

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

ROBERTA CRISTINE YAMASHITA

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESGASTE DE CORPOS DE PROVA EM UM
TRIBÔMETRO *REICHERT TEST***

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CORNÉLIO PROCÓPIO
2018**

ROBERTA CRISTINE YAMASHITA

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESGASTE DE CORPOS DE PROVA EM UM
TRIBÔMETRO *REICHERT TEST***

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Área de concentração: Caracterização de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Júnior.

**CORNÉLIO PROCÓPIO
2018**



Título da Dissertação Nº 024:

“Estudo Comparativo do Desgaste de Corpos de Prova em um Tribômetro Reichert Test”.

por

Roberta Cristine Yamashita

Orientador: **Prof. Dr. Carlos Elias Da Silva Junior**

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA** – Área de Concentração: **Ciências Mecânicas**, linha de pesquisa: **Caracterização dos Materiais Aplicados em Engenharia**, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio, às 09h30 do dia 02 de março de 2018. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

Prof. Dr. Carlos Elias Da Silva Junior
(Orientador – UTFPR-CP)

Prof. Dra. Janaina Fracaro De Souza Gonçalves
(UTFPR-LD)

Prof. Dr. Ricardo Breganon
(IFPR – Câmpus Jacarezinho)

Visto da coordenação:

Prof. Dr. Vagner Alexandre Rigo
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UTFPR Câmpus Cornélio Procópio

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e por ter guiado meus passos e me dado esperanças para seguir em frente. Muitas pessoas foram importantes, e essenciais para que eu alcançasse essa vitória. Recebi muito incentivo e muita ajuda para chegar até aqui e conquistasse o meu sonho.

Aos meus amados pais, Roberto e Suely, minha eterna gratidão por me apoiarem em todas as decisões, por me ampararem nos momentos difíceis, por confiarem em mim e por todo incentivo.

Às minhas irmãs, Karla e Karen, obrigada por me fazerem companhia em tantas idas e vindas durante esses anos, e por todo o apoio que me deram. Ao meu noivo Lucas, pelo amor, ajuda, pela compreensão nas horas de desespero e pelo ombro amigo nos choros, obrigada por ter sido paciente neste período difícil.

Ao Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Júnior, meu orientador neste trabalho, pela generosidade, pelas sábias palavras de apoio, por tantas conversas que me acalmaram, pelo tempo cedido para correção do meu trabalho e por me ensinar tanta coisa, palavras não serão capazes de expressar a minha gratidão.

À Profa. Dra. Janaína Fracaro de Souza Gonçalves, pela disposição em ajudar, pelas valiosas horas de ensinamento e de discussões que sempre colaboraram com a elaboração do trabalho, pela paciência em me receber sempre para auxiliar em todos os momentos do trabalho.

Ao Professor Me. Genésio Lopes da Silva, por ter se disponibilizado tantas vezes para me auxiliar durante o trabalho, por ter dividido seus aprendizados comigo, pela paciência em acompanhar e auxiliar os meus ensaios e por estar sempre disposto a colaborar.

Aos professores Adailton Silva Borges, Émillyn Ferreira Trevisani Olivio, Elizabeth Hashimoto e ao técnico Wanderlei Malaquias pelo tempo dispensado em me auxiliar.

Ao João Marcelo Correia da Silva, da empresa MGL em Cambé, por ter oferecido ajuda e equipamento para execução de testes para o trabalho.

Ao laboratorista Fabio Bossoi Vicente, responsável pelo laboratório de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da Universidade Estadual Paulista (Unesp) - Câmpus de Bauru - SP.

A todos os envolvidos, minha eterna gratidão.

RESUMO

YAMASHITA, ROBERTA CRISTINE. **Estudo comparativo do desgaste de corpos de prova em um tribômetro *reichert test***. 2018. Dissertação de Mestrado - Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2018.

A grande demanda por produtos que tenham baixo custo e causem menor impacto ambiental, tem feito muitas empresas reavaliarem seus processos, aumentando assim o número de pesquisas. Muitos estudos estão sendo realizados a fim de encontrar alternativas que diminuam o custo final do produto, sem alterar a qualidade e ainda preservar o meio ambiente. Os avanços tecnológicos têm ajudado nestes casos. Os fluidos de bases vegetal vêm sendo usados como alternativa para as indústrias por causarem menor impacto ambiental e ter um custo mais baixo. O presente trabalho faz um comparativo de desgaste entre um par de corpos de prova normalizados e um par de corpos de prova genéricos. O par de corpos de prova normalizados é importado e possui alto custo de aquisição, por este motivo o estudo faz-se necessário para analisar a possibilidade de emprego de corpos de prova genéricos nos estudos posteriores. Para realização do presente trabalho, depois de avaliar o material do pino normalizado, selecionou-se o aço ABNT 1020 como material do pino genérico e o aço de rolamento para o anel genérico. Além disto, foram feitas adaptações de sensores de temperaturas em uma máquina simuladora de desgaste do tipo *Reichert Test*, que tem como função proporcionar simulações de atrito e desgaste sob condições controladas, onde foram realizados ensaios empregando óleo de pinhão manso *in natura* como óleo lubrificante. Os ensaios tribológicos permitem obter informações sobre a lubricidade do fluido empregado. Avaliou-se a maneira como cada par de corpos de prova se desgastaram em ensaios com parâmetros pré-determinados. Os resultados dos ensaios tribológicos por meio do *Reichert Test*, foram satisfatórios, de maneira constante e estável. Os ensaios para o par de corpos de prova genéricos apresentaram desgastes moderados comparados aos obtidos nos ensaios com o par de corpos de prova normalizados. Estes resultados indicam a possibilidade de utilização dos corpos de prova genéricos como alternativa ao emprego dos corpos de prova normalizados nos ensaios de desgaste realizados no tribômetro do tipo *Reichert Test*.

Palavras-chave: Tribômetro *Reichert test*; Desgaste; Rugosidade superficial.

ABSTRACT

YAMASHITA, ROBERTA CRISTINE. **Comparative study of test specimen on a reichert test tribometer**, 2018. Dissertação de Mestrado - Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

As the demand for lower cost and environmental impact products increase, many companies have been enhancing their number of researches and revaluing their processes. In fact, studies have shown different alternatives that decreases the final cost of the product without altering the quality, also preserving the environment. In these cases, the technological progresses have been helping. As an alternative, industries have been investing in fluids of vegetable base due to these fluids cause less environmental impact, and they have lower cost. The focus of this work is to compare the wear between a pair of standardized sample and a pair of generic sample. The standardized sample is imported and it has a high purchase cost, therefore it is necessary to study the availability of using generic samples for further analyzes. For a start, the pin was measured for standardized material, then, the ABNT 1020 was chosen as a material for the generic pin and for the bearing for the generic ring. Furthermore, the temperature sensors were adapted in a Reichert Test machine, which is wear test. The function of the Reichert Test machine is to provide friction and wear tests under controlled conditions, where the tests were performed using Jatropha oil in nature as the lubricating fluid. Tribological tests give information about the lubricity of the used fluid. Then, using pre-determined parameters, the wear of which sample was measured. The results using the Reichert Test and tribological tests were satisfactory, constants and stables. Moreover, the results using generic samples showed moderate wear when compared to the results for the standardized sample. In conclusion, these results have shown the possibility of use generic samples as an alternative for standardized samples in tests of wear using tribometer of Reichert Test type.

