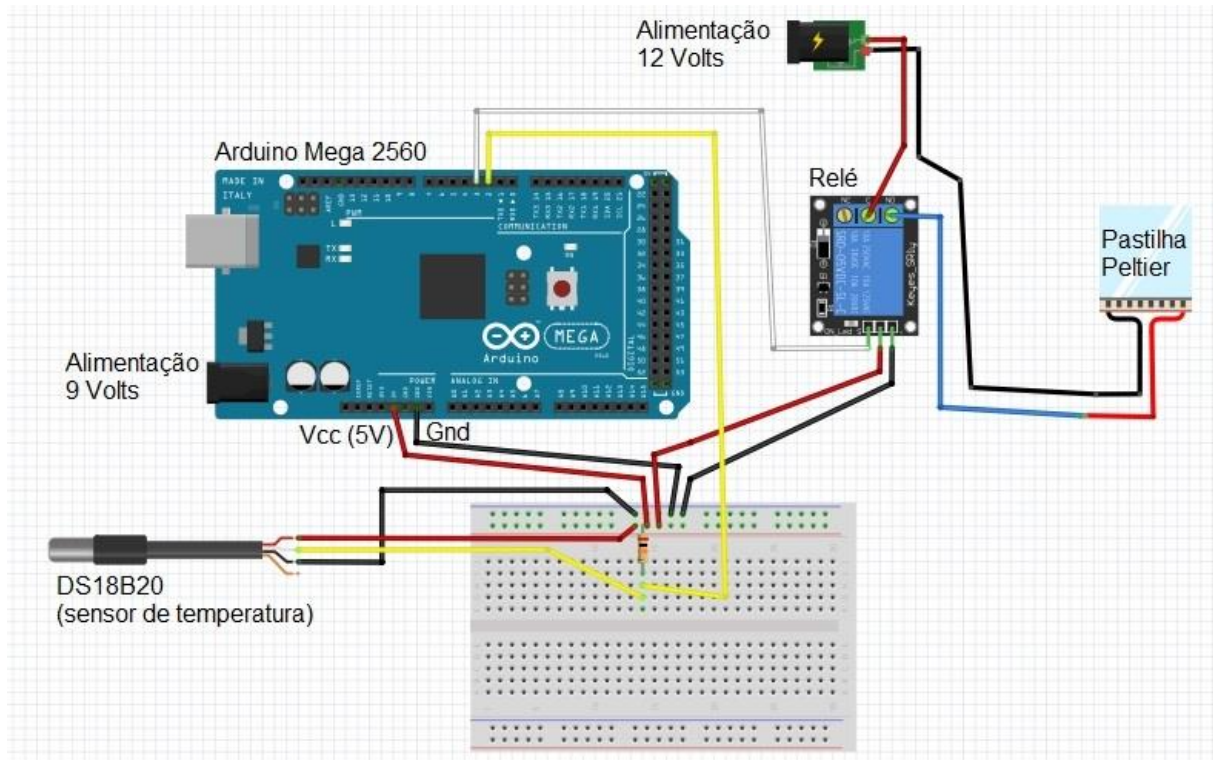


Figura 19. Circuito de controle e monitoramento da temperatura do recipiente com óleo vegetal.  
Fonte: Próprio autor.

#### 4.2.3 Preparação do equipamento

Após a calibração dos componentes, foram definidos três parâmetros para a execução dos testes com o tribômetro, sendo programados no microcontrolador interligado ao acionamento do motor. Estes parâmetros são a velocidade de teste, faixa de deslocamento do corpo de prova e tempo total do ensaio. Com a finalidade de avaliar os efeitos da lubrificação limítrofe, foi utilizado 1 mm/s como velocidade de teste, 5 mm na faixa de deslocamento e 5 minutos de tempo total do ensaio de atrito. A baixa velocidade garante números baixos de Sommerfeld, que permite trabalhar na região mais severa da lubrificação, ou seja, a lubrificação limítrofe.

Variou-se a temperatura durante os ensaios para observar o comportamento da força normal e da força de atrito dos óleos vegetais. Para esta aquisição de dados, foram utilizados extensômetros representando as medições das forças de atrito e normal, enviando as informações coletadas ao kit de extensometria Lynx interligado ao *software* Lynx Aqdados 7.2. A bancada de testes pronta para iniciar a coleta de dados é apresentada na Figura 20.

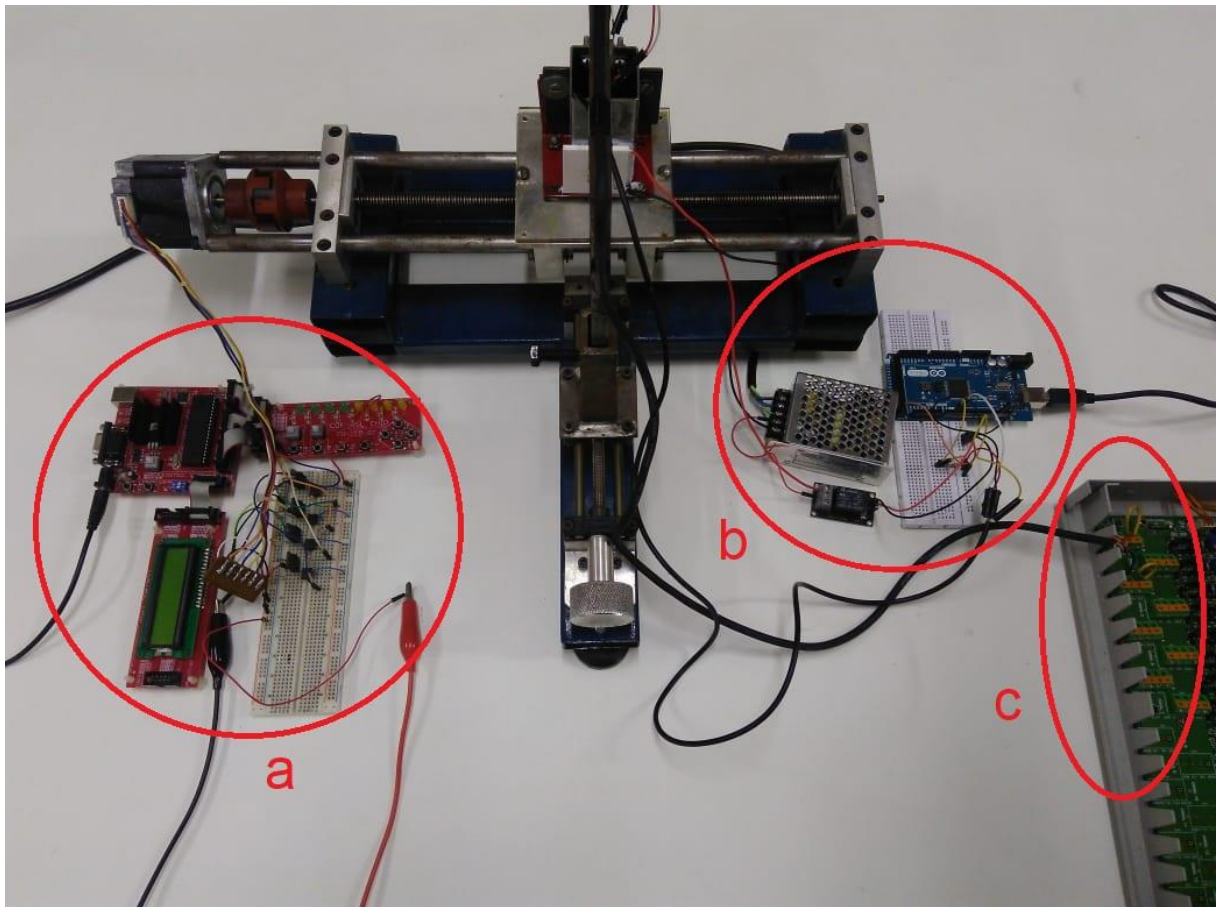


Figura 20. Montagem da bancada de testes com circuito de acionamento do motor (a), circuito de controle e monitoramento da temperatura do recipiente (b) e kit de extensometria para aquisição dos dados (c).

Fonte: Próprio autor.

#### 4.2.4 Preparação dos dados

Após a configuração de comunicação do driver de aquisição e a exportação dos dados para o *software* Excel 2013, descrito no Apêndice, foi necessário converter os dados conforme as equações de calibração dos sensores vistos na seção 4.2.2.1. Para isso, manteve-se as colunas dos dados originais e então adicionou-se as colunas com as equações para corrigir os dados. Para o cálculo da força normal e da força de atrito, respectivamente, foram utilizadas as seguintes equações conforme seção 4.2.2.1:

$$y = 0,5221 * x + 5,7109 \quad (8)$$

$$y = 0,5877 * x + 0,7901 \quad (9)$$

A saída é representada por  $x$  e a entrada que contém o dado original é representada por  $y$ . Como os dados estão na unidade volts (V), multiplica-se a entrada por 1000 para que o resultado esteja em milivolts (mV). Por fim, obtém-se as seguintes equações de força normal e força de atrito, respectivamente:

$$x = \frac{(y * 1000) - 5,7109}{0,5221} \quad (10)$$

$$x = \frac{(y * 1000) - 0,7901}{0,5877} \quad (11)$$

Antes de calcular o coeficiente de atrito, foi necessário fazer uma correção nos dados da força de atrito. Essa correção é chamada de *offset* e se trata de um valor médio que surge no sinal. Sua principal causa é possivelmente durante o momento da conversão do sinal analógico para o sinal digital. O ideal seria que esse *offset* fosse zero, e para esta correção, calculamos um valor médio entre os dados obtidos. O valor obtido é então subtraído do valor adquirido a partir da equação de calibração da força de atrito. Com os valores adquiridos das forças de atrito (com *offset*) e normal, calcula-se os valores do coeficiente de atrito do óleo vegetal.

#### 4.2.5 Tratamento dos dados

Para o tratamento dos dados, primeiramente foi necessário importar os dados de coeficiente de atrito do *software* Excel 2013 para o *software* Matlab 2014a. Com os dados importados, o *software* cria um vetor que armazena estes dados para que, a partir de um algoritmo de programação, seja possível trata-los. Um exemplo da comparação entre os dados originais e os dados filtrados com o filtro de Kalman pode ser observado na Figura 21.

