

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO TRIBOLÓGICO PARA A SUBSTITUIÇÃO DO ÓLEO MINERAL POR BIO
ÓLEO PARA LUBRIFICAÇÃO DE CONJUNTO DE CORTE DE MOTOSSERRA

por

Eric Wiggers

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Wiggers, Eric

ESTUDO TRIBOLÓGICO PARA A SUBSTITUIÇÃO DO ÓLEO
MINERAL POR BIO ÓLEO PARA LUBRIFICAÇÃO DE CONJUNTO DE
CORTE DE MOTOSSERRA / Eric Wiggers. -- 2021.

26 f.

Orientador: Ney Francisco Ferreira.

Coorientador: Liu Yesukai de Barros.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. biolubrificante. 2. motosserra. 3. desgaste. 4.
tribologia. 5. talol. I. Francisco Ferreira, Ney,
orient. II. Yesukai de Barros, Liu, coorient. III.
Título.

Eric Wiggers

ESTUDO TRIBOLÓGICO PARA A SUBSTITUIÇÃO DO ÓLEO MINERAL POR BIO
ÓLEO PARA LUBRIFICAÇÃO DE CONJUNTO DE CORTE DE MOTOSSERRA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Coorientador: Me. Eng. Liu Yesukai de Barros

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Prof. Dr. Darci Barnech Campani

Porto Alegre, novembro de 2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa e em especial a minha família.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Aldori e Marlene e a minha irmã Karen, por todos os anos que sofreram junto comigo para tornar isso possível, dando todo o incentivo, apoio e condições necessárias para que eu chegasse até aqui.

À minha esposa Paula, por todo o companheirismo, paciência e compreensão nessa reta final.

Ao amigo e colega Eng. Leandro Dias Perez, pela ideia do tema deste presente estudo, pela visitação à fábrica e ensinamentos sobre o processo de fabricação do óleo, e por fornecer o óleo necessário para os ensaios.

Aos demais integrantes da equipe do LATRIB, professor Patric Neis e Jean Poletto pela ajuda com dificuldades técnicas, e ao colega Kássio Gomes pelas instruções e ensinamentos na operação dos equipamentos.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

ESTUDO TRIBOLÓGICO PARA A SUBSTITUIÇÃO DO ÓLEO MINERAL POR BIO
ÓLEO PARA LUBRIFICAÇÃO DE CONJUNTO DE CORTE DE MOTOSSERRA

Wiggers, Eric

ericwig@gmail.com

Resumo. *A lubrificação do conjunto de corte de motosserras é uma necessidade para redução do desgaste sofrido pelas peças durante o seu funcionamento. Essa lubrificação ocorre em um regime de perda total, o que significa que todo o óleo utilizado acaba sendo espalhado no meio ambiente, gerando um grande impacto ambiental. Uma alternativa para redução desse impacto é a utilização de bio óleos. O objetivo deste trabalho é comparar o desempenho tribológico entre um bio óleo e um óleo mineral comercial. Para isso, experimentos foram realizados em um tribômetro do tipo pino sobre disco no Laboratório de Tribologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. As dimensões do desgaste sofrido pelos pares tribológicos e o atrito médio ao longo do ensaio foram usados como critérios de comparação, não sendo encontradas evidências estatísticas que sugiram uma diferença na performance dos óleos. Sendo assim, conclui-se que o bio óleo demonstra boa perspectiva de uso para essa aplicação.*

Palavras-chave: *biolubrificante, motosserra, desgaste, tribologia, talol*

**TRIBOLOGICAL STUDY ON THE REPLACEMENT OF MINERAL OIL BY BIO OIL
FOR LUBRICATION OF CHAINSAW CUTTING ASSEMBLY**

Abstract. *The lubrication of chainsaw and guide bar is a necessity to reduce wear suffered by the parts during operation. This lubrication in chainsaws is classified as a total loss regime, which means that all the oil used ends up being spread in the environment, generating a big environmental impact. An alternative to reduce this impact is the use of bio oils. The objective of this work is to compare the tribological performance between a bio oil and a commercial mineral oil. For this, experiments were carried out in a pin-on-disk tribometer at the Laboratório de Tribologia (Tribology Laboratory) at Universidade Federal do Rio Grande do Sul. The dimensions of wear suffered by the tribological pairs and the average friction coefficient throughout the tests were used as comparison criteria, and no statistical evidence was found to suggest a difference in the performance of the oils. Thus, it is concluded that the bio oil shows good potential for this application.*

Keywords: *biolubricant, chainsaw, wear, tribology, tall oil*

NOMENCLATURA

Símbolos

A_p	Área de contato entre o pino e disco	[mm ²]
D_a	Diâmetro da árvore	[mm]
E_{pe}	Espessura da placa do elo	[mm]
F_n	Força normal entre disco e pino	[N]
F_p	Força exercida no pino	[N]
F_s	Força exercida no sabre	[N]
H_S	Número de Hersey	
P	Pressão de contato nas superfícies	[Pa]
P_c	Pressão de contato entre corrente e sabre	[MPa]
P_p	Pressão de contato entre pino e disco	[MPa]
R	Distância do centro do disco até o centro do pino	[m]
R_{cs}	Razão entre a área de contato do elo e a sabre e a área transversal do elo	[%]
R_q	Rugosidade	
T	Torque fornecido pelo motor	[N m]

Símbolos gregos

α	Nível de significância	
η	Viscosidade dinâmica do lubrificante	[Pa.s]
μ	Coefficiente de atrito	
ω	Velocidade angular entre as superfícies	[rps]

Abreviaturas e acrônimos

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CTO	<i>Crude Tall Oil</i>
DTO	<i>Distilled Tall Oil</i>
FAOStat	<i>Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. FUNDAMENTAÇÃO.....	2
3.1. Lubrificação.....	2
3.2. Corrente de motosserra e sua lubrificação.....	4
3.3. Desgaste do conjunto de corte.....	5
3.4. Desempenho do óleo lubrificante.....	6
3.5. Estudos relacionados à utilização de bio óleos para corrente de motosserras.....	6
4. METODOLOGIA.....	7
4.1. Óleos utilizados.....	7
4.2. Corpos de prova.....	7
4.3. Tribômetro.....	7
4.4. Gotejamento do óleo.....	8
4.5. Parâmetros dos ensaios.....	9
5. RESULTADOS.....	11
5.1. Desgaste sofrido no par tribológico.....	11
5.2. Coeficiente de atrito.....	13
5.2. Análise de variância (ANOVA).....	14
6. CONCLUSÃO.....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
ANEXO A – Laudo técnico do bio óleo utilizado.....	18

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material extremamente versátil e com diversas aplicações, sendo utilizada para várias finalidades pela humanidade há milhares de anos. Nos dias atuais, pode-se citar entre as maiores aplicações, o uso como combustível, material de construção e matéria prima para fabricação de papel. Devido a essa grande gama de aplicações, a madeira é uma *commodity* com produção em grande escala. De acordo com dados estatísticos da FAOStat¹ (2021), apenas no Brasil foram extraídos aproximadamente 370 milhões de metros cúbicos de madeira no ano de 2020.

A extração de árvores na indústria madeireira se dá, em sua grande parte, com a utilização de motosserras manuais e *harvesters*. A fabricante John Deere (2021) define as *harvesters* como sendo um veículo florestal pesado com uma lança hidráulica contendo um cabeçote de corte na ponta, se tornando assim uma máquina específica para a colheita da madeira.

Para aumentar a longevidade do conjunto de corte dessas máquinas, além de diminuir a resistência ao movimento, é necessária a lubrificação dos contatos metálicos que ocorrem, sendo essa lubrificação feita com óleos. Essa lubrificação se dá em um regime de perda total, ou seja, o óleo não permanece em um circuito fechado. Desta forma, a recuperação do óleo é inviável, e este acaba sendo consumido durante o processo. Estudos realizados por Skoupy (2004) concluíram que, dependendo do diâmetro do corte, 75-77% do óleo é absorvido pela serragem, 7-13% do óleo permanece na superfície da madeira cortada e 12-16% do óleo atinge a superfície do solo. Como a serragem do corte permanece no local, 87-93% do óleo utilizado acaba sendo espalhado no meio ambiente.

Segundo Klamerus-Iwan et al. (2015), óleos de origem mineral possuem uma mistura complexa de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), os quais são extremamente tóxicos. Dessa forma, a dispersão desses óleos no meio ambiente gera um grande impacto ambiental, alterando as propriedades físicas, propriedades biológicas, atividade enzimática e densidade populacional de minhocas no solo. Ainda segundo estimativas de Klamerus-Iwan et al. (2015), para extração de 30 milhões de metros cúbicos de madeira são utilizados 6 milhões de litros de óleo. Isso resultaria em 74 milhões de litros de óleo utilizados no Brasil no ano de 2020.

O óleo mais comumente utilizado em motosserras é de origem mineral, específico para essa aplicação. Entretanto, de acordo com Orawiec (2018), operadores e empresas de menor porte optam por utilizar óleos reciclados de motores automotivos visando diminuir custos, os quais podem chegar a 15% do custo total de operação, aumentando ainda mais o impacto ambiental.