Key-words: Reichert test tribometer; Wear; Surface roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismo de desgaste - Desgaste Adesivo.	18
Figura 2 - Mecanismo de desgaste - Desgaste Abrasivo.	19
Figura 3 - Desgaste abrasivo por riscamento.	20
Figura 4 - Desgaste abrasivo por rolamento.	20
Figura 5- Mecanismo de Desgaste - Desgaste por Fadiga.	21
Figura 6 - Mecanismo de desgaste - Desgaste Corrosivo.	22
Figura 7 - Desenho esquemático da reação.	23
Figura 8 - Desenho esquemático do equipamento <i>Reichert Test</i>	28
Figura 9 - Tribômetro montado com adaptações.	32
Figura 10 - Anel externo de rolamento adaptado para o	33
Figura 11 - Pino genérico usado como corpo de prova para o.	33
Figura 12 - Anel normalizado adaptado para o tribômetro	34
Figura 13 - Pino normalizado usado como corpo de prova para	34
Figura 14 - Espectrofotômetro utilizado.	34
Figura 15 - Sequência de ações para realização do ensaio tribológico de <i>Reichert Test</i>	36
Figura 16 - Geometria utilizada	38
Figura 17 - Rugosímetro portátil.	39
Figura 18 - Área das elipses dos corpos de prova - Ensaio <i>Reichert Test</i>	41
Figura 19 - Perda de massa dos corpos de prova - Ensaio <i>Reichert Test</i>	42
Figura 20 - Temperaturas médias dos corpos de prova - Ensaio <i>Reichert Test</i>	43
Figura 21 - Temperaturas médias do óleo - Ensaio <i>Reichert Test</i>	44
Figura 22 - Resultados de rugosidade superficial (R_a).	46
Figura 23 - Resultados de rugosidade superficial (R_q).	47
Figura 24 - Resultados de rugosidade superficial (R_z).	48
Figura 25 - Imagem da região de desgaste.	49
Figura 26 - Imagem da região de desgaste.	49
Figura 27 - Imagem da região de desgaste do.	49
Figura 28 - Imagem da região de desgaste.	50
Figura 29 - Imagem da região de desgaste.	50
Figura 30 - Imagem da região de desgaste do anel	51
Figura 31 - Imagem da região de desgaste.	51
Figura 32 - Imagem da região de desgaste.	52
Figura 33 - Imagem da região de desgaste.	52
Figura 34- Imagem da região de desgaste do.	52
Figura 35 - Imagem da região de desgaste do.	53
Figura 36 - Imagem da região de desgaste do anel	53
Figura 37 - Imagem da região de desgaste.	54
Figura 38 - Imagem da região de desgaste.	54
Figura 39 - Imagem da região de desgaste.	55
Figura 40 - Imagem da região de desgaste.	55
Figura 41 - Imagem da região de desgaste.	55
Figura 42 - Imagem da região de desgaste do anel do par	56

Figura 43 - Imagem da região de desgaste.....	57
Figura 44 -Imagem da região de desgaste.....	57
Figura 45 - Imagem da região de desgaste.....	57
Figura 46 - Imagem da região de desgaste.....	58
Figura 47 - Imagem da região de desgaste.....	58
Figura 48 - Imagem da região de desgaste do.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sequência dos experimentos.	35
Tabela 2 - Áreas das elipses (mm ²).	40
Tabela 3 - Aferição das perdas de massa (g).....	41
Tabela 4 - Temperaturas médias dos corpos de prova.	43
Tabela 5 - Temperaturas médias do óleo (°C).	44
Tabela 6 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade Ra (µm).....	45
Tabela 7 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade Rq (µm).....	45
Tabela 8 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade Rz (µm).....	46
Tabela 9 - Análise de decisão qualitativa por pesos.	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CGI	Compacted Graphite Iron
°C	Graus Celsius
DIN	Instituto Alemão de Normas
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
°F	Graus Fahrenheit
ISO	International Organization for Standardization
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
mm	Milímetro
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
R	Raio
Ra	Rugosidade média
RPM	Rotação por Minuto
Rq	Rugosidade Quadrática média
Rz	Rugosidade de profundidade média
µm	Micrômetro
µV	Micro Volt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	JUSTIFICATIVA	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Tribologia	15
2.2	Conceito de Desgaste	16
2.2.1	Mecanismos de desgaste	17
2.3	Fluido de corte	24
2.3.1	Óleo de base vegetal	24
2.3.2	Óleo de Pinhão Manso	25
2.4	Tribômetro <i>Reichert Test</i>	27
2.5	Comportamento tribológico	28
2.6	Ensaio tribológicos	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Adaptação do tribômetro <i>Reichert Test</i>	32
3.2	Experimentos tribológicos	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	Resultados obtidos para as áreas de desgaste (áreas das elipses)	40
4.2	Resultados obtidos para as perdas de massa	41
4.3	Resultados obtidos para as temperaturas dos corpos de prova	42
4.4	Resultados obtidos para as temperaturas do óleo	43
4.5	Resultados de rugosidade superficial	45
4.6	Mecanismo de desgaste tribológico	48
5	CONCLUSÕES	61

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS.....	63
APÊNDICE A	68

1 INTRODUÇÃO

O termo tribologia, que vem do grego Tribo (esfregar) e Logos (estudo), foi utilizado, oficialmente, pela primeira vez em 1966 em um relatório feito por H. Peter Jost para o comitê do departamento inglês de educação e ciência. “A ciência e a tecnologia da interação entre superfícies com movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionadas” (JOST, 1989).

Há muitos anos já se preocupava em reduzir o atrito, um exemplo que ilustra bem esta afirmação é a invenção da roda que reduz o atrito nos movimentos de rotação e de translação, sendo um invento tribológico anterior a outros registros históricos.

A necessidade de envolvimento do homem com fenômenos tribológicos e de desgaste é perfeitamente justificável, pois esses fenômenos afetam quase todos os aspectos da vida não ficando restrito aos elementos de máquinas.

A ação de movimento das articulações humanas constitui uma situação tribológica e a cura de doenças como artrose, artroplastia do quadril, substituição da articulação relacionadas. A construção de próteses é devida, em grande parte, ao conhecimento dos tribologistas (ALTERA, 2009).

Na indústria, o desgaste excessivo de componentes mecânicos é um dos fatores de maior preocupação, pois a quebra dos mesmos pode causar transtornos no processo fabril e conseqüentemente elevar os custos de manutenção e produção.

O estudo do atrito e do desgaste é essencial para engenharia, no qual é possível obter informações que auxiliam na elaboração de projetos, no desenvolvimento de materiais e de métodos de controle de qualidade dos elementos em operação. Pois, adquirir conhecimentos apenas em processos de fabricação não é suficiente, visto que há também a necessidade de se estudar e entender os processos de desgaste que ocorrem nos sistemas e os meios de prevenção dos mesmos.

Os ensaios tribológicos são alternativas iniciais de análise na etapa de desenvolvimento dos produtos de fluidos de corte, uma vez que permitem uma maior flexibilidade para alteração da formulação onde são obtidas informações sobre lubrificidade dos mesmos na fase de teste (GONÇALVES, 2013).