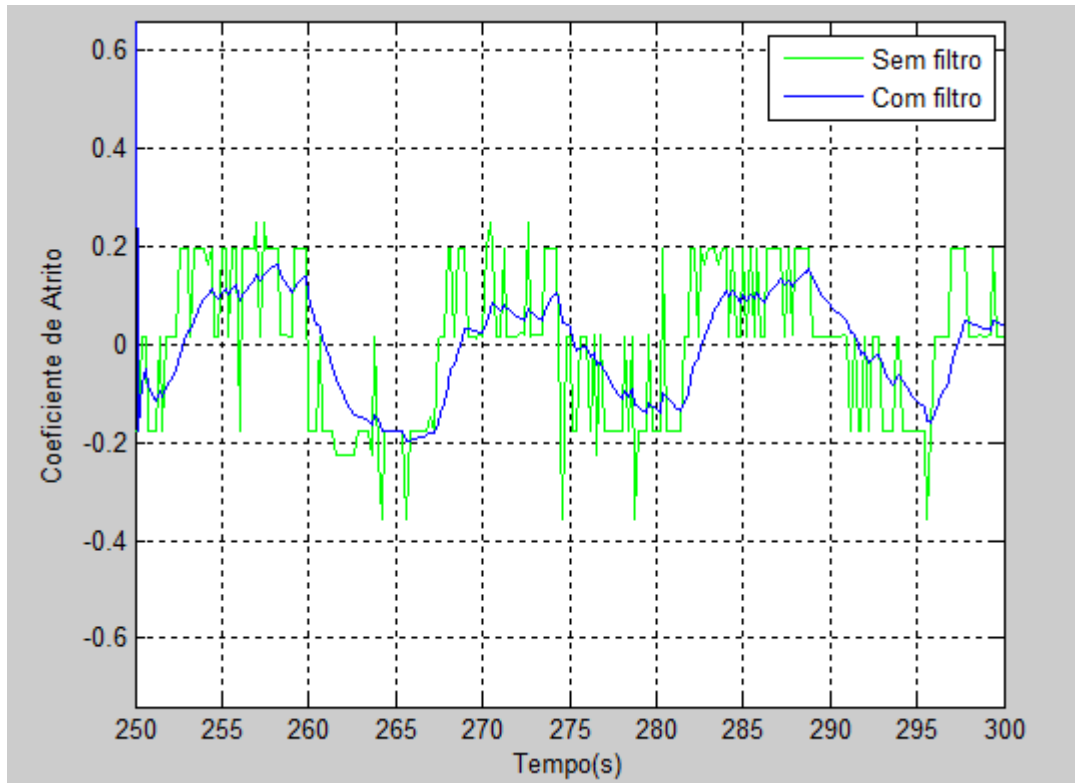


Figura 21. Aplicação do filtro de Kalman no teste de atrito.

Para que os resultados fossem confiáveis, os ensaios foram replicados cinco vezes sob as mesmas condições de teste e utilizando o filtro de Kalman. Os valores tendem a serem um pouco diferentes (Gráfico 1). Com os cinco ensaios realizados, é feita uma média entre eles para a determinação do coeficiente de atrito obtido sobre as condições do teste. Foi utilizado como parâmetro 1 mm/s de velocidade de teste e 5 mm na faixa de deslocamento. Dos 5 minutos de tempo total configurado no equipamento, foram considerados os últimos 50 segundos, que representaria a força de atrito no seu regime permanente.



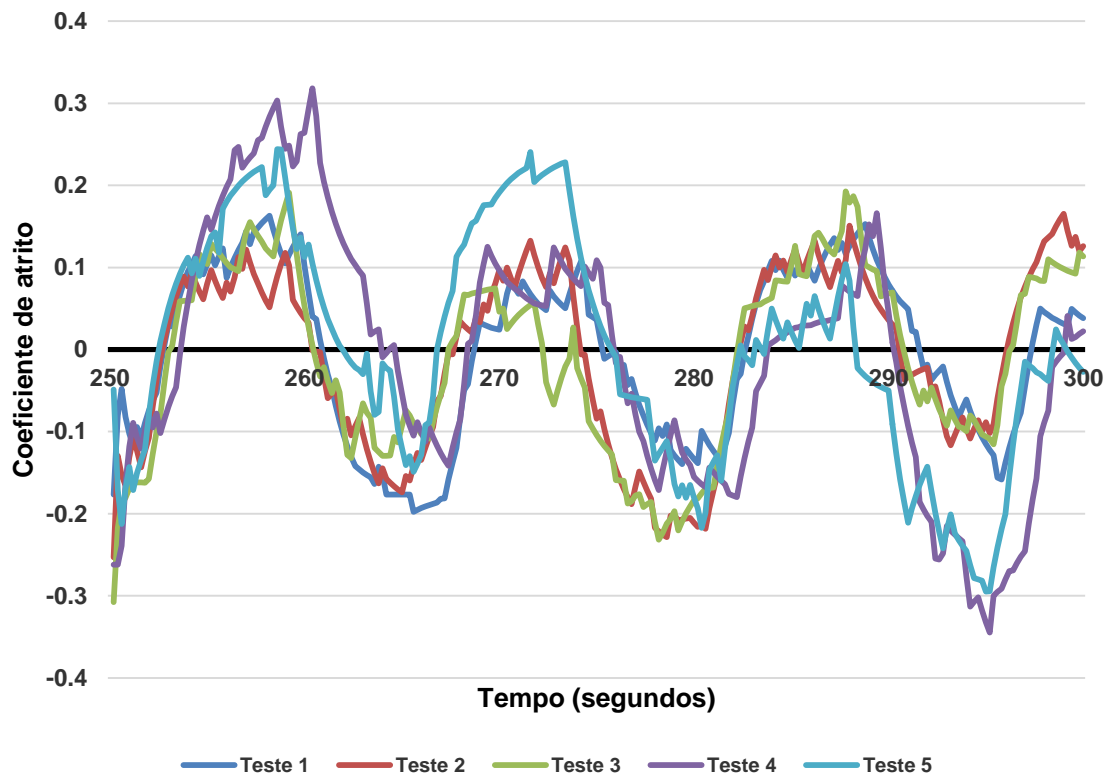


Gráfico 1. Ensaio de atrito realizados com filtro e sob os mesmos parâmetros de teste.

Com os dados tratados, foram exportados para o software Excel 2013 contendo apenas os coeficientes de atrito de cada teste. Com isso, restou adquirir o coeficiente de atrito em cada uma das cinco variações de temperatura com as três diferentes superfícies. Primeiramente, o gráfico de coeficiente de atrito foi separado por três picos positivos e três picos negativos, que representam a ida e a volta do corpo de prova sobre a superfície utilizada, como mostra os números indicados no Gráfico 2. Este procedimento foi refeito em cada um dos cinco testes replicados sob os mesmos parâmetros (mesma superfície e faixa de temperatura).



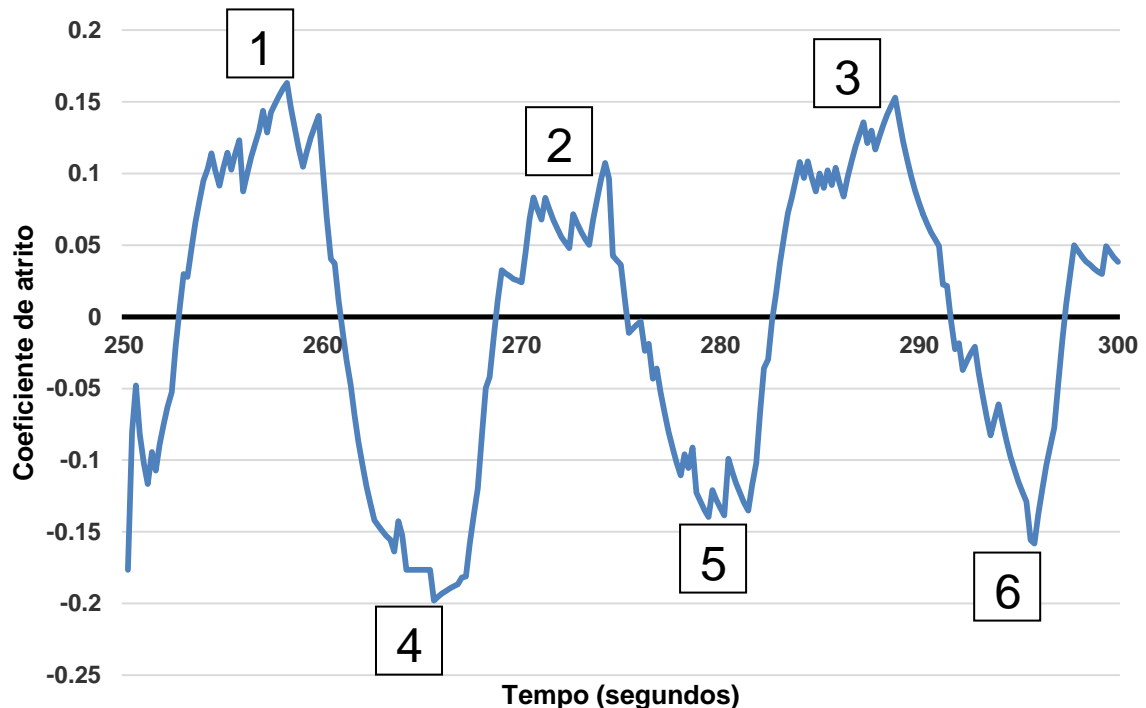


Gráfico 2. Separações dos picos de coeficiente para análise. Picos 1, 2 e 3 positivos representam a ida (avanço) do corpo de prova sobre a superfície. Picos 4, 5 e 6 negativos representam a volta (retorno) do corpo de prova sobre a superfície.

Devido ao modelo recíproco do tribômetro, o coeficiente de atrito obtido possui esta oscilação entre valores positivos e negativos. Quando os valores são positivos, indica que o corpo de prova está avançando, e quando os valores são negativos, indica que o corpo de prova está retornando. Dentro do tempo determinado nos ensaios, foi possível analisar as idas e voltas do corpo de prova. É importante calcular nos dois sentidos, porque os valores de coeficiente podem não ser os mesmos.

Entre um pico positivo e negativo, existe um momento chamado de transição, ficando exatamente na região da troca de sentido do ensaio. Para uma análise mais concreta, verificou-se os extremos de cada pico (onde exatamente ele deixa de ser positivo ou negativo) e se obteve um valor central do pico. A partir deste valor, definiu-se um protocolo para utilizar três valores antes e três valores depois do valor central. Após isso, calculou-se a média de coeficiente em cada um dos seis picos do gráfico. Este procedimento foi repetido em cada um dos cinco testes replicados.

Após obter a média de coeficiente de atrito em cada pico de cada um dos cinco testes replicados, os dados de cada teste foram cruzados para que fossem calculados as médias e o desvio padrão de amostras, conforme Gráfico 3.

Não houve diferença significativa entre os picos positivos 1, 2 e 3 em relação ao coeficiente de atrito (teste ANOVA de uma via, valor de  $p=0,149$ ) e entre os picos negativos 4, 5 e 6 em relação ao coeficiente de atrito (teste ANOVA de uma via, valor de  $p=0,555$ ). Estes resultados são apresentados no gráfico 3.