Com o intuito de reduzir esse impacto ambiental, a substituição do óleo mineral por bio óleos surge como uma alternativa desejável. Segundo Shekhar et al. (2013), a utilização de bio óleos para lubrificação do conjunto de corte de motosserras tem grande potencial devido à boa lubricidade e boa estabilidade ao envelhecimento. Além disso, de acordo com Erhan e Asadauskas (2000) e Haigh (1995), bio óleos a base de vegetais se biodegradam muito mais rápido do que óleos minerais ou sintéticos, sendo a completa biodegradabilidade o indício de que o lubrificante retornou para a natureza de forma ecologicamente correta (Bartz, 1998).

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho tribológico de um bio óleo em comparação a um óleo mineral comercial, visando assim avaliar sua utilização como substituto para correntes de motosserra.

¹ FAOStat - *Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database* - Banco de Dados Estatísticos Corporativos da Organização para Agricultura e Alimentação

Objetivos específicos:

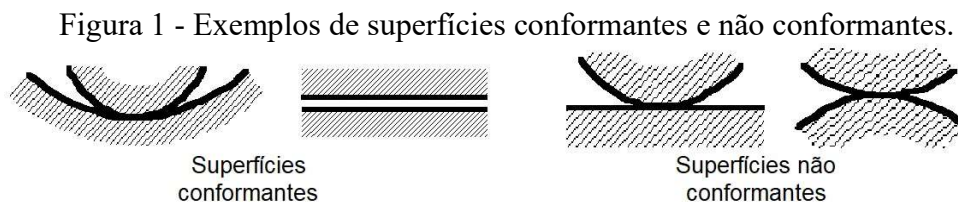
- Estabelecer critérios de comparação para o desempenho de cada óleo.
- Realizar ensaios tribológicos em ambos os óleos.
- Mensurar o desempenho dos óleos de acordo com os critérios de comparação.
- Avaliar os resultados e estabelecer a viabilidade da substituição do óleo mineral pelo bio óleo.

3. FUNDAMENTAÇÃO

3.1. Lubrificação

Segundo Stachowiak et al. (2005), a lubrificação é uma fina camada de gás, líquido ou sólido entre duas superfícies sólidas em movimento relativo. O objetivo da lubrificação é suavizar essa movimentação e evitar danos à superfície. Essa suavização na movimentação reduz perdas energéticas, aumentando assim a eficiência do processo. Já a diminuição de danos à superfície reduz o desgaste sofrido pelas interfaces do material, aumentando a vida útil do equipamento. A espessura da camada de lubrificante varia bastante de acordo com o tipo de lubrificante, a conformidade das superfícies e do regime de lubrificação, estando normalmente entre 1 a 100 μm .

A conformidade das superfícies é uma característica geométrica, conforme apresentado na Figura 1. As superfícies conformantes tendem a facilitar a formação de uma camada de lubrificante (ou filme), enquanto que nas superfícies não conformantes a formação de um filme lubrificante é mais difícil. Isso ocorre devido as altas pressões geradas na região de contato de superfícies não conformantes, que tendem a expulsar o lubrificante.



O atrito e desgaste sofrido por duas superfícies em movimento relativo são consequências da interação entre as rugosidades e asperezas das superfícies. Devido a isso, quanto maior a camada de lubrificante, mais distantes as superfícies estarão entre si, proporcionando uma redução no desgaste sofrido. Já o coeficiente de atrito μ em condições tribológicas lubrificadas varia de acordo com o regime de lubrificação.

Os regimes de lubrificação são classificados na literatura como limítrofe, misto, hidrodinâmico e elastohidrodinâmico. Hamrock et al. (2004) descreve o regime limítrofe como a situação na qual o filme lubrificante não possui espessura significativa, não sendo capaz de afastar as superfícies. Isso ocasiona um contato severo entre as asperezas, de forma que as propriedades viscosas dos lubrificantes são desprezíveis, e a capacidade de lubrificação é dependente exclusivamente das propriedades químicas do mesmo. Esse regime é caracterizado por atrito e desgaste elevados.

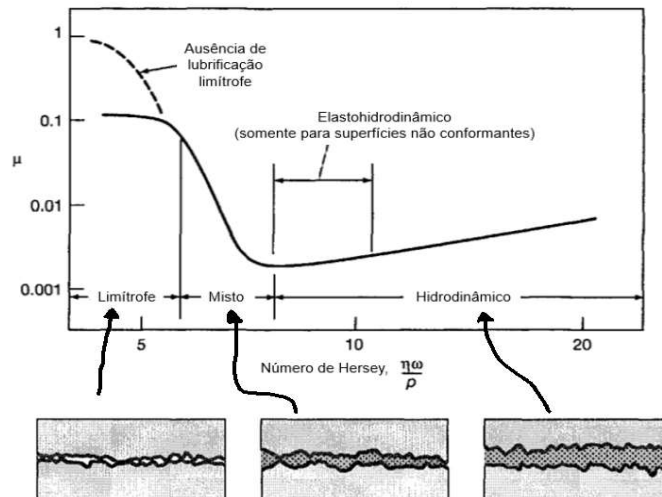
Em uma condição de transição, onde há o início da formação de um filme lubrificante entre as superfícies, temos o regime misto. Neste regime, a espessura do filme é da ordem de grandeza da rugosidade da superfície, fazendo com que o contato entre as asperezas seja reduzido. Sendo assim, se caracteriza por ter atrito e desgaste reduzidos comparado ao regime limítrofe.

O regime hidrodinâmico ocorre em superfícies conformantes, e consiste na formação de uma camada de lubrificante espessa o suficiente a ponto de separar completamente as asperezas, de forma que o atrito seja puramente viscoso. Este é o regime que proporciona o menor desgaste nas superfícies.

Por fim, o regime elastohidrodinâmico ocorre quando não há conformidade entre as superfícies, o que acarreta em uma pressão elevada no ponto de contato entre as mesmas. Essa pressão elevada ocasiona uma pequena deformação elástica local na região de contato, gerando assim uma conformidade localizada. Nessa região de conformidade localizada, um filme se forma, semelhante ao regime hidrodinâmico, sendo a propriedade da piezoviscosidade (aumento da viscosidade com a pressão) do lubrificante a responsável por garantir que o mesmo exerça a sua função. Porém, no regime elastohidrodinâmico o desgaste tende a ser por fadiga superficial.

A variação do atrito para os diferentes regimes de lubrificação pode ser visto na Curva de Stribeck, a qual relaciona o atrito com o Número de Hersey. Essa curva é apresentada na Figura 2.

Figura 2 - Diagrama de Stribeck. [Adaptado: Hamrock et al. (2004)]



O Número de Hersey H_s consiste em um parâmetro adimensional, que é definido pela Equação 1.

$$H_s = \frac{\eta \omega}{P} \quad (1)$$

sendo η a viscosidade dinâmica do lubrificante [Pa.s], ω a velocidade angular entre as superfícies [rps] e P a pressão de contato nas superfícies [Pa].

De acordo com Orawiec et al. (2020), em condições normais de operação as motosserras trabalham no regime hidrodinâmico. Operar nesse regime é desejado para se obter o menor desgaste possível, o que ocorre em valores mais elevados do Número de Hersey. Porém, um Número de Hersey muito elevado resultará em um maior atrito viscoso do lubrificante, aumentando a perda energética. Adota-se como prática comum na engenharia ajustar a viscosidade do óleo para se obter o regime hidrodinâmico com o menor Número de Hersey possível.

3.2. Corrente de motosserra e sua lubrificação

Tanto a motosserra manual quanto grande parte dos cabeçotes de corte das *harvesters* utilizam o mesmo princípio de funcionamento para o corte. Seu sistema consiste em dentes de corte afiados distribuídos em intervalos regulares na parte externa de uma corrente, a qual se movimenta de forma guiada ao longo de um sabre. O movimento da corrente é efetuado através de uma roda dentada motora, a qual costuma ser acionada por motores de combustão ou elétrico no caso das motosserras, e motores hidráulicos nas *harvesters*. Esses componentes são apresentados na Figura 3.