Um dos equipamentos mais utilizados para o estudo desses fenômenos são os tribômetros, que tem como principal função simular situações de atrito e desgaste sob condições controladas. Ensaios de desgastes por meio de tribômetros são de extrema importância, pois é possível simular uma situação de degradação que ocorreria em um equipamento durante um longo período de utilização, em um tempo relativamente curto (ALVES, 2014).

Existem diversos tipos de tribômetros, quando selecionado adequadamente pode simular várias características de um problema de desgaste ou atrito, sem as dificuldades associadas à experimentação em equipamento real. Os critérios na seleção de um tribômetro devem ser muito bem fundamentados, pois um equipamento mal selecionado pode fornecer resultado inteiramente duvidoso.

O ensaio tribológico utilizado neste trabalho é o *Reichert Test*, especificado pela norma DIN 50-347 (Aparato para Ensaios de Desgaste) devido à maior repetibilidade dos resultados.

Este método consiste em uma configuração para o tribômetro do tipo pino sobre um anel, utilizado para testar a capacidade de resistência da película lubrificante sob a aplicação de uma força cisalhante. Este conjunto a ser ensaiado, fica imerso em óleo. O número constante de rotações por minuto (RPM) do eixo árvore deve arrastar um filme de óleo e garantir o fluxo de lubrificante no ponto de contato. Os materiais do pino e do anel variam conforme o material a ser testado (GONÇALVES, 2013).

A busca por novas bases para óleos lubrificantes, por produtos que sejam menos agressivos ao meio ambiente que os óleos minerais, de modo a reduzir a dependência de produtos de origem fósseis, tornou-se uma busca incansável.

As plantas oleaginosas possuem um grande potencial para essa substituição. Entre as culturas oleaginosas, o pinhão manso, uma alternativa de grande potencial de produção de óleos vegetais e também por ser oriunda de clima temperado, sendo adaptada às condições edafoclimáticas, além disso, é uma cultura que não faz parte de cadeia alimentar humana ou animal, a sua produção tem como base a agricultura familiar e pequenas cooperativas e ainda apresenta elevado rendimento para extração de óleo.

Ao mesmo tempo em que ocorre a busca por elementos que prejudiquem menos o meio ambiente, as indústrias buscam diminuir custos, sem diminuir a qualidade final do produto.

O presente trabalho busca alternativas para que testes de novos lubrificantes possam ser feitos, com eficiência nos resultados, porém utilizados materiais com um custo mais baixo. A pesquisa procura informações sobre substituições de materiais para o corpo de prova utilizado no tribômetro *Reichert Test* que possam garantir um resultado satisfatório nos ensaios com novos lubrificantes.

Inicialmente investiga-se um material genérico para o par de corpos de prova utilizando um lubrificante, o óleo de pinhão manso *in natura*, por já existirem resultados conhecidos, para que posteriormente seja possível estudar novos óleos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Comparar o desgaste entre o par de corpo de prova normalizado e par de corpo de prova genérico (anel de rolamento de metal duro e pino de aço ABNT 1020) em um tribômetro *Reichert Test*.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Usinar os corpos de prova no formato específico de cada um;
- Realizar os ensaios no tribômetro com dois tipos de corpos de prova: o normalizado e o genérico, utilizando como lubrificante o óleo de pinhão manso *in natura*;
- Avaliar o desgaste dos dois tipos de corpos de prova por meio da aferição de suas perdas de massa (ou seja, uma comparação entre as massas dos corpos de prova desgastados e sem desgaste), das suas áreas de desgaste (ou áreas da elipse), das análises das imagens das superfícies desgastadas obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), da aferição da

rugosidade superficial da superfície desgastada dos pinos e pela aferição das temperaturas do fluido e dos corpos de prova;

- Avaliar os resultados obtidos nos ensaios para validar o par de corpos de prova genéricos, a partir da comparação com os resultados obtidos com os corpos de prova normalizados.

1.2 JUSTIFICATIVA

Em praticamente todo ambiente produtivo existe uma busca constante para diminuição de custos e eficiência nos resultados.

O tribômetro *Reicher test* é utilizado para experimentos de desgastes causados pelo atrito entre um anel e um pino. Os corpos de prova utilizados neste tipo de equipamento são amostras normalizadas. Essas amostras, na maioria dos casos, são importadas e têm um elevado custo de aquisição.

Diante desta situação, surge a necessidade de validar um material para os corpos de prova que seja tão eficiente quanto os normalizados, porém que seja mais acessível. A proposta do trabalho é testar um tipo de corpo de prova que apresente resultados coerentes e similares aos dos corpos de prova normalizados, porém com um custo de aquisição menor.

Os corpos de prova, confeccionados com material similar ao material normalizado, serão usinados e adaptados para o tribômetro, a fim de validar a utilização dos mesmos para ensaios tribológicos. No caso de obter-se resultados satisfatórios, poderão ser feitas pesquisas com outros tipos de lubrificantes, com um menor custo e qualidade nos resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo inicialmente serão apresentados os conceitos sobre tribologia, os principais mecanismos de desgaste e os indicadores que influenciam o atrito. Na sequência, são apresentados conceitos sobre lubrificação e estudos sobre o comportamento dos aços. Em seguida, são apresentados os principais mecanismos de desgaste que atuam em processos de usinagem. E por fim, conceitos sobre os ensaios tribológicos.

2.1 Tribologia

O termo tribologia, que vem do grego Tribo (esfregar) e Logos (estudo) foi utilizado, oficialmente, pela primeira vez em 1966 em um relatório feito por H. Peter Jost para o comitê do departamento inglês de educação e ciência. “A ciência e a tecnologia da interação entre superfícies com movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionadas” (JOST, 1989).

A tribologia reúne conceitos de química, física, mecânica e ciência dos materiais para explicar o comportamento de sistemas mecânicos. O que unifica a tribologia são as áreas de aplicação. A tribologia diz respeito ao estudo do desgaste, do atrito, e conseqüentemente da lubrificação, a qual tem como função minimizar os efeitos negativos do atrito (SINATORA, 2005).

O estudo dos efeitos tribológicos e desgaste se justifica pelo fato de que esses fenômenos afetam quase todos os aspectos da vida humana. Vai além das máquinas que usamos e a seus mancais. Outros exemplos de situação tribológica pode ser vista na ação de juntas dos corpos de animais e na cura de doenças como artrite. Também dependem do controle do atrito em atividades de lazer, como escaladas de montanhas ou esqui por exemplo. Além de atividades cotidianas como segurar, cortar e escovar que são outras manifestações da tribologia no dia a dia (ALTERA, 2009).

Os estudos tribológicos têm sido realizados para compreender o comportamento do desgaste em determinados materiais, para auxiliar na seleção de materiais para uma determinada aplicação, para compreender os efeitos de certas variáveis num modo particular de desgaste e também para

desenvolver modelos para prever ou descrever o desgaste em tribosistemas específicos (OLIVEIRA e SILVA, 2015).

O tipo, a evolução e a extensão do desgaste são determinados pelos materiais dos componentes em contato e pelos seus graus de acabamentos, por eventuais materiais intermediários, por influências da área adjacente e pelas condições de operação (BHUSHAN, 2002).

Geralmente a avaliação das propriedades mecânicas é que avalia a aplicabilidade do material. Porém, com o avanço da engenharia preditiva, as propriedades tribológicas vem sendo utilizadas cada vez mais para que a predição da vida útil dos materiais seja mais acertiva. As propriedades tribológicas se diferem das propriedades mecânicas e térmicas pois dependem do sistema em que estão inseridas (SUSKI, 2004).