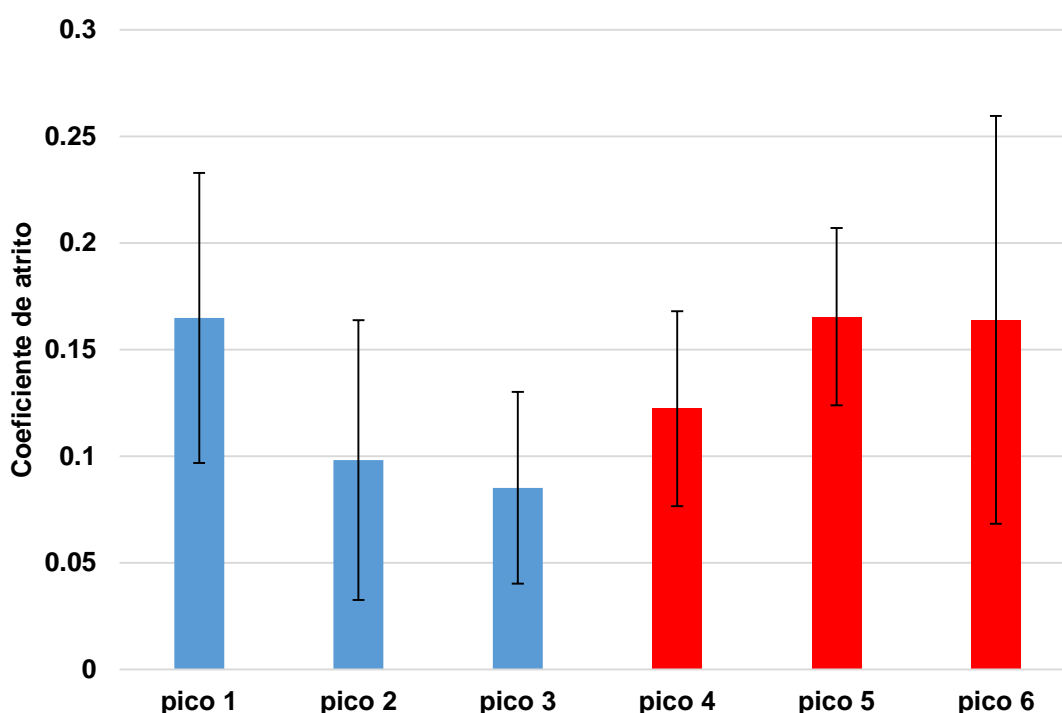


Gráfico 3. Média de coeficiente de atrito sob os mesmos parâmetros e com desvio padrão de amostras.

Juntando os três picos positivos e os três picos negativos, foi possível enfim se obter o coeficiente de atrito da ida (coeficiente positivo) e da volta (coeficiente negativo) do corpo de prova sobre a superfície de teste utilizada com determinada temperatura. Não houve diferença significativa entre o coeficiente positivo e negativo em relação ao coeficiente de atrito (teste ANOVA de uma via, valor de  $p=0,231$ ). Estes resultados são apresentados no Gráfico 4.

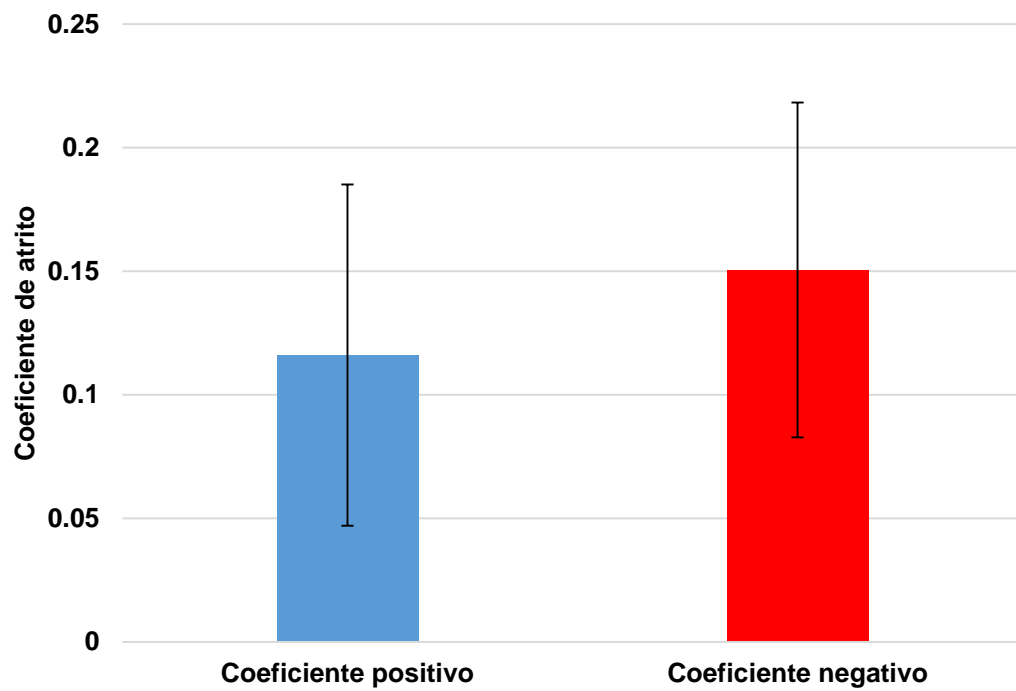


Gráfico 4. Média de coeficiente de atrito sob os mesmos parâmetros e com desvio padrão de população.

## 5. RESULTADOS

Para que os dados pudessem ser conclusivos, foram feitos ensaios em três superfícies diferentes, com cinco faixas de temperatura (25, 30, 35, 40 e 45 °C) e com uma força normal aplicada de aproximadamente 46,5 mN. As superfícies utilizadas foram confeccionadas a partir de uma impressora 3D. Foi utilizado uma superfície de controle, ou seja, impressa sem texturização (lisa), para que o material da impressão pudesse ser avaliado. As outras duas superfícies foram confeccionadas utilizando técnicas de biomimetismo, ou seja, baseando-se em superfícies existentes na natureza. Utilizou-se a texturização da pata da lagartixa em formato circular e da texturização da asa da coruja em perfil ramificado. As três superfícies utilizadas para os ensaios podem ser observadas na Figura 22.

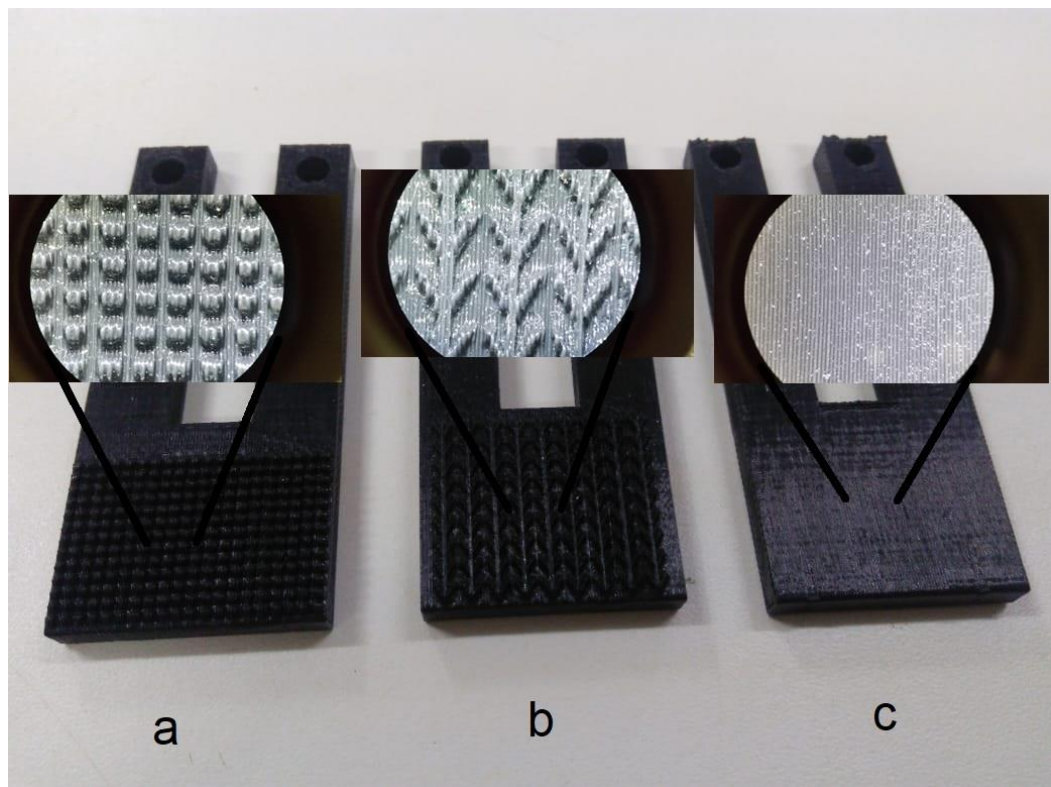


Figura 22. Superfícies utilizadas nos ensaios de atrito. Texturização da pata da lagartixa em formato circular (a), asa da coruja em perfil ramificado (b) e superfície lisa (c).

A pata da lagartixa possui milhões de cerdas que interagem com superfícies permitindo a capacidade de escalar paredes usando a interação da força molecular de Van der Waals entre a superfície e a pata deste animal (AUTUMN et. al., 2002). Esta força é responsável pela aderência com firmeza na parede, permitindo a adesão devido as cercas serem tão pequenas e, com isso, aumentando a área em contato com a superfície. Nas arestas frontais das asas das corujas, elas apresentam formatos semelhantes a ganchos em forma de pente e com superfície macia, melhorando a aderência da corrente aérea. Além disto, as penas da asa da coruja apresentam baixo atrito quando em contato com o ar. Por conta destas propriedades, estas superfícies foram selecionadas para os testes de atrito.

Em testes iniciais com o tribômetro, verificou-se a necessidade de aperfeiçoamento do equipamento para uma maior precisão nos resultados. Foi constatado, a partir de testes de repetibilidade, que os sensores que coletavam os dados estavam danificados, talvez devido a instalação de forma inadequada, não conseguindo fornecer resultados confiáveis, logo tiveram de ser substituídos.

Os sensores de força do tribômetro foram substituídos (Figura 23) passando por um cuidadoso processo de colagem e, para verificação da confiabilidade, os sensores passaram novamente por testes de repetitividade. Após a substituição dos sensores, foi constatado também que o circuito de acionamento da pastilha termoeletrica ocasionava queima de componentes eletrônicos, devido à alta passagem de corrente elétrica, próxima de 2 Amperes. Para solução deste problema, o circuito de acionamento da pastilha foi substituído por um relé de acionamento em que liga ou desliga o fluxo de corrente elétrica da pastilha conforme necessário.



Figura 23. Sensores de medição de deformação substituídos.

Após obter os valores médios dos coeficientes em cada uma das variações de temperatura (cinco variações), foi possível obter o gráfico que comprova a diminuição do coeficiente de atrito conforme o aumento da temperatura. Todo procedimento foi refeito para cada uma das três superfícies utilizadas.

Dentre as três superfícies, a que não possuía texturização obteve um resultado quase simétrico entre a ida e a volta do corpo de prova. Isso porque a superfície lisa é a mesma em ambos os sentidos. Mas como foi impressa, pode ter acontecido falhas na impressão ou até mesmo um desgaste não esperado em sua superfície.

Analisando as três superfícies, constatou-se que a superfície da pata da lagartixa com perfil circular apresentou o maior coeficiente de atrito em quase todas as faixas de temperatura. A superfície da asa da coruja com perfil ramificado

apresentou coeficiente de atrito menor até 35 °C, depois disso obteve resultados similares com a superfície não texturizada. Não houve diferença significativa entre a ida do corpo de prova em relação ao coeficiente de atrito (teste ANOVA de uma via, valor de  $p=0,321$ ). Também não houve diferença significativa entre a volta do corpo de prova em relação ao coeficiente de atrito (teste ANOVA de uma via, valor de  $p=0,184$ ). Estes resultados são apresentados na Figura 24.