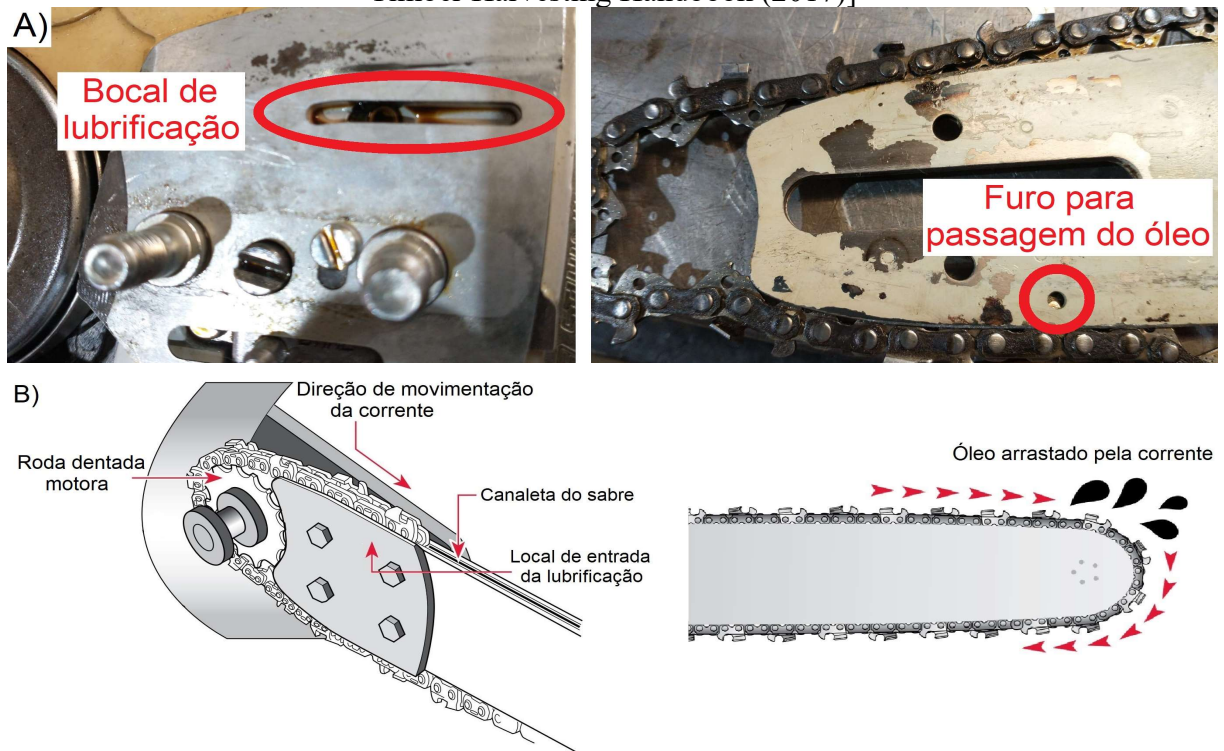
Figura 3 - Conjunto de corte IGGESUND FOREST R2. [Adaptado: AgriExpo online (2021) e Oregon® Mechanical Timber Harvesting Handbook (2017)]



Orawiec (2018) cita que a lubrificação dos conjuntos de corte é fundamentalmente necessária em quatro regiões, sendo a primeira e mais óbvia o contato entre corrente e sabre, o segundo são os pinos de articulação da corrente, terceiro o contato entre corrente e roda dentada movida, e o quarto o contato entre corrente e roda dentada motora. O maior objetivo do óleo lubrificante é a proteção ao desgaste nessas regiões, visto que o custo de peças de reposição é alto e o tempo perdido de produção é significativo para uma troca completa do conjunto de corte.

Sellars (2021) descreve o método padrão de lubrificação de conjuntos de corte, que é o método mais comumente utilizado pela maioria dos fabricantes. Esse método de lubrificação é indireto, o que quer dizer que o óleo não é colocado diretamente nas superfícies de contato. O método consiste em bombear óleo do reservatório até o bocal de lubrificação, o qual é alinhado com um pequeno furo na lateral do sabre, localizado no início do contato com a corrente após passagem pela roda dentada motora. Esse furo permite o acesso do óleo até a canaleta do sabre, de onde é arrastado ao longo dessa com a passagem da corrente. Por fim, a força centrífuga, em especial na ponta do sabre, faz com que o óleo saia da canaleta em direção à corrente, lubrificando assim os pontos de contato. A Figura 4 apresenta esse funcionamento.

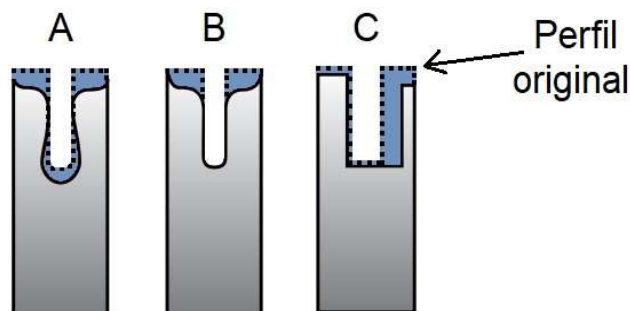
Figura 4 - Método de lubrificação padrão. [Fonte: B) Adaptado: Oregon® Mechanical Timber Harvesting Handbook (2017)]



3.3. Desgaste do conjunto de corte

De acordo com o manual da fabricante Oregon® (2017), para compensar o desgaste nos dentes de corte, os mesmos devem ser reafiados sempre que necessário. Para compensar o desgaste dos pinos da corrente, o sabre deve ser ajustado de forma a remover excesso de folga, e a corrente deve ser trocada quando o passo da mesma atingir um valor limite. Para compensar o desgaste do sabre, deve ser analisado a forma do desgaste. A Figura 5 demonstra os principais formatos do desgaste no perfil da canaleta do sabre.

Figura 5 - Tipos comuns de desgaste no perfil do sabre. [Adaptado: Oregon® Mechanical Timber Harvesting Handbook (2017)]



O desgaste do tipo “A” representa um sabre que chegou ao final de sua vida útil, já ocorrendo desgaste no fundo da canaleta devido ao contato com as guias da corrente. O desgaste do tipo “B” representa o desgaste esperado com o tempo de operação, devendo ser limado o sabre esporadicamente de forma a esquadrear o seu perfil novamente. O desgaste do tipo “C” representa um desgaste assimétrico atípico. Desgastes dos tipos “A” e “C” requerem a substituição do sabre.

3.4. Desempenho do óleo lubrificante

Considerando-se que o principal objetivo da lubrificação dos conjuntos de corte é reduzir o desgaste nos componentes, pode-se considerar o óleo com melhor desempenho aquele que resultar o menor desgaste.

Segundo Orawiec (2018), medir o desempenho de um óleo lubrificante para conjunto de corte de motosserras através de monitoramento do desgaste dos componentes é um processo árduo, que consumiria muito tempo e necessitaria de equipamentos específicos e vários conjuntos de corte completos como corpos de prova. Ainda segundo Orawiec (2018), a performance de um lubrificante pode ser medida pela temperatura média do sabre durante o funcionamento. Isso se deve ao fato de que o desgaste dos componentes é diretamente proporcional à temperatura de operação, o que garante que um lubrificante que proporciona uma menor temperatura de operação também proporcionará um menor desgaste dos componentes. O aumento de temperatura é uma consequência da energia dissipada por atrito, um lubrificante que oferece um menor coeficiente de atrito oferecerá também uma maior proteção ao desgaste. Com esse critério de comparação, pode-se medir o desempenho dos lubrificantes em ensaios do tipo pino sobre disco em um tribômetro.

3.5. Estudos relacionados à utilização de bio óleos para corrente de motosserras

Orawiec et al. (2020) realizaram um estudo comparando seis óleos, sendo estes divididos em três grupos: óleos minerais específicos para corrente de motosserra, óleos minerais para motor automotivo, e bio óleos de canola. Para cada grupo, foi escolhido um óleo considerado econômico, com um valor de mercado mais baixo, e um óleo considerado *premium*, com um maior valor de mercado. O método utilizado foi o mapeamento da temperatura do sabre da motosserra com a utilização de uma câmera infravermelho de alta resolução, tanto em regime de corte quanto em regime de movimento livre da corrente. Como critério de comparação, foi utilizado a valor médio da temperatura do sabre. Concluiu-se nesse estudo que o grupo com o melhor desempenho foi o grupo dos óleos minerais específicos para corrente de motosserras, seguido dos óleos minerais para motor automotivo e por último os bio óleos. Entretanto, as diferenças de performance não foram grandes em magnitude, e não foi encontrada correlação entre o preço de um óleo e seu desempenho.

Visser (2018) realizou um estudo com a participação de nove equipes responsáveis pelo corte de árvores, as quais possuíam um somatório de dez motosserras e sete *harvesters* em utilização. Durante o período de um mês, a quantidade de óleo mineral utilizado por equipe foi monitorada, e então foi feita a transição para um bio óleo a base de colza, na qual os operadores deveriam regular a vazão desse bio óleo para as máquinas de forma que sentissem que o desgaste e resistência ao movimento do maquinário não tivesse sido alterado. Obteve-se uma média de 39,6% na redução do consumo de óleo entre as equipes monitoradas com a utilização desse bio óleo. Para validar esses resultados, a motosserra mais utilizada por essas equipes teve a temperatura da ponta do sabre mensurada, tanto em regime de corte quanto em regime de movimento livre. Essa medição iniciou utilizando-se vazão máxima de óleo, depois com uma redução de 25%, 50% e 75%. Em todas essas condições, o bio óleo manteve uma temperatura menor na ponta do sabre, sendo que o óleo mineral nem foi testado com 75% de redução devido à temperatura já ter ficado muito alta no teste com 50 % de redução. Concluiu-se que o bio óleo testado, embora tendo um custo mais alto que o óleo mineral, tinha um bom desempenho, sendo que 2/3 das equipes mantiveram o uso do bio óleo após o término do estudo em questão.