2.2 Conceito de Desgaste

O desgaste ocorre como consequência natural de um movimento relativo entre superfícies em contato. Muitos mecanismos podem estar envolvidos no desgaste, separadamente ou ao mesmo tempo, principalmente para os metais. Apesar do fato dos mecanismos de desgaste serem, individualmente, bem conhecidos, o fenômeno permanece um tanto quanto imprevisível em termos quantitativos (ALVES, 2014).

Segundo Williams (2005) desgaste é um dano que envolve a perda de materiais. Este dano ocorre na superfície dos componentes e é resultado do seu movimento em relação às partes adjacentes de trabalho.

Outro conceito é o de Bayer (2002) que diz que o desgaste não se limita apenas à perda de materiais de uma superfície podendo também ser definido pelo movimento do material sem alterações na geometria ou dimensão como resultado de uma deformação plástica. Um outro modo de desgaste, o qual o dano não resulta em perda de massa ou em alterações dimensionais, como, por exemplo, o desenvolvimento de fissuras em uma superfície.

O desgaste é a principal causa da perda de materiais e propriedades mecânicas e qualquer redução que possa ser feita com relação a esse fenômeno pode resultar em consideráveis economias (ALVES, 2014).

Um dos grandes desafios em resolver os problemas de desgaste é antecipar a forma e a intensidade com a qual ele irá ocorrer em um dado componente. Conhecer a forma como ocorre o desgaste é uma maneira para selecionar adequadamente o material para cada aplicação já que o fenômeno de desgaste depende do material e do sistema no qual ele ocorre. Identificar a intensidade do fenômeno, permite à engenharia verificar se o componente poderá atingir a vida útil que se espera para o mesmo (LEITE, 2009).

2.2.1 Mecanismos de desgaste

O desgaste é um dano em uma superfície sólida, usualmente com perda progressiva de material, envolvendo o movimento relativo entre aquela superfície e alguma substância contatante (MORAES, 2008).

Os modos de desgaste podem ocorrer através de diversos mecanismos. Os mecanismos de desgaste são descritos pelas mudanças complexas na superfície durante o movimento. Em geral, o desgaste ocorre de várias maneiras, portanto a compreensão de cada mecanismo de desgaste em cada forma se torna importante (KATO e ADACHI, 2001).

O desgaste pode ser descrito em quatro formas principais: desgaste abrasivo, adesivo, corrosivo e por fadiga, além de alguns processos paralelos que muitas vezes são classificados como formas de desgaste e que em muitas ocasiões, uma das formas de desgaste afeta outras. Cada processo de desgaste obedece às suas próprias leis e, em muitas ocasiões, um dos modos de desgaste atua de tal modo que influencia os outros (RABINOWICZ, 1995).

2.2.1.1 Desgaste Adesivo

Apesar do grande número de estudos já realizados, uma teoria perfeita ainda não foi estabelecida, mas desgaste adesivo é um dos principais mecanismos de desgaste. Em muitas aplicações da usinagem, o desgaste adesivo aparece, principalmente em ferramentas de corte ou na usinagem de aços resistentes ao calor e com grande quantidade de carbeto, utilizadas em baixa ou média velocidade de corte (REGNEY, 1997).

O desgaste adesivo é uma forma muito grave de desgaste, caracterizado por altas taxas de desgaste e um grande coeficiente de atrito instável. Contatos deslizantes podem ser rapidamente destruído pelo desgaste adesivo e, em alguns casos, o movimento deslizante pode ser impedido pela existência de grandes coeficientes de atrito (ALVES, 2014).

Na maioria dos casos o desgaste por adesão acontece quando um sólido irá aderir ao entrar em contato com outro sólido. A adesão entre dois objetos casualmente colocados juntos não é observada porque há uma interação entre as camadas contaminantes de oxigênio, água e óleo, que estão geralmente presentes (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

O desgaste adesivo, exemplificado na Figura 1, ocorre quando a ligação adesiva entre as superfícies é suficientemente forte para resistir ao deslizamento. Como resultado dessa adesão, uma deformação plástica é causada na região de contato, gerando uma trinca que pode se propagar levando à geração de um terceiro corpo e a uma transferência completa de material (RADI et al., 2007).

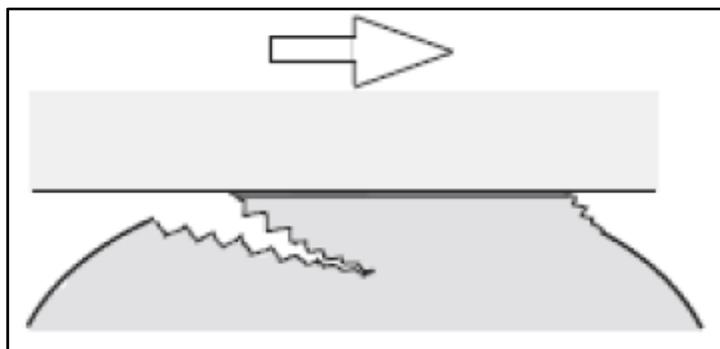


Figura 1 - Mecanismo de desgaste - Desgaste Adesivo.
Fonte: Adaptado de Kato e Adachi (2001).

2.2.1.2 Desgaste Abrasivo

Desgaste abrasivo ocorre quando há uma superfície sólida, dura e rugosa sendo carregada sobre uma superfície mais mole, ou uma superfície mole contendo partículas duras, deslizando sobre uma superfície mais mole, ocasionando riscamento e remoção do material (ALVES, 2014).

Este tipo de desgaste é encontrado com facilidade na indústria em peças com movimentos rotativos. Na prática é o principal tipo de desgaste, sendo um dos mais intensos e responsável por 50 % das causas de falhas das máquinas ou componentes. Além disso, o desgaste abrasivo tem especial importância nas atividades agrícolas, de transporte e de mineração, atividades de importância estratégica para o nosso país (GONÇALVES, 2013).

No combate à abrasão, levar em consideração os elementos que compõem o metal sujeito a abrasão e o tamanho dos respectivos grãos é necessário além de empregar materiais mais duros do que os materiais abrasivos, como a melhor solução. O desgaste por abrasão, como exemplifica a Figura 2, é causado pela interação mecânica de saliências grosseiras ou partículas não metálicas contra as superfícies de trabalho, provocando perda de massa por corte ou por arrancamento. Protuberâncias, como a rugosidade superficial, podem agir como partículas de alta dureza caso esta superfície apresente maior dureza que a contrapeça, que neste trabalho será representada pelo anel (SUSKI, 2004).

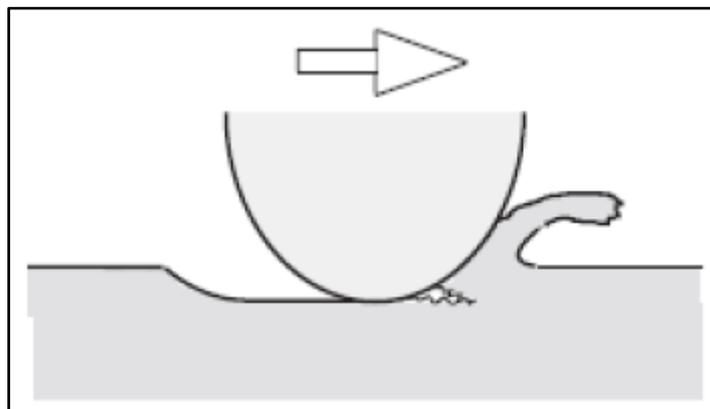


Figura 2 - Mecanismo de desgaste - Desgaste Abrasivo.
Fonte: Adaptado de Kato e Adachi (2001).