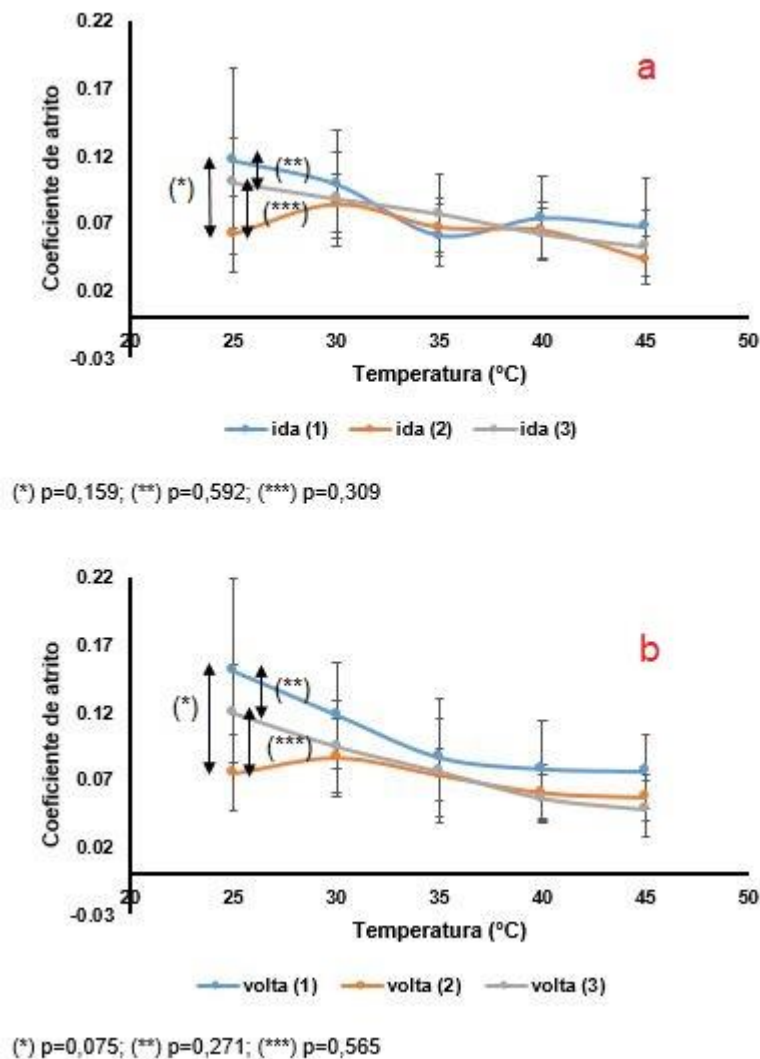


Figura 24. Coeficientes de atrito no avanço (a) e no retorno (b) do corpo de prova sobre as superfícies texturizada. Testes com a superfície da pata da lagartixa com perfil circular (1), superfície da asa da coruja em perfil ramificado (2) e superfície lisa (3).

Como a intenção é reduzir e não aumentar o coeficiente de atrito, a superfície da asa da coruja é um forte candidato para estudos de superfícies redutoras de coeficiente de atrito. Como nosso controle é a superfície lisa, qualquer textura impressa deste mesmo material que apresente um coeficiente de atrito maior que a superfície sem texturização é automaticamente descartado.

Como a superfície da asa da coruja se comportou bem até certa temperatura, algumas alterações em seu perfil ou na escala de sua impressão podem fazer com que os resultados sejam melhores na diminuição do coeficiente de atrito.



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em testes iniciais com o tribômetro, foi constatado que o equipamento apresentava grande imprecisão com erros de medição e que também não era possível uma calibração do mesmo. Inicialmente o projeto visava testar diversos óleos vegetais com o equipamento para montar um banco de dados sobre coeficientes de atrito de óleo vegetais oriundos do cerrado sul-mato-grossense.

Conforme os testes prosseguiam, mais problemas apareciam. Foi necessário substituir as molas planas e os dois extensômetros do equipamento. Foram feitos testes iniciais para testar a eficiência do processo de colagem das molas e dos dois extensômetros, além de diversos testes de calibração para comprovar que os sensores estão bem fixos. Estes testes consistiram em analisar se depois de uma força constante aplicada ao sensor, ele iria fazer uma leitura constante e também quando retirasse esta força, se o sensor voltaria ao valor “zero”. Mesmo se o sensor medisse a força constante, se ao ser retirada não voltasse ao valor “zero”, isso indicaria que o sensor poderia estar descolando da superfície.

O controle de temperatura foi revisado e alguns componentes foram substituídos. O circuito eletrônico costumava esquentar constantemente e com isso queimava um dos quatro transistores responsáveis pelo acionamento da pastilha termoeletrica. Como estes transistores controlam o fluxo de corrente para a pastilha, isso poderia danificá-la. Como solução, os transistores foram substituídos por um módulo de relé que se comunica com uma placa Arduino. Seu objetivo é isolar completamente o circuito, pois dentro do controle de temperatura são utilizadas duas faixas de tensões e um mal isolamento poderia ter sido a causa da queima de componentes. O algoritmo também foi modificado para se adequar ao módulo relé. O funcionamento deste controle de temperatura consistiu em determinar uma temperatura de trabalho para os testes de atrito, como por exemplo 30 °C. A pastilha termoeletrica foi programada para acionar sempre que a temperatura presente fosse

menor e desligar quando ultrapassasse. Vários testes foram feitos para verificar a faixa de oscilação da temperatura. Foi constatado uma precisão de  $\pm 0,7$  °C.

Outra parte do equipamento que também necessitou de modificação foi o algoritmo que controla o acionamento do motor do tribômetro. Anteriormente, os testes de atrito só poderiam ser executados em um tempo de  $\pm 01:15$  minutos. Como este tempo é pouco para verificar a estabilidade do coeficiente de atrito, o algoritmo foi alterado de forma que o tempo máximo não seja mais um problema. Inicialmente, testes foram feitos com tempo de execução de aproximadamente 10 minutos. Posteriormente constatou-se que para os objetivos do projeto, 5 minutos já eram suficientes, pois a variação do coeficiente de atrito era insignificante para tempos maiores, ou seja, o coeficiente de atrito em lubrificação limítrofe já havia alcançado o regime permanente dentro dos 5 minutos de testes.

Como o objetivo geral do projeto foi aperfeiçoar o equipamento, foi também utilizado diferentes superfícies de testes, obtidas por impressão 3D. Estas superfícies foram elaboradas com técnicas de biomimetismo. Foram utilizadas a texturização da pata da lagartixa em formato circular e da asa da coruja em perfil ramificado, além de uma superfície sem texturização (lisa) para que o material da impressão pudesse ser avaliado. Todos estes testes foram feitos com óleo de soja refinado.

Em resumo, os testes de atrito foram feitos em cinco variações de temperatura, sendo 25, 30, 35, 40 e 45 °C. Para cada uma das variações, foram feitos cinco testes de atrito em cada uma das três superfícies impressas. A cada variação de temperatura foi trocado o óleo de soja do recipiente de teste. Para cada temperatura, foi obtido uma média geral de coeficiente de atrito de ida e volta do corpo de prova (coeficiente positivo e negativo respectivamente). Após a obtenção dos cinco coeficientes com as variações de temperatura, foi feito um gráfico de cada uma das três superfícies para a demonstração destes resultados. Como o motor de acionamento está instalado na base do tribômetro, isso gerou vibrações, podendo ser responsável por parte dos ruídos gerados nos testes. Para melhorar os resultados obtidos e diminuir os ruídos gerados, foi utilizado um algoritmo chamado filtro de Kalman, que se trata de um filtro estatístico.

Como pode ser observado na Figura 24, a volta do corpo de prova teve um maior coeficiente de atrito do que na ida. Isso pode ter acontecido devido a falhas microscópicas relacionadas à impressão 3D. A impressora deve adotar um sentido fixo de impressão e, por isso, deve deixar pequenas “saliências microscópicas” durante a impressão da texturização das superfícies. Contudo, foi possível observar que com o aumento da temperatura, reduziu-se o coeficiente de atrito. Isso porque quanto maior a temperatura de um óleo, menor é a sua viscosidade, portanto menor tende ser o atrito com a transição de regime de lubrificação limítrofe para mista.

Analisando as três superfícies, constatou-se que a superfície da pata da lagartixa com perfil circular apresentou o maior coeficiente de atrito em todas as faixas de temperatura. A superfície da asa da coruja com perfil ramificado apresentou coeficiente de atrito menor até 35 °C, depois disso obteve resultados similares com a superfície não texturizada. Não houve diferença significativa entre a ida do corpo de prova em relação ao coeficiente de atrito (teste ANOVA de uma via, valor de  $p=0,321$ ). Também não houve diferença significativa entre a volta do corpo de prova em relação ao coeficiente de atrito (teste ANOVA de uma via, valor de  $p=0,184$ ). Estes resultados são apresentados na Figura 24.

Como a intenção é reduzir e não aumentar o coeficiente de atrito, a superfície da asa da coruja é um forte candidato para estudos de superfícies redutoras de coeficiente de atrito. Como nosso controle é a superfície lisa, qualquer textura impressa deste mesmo material que apresente um coeficiente de atrito maior que a superfície sem texturização é automaticamente descartado.

Como a superfície da asa da coruja se comportou bem em até certa temperatura, algumas alterações em seu perfil ou na escala de sua impressão podem fazer com que os resultados sejam melhores.

## 7. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Autumn K., Sitti M., Liang Y. A., Peattie A. M., Hansen W. R., Sponberg S., Kenny T. W., Fearing R., Israelachvili J. N., Full R. J., 2002. “Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae”. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, published online, doi:10.1073/pnas.192252799, vol. 99 no. 19, pp. 12252–12256.

Bart, J.C.J., Cavallaro, S., Gucciardi, E., 2012. “Biolubricants: Science and Technology”. Elsevier Science, Cambridge, UK.

Barreto Jr., E., 2000. *Extensometria Manual Prático*. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 73p.

Berti, A. P., Düsman, E., Soares, L. C., 2009. “Efeitos da contaminação do ambiente aquático por óleos e agrotóxicos”. *SaBios: Rev. Saúde e Biol.*, vol. 4, n. 1, pp. 45-51.

Brunetti, F., 2004. *Mecânica dos Fluidos*. Pearson, São Paulo, Brasil pp. 4-5.

Costa, H.L., Hutchings I.M., 2007. “Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions”, *Tribology International*, vol. 40, pp. 1227-1238.

Cavalcanti, E.D.C., Aguiéiras, É.C.G., da Silva, P.R., Duarte, J.G., Cipolatti, E.P., Fernandez-Lafuente, R., da Silva, J.A.C., Freire, D.M.G., 2018. “Improved production of biolubricants from soybean oil and different polyols via esterification reaction catalyzed by immobilized lipase from *Candida rugosa*”. *Fuel*, vol. 215, pp. 705-713.

Crockett, R., Roba, M., Naka, M., Gasser, B., Delfosse, D., Frauchiger, V., Spencer, N.D., 2009. "Friction, lubrication, and polymer transfer between UHMWPE and CoCrMo hip-implant materials: a fluorescence microscopy study". *Journal of Biomedical Materials Research. Part A*, vol. 89, p. 1011-1018.

Cruz, S. M., 2013. "Implementação de um filtro de Kalman estendido em arquiteturas reconfiguráveis aplicado ao problema de localização em robótica móvel". Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasil, 98p.

Da Silva, J.A.C., Soares, V.F., Fernandez-Lafuente, R., Habert, A.C., Freire, D.M.G., 2015. "Enzymatic production and characterization of potential biolubricants from castor bean biodiesel". *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, vol. 122, pp. 323-329.