4. METODOLOGIA

4.1. Óleos utilizados

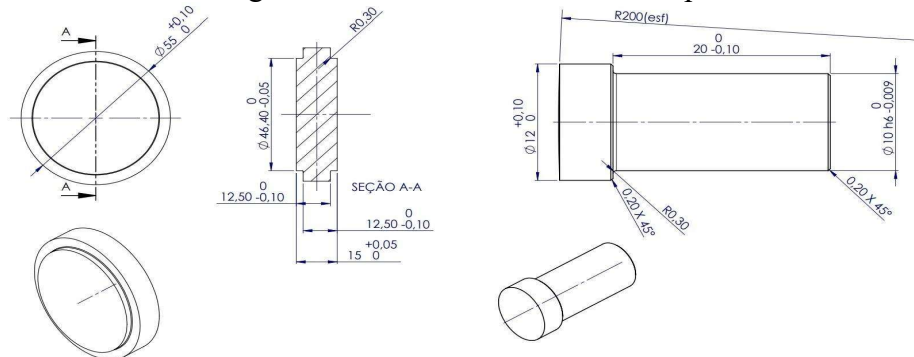
Neste trabalho foram utilizados dois óleos, um de origem mineral e um bio óleo. O óleo mineral escolhido como referência foi o óleo recomendado pela fabricante de motosserras Stihl, sendo que o mesmo é fabricado pela Castrol, tendo o nome comercial STIHL MAGNUM.

Já a opção de bio óleo utilizado é fabricado pela Lubmais, tendo o nome comercial LUBMOTO-100. Esse óleo é oriundo da própria madeira, fabricado a partir de um subproduto da indústria da celulose. Após a extração da celulose da madeira, tem-se como subproduto o *crude tall oil* (CTO), também chamado de talol. Esse subproduto passa então por um processo de destilação, obtendo-se o *distilled tall oil* (DTO). O DTO tem tendência a formação de cristais com o passar do tempo, o que não é desejável em um lubrificante, pois esses cristais possuem uma maior dureza e acelerariam o desgaste tribológico. Por isso, antes de poder ser utilizado como lubrificante, deve passar por um processo de estabilização. Após estabilizado, este forma a base do bio óleo proposto. Informações adicionais do óleo podem ser encontradas no certificado de qualidade que consta no Anexo A.

4.2. Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados como par tribológico para os ensaios consistem em discos e pinos confeccionados em aço SAE-52100, cujas dimensões são apresentadas na Figura 6.

Figura 6 - Dimensões do disco e do pino.



Os discos são lixados, sendo que esse processo de lixamento molhado é feito em uma lixadeira/politriz metalográfica marca Arotec, modelo AROPOL-VV utilizando-se as lixas de granulometria 400, 600 e 1200, iniciando na menor granulometria.

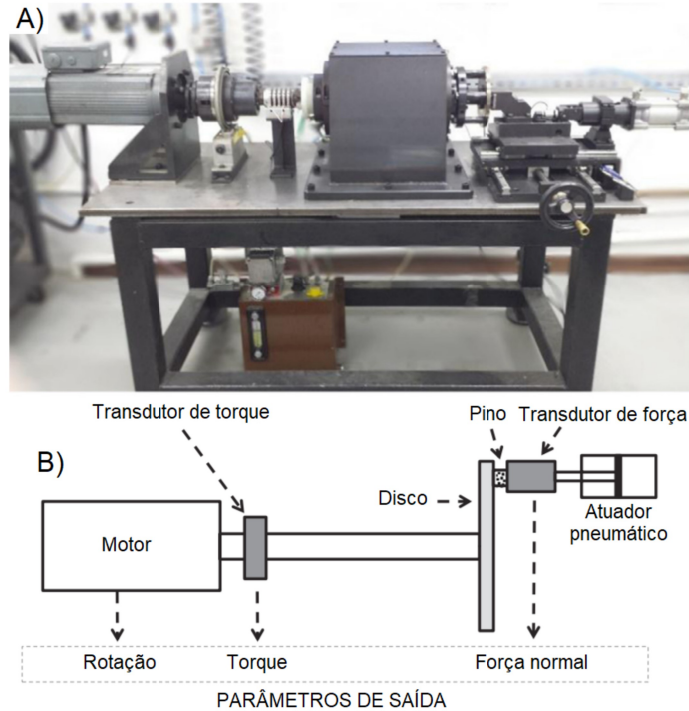
Após o lixamento, utilizou-se um critério de superfície para que os discos pudessem ser ensaiados. A rugosidade dos discos foi mensurada através de um rugosímetro marca Mitutoyo, modelo SJ-201. Para o disco ser aprovado para teste, foram realizadas quatro medições com espaçamento angular de 90° de giro entre uma e outra. Desta forma, necessitava-se que a máxima rugosidade R_q (desvio da raiz quadrada do perfil medido), não ultrapasse 0,1 μm em nenhuma das quatro medições para que o disco seja submetido ao experimento no tribômetro.

4.3. Tribômetro

O tribômetro utilizado para os ensaios é do tipo pino sobre disco, seguindo a norma ASTM G99, e entre as principais características de funcionamento, pode-se citar o motor com

inversor que permite variar e controlar a rotação de forma precisa, o transdutor de torque que mede o torque na saída do eixo do motor, o transdutor de força para medir a força normal do pino sobre o disco e o pistão pneumático que exerce e regula essa força. O tribômetro é apresentado esquematicamente na Figura 7.

Figura 7 - Tribômetro do LATRIB - UFRGS. [Adaptado: Barros et al. (2019)]



Os parâmetros de saída medidos pelo tribômetro são a rotação, torque e força normal. Com esses parâmetros é possível calcular o coeficiente de atrito (μ) através da Equação (2).

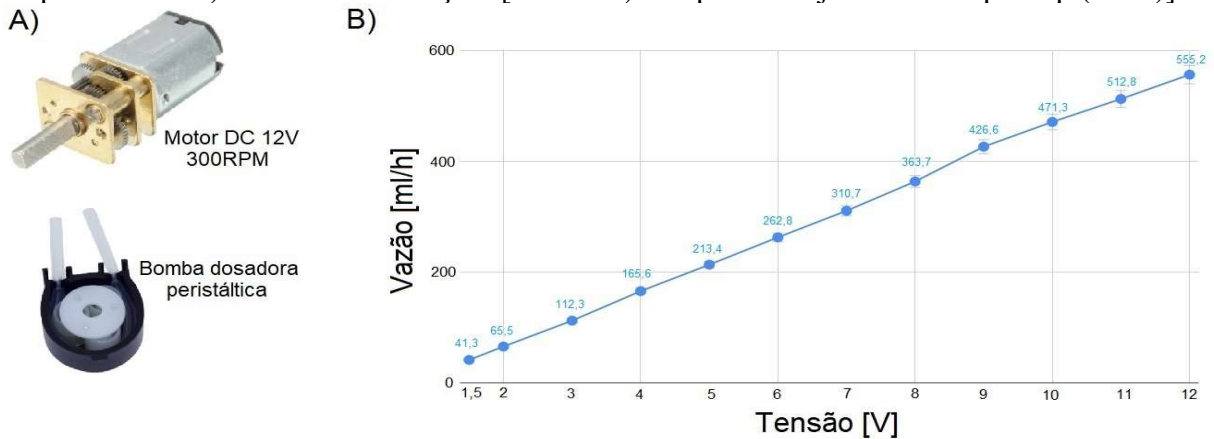
$$\mu = \frac{T}{F_N R} \quad (2)$$

onde T é o torque fornecido pelo motor [N m], F_n é a força normal entre o disco e pino [N] e R é a distância do centro do disco até o centro do pino [m]. Maiores detalhes deste equipamento podem ser vistos em Neis, P. D., 2012.