Os termos desgaste abrasivo a dois corpos e desgaste abrasivo a três corpos são conhecidos também, na língua portuguesa, como desgaste abrasivo por riscamento e desgaste abrasivo por rolamento, respectivamente como mostram as Figuras 3 e 4 (COZZA, 2006).

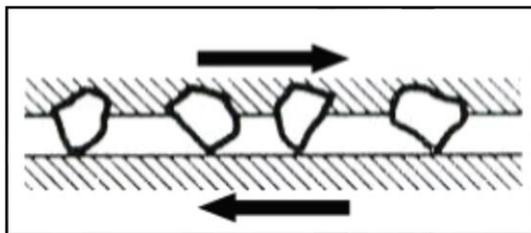


Figura 3 - Desgaste abrasivo por riscamento.
Fonte: COZZA (2006).

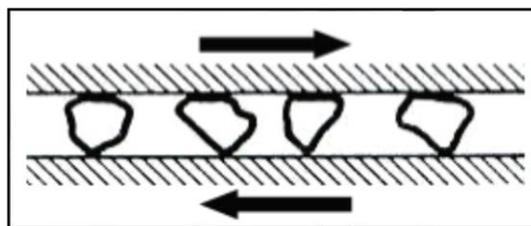


Figura 4 - Desgaste abrasivo por rolamento.
Fonte: COZZA (2006).

Estas classificações são baseadas nas marcas de desgastes que as partículas abrasivas geram nos corpos de prova. No desgaste abrasivo por riscamento, considerando-se duas superfícies em movimento, as partículas em movimento estão incrustadas na superfície, neste caso elas deslizam apenas no contra corpo. No caso do desgaste abrasivo por rolamento as partículas podem rolar entre as mesmas pois estão livres entre as duas superfícies (COZZA, 2006).

2.2.1.3 Desgaste por fadiga

O desgaste por fadiga ocorre em casos nos quais um certo número de contatos repetidos é essencial para a geração de partículas de desgaste, tais ciclos de contato podem ocasionar este tipo de desgaste. O termo fadiga é habitualmente usado na literatura para danos em superfícies causados por contatos cíclicos (KATO e ADACHI, 2001).

O desgaste por fadiga, visto na Figura 5, é caracterizado pela formação de trincas e lascamento de material causados por carregamentos cíclicos na superfície do sólido. Estes carregamentos podem ser resultantes de sólido e / ou líquido na superfície, em escalas microscópicas, este carregamento pode ser pela rugosidade superficial de sólido com movimento relativo. As causas de

desgaste por fadiga superficial, não são progressivas, e acontecem de forma abrupta, de maneira que dificilmente pode ser previsto (ALTERA, 2009).

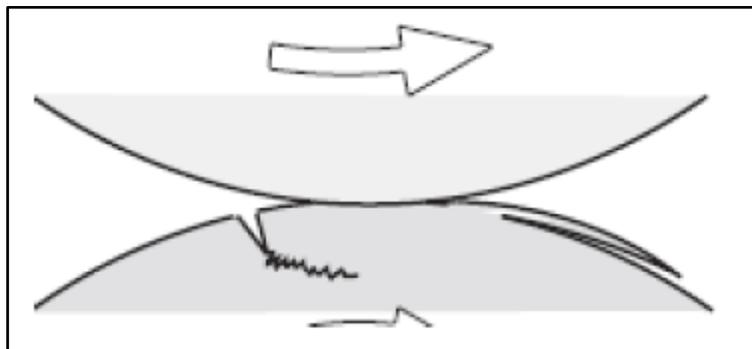


Figura 5- Mecanismo de Desgaste - Desgaste por Fadiga.
Fonte: Adaptado de Kato e Adachi (2001).

Segundo Gonçalves (2013), carregamentos alternados repetidos em superfícies sólidas causam o desgaste por fadiga superficial caracterizado por formação de trincas e descamação de material.

2.2.1.4 Desgaste Corrosivo

A corrosão é um fenômeno de interface que afeta materiais orgânicos e principalmente materiais inorgânicos. Manifesta-se através de reações químicas acompanhadas da dissolução de um elemento químico do material para o meio corrosivo ou da dissociação de uma espécie química do meio para o material (ANTUNES, 2017).

Segundo Pereira (2010), a corrosão é um fenômeno químico e eletroquímico que reduz as propriedades dos aços em serviço quando expostos a meios agressivos. Desgaste, ao contrário da corrosão, destrói o metal por meio da remoção mecânica da superfície.

Desgaste corrosivo e oxidativo ocorrem em inúmeras variedades de situações, tanto lubrificadas quanto não lubrificadas. Desgaste oxidativo é a melhor forma de representar o desgaste corrosivo de metais. Estas regiões que apresentam camadas de óxidos distintas podem trincar de modo abrupto ou em fadiga, devido as altas concentrações de tensões geradas pelo contato entre superfícies (SERBINO, 2005).

O desgaste corrosivo é um termo geral relativo a qualquer modo de desgaste dependente de um processo químico ou corrosivo, enquanto que o desgaste oxidativo refere-se ao desgaste provocado pelo oxigênio atmosférico (STACHOWIAK, 2001).

O desgaste do tipo corrosivo, mostrado na Figura 6, ocorre em meios corrosivos, os quais podem ser líquidos ou gasosos. Neste tipo de desgaste são formados produtos de reação devido às interações químicas e eletroquímicas. Essas reações são conhecidas como reações triboquímicas e produzem uma intercamada na superfície que depois é removida (RADI et al., 2007).

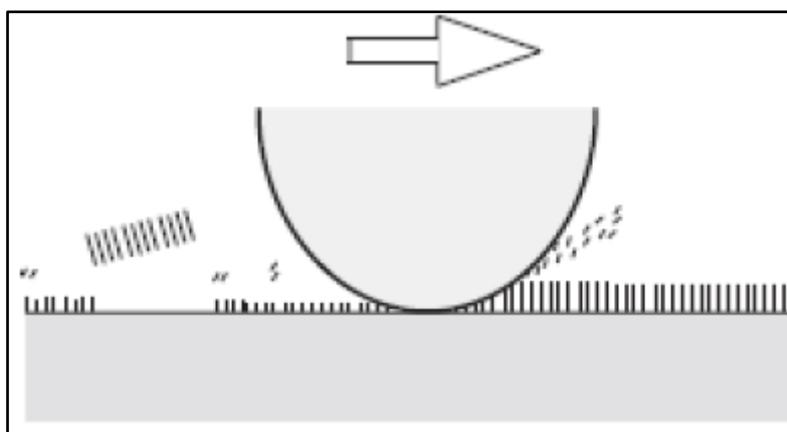


Figura 6 - Mecanismo de desgaste - Desgaste Corrosivo.
 Fonte: Adaptado de Kato e Adachi (2001).