De Farias, A.C.M., De Santana, J. S., Oliveira Filho, M. F., De Santana, J. S., Barbosa, C. R. F., De Medeiros, J. T. N., 2011. "Os Combustíveis Verdes do Brasil - Avaliação da Lubricidade do Biodiesel B5 e Óleos de Mamona e Coco". *HOLOS*, Ano 27, Vol.3.

De Menezes, T. P., 2012. "Sistema remoto de aquisição e monitoramento de variáveis ambientais para aplicações de previsão meteorológica". Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Brasil, 132p.

De Oliveira, K. S. M., 2014. "Avaliação numérica do desempenho termodinâmico de células termoelétricas". Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Brasil, 144p.

Dearnley, P. A., 2007. "Meeting tribological challenges with surface engineered materials. *Tribology – Materials*", *Surfaces & Interfaces*, vol. 1, no. 1, pp. 18-27.

Diaz, P.A.B., Kronemberger, F.D.A., Habert, A.C., 2017. "A pervaporation-assisted bioreactor to enhance efficiency in the synthesis of a novel biolubricant based on the enzymatic transesterification of a castor oil based biodiesel". *Fuel*, vol. 204, pp. 98-105.

Dowson, D., 1997. *History of tribology*. Professional Engineering Publish 759p.

Dowson, D., Wright V., 1973. *Biotribology*. Proceedings of the conference on the rheology of lubrication. The Institute of Petroleum, The Institution of Mechanical Engineers and the British Society of Rheology, pp. 81-88.

Embarcados, Saiba mais sobre a placa Arduino MEGA 2560. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/arduino-mega-2560/>> Acesso em 10 de julho de 2018.

Fernandes, K.V., Papadaki, A., Da Silva, J.A.C., Fernandez-Lafuente, R., Koutinas, A.A., Freire, D.M.G., 2018. "Enzymatic esterification of palm fatty-acid distillate for the production of polyol esters with biolubricant properties". *Industrial Crops and Products*, vol. 116, pp. 90-96.

Filipeflop, Sensor de Temperatura DS18B20 a Prova D'água. Disponível em: <<http://www.filipeflop.com/pd-1e7d0e-sensor-de-temperatura-ds18b20-a-prova-d-agua.html>> Acesso em 07 de dezembro de 2017.

Gimenez, S. P., 2002. *Microcontroladores 8051: teoria do hardware e do software/aplicação em controle digital/laboratório e simulação*. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 253 p.

GRANTE, 2004. *Apostila de extensometria*. Universidade Federal de Santa Catarina. Grupo de Análise e Projeto Mecânico, Florianópolis. Disponível em: <<http://grante.ufsc.br/download/Extensometria/SG-Apostila.pdf>>. Acesso em: 21 de julho 2018.

Greco-Duarte, J., Cavalcanti-Oliveira, E.D., Da Silva, J.A.C., Fernandez-Lafuente, R., Freire, D.M.G., 2017. "Two-step enzymatic production of environmentally friendly biolubricants using castor oil: Enzyme selection and product characterization.Fuel". vol. 202, pp. 196-205.

Heikal, E.K., Elmelawy, M.S., Khalil, S.A., Elbasuny, N.M., 2017. "Manufacturing of environment friendly biolubricants from vegetable oils". Egyptian Journal of Petroleum, vol. 26, Issue 1, pp. 53-59.

Hirayama, P. M. A., 2012. "Efeito do jateamento com óxido de alumínio e uso de adesivo, no afrouxamento do parafuso de pilares protéticos cônicos, com indexador de restaurações implanto suportadas". Dissertação (Mestrado em Ciências Odontológicas). Faculdade de Odontologia, Universidade de São Paulo, Brasil, 67p.

Kania, D., Yunus, R., Omar, R., Abdul Rashid, S., Mohamad Jan, B., 2015. "A review of biolubricants in drilling fluids: Recent research, performance, and applications". Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 135, pp. 177-184.

Kyowa, KFG Series General-purpose Foil Strain Gages. Disponível em: <[http://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/strain\\_gages/kfg/index.html](http://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/strain_gages/kfg/index.html)> Acesso em 19 de agosto de 2018.

Lazzeri, L., Mazzoncini, M., Rossi, A., Balducci, E., Bartolini, G., Giovannelli, L., Pedriali, R., Petroselli, R., Patalano, G., Agnoletti, G., Borgioli, A., Croce, B., D'Avino, L., 2006. "Biolubricants for the textile and tannery industries as an alternative to conventional mineral oils: An application experience in the Tuscany province". Industrial Crops and Products, vol. 24, Issue 3, pp. 280-291.

Maia, G. M. F., 2012. "Acionamento remoto de portões elétricos via celular através de microcontrolador". Conclusão de curso (Engenharia de Computação). Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - FATECS, Centro Universitário de Brasília, Brasil, 72p.

Martins, E. A. N., Da Silva, L. C. L. C., Baccarin, R. Y. A., 2007. "Líquido sinovial da articulação femuropatelar após desmotomia patelar medial experimental em equinos". *Ciência Rural*, Santa Maria, vol. 37, n.3, p.784-788.

McNutt, J., He, Q.S., 2016. "Development of biolubricants from vegetable oils via chemical modification". *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 36, pp. 1-12.

Mobarak, H.M., Niza Mohamad, E., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Al Mahmud, K.A.H., Habibullah, M., Ashraful, A.M., 2014. "The prospects of biolubricants as alternatives in automotive applications". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 34-43.

Nagendramma, P., Kaul, S., 2012. "Development of ecofriendly/biodegradable lubricants: An overview". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, Issue 1, pp. 764-774.

Naka, M.H., Morita, Y., Ikeuchi, K., 2005, "Influence of proteoglycan contents and of tissue hydration on the frictional characteristics of articular cartilage", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 219 (H), pp. 175-182.

Naka, M. H., Hattori, K., Ikeuchi, K., 2006. "Evaluation of the superficial characteristics of articular cartilage using evanescent waves in the friction tests with intermittent sliding and loading", *Journal of Biomechanics*, vol. 39, pp. 2164-2170.

Neis, P. D., 2012. "Projeto e construção de um tribômetro com controle independente da temperatura do disco". Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 130p.



Neves, M.G.C., Arruda, M.A.N., Freitas, J.C.S., Batista, E.A., Prado, T.A., Naka, M.H., 2012. "Construction of a tribometer for tests with biolubricants". In Proceedings of the 10th International Conference on Industry Applications – INDUSCON 2012. Fortaleza, Brazil.

Neves, M. G. C., Cunha, M. A. N., Yamashita Filho, N. M., Rodrigues, P. L, Batista, E. R., Padro, T. A., Naka, M. H., 2013. "Design and fabrication of a liner reciprocating tribometer using sensors with strain-gages". In: 22nd International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2013, Ribeirão Preto.

Neves, M. G. C., Freitas, J. C. S., Ferreira, J. L. P., Naka, M. H., 2011. "Construção de uma Máquina Medidora de Atrito para Testes com Biolubrificantes". In: XVIII CREEM - Congresso Nacional dos Estudantes de Engenharia Mecânica, Erechim.

Ocholi, O., Menkiti, M., Auta, M., Ezemagu, I., 2017. "Optimization of the operating parameters for the extractive synthesis of biolubricant from sesame seed oil via response surface methodology". Egyptian Journal of Petroleum.

Projeto Garagem, Cooler com peltier para resfriamento de bebidas. Disponível em <<https://projetogaragem.wordpress.com/2015/10/23/cooler-com-peltier-para-resfriamento-de-bebidas/>> Acesso em 10 de julho de 2018.

Robocore Tecnologia Ltda, Módulo Relé. Disponível em: <<https://www.robocore.net/loja/produtos/modulo-rele.html#descricao>> Acesso em 07 de dezembro de 2017.

Rodriguez, J. E. B., 2016. "Estimulador Elétrico Funcional com Utilização de Ponte H e Fonte de Corrente no Estágio de Potência". Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Brasil, 66p.

Sripada, P.K., Sharma, R.V., Dalai, A.K., 2013. "Comparative study of tribological properties of trimethylolpropane-based biolubricants derived from methyl oleate and canola biodiesel". *Industrial Crops and Products*, vol. 50, pp. 95-103.

Welch, G., Bishop, G., 2006. "An Introduction to the Kalman Filter". Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, NC, 16p.

## APÊNDICE

### Configuração da comunicação do *software*

Para a utilização do equipamento, são necessárias algumas configurações no computador e no *software*. Primeiramente, deve-se acessar o painel de controle do computador e buscar o ícone Rede e Internet, para poder alterar as configurações do adaptador de internet. Para isso, clicou-se com o botão direito do mouse em cima do ícone “Ethernet” e depois na opção “Propriedades”. Dentre os itens que aparecem, clicou-se em cima de “Protocolo IP Versão 4 (TCP/IPv4)” e depois na opção “Propriedades”. Na janela que abriu, clicou-se na opção “Usar o seguinte endereço IP” e foi preenchido conforme a Figura A1. Se o computador possuir adaptador de internet sem fio (Wi-Fi), é necessário desativar para que não haja interferência na comunicação.

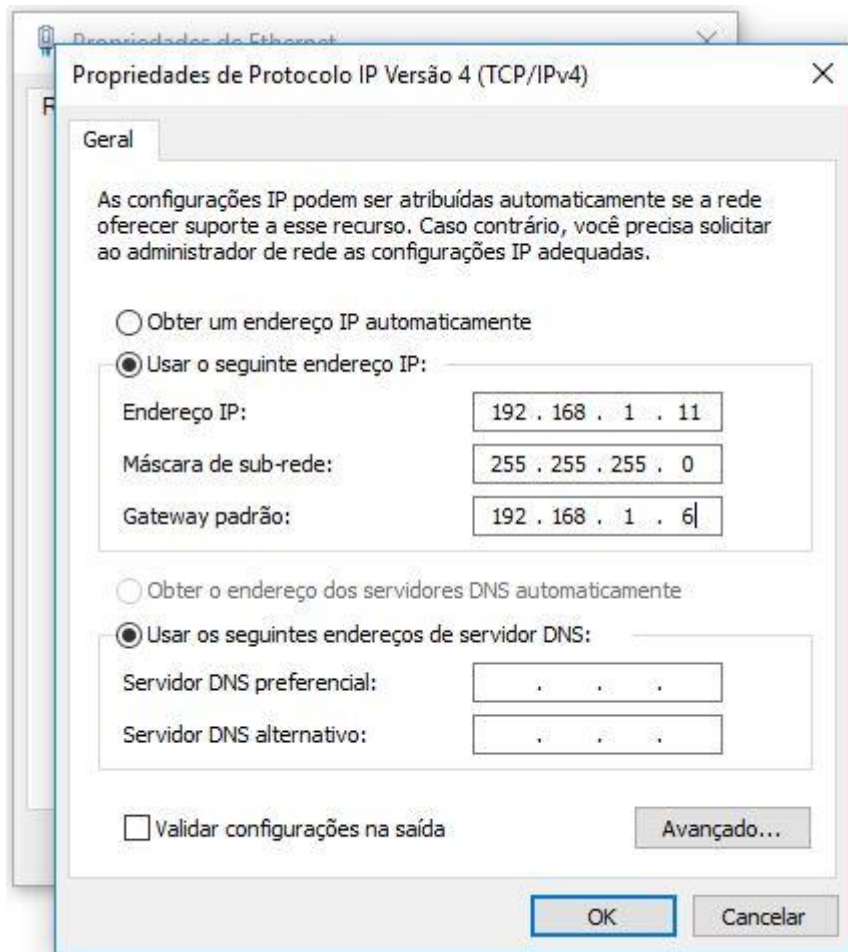


Figura A1. Configuração do IP de comunicação do computador que será conectado ao kit de extensometria para aquisição dos dados.