4.4. Gotejamento do óleo

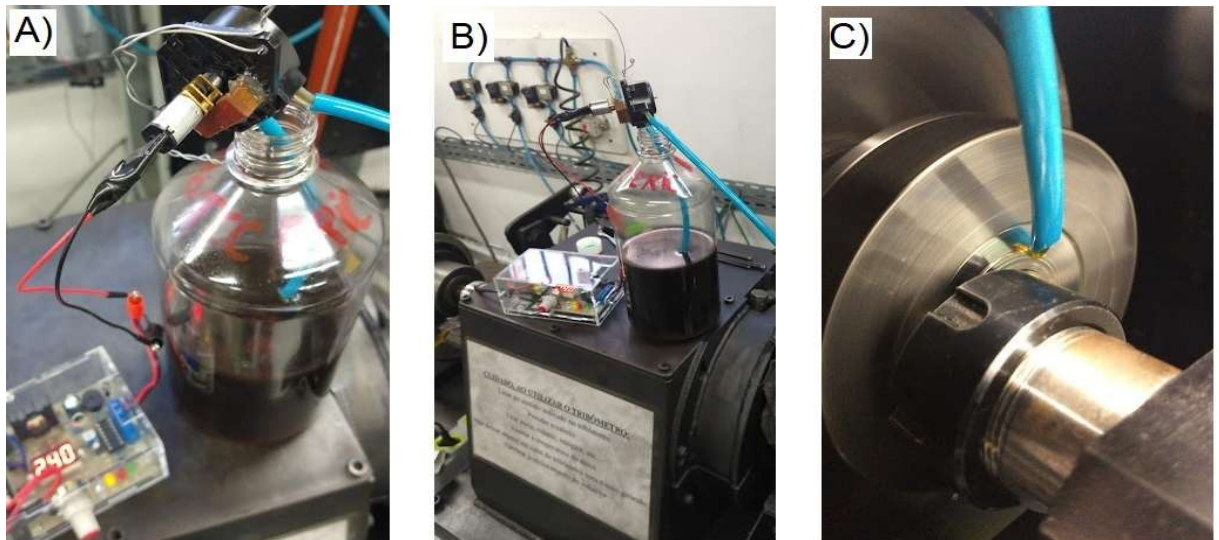
Para se obter uma lubrificação uniforme na zona de contato tribológico, utilizou-se uma bomba peristáltica, a qual foi adaptada a um motor de corrente contínua 12 V de baixa rotação, 300 RPM. Esse conjunto motor e bomba foi então calibrado utilizando-se quatro óleos com diferentes viscosidades cinemáticas, medindo-se para cada óleo o tempo necessário para o bombeamento de 5 ml e 10 ml. Para isso utilizou-se uma fonte de alimentação marca Icel, modelo Ps-3005, sendo feita uma variação na alimentação do motor de 1,5 V até 12 V, com incremento de 1 V. Obteve-se vazões muito semelhantes para os diferentes óleos, sendo gerada a curva média da vazão [ml/h] de acordo com a tensão de alimentação [V]. A Figura 8 apresenta os componentes utilizados para a construção do sistema de lubrificação, bem como a curva de calibração.

Figura 8 - Sistema de lubrificação. A) Motor DC 12V 300RPM e bomba dosadora peristáltica B) Curva de calibração. [Fonte: A) Adaptado: Loja online FilipeFlop (2021)]



Utilizando-se esse sistema de lubrificação, foi possível obter uma vazão facilmente ajustável, precisa e constante ao longo da duração de todos os ensaios. Estabeleceu-se uma vazão inicial estimada de uma gota a cada dois segundos, medindo-se posteriormente o volume bombeado em um recipiente graduado durante 10 minutos para se obter uma maior precisão. Essa vazão equivale a 1,25 ml/min, que foi obtida com a tensão de alimentação de 2,4 V. A vazão de óleo proveniente dessa bomba foi então direcionada para a zona de contato com auxílio de mangueiras, que foram posicionadas e seguramente fixadas. A Figura 9 mostra o posicionamento da fonte de alimentação 12 V ajustável, da bomba peristáltica, reservatório de óleo e mangueiras de distribuição.

Figura 9 - Posicionamento da bomba peristáltica no tribômetro: A) fonte ajustável 12V alimentando o motor, B) reservatório de óleo, C) gotejamento do óleo na superfície de contato do disco.



4.5. Parâmetros dos ensaios

Devido ao diâmetro reduzido do disco e a limitações na rotação máxima do tribômetro, estabeleceu-se para os ensaios uma velocidade de movimento relativo de 1 m/s.

Para estabelecer a força do atuador pneumático, procurou-se obter a mesma pressão de contato exercida pela corrente sobre o sabre no contato entre pino e disco. Isto foi calculado através das Equações 3 e 4 abaixo.

$$P_c = P_p \quad (3)$$

$$\frac{F_s}{2 E_{pe} R_{cs} D_a} = \frac{F_p}{A_p} \quad (4)$$

sendo P_c a pressão de contato entre corrente e sabre [MPa], P_p a pressão de contato entre pino e disco [MPa], F_s a força exercida no sabre [N], F_p a força exercida no pino [N], E_{pe} a espessura da placa do elo [mm], R_{cs} a razão entre a área de contato do elo e a sabre e a área transversal do elo [%], D_a o diâmetro da árvore [mm], e A_p a área de contato entre o pino e disco [mm²].

Para se estabelecer a pressão de contato entre corrente e sabre, foi escolhido a corrente comercial com passo de 0,404” e espessura da placa do elo de 0,122”. De acordo com o manual da fabricante Oregon® (2017), a força recomendada no centro do sabre pressionando contra a árvore para essa corrente deve ser de até 700 N. Devido à geometria do elo da corrente, estimou-se que razão de contato entre as placas do elo e o sabre seja de 50% da área transversal do elo. A Figura 10 apresenta essa estimativa.

Figura 10 - Área de contato entre corrente e sabre. [Adaptado: Sellars (2021)]



De acordo com Pezzutti et al. (2016), o diâmetro das árvores da espécie *Pinus taeda* L., bastante cultivada no Sul do Brasil, é de aproximadamente 256 a 415 mm com 15 anos de idade. Com base nisso, estabeleceu-se um diâmetro médio de 335 mm. Por último, a área de contato entre pino e disco é a área de um círculo de 12 mm de diâmetro, sendo esse o diâmetro do pino. Da Equação 4, pode-se obter a força exercida no pino (F_p), mostrada na Equação 5.

$$F_p = \frac{F_s A_p}{2 E_{pe} R_{cs} D_a} = \frac{700 \text{ N} \cdot 113,1 \text{ mm}^2}{2 \cdot 3,1 \text{ mm} \cdot 0,5 \cdot 335 \text{ mm}} = 76,3 \text{ N} \approx 80 \text{ N} \quad (5)$$

Foi estabelecido um tempo de ensaio de 2 horas, e após a realização de cada ensaio, foram analisados quantitativamente o desgaste sofrido pelo par tribológico utilizando-se um microscópio da marca Zeiss, modelo Axio Lab.A1, com magnificação de 25 vezes. Desta forma, foi possível mensurar o diâmetro médio das marcas de desgaste do pino bem como a trilha desgastada do disco. Devido ao aparente baixo desgaste sofrido pelos pares tribológicos dos primeiros quatro ensaios, decidiu-se dobrar o valor da força normal para 160 N com o intuito de agravar o processo de desgaste. Ainda assim, a análise quantitativa do desgaste desse ensaio com força normal maior também apresentou valores baixos para ambos os óleos. Por fim, decidiu-se dobrar o tempo de ensaio para 4 horas, de forma que o último ensaio de

cada óleo foi realizado com a força normal maior e o dobro do tempo. Todos os parâmetros de cada ensaio são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros dos ensaios realizados.

Nomenclatura	Velocidade [m/s]	Vazão [ml/min]	Tipo óleo	Tempo [h]	Força [N]
MIN_2H_80N_1	1	1,25	Mineral	2	80
MIN_2H_80N_2					
MIN_2H_160N				4	160
MIN_4H_160N					
BIO_2H_80N_1			Bio	2	80
BIO_2H_80N_2					
BIO_2H_160N				4	160
BIO_4H_160N					

5. RESULTADOS

5.1. Desgaste sofrido no par tribológico

Através da análise microscópica, é possível notar uma grande variação nas dimensões dos desgastes entre os pares tribológicos, em especial na largura da trilha dos discos, mesmo para ensaios realizados sob os mesmos parâmetros. As Figuras 11 e 12 apresentam as trilhas e marcas de desgaste sofridos nos pares tribológicos com óleo mineral e bio óleo, respectivamente.

Figura 11 - Desgaste nos pares tribológicos lubrificados com óleo mineral.