O ataque corrosivo inicia-se com rápidas reações, que diminuem com o tempo. Este decréscimo nas reações ocorre devido a formação de um filme lubrificante na superfície que separa os dois elementos reativos. Desta forma tem-se o fim do desgaste corrosivo após certa profundidade do produto da reação formada. Porém, quando não há formação do filme protetor, as reações continuam indefinidamente desde seu início (STOETERAU, 2007).

2.2.2 Reações triboquímicas

Corresponde à perda ou degradação da superfície de um material devido à ação química ou eletroquímica do ambiente agressivo; ou devido à remoção de material, facilitada por meios mecânicos através de reação química. Como exemplo pode-se citar o atrito entre superfícies sólidas que reagem com um meio

corrosivo. A interação triboquímica entre a superfície e o meio de maneira contínua é o que indica este processo de desgaste (RADI et al., 2007).

O desgaste pela reação triboquímica, representado esquematicamente na Figura 7, é caracterizado pelo atrito entre duas superfícies sólidas em um ambiente corrosivo e não lubrificado, que pode ser líquido ou gasoso (BERALDO, 2011).

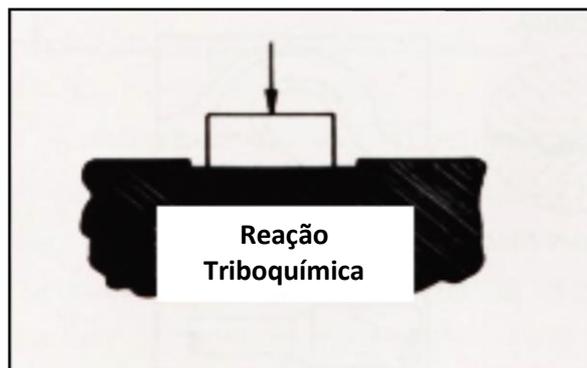


Figura 7 - Desenho esquemático da reação triboquímica.

Fonte: Adaptado de SUSKI (2004).

Segundo Suski (2004) as reações triboquímicas podem se dividir em quatro conjuntos distintos:

- Contato metálico entre a rugosidade das superfícies. Os sólidos têm a capacidade de se unir devido a junção localizada entre superfícies sólidas que levam a transferência de material entre duas superfícies. Ocasionalmente ocasionando uma remoção de metal devido à adesão e pequenas partículas de desgaste.

- Reações químicas dos metais com o ambiente. Para que ocorra a reação é necessário satisfazer algumas condições, como por exemplo, afinidade química entre reagentes. Estas reações resultam em camadas protetivas superficiais e reduzem o contato metálico.

- Trincamento de camadas protetivas superficiais devido à alta pressão local ou microfadiga levando a partículas não-metálicas de desgaste.

- Partículas metálicas e não metálicas podem agir abrasivamente e desgastar as superfícies de contato. Um maior desgaste pode ser causado por novas formações e remoção de camadas protetivas superficiais.

2.3 Fluido lubrificante

Por definição, lubrificação é a capacidade de um fluido de minimizar o atrito e o desgaste de superfícies metálicas sob carga. É uma medida que mensura o poder de lubrificação de uma substância, a partir de propriedades físicas como viscosidade e tensão superficial (SILVA, 2015).

O fluido de corte é um insumo ao processo de usinagem com a função de auxiliar a ferramenta de corte a remover maior volume de material da peça, sem colocar a vida útil da ferramenta em risco. As três principais funções do fluido de corte são refrigeração, lubrificação e limpeza da região de corte (GONÇALVES, 2013).

A formação de uma película lubrificante garante um menor atrito entre a peça e a ferramenta e conseqüentemente, um menor desgaste da ferramenta de corte. Os lubrificantes também desempenham outras funções importantes, como por exemplo, controle de corrosão, isolamento, transmissão de potência, amortecimento de choques, remoção de contaminantes e vedação (CARDOSO, 2016).

Neste trabalho a função principal do fluido empregado nos ensaios tribológicos será a de lubrificação, pois o mais importante é que o óleo crie um filme contínuo de lubrificante entre o anel e o pino para estabilizar a execução do ensaio e minimizar os efeitos de desgaste decorrentes do atrito.

2.3.1 Óleo de base vegetal

A produção das bases vegetais, pode ser enquadrada em um sistema sustentável de agricultura, definida como modelo de agricultura, que está comprometida com a natureza sistêmica da produção de alimentos, forragens e fibras, equilibrando, com equidade, preocupações relacionadas à saúde ambiental, justiça social e viabilidade econômica, entre os diferentes setores da população (GOLFETTO, 2011).

Os obtidos a partir de bases vegetais são considerados biodegradáveis. São frequentemente utilizados onde a sua aplicação envolve riscos de vazamentos que possam comprometer o meio ambiente (SILVA, 2012).

Os óleos vegetais por apresentarem duplas ligações em sua estrutura, apresentam menor estabilidade oxidativa, gerando compostos insolúveis, aumentando a viscosidade e a acidez do produto (MATOS, 2011).

Porém, o uso de aditivos antioxidantes pode prevenir esse processo de oxidação, por proteger o lubrificante da degradação oxidativa (QUINCHIA et al., 2011).

Lovell et al. (2010), por exemplo, utilizou combinações de biolubrificantes preparados com uma mistura homogênea de partículas da ordem de aproximadamente 20 nm, 600 nm e 4 µm de aditivo em pó. Após os testes observou-se que os lubrificantes com partículas da ordem de 20 nm de ácido bórico superou significativamente todos os outros lubrificantes no que diz respeito ao atrito e desgaste.

Rao e Krishna (2008) fizeram uma importante investigação a respeito da utilização de biolubrificante no processo de usinagem, na qual utilizou-se o ácido bórico para aplicação como fluido de corte convencional em processo de torneamento. Os resultados obtidos indicaram uma melhora considerável no desempenho de usinagem com ácido bórico comparando a usinagem a seco e molhado.

Reeves et al. (2012) testaram, através de um tribômetro do tipo pino sobre disco, o desempenho tribológico de vários lubrificantes verdes, tais como: óleo de abacate, canola, milho, oliva, de amendoim, de cártamo, gergelim, além de investigar o desempenho tribológico sobre o efeito do tamanho de partículas de nitrato de boro em óleo de canola durante o contato deslizante. Ao final constatou-se que o óleo de abacate e amendoim, tiveram o menor coeficiente de atrito dos óleos naturais. Em contraste, os óleos de abacate, oliva, e óleo de cártamo obtiveram as mais baixas taxas de desgaste. Dos óleos naturais o óleo de abacate teve o melhor desempenho tribológico.

2.3.2 Óleo de Pinhão Manso

Algumas espécies de oleaginosas possuem um vasto histórico de pesquisa na área de produção de óleos e de agroenergia, porém, o pinhão

manso por exemplo, ainda demanda estudos (EMBRAPA CLIMA TEMPERADO, 2012).

Segundo Souza et al. (2015), o óleo de pinhão manso possui maior presença de ácidos graxos insaturados, o que indica maior eficiência na lubrificação. Porém apresenta capacidade oxidativa menor, o que indica que um aditivo antioxidante melhoraria a eficiência do lubrificante.

Alguns motivos do potencial do pinhão manso são: capacidade produtiva da planta acima de quarenta anos e com pico de produção a partir do quarto, adaptável em áreas marginais e degradadas, forte resistência à seca, bem como variações de solo e clima (RIBEIRO, 2015).