Para que as configurações no *software* possam ser feitas, é necessário que o usuário acesse o programa como administrador, clicando com o botão direito do mouse em cima do programa e selecionando a opção “Executar como administrador”. Sem este tipo de acesso, algumas das configurações necessárias não podem ser efetuadas.

Com o pendrive chave conectado e o *software* AqDados aberto como administrador, clicou-se na aba “Ensaio” e depois na opção “Configuração do Drive de Aquisição”. Na aba aberta, foi selecionado o drive de aquisição “ADS0500” e clicou-se em “Configurar”. Na nova aba, foi preenchido conforme a Figura A2 e clicou-se em “OK”.

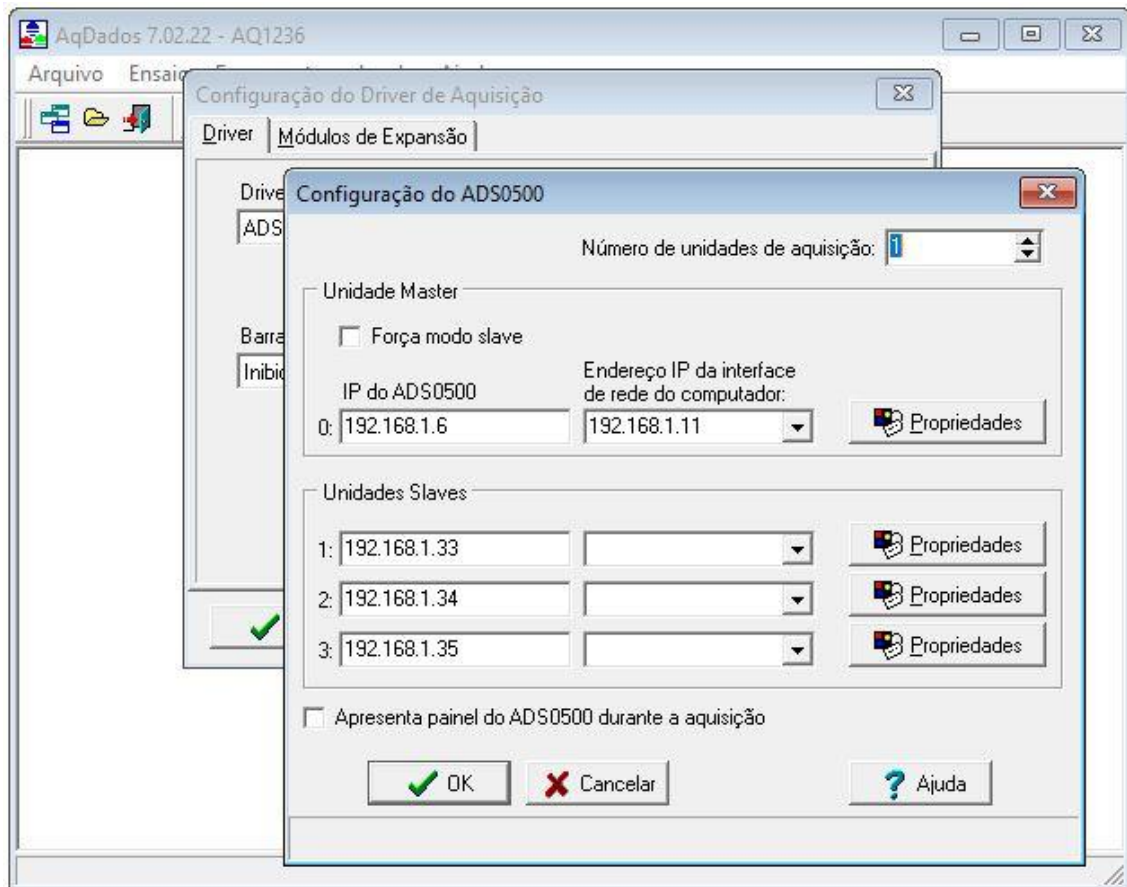


Figura A2. Configuração do IP do drive de aquisição para comunicação com o computador.

Antes de iniciar os testes, foi necessário mais uma configuração do driver. Para isso, clicou-se com o botão direito do mouse em cima do *software* Lynx AqDados 7.2 e depois na opção “Abrir local do arquivo”. Abriu-se a pasta “Drivers”, depois a pasta “COM” e então a pasta “ADS0500”. Abriu-se o arquivo “ProgADS0500”. Após isso, foi preenchido conforme a Figura A3. Depois, clicou-se em “Conecta”, “Carrega” e “Inicia Aquisição”, nesta ordem. Para verificar se toda a configuração está correta, basta clicar na aba “Pacote pcAcqData” e verificar se os valores dos canais estão oscilando, ou seja, se estão recebendo dados.

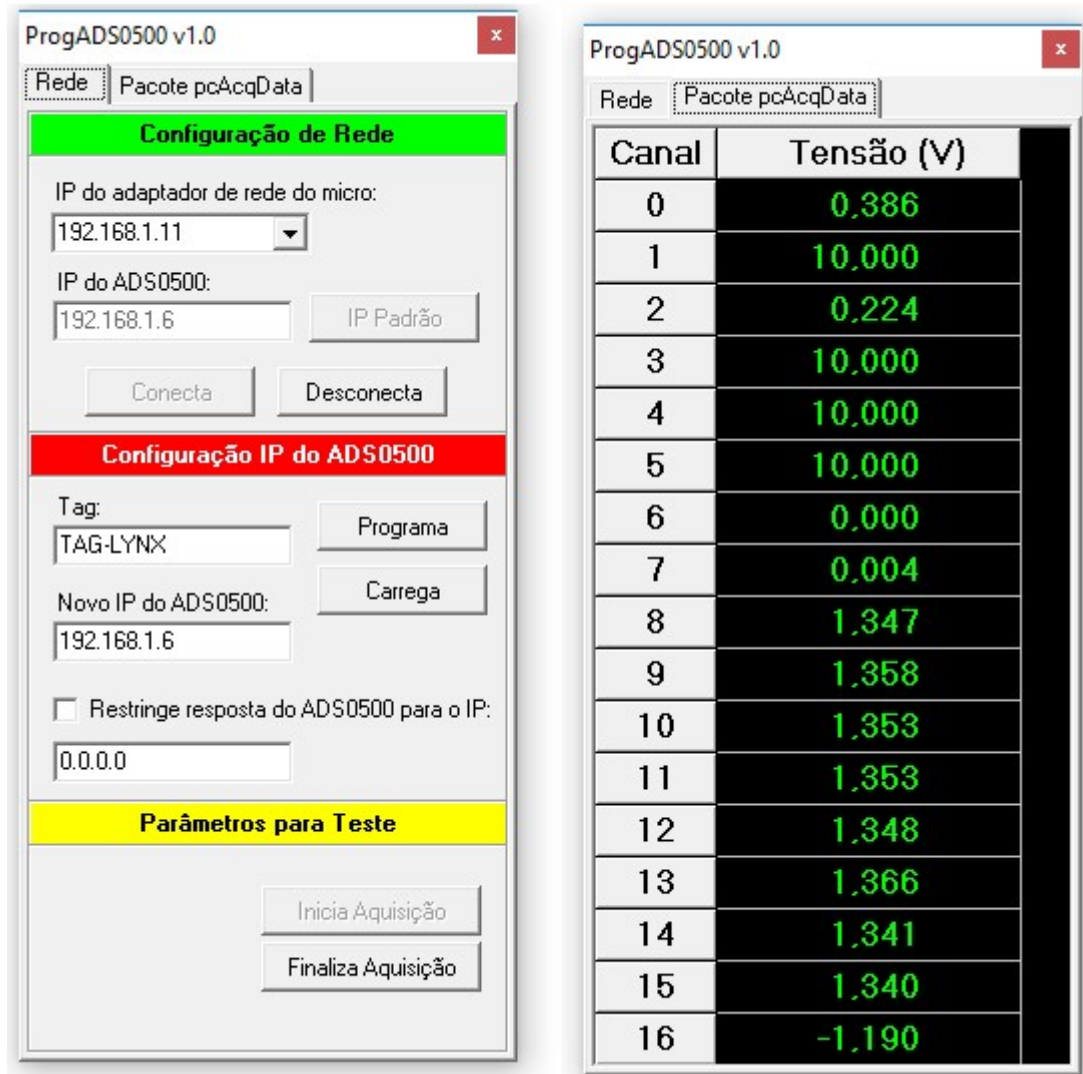


Figura A3. Configuração da rede de comunicação entre o computador e o kit de extensometria.

### Configuração e preparação para aquisição de dados

Com o *software* AqDados aberto, clicou-se na aba “Ensaio” e depois na opção “Parâmetros”. Para os testes, utilizou-se uma frequência de amostragem de 100 Hz e com tempo de simulação de 05:05 minutos, conforme Figura A4. Os 5 segundos sobressalentes são para avaliar o ruído gerado antes do motor do tribômetro ser acionado.

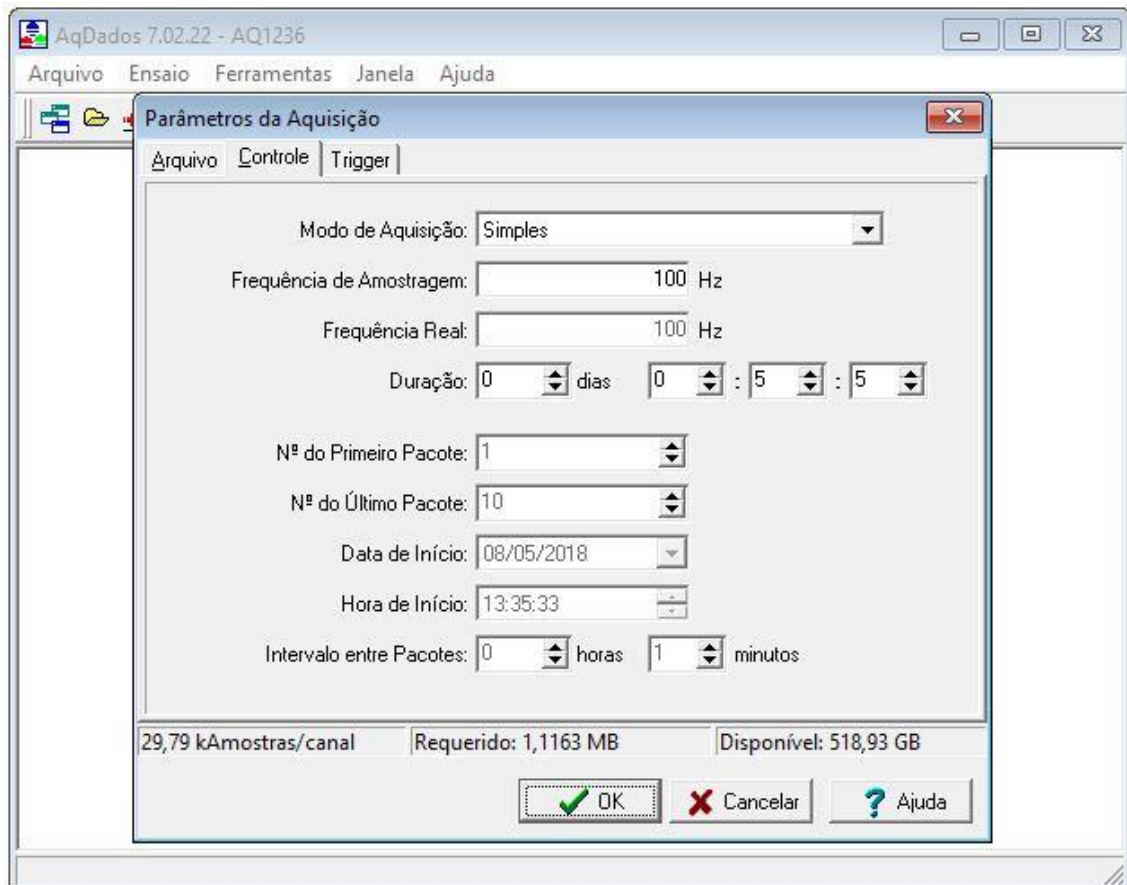


Figura A4. Parâmetros para aquisição dos dados dos testes de atrito.