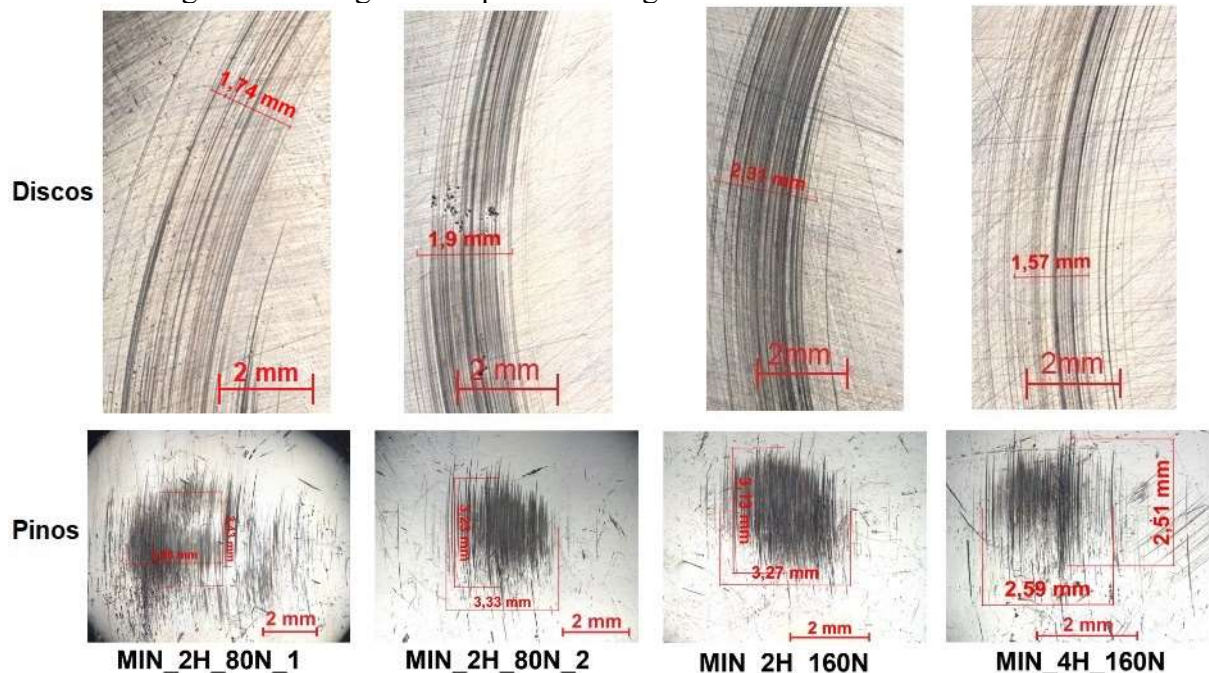
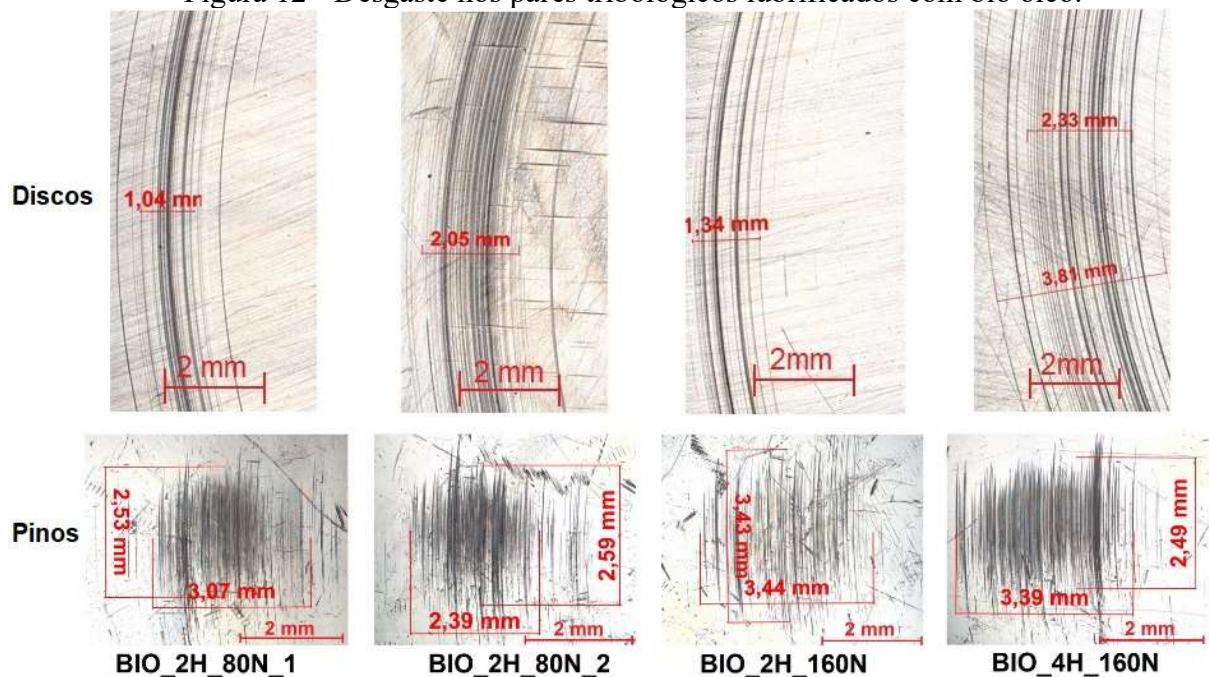
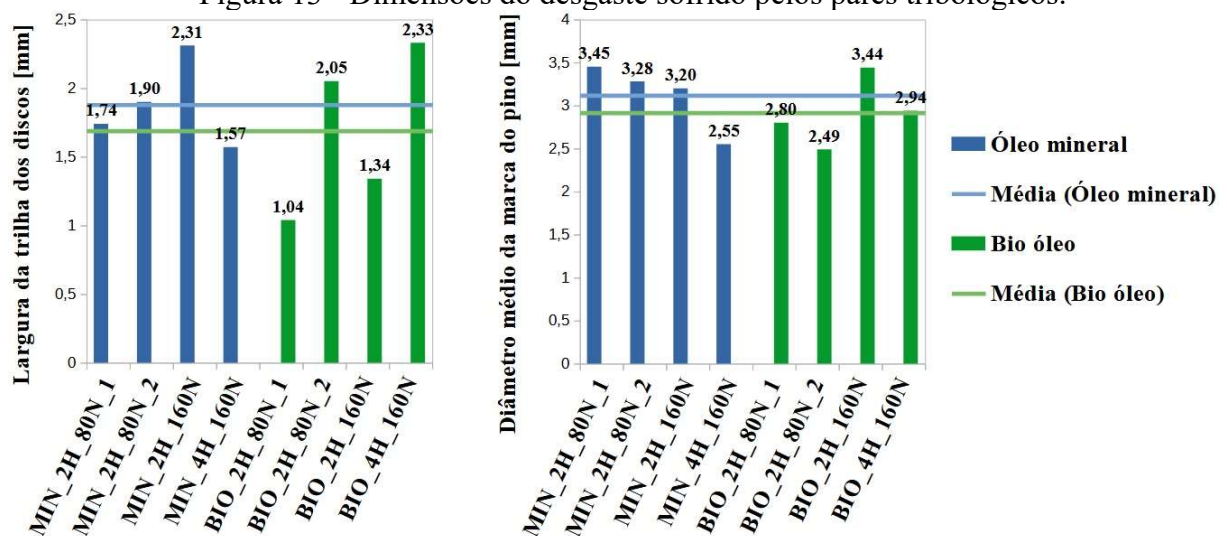


Figura 12 - Desgaste nos pares tribológicos lubrificado com bio óleo.



Analisando-se a trilha de desgaste dos discos, percebe-se que o desgaste sofrido foi de natureza leve em todos os ensaios, visto que as dimensões dos desgastes não foram de grandes proporções. Além disso, ainda é possível ver áreas da superfície original, não atritada, entre as marcas (riscos) de desgaste, o que leva a concluir que a profundidade do desgaste foi baixa. Também é evidente que o mecanismo de desgaste predominante foi o abrasivo, que é caracterizado pelos riscos uniformes que seguem ao longo da linha de deslizamento. É possível também notar uma coloração mais escura nas trilhas, que é resultado do mecanismo de tribo-oxidação. Esse mecanismo ocorre quando o material exposto da superfície entra em contato com o oxigênio, formando óxidos. A Figura 13 apresenta graficamente os resultados mensurados do desgaste dos pinos e discos.

Figura 13 - Dimensões do desgaste sofrido pelos pares tribológicos.



As dimensões do desgaste dos pares tribológicos apresentaram uma grande variação, indo de 1,0 mm a 2,3 mm na largura da trilha dos discos, e de 2,5 mm a 3,4 mm no diâmetro da

marca dos pinos, sendo que o bio óleo apresentou uma maior variação nesse critério. Essas dimensões foram menores em alguns ensaios com a utilização do óleo mineral e menores em outros ensaios com a utilização do bio óleo, porém a média dessas dimensões foi menor com a utilização do bio óleo. Este apresentou uma redução de 10,1% na largura da trilha dos discos e de 6,4% no diâmetro da marca dos pinos.

5.2. Coeficiente de atrito

O coeficiente de atrito monitorado pelo tribômetro em cada ensaio é apresentado nos gráficos abaixo, sendo a Figura 14 referente aos ensaios com óleo mineral e a Figura 15 referente aos ensaios com bio óleo.

Figura 14 - Coeficiente de atrito para ensaios com óleo mineral.