O pinhão manso (*Jatropha Curcas*) é uma espécie perene e monóica, pertencente à família das Euforbiáceas, a mesma da mamona (*Ricinus sp.*), e seringueira (*Hevea spp.*) Acredita-se que a *Jatropha* seja originária da América Central, porém sua vegetação ocorre espontaneamente em diversas regiões do Brasil (HELLER, 1996).

O pinhão manso é uma espécie nativa com forte resistência à seca, solos pouco aproveitáveis e em áreas inviáveis para o manejo de máquinas. Sendo uma cultura viável para pequenas propriedades rurais com mão de obra familiar, tornando-se uma alternativa de fonte de renda para a região norte do Brasil. Configura-se também como uma cultura opcional para produção de óleo com fins energéticos. Sendo assim uma alternativa de inserção de renda para as pequenas propriedades rurais da região do sertão nordestino (CARDOSO, 2012).

As sementes de *Jatropha Curcas* não são comestíveis e contém diversos componentes tóxicos tais como ésteres de forbol, curcina, inibidores de tripsina, lectinas, fitatos. São formadas por uma casca dura que representa aproximadamente 37% de seu peso total e por uma amêndoa branca e suave que representa os 63% do peso restante. Quando secas, as sementes apresentam em torno de 7% de umidade e contém de 32 a 40% de óleo, com média de 34% (PUTTEN et al., 2009).

Tratando-se de aplicação de diferentes bases de fluido de corte no fresamento do ferro fundido vermicular (CGI) pela técnica de mínima quantidade de lubrificantes (MQL), o fluido vegetal de pinhão manso teve um desempenho melhor quando comparado com um fluido mineral com a mesma concentração.

Todavia o resultado é invertido quando o assunto é consumo de potência, onde o fluido mineral leva vantagem em relação ao fluido vegetal (SOUZA et al., 2015).

Nos experimentos de *Reichert Test*, os óleos vegetais in natura, por exemplo o Pinhão manso, apresentou uma boa capacidade de lubrificação, conforme análises das áreas de desgaste dos pinos (ou áreas das elipses) quando comparadas com água (GONÇALVES et al., 2014).

Segundo Gonçalves (2013), quando comparado ao óleo vegetal à base de Canola, óleo semissintético e ao óleo sintético nas operações de fresamento, furação e roscamento, com materiais de liga de alumínio e ferro fundido cinzento FC250, o óleo de base de Pinhão manso apresentou melhores resultados, principalmente em situações onde existem a necessidade de um nível maior de lubrificação.

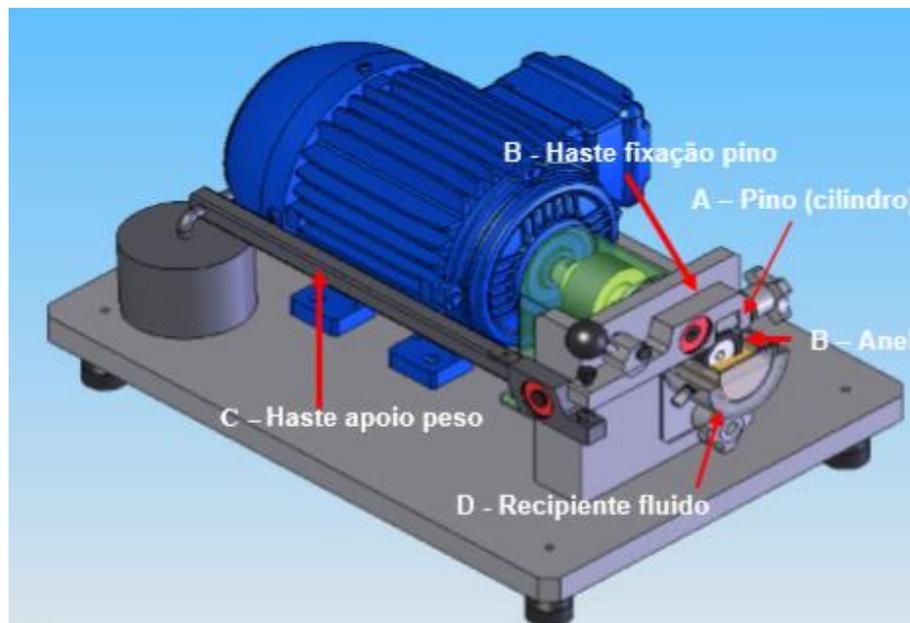
2.4 Tribômetro *Reichert Test*

O *Reichert Test* é um exemplo de ensaio tribológico que visa estudar a interação entre duas superfícies metálicas, com presença ou não de óleos lubrificantes (RADI et al., 2007).

O aparato do tipo *Reichert Test* é um equipamento utilizado para ensaios de desgaste que proporciona atrito entre um anel e um pino, para a realização do experimento. É uma técnica de ensaio importante para estudar propriedades tribológicas de materiais e a interação de fluidos lubrificante com diversos tipos de materiais. Para garantir o filme lubrificante, um terço da parte inferior do anel é imerso no óleo em teste. No ensaio, quanto melhor for à capacidade de lubrificação do fluido teste, menor será a área da cratera e a perda de massa (GONÇALVES, 2013).

O tribômetro *Reichert Test* é uma boa alternativa para a formulação de novos fluidos, pois consome menos fluido de corte quando comparado aos testes de usinagem convencionais. O equipamento consiste em atritar um pino fixado a um sistema de alavanca com um anel posicionado sobre um eixo acoplado a um motor elétrico. A rotação constante garante o fluxo de óleo no ponto de contato entre o pino e o anel, uma vez que o conjunto fica imerso em um recipiente com óleo. O pino simula o material da peça a ser usinada enquanto o

anel desempenha o papel da contrapeça (GONÇALVES, 2013). A Figura 8 apresenta um desenho esquemático do tribômetro *Reichert Test* que será empregado para realizar os ensaios tribológicos neste trabalho.



**Figura 8 - Desenho esquemático do equipamento *Reichert Test*.
Fonte: Gonçalves (2013).**

Segundo Lutfi et al. (2014), para o estudo realizado nos ensaios tribológicos *Reichert test*, os óleos de amendoim e moringa apresentaram melhor lubrificidade quando comparados com água e a seco. Porém, dos vegetais estudados o óleo de Moringa apresentou melhor resultado, no que compromete seu maior potencial lubrificante. Além disto, a moringa apresentou um melhor desempenho quando comparado com os experimentos utilizando água, seco (sem nenhum meio fluido) e óleo de amendoim.

Segundo Silva (2017), estudos feitos em um tribômetro do tipo *Reichert Test* utilizando óleos in natura e emulsões de óleo de pinhão manso e óleo de tungue, a base vegetal de pinhão manso apresentou resultados mais satisfatórios do que a base vegetal de tungue.

2.5 Comportamento tribológico

Conhecer como ocorre o desgaste permite selecionar adequadamente o material para cada aplicação uma vez que o fenômeno de desgaste depende

não apenas do material, mas também do sistema no qual ele ocorre. Para obter conhecimento sobre a maneira que o desgaste ocorre é importante conhecer dois aspectos da situação. O primeiro qual o principal movimento que causa desgaste, como apresenta a norma DIN 50320 (Análise de Sistemas 35 de Processos de Desgaste - 1979) ou seja: o deslizamento, o rolamento, o movimento oscilatório e o de impacto. O segundo aspecto é considerar quais são os mecanismos de desgaste, que são: a adesão, a abrasão, as reações triboquímicas e a fadiga superficial (LEITE et al., 2009).