Clicando novamente na aba “Ensaio”, clicou-se na opção “Entradas Analógicas”. Foi selecionado os canais que estão conectados aos sensores. Clicou-se sobre um dos canais e então foi selecionado “Aferir” e depois a opção “por Ganho e Ponto de Referência”, ou então clicando no atalho conforme Figura A5.

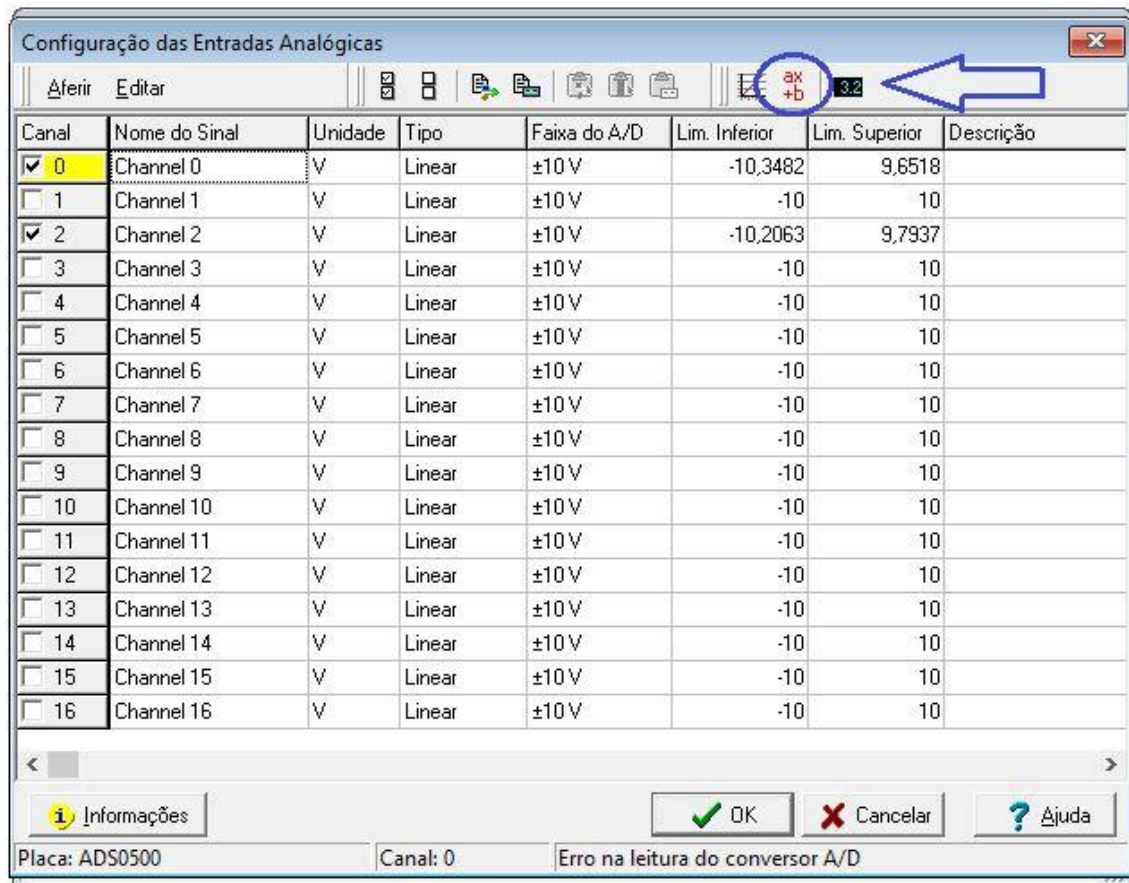


Figura A5. Configuração das entradas analógicas do kit de extensometria.

Clicou-se dentro de “Valor no A/D” e depois na opção “Aceita Limites Calculados” para que o sensor pudesse ser zerado, conforme pode ser observado na Figura A6. Depois, clicou-se em fechar.



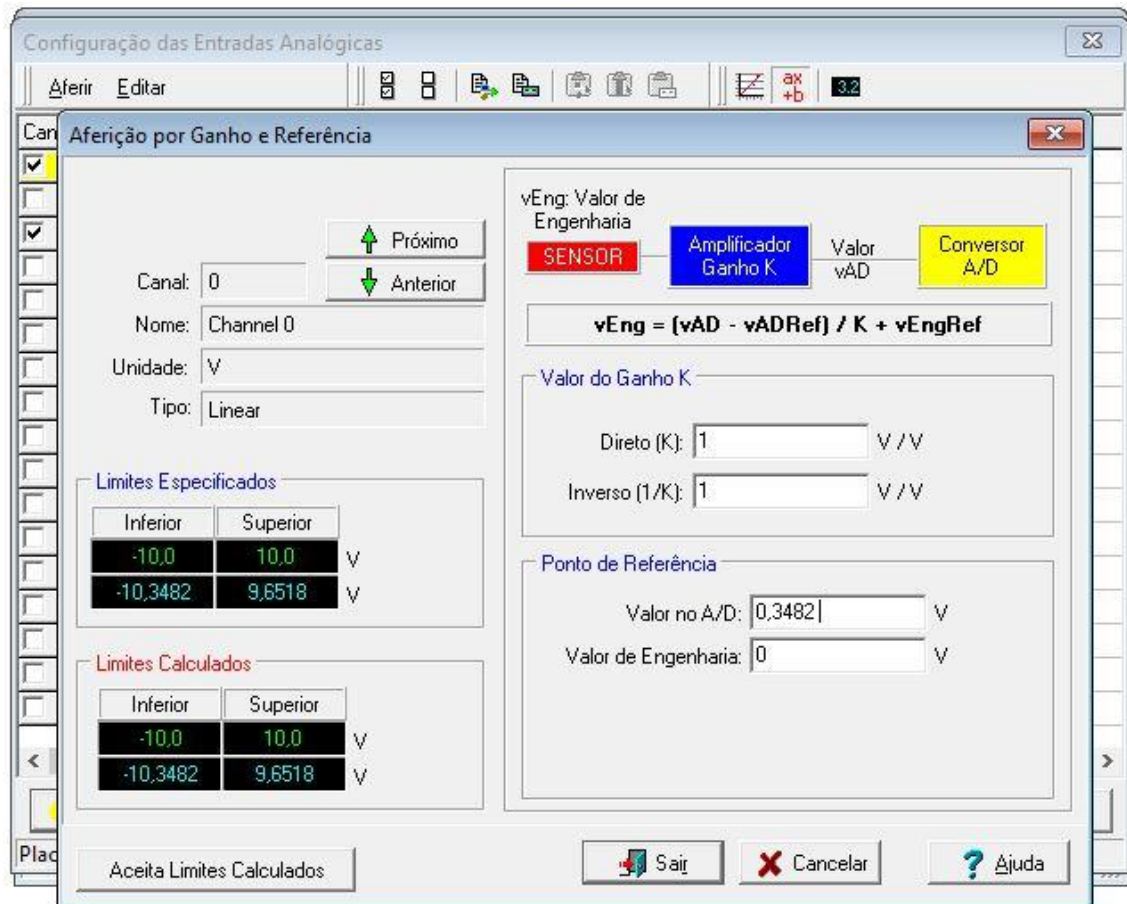


Figura A6. Calibração dos canais utilizados do kit de extensometria.

Clicou-se em “Aferir” e depois na opção “Leitura do A/D” para verificar se o sensor foi zerado corretamente. Caso ainda apresente valores superiores ou inferiores à zero, é necessário repetir o procedimento. Os sensores apresentam oscilações nos valores, portanto é necessário esperar um tempo para que possa medir e apresentar os dados corretamente. Essa oscilação varia em torno de  $\pm 3$  mV. Caso o valor seja superior, é necessário verificar novamente a calibração dos sensores para constatar se houve algum dano no componente. Após esta operação, repetiu-se o procedimento de calibração com o outro canal utilizado.

Para a definição da intensidade da força normal, foi rotacionado o eixo no sentido em que se aproxima da superfície de teste, conforme Figura A7. Na “Configuração das Entradas Analógicas”, clicou-se em aferir e depois na opção “Leitura do A/D” para visualizar a variação da força normal aplicada ao sensor. Como o sensor está zerado, após o corpo de prova encostar na superfície, o sensor

começa a medir a força aplicada sobre a superfície. Neste momento, era verificado se a força medida pelo sensor estava dentro do parâmetro de calibração, visto anteriormente na seção 4.2.2.1. Foi utilizado uma força normal em torno de 46,5 mN. Esta força foi a mesma em todos os testes aplicados.

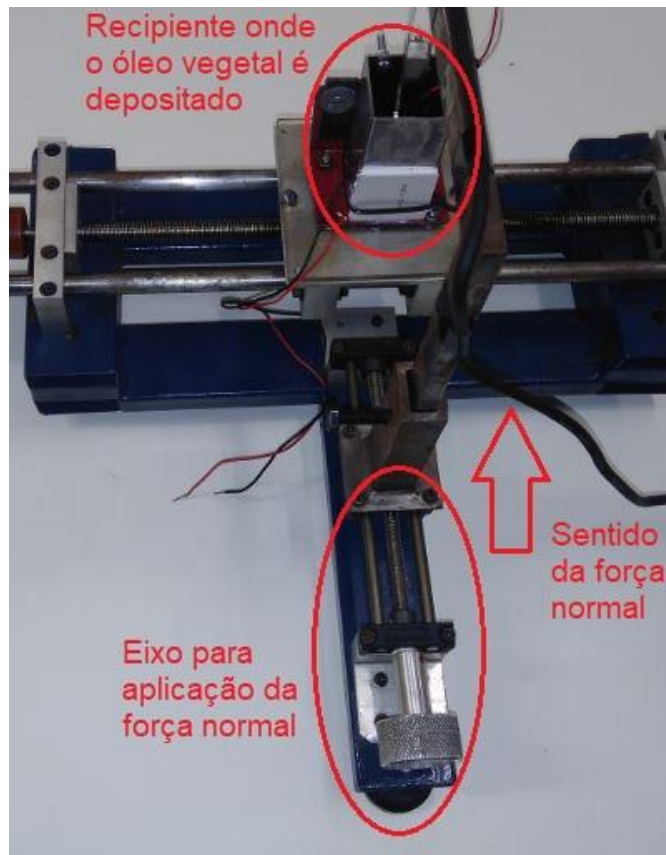


Figura A7. Aplicação da força normal no tribômetro.