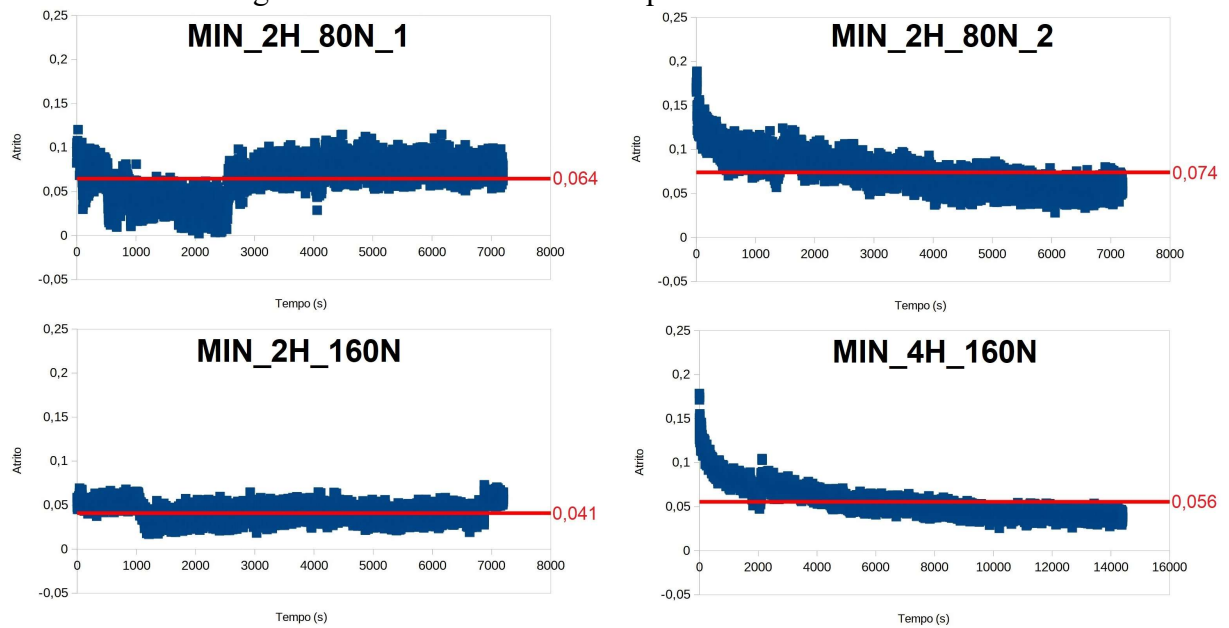
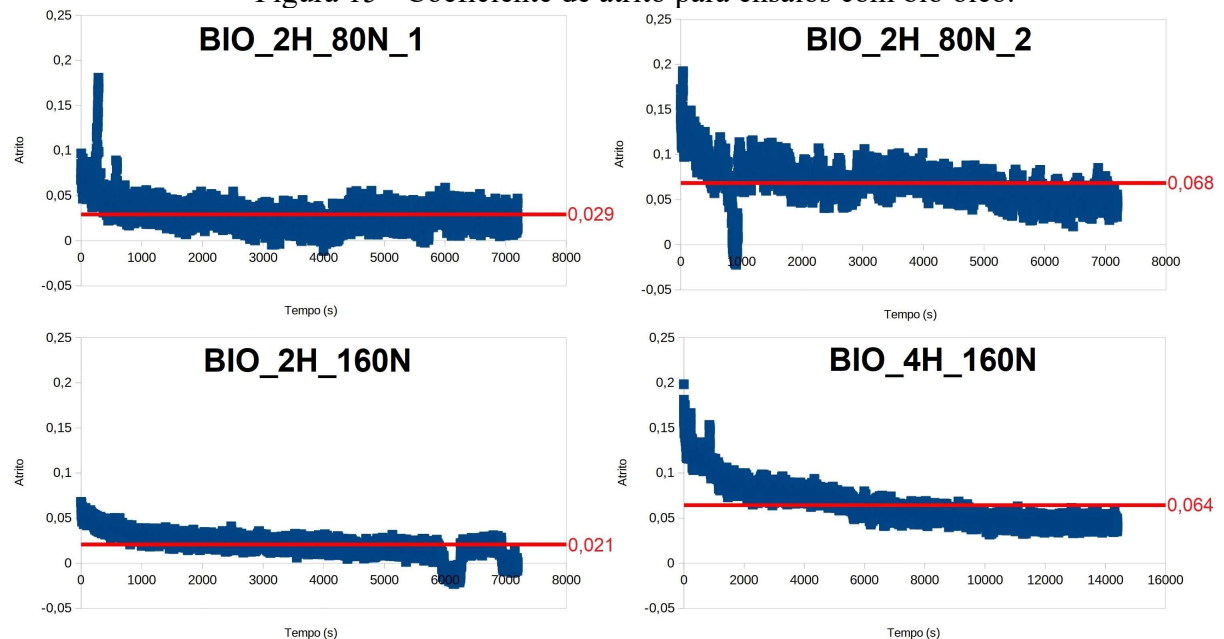
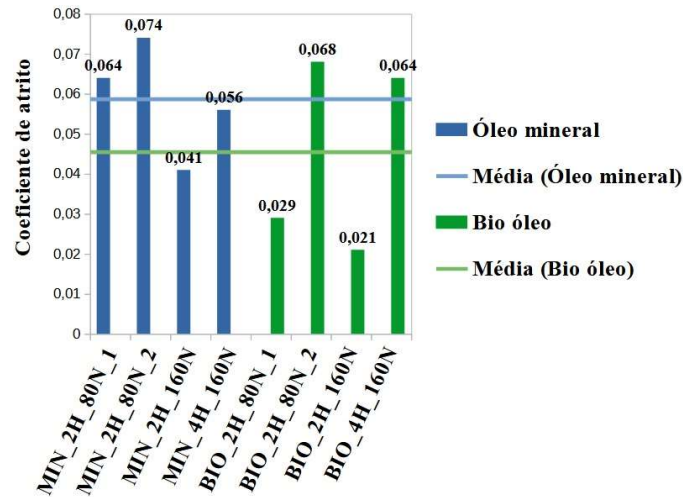


Figura 15 - Coeficiente de atrito para ensaios com bio óleo.



O valor médio dos coeficientes de atrito obtidos para cada ensaio é apresentado graficamente na Figura 16.

Figura 16 - Média do coeficiente de atrito de cada ensaio



Uma variação parecida ao que ocorreu com as dimensões dos desgastes ocorreu com os valores do coeficiente de atrito, que tiveram valores menores para alguns parâmetros com a utilização do óleo mineral e menores para outros com a utilização do bio óleo. Para esse critério, o bio óleo apresentou uma amplitude de variação bem maior, indo de 0,021 a 0,068, sendo que a variação do óleo mineral foi de 0,041 a 0,074. Porém, os valores dos coeficientes de atrito do bio óleo apresentaram uma média menor do que o óleo mineral, oferecendo uma redução de 22,6%.

5.2. Análise de variância (ANOVA)

Os resultados de desgaste e atrito mensurados foram analisados de forma a se estabelecer se há evidência estatística de que os óleos obtiveram diferentes resultados. Assumindo-se que esses resultados sigam uma distribuição normal, é possível realizar uma análise de variância (ANOVA). Essa análise é um teste de hipótese, o qual garante que, se obtivermos p-valor < nível de significância (α), podemos rejeitar a hipótese nula e concluir que a diferença entre dois grupos não se deve a chances aleatórias, e que de fato há uma diferença entre eles. Para este trabalho, foi escolhido um valor de α de 5%. A Tabela 2 apresenta os resultados dessa análise, realizada através do software Excel.

Tabela 2 - Análise de variância (ANOVA).

	($\alpha = 0,05$)	2H_80N_1	2H_80N_2	2H_160N	4H_160N	Média	Variância	p-valor
Largura da trilha [mm]	Óleo mineral	1,74	1,90	2,31	1,57	1,88	0,1003	0,596
	Bio óleo	1,04	2,05	1,34	2,33	1,69	0,3614	
Diâmetro da marca [mm]	Óleo mineral	3,45	3,28	3,20	2,55	3,12	0,1553	0,496
	Bio óleo	2,80	2,49	3,44	2,94	2,92	0,1567	
Coeficiente de atrito	Óleo mineral	0,064	0,074	0,041	0,056	0,059	0,0002	0,376
	Bio óleo	0,029	0,068	0,021	0,064	0,045	0,0006	

Como nenhum dos valores de p-valor foi menor do que o valor de α , não há evidências estatísticas para comprovar uma diferença no desempenho entre os óleos testados. Desta

forma, pode-se concluir que o desempenho (em termos de atrito e desgaste) do par tribológico dos dois óleos são similares, indicando que o bio óleo é um possível substituto para o óleo mineral.