#### Aquisição e coleta dos dados

Com todas as etapas anteriores concluídas, clicou-se na aba “Ensaio” e depois na opção “Executa Ensaio”. Após alguns segundos, clicou-se na opção que inicia a aquisição dos dados. Para a verificação de ruídos na coleta de dados, a aquisição dos dados foi iniciada alguns segundos antes de acionar o motor do tribômetro. Em todos os testes, foi configurado um tempo inicial de 5 segundos antes do acionamento do motor, ou seja, o tempo total de simulação foi de 05:05 minutos.

Após a conclusão do ensaio, abriu-se o *software* AqDAnalysis com a opção “Executar como administrador”. Lembrando que o pendrive que contém a chave de acesso deve estar conectado ao computador.

Ao abrir o software, clicou-se na aba “Arquivo” e depois em “Abrir Arquivo de Dados”. Os dados obtidos serão apresentados conforme Figura A8.

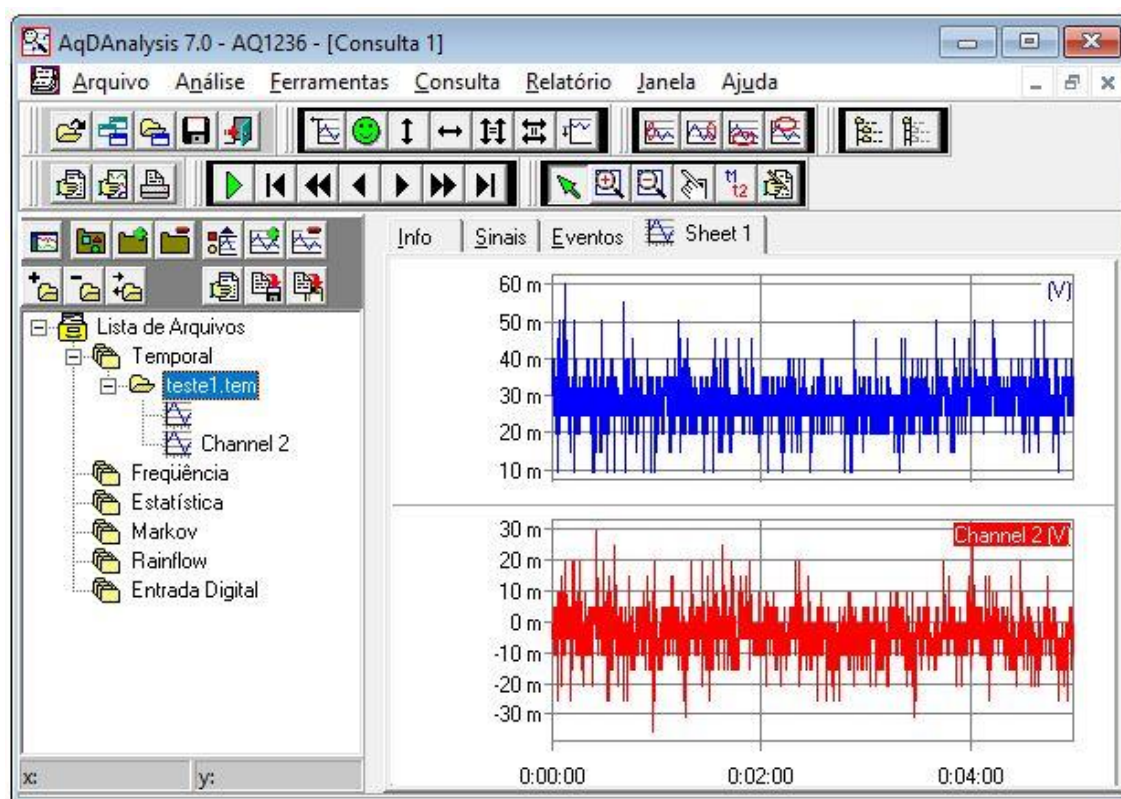


Figura A8. Dados do ensaio de atrito.

É possível alterar os instantes apresentados pelo gráfico, ou seja, é possível que o gráfico apresente dados a partir de um determinado intervalo de tempo, desde que esteja dentro do tempo de simulação. Estas configurações podem ser feitas clicando com o botão direito do mouse em cima de qualquer um dos dois gráficos, selecionando a opção “Gráfico” e depois “Propriedades”. Foi configurado um intervalo de amostragem entre 04:10 minutos e 05:00 minutos, conforme apresentado na Figura A9. Foi utilizado para análise o tempo final dos ensaios, pois neste período o óleo atinge o regime permanente, ou seja, não apresentam variações no decorrer do tempo.

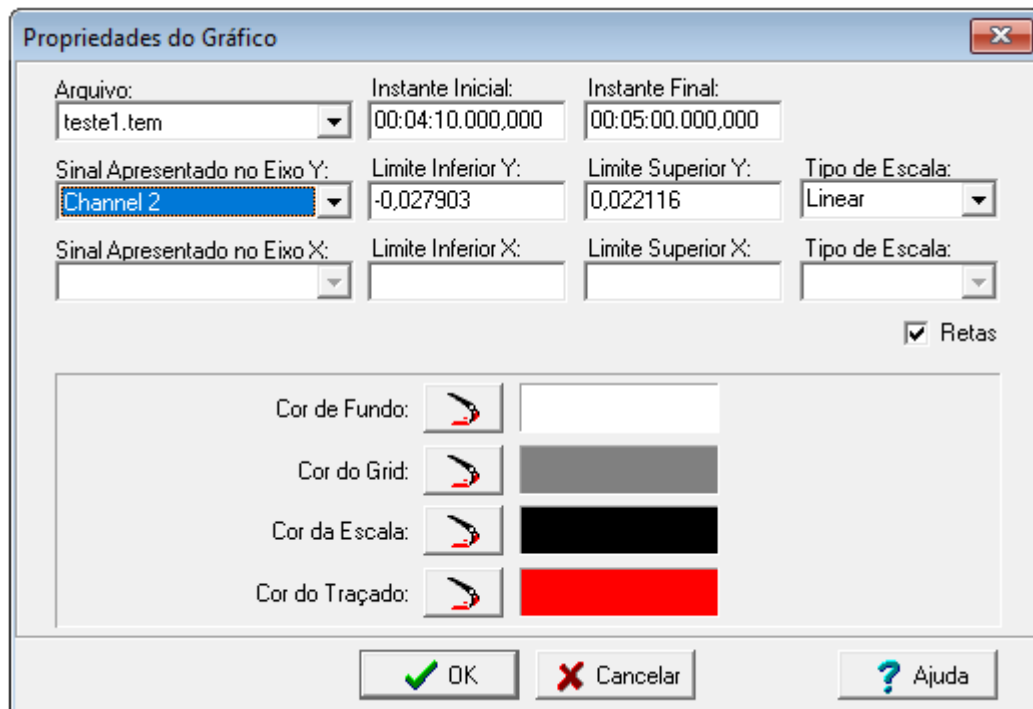
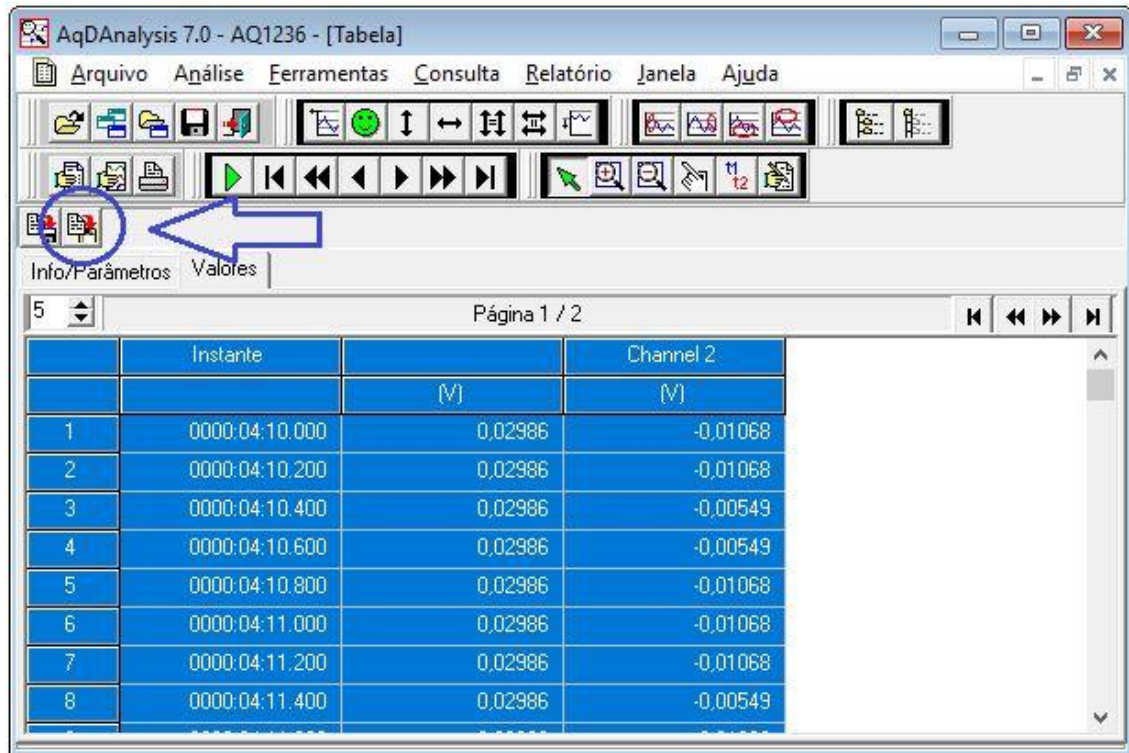


Figura A9. Propriedades do gráfico dos testes de atrito.

Conforme observações nos resultados dos testes, os gráficos apresentaram diversos ruídos, impossibilitando uma maior exatidão nos dados. Para que estes dados pudessem ser tratados, primeiramente, os mesmos foram exportados para o *software* Excel 2013. Para isso, clicou-se com o botão direito em cima de qualquer um dos gráficos e depois sobre a opção “Tabela”.

O *software* apresenta os dados dos dois gráficos em forma de uma tabela. Por padrão, ele apresenta os dados com apenas duas casas decimais, podendo ser alterado pelo usuário. Para os testes, foram utilizadas cinco casas decimais. Depois da alteração, clicou-se no ícone para copiar a tabela, conforme Figura A10. Após clicar no ícone para exportar os dados, abriu-se o *software* Excel 2013 e importou-se os dados.



AqDAnalysis 7.0 - AQ1236 - [Tabela]

Arquivo Análise Ferramentas Consulta Relatório Janela Ajuda

Info/Parâmetros Valores

Página 1 / 2

	Instante		Channel 2
		[N]	[N]
1	0000:04:10.000	0,02986	-0,01068
2	0000:04:10.200	0,02986	-0,01068
3	0000:04:10.400	0,02986	-0,00549
4	0000:04:10.600	0,02986	-0,00549
5	0000:04:10.800	0,02986	-0,01068
6	0000:04:11.000	0,02986	-0,01068
7	0000:04:11.200	0,02986	-0,01068
8	0000:04:11.400	0,02986	-0,00549

Figura A10. Exportação de dados dos testes de atrito.