6. CONCLUSÃO

Do presente trabalho, as seguintes conclusões podem ser listadas:

- Nos ensaios realizados, não há evidências estatísticas para comprovar uma diferença no desempenho entre os óleos testados.
- A performance do biolubrificante frente ao óleo comercial demonstra que existe boa perspectiva de uso na lubrificação de correntes de motosserra.
- O método de análise com utilização de tribômetro do tipo pino sobre disco se mostrou eficiente, sendo um método que pode ser utilizado para estudos similares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, Felipe de. **“Avaliação tribológica de superfícies revestidas com cromo duro”**, Monografia (graduação em engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.
- ARO, Thomas; FATEHI, Pedram. **“Tall oil production from black liquor: Challenges and opportunities”**, Separation and Purification Technology, v. 175, p. 469-480, 2017.
- ASADAUSKAS, Svajus; ERHAN, Sevim Z. **“Depression of points of vegetable oils by blending with diluents used for biodegradable lubricants”**, Journal of the American Oil Chemists` Society, v. 76, p. 313-316, 1999.
- BAHMED, Eduardo. **“Controle de qualidade superficial de discos para ensaios tribológicos”**, Monografia (graduação em engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.
- BARROS, Liu Y.; POLETTO, Jean C.; NEIS, Patric D.; FERREIRA, Ney F.; PEREIRA, Carlos H. S. **“Influence of copper on automotive brake performance”**, Wear, v. 426-427, p. 741-749, 2019.
- BARTZ, Wilfried J. **“Lubricants and the environment”**, Tribology International, v. 31, p. 35-47, 1998.
- CASTROL. **“Óleo STIHL Magnum”**, Disponível em: <https://www.castrol.com/pt_br/brazil/home/produtos-stihl.html#tab_stihl-magnum>. Acessado em 21/09/2021.
- ELLWANGER, Diego. **“Análise de desempenho tribológico de lubrificantes automotivos em ensaio de escorregamento metal-metal”**, Monografia (graduação em engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.
- ERHAN, Sevim Z.; ASADAUSKAS, Svajus. **“Lubricant basestocks from vegetable oils”**, Industrial Crops and Products, v. 11, p. 277-282, 2000.
- FAOSTAT©. **“Forestry Production and Trade Database”**, Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database, 2021. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>>. Acessado em 24/10/2021.
- FERRER, Bruno P. **“Avaliação em laboratório do efeito da formulação e das propriedades de graxas lubrificantes no desempenho tribológico do contato roda-trilho”**, Dissertação (mestrado em engenharia), 203 p., Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020.

- FILIFELOP. “**Bomba dosadora peristáltica para líquidos 12V**”. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/bomba-dosadora-peristaltica-para-liquidos-12v/>>. Acessado em 29/06/2021.
- FRAS-LE. “**Fras-le desenvolve pesquisa com a Universidade Federal do RS**”. Disponível em: <<https://blog.fras-le.com/pesquisa-fras-le-e-ufrgs/>>. Acessado em 21/09/2021.
- GAHR, Karl-Heinz Z. “**Microstructure and wear of materials**”. 1ª Edição. Elsevier Science Ltd, 1987.
- HAIGH, Susan D. “**Fate and effects of synthetic lubricants in soil: biodegradation and effect on crops in field studies**”, The Science of the Total Environment, v. 168, p. 71-83, 1995.
- HAMROCK, Bernard J.; SCHMID, Steven R.; JACOBSON, Bo O. “**Fundamentals of fluid film lubrication**”, 2ª Edição. New York: Marcel Dekker, 2004.
- HU, Yiran; WANG, Li L.; POLITIS, Denis J.; MASEN, Marc A. “**Development of an interactive friction model for the prediction of lubricant breakdown behavior during sliding wear**”, Tribology International, v. 110, p. 370-377, 2017.
- IGGESUND FOREST. “**Chainsaw guide bar R2 series**”. Disponível em: <<https://www.agriexpo.online/prod/iggesund-forest/product-182011-59675.html>>. Acessado em 05/11/2021.
- JOHN DEERE. “**Harvesters**”. Disponível em: <<https://www.deere.com.br/pt/harvesters/>>. Acessado em 21/09/2021.
- KLAMERUS-IWAN, Anna; BLOŃSKA, Ewa; LASOTA, Jarosław; KALANDYK, Agnieszka; WALIGÓRSKI, Piotr. “**Influence of oil contamination on physical and biological properties of forest soil after chainsaw use**”, Water Air Soil Pollut, 226: 389, 2015.
- MICHALÍK, Maroš; BALLOVÁ, Zuzana K.; KOMPIŠ, Martin. “**Impact of biodegradable lubricant oils on soil element concentrations**”, Oecologia Montana, v. 29, p. 1-8, 2020.
- NEIS, Patric D. “**Projeto e construção de um tribômetro com controle independente de temperatura no disco**”, Tese (doutorado em engenharia), 130 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- ORAWIEC, Alex; SURYAN, Levi; PARMIGIANI, John. “**An evaluation of the performance of chainsaw lubricants**”, Croatian Journal of Forest Engineering, v. 42, p. 325-332, 2020.
- ORAWIEC, Alexander. “**A free running lubrication comparison of commonly used bar and chain oil**”, Thesis (master of science in mechanical engineering), 49 p., Oregon State University, 2018.
- OREGON® | Blount, Inc. “**Oregon® Mechanical Timber Harvesting Handbook**”, 575957 - Rev AA - 1/18, 2017.
- OREGON®. “**Barra VersaCut™**”. Disponível em: <https://www.oregonproducts.com/pt_br/produtos-profissionais/uso-florestal/fam%3%adlias-de-correntes-de-motosserra/corrente-da-motosserra-e-barras-versacut/c/versacut-sc-p#ORE-PRO-FOR-230-VersaCut-Guide-Bar_Image-with-Adj-Text>. Acessado em 21/07/2021.
- PEZZUTTI, Raul V.; FLEIG, Frederico D.; FINGER, Cesar A. G.; SCHNEIDER, Paulo R. “**Estudo e modelagem do crescimento em diâmetro de povoamentos de *pinus taeda* L. submetidos a podas e desbastes na argentina**”, Ciência Florestal, Santa Maria, v. 26, p. 1225-1237, 2016.
- ROŹ, Julie; PAQUOT, Michel. “**Life cycle assessment of a bio based chainsaw oil made on the farm in Wallonia**”, The International Journal of Life Cycle Assessment, 18: 1485-1501, 2013.

- SELLARS, Patrick V. “**Improved lubrication performance of chainsaw cutting systems**”, Thesis (master of science in mechanical engineering), 57 p., Oregon State University, 2021.
- SHEKHAR, Chandra; BHATT, Arun; CHAUBEY, B K.; TRIVEDI, Himanshu. “**Bio lubricants: An environment affable and energy prospective substitute for mineral lubricants**”, National Conference on Recent Advances in Mechanical Engineering (NCRAME), 2013.
- SKOUPÝ, Alois. “**Biologically degradable oils at working with power saws**”, Journal of Forest Science, v. 50, p. 542-547, 2004.
- SKOUPÝ, Alois. “**Biologically degradable oils for power saws**”, Paper prepared within the Research Project of the Faculty of Forestry and Wood Technology, Mendel University of Agriculture and Forestry.
- SKOUPÝ, Alois; KLVAC, Radomir; HOSSEINI, Seyedmohammad. “**Changes in the external speed characteristics of chainsaw engines with the use of mineral and vegetable oils**”, Croatian Journal of Forest Engineering, v. 31, p. 149-155, 2010.
- STACHOWIAK, Gwidon W.; BATCHELOR, Andrew W. “**Engineering Tribology**”, 3ª Edição. Butterworth-Heinemann, 2005.
- STANOVSKÝ, Miroslav; SCHÜRGER, Ján; JANKOVSKÝ, Martin; MESSINGEROVÁ, Valéria; HNILICA, Richard; KUČERA, Marian. “**The effect of lubricating oil on temperature of chainsaw cutting system**”, Croatian Journal of Forest Engineering, v. 34, p. 83-90, 2013.
- STIHL. “**Motosserra MS 460**”, Disponível em: <<https://www.stihl.com.br/>>. Acessado em 21/09/2021.
- VISSER, Millan T. “**Exploring opportunities for bio-oil within the New Zealand forestry industry**”, Dissertation (bachelor of forestry science), 50 p., University of Canterbury, 2018.
- VITRINE TECNOLÓGICA UFRGS, “**Equipamento para caracterização de materiais de fricção – Tribômetro**”, Disponível em <<https://www.ufrgs.br/vitrinetecnologica/>>. Acessado em 21/09/2021.
- WIGHTMAN, Patricia S.; EAVIS, Roger M.; WALKER, Kerr C.; BATCHELOR, Sheila E.; CARRUTHERS, Peter; BOOTH, E. J. “**Life-cycle assessment of chainsaw lubricants made from rapeseed oil or mineral oil**”, Work supported by Ministry of Agriculture Fisheries and Food, UK.

ANEXO A – Laudo técnico do bio óleo utilizado



LUBMAIS INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA
 Rua João José Godinho, S/N. Frei Rogério – Lages/SC
 Tel.: (49) 984247447

CERTIFICADO DE QUALIDADE

CLIENTE: ERIC WIGGERS

ATT: **Eric Wiggers**

PRODUTO: LUBMOTO-100

Lote: 001/20

Fabricação: 03/10/2020

ATRIBUTOS	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO
Viscosidade - CTS	110	100,0 a 120,0
Teor de Cinzas (%)	0,01	0,1 máximo
Umidade – Karl Fischer (%)	0,0	0,5 Máximo
Cor, Gardner	Castanho	Castanho
Ponto de Fulgor	230	180 mínimo
Ponto de Névoa (°C)	10,0	14,0 Máximo
Ponto de Fluidez(°C)	8	5,0 Mínimo
Índice de Acidez (mgKOH/g)	65,00	100,0 Máximo

Validade: 24 Meses.

Lages, 05 de Outubro de 2020

Leandro Dias Perez
 CRQ 03420063
 LUBMAIS - Laboratório de Controle de Qualidade