Os tribômetros, máquinas de ensaios tribológicos, são recursos que servem para medir atrito ou desgaste dos materiais em condições controladas, e são frequentemente utilizados nas mais diversas pesquisas realizadas na área da tribologia. Este equipamento deve ser selecionado de maneira criteriosa, visto que existe uma ampla variedade dos mesmos, visando o objetivo de recriar todas as características críticas do atrito ou desgaste, com menor custo e sem a complexidade associada à utilização dos ensaios nos processos reais de fabricação. Uma escolha inadequada pode fornecer resultados insatisfatórios (GONÇALVES et al., 2014).

Os tribômetros têm sido utilizados por muitos autores para fins de pesquisas de base, com relação aos entendimentos dos mecanismos de atrito e para melhorar a compreensão da influência de variáveis como pressão de contato, velocidade de escorregamento, temperatura, composição química, acabamento superficial, entre outras sobre o atrito e desgaste dos materiais (STOETERAU, 2007).

Franceschini (2014), utilizou um tribômetro, com sistema de aquisição de dados e controle em tempo real que gerencia todos os processos realizados neste sistema. Este tribômetro, desenvolvido por Neis (2008), é capaz de utilizar em escalas condições semelhantes as que ocorrem em veículos. Os resultados obtidos mostraram que o equipamento cumpre bem o propósito e apresenta bons resultados para caracterização de materiais de fricção.

Schirmann (2016), utilizou um tribômetro do tipo pino conta disco para avaliar o desgaste de ferro fundido nodular GGG60, aço LNE 380 e aço LNE 250. Avaliou que o equipamento demonstrou resultados satisfatórios e que o material que apresentou maior resistência ao desgaste foi o ferro fundido nodular GGG 60 com tempera superficial.

O tribômetro do tipo *Reichert Test* é um equipamento utilizado para ensaios de desgaste. É uma técnica de ensaio importante para estudar propriedades tribológicas de materiais e a interação de fluidos lubrificantes com diversos tipos de materiais. Ele proporciona um atrito entre um anel e um pino, para a realização do experimento. No ensaio, quanto melhor for a capacidade de lubrificação do fluido em teste, menor será a área da elipse e a perda de massa. Sendo assim, para garantir o filme lubrificante, um terço da parte inferior do diâmetro externo do anel deve ficar imerso no óleo em teste (GONÇALVES, 2013).

2.6 Ensaios tribológicos

As alternativas iniciais de análise para os ensaios tribológicos são etapas de desenvolvimento dos produtos de fluidos de corte, uma vez que permitem uma maior flexibilidade para alteração da formulação onde são obtidas informações sobre lubricidade dos mesmos na fase de teste (GONÇALVES, 2013).

Os ensaios em escala real são necessários para confirmação dos resultados obtidos em pequena escala, ainda que os ensaios tribológicos padronizados em pequena escala sejam preferidos por sua praticidade e capacidade de seleção de materiais (BRISCOE e SINHA, 2009).

Para o desenvolvimento e avaliação do desempenho dos fluidos de corte, os ensaios tribológicos são alternativas iniciais de análise na etapa de concepção dos fluidos de corte, essa etapa permite uma maior flexibilidade para alteração da formulação onde são obtidas informações sobre lubricidade, efeitos de aditivos, detergência, habilidade de estabelecer uma resposta térmica, tensão superficial, sólidos dissolvidos e oscilação da temperatura na superfície de contato (CARDOSO et al., 2011).

Estudos sobre as reais condições de uso do material assim como as informações sobre o coeficiente de atrito, taxa de desgaste e durabilidade da película de lubrificantes, são características atribuídas aos testes tribológicos. À partir dos testes tribológicos por meio do *Reichert Test* avalia-se o comportamento da base vegetal selecionada utilizado para ensaios de desgaste,

que consiste em proporcionar um atrito entre um anel de metal duro e um pino de aço para a realização do experimento. Uma técnica de ensaio importante para estudar as propriedades tribológicas dos materiais e a interação de fluidos lubrificante com diversos tipos de materiais. Ao final dos ensaios tribológicos pode-se constatar a boa capacidade de lubrificação dos fluidos de base vegetal quando analisado a área da elipse, perda de massa e temperatura do fluido e corpo de prova valores estes semelhantes a base vegetal de pinhão manso (RADI et al., 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresentará os procedimentos e materiais utilizados nos ensaios. Inicialmente apresenta a adaptação feita no tribômetro, em seguida os experimentos tribológicos e a forma como serão feitas as análises dos resultados.

3.1 Adaptação do tribômetro *Reichert Test*

Para o desenvolvimento do experimento adaptou-se ao equipamento um sensor próximo da área de contato entre pino e anel para aquisição de temperatura dos corpos de prova e um sensor para aquisição da temperatura do fluido lubrificante. Segundo Diniz (2002), o aumento da temperatura contribui para ação do desgaste.

Para tal adaptação foi possível contar com a colaboração de funcionários do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da UTFPR - Câmpus Cornélio Procópio. A Figura 9 apresenta o tribômetro do tipo *Reichert Test* já com as adaptações dos sensores (termopares) para aferição das temperaturas.

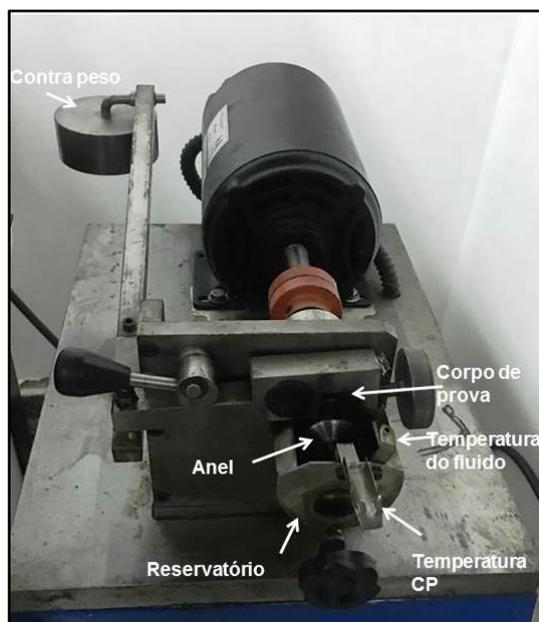


Figura 9 - Tribômetro montado com adaptações de termopares para aferição das temperaturas dos corpos de prova e do fluido.

Fonte: Autoria própria

3.2 Experimentos tribológicos

Para os ensaios que foram realizados no tribômetro *Reichert Test* escolheu-se como lubrificante o óleo de pinhão manso in natura, uma vez que existem estudos anteriores com este tipo de óleo que servirão como base de comparação, juntamente com os ensaios que serão realizados.

Neste trabalho o estudo inicial baseou-se na possibilidade de utilizar corpos de prova de custo abaixo dos normalizados, ou seja, que são indicados por norma. Optou-se por um anel de rolamento, mostrado na Figura 10, que é fabricado do mesmo material que o anel normalizado apresentado na Figura 12. O pino genérico, mostrado na Figura 11, foi usinado a partir de um aço ABNT 1020, material similar ao do pino normalizado, mostrado na Figura 13.



Figura 10 - Anel externo de rolamento adaptado para o tribômetro *Reichert Test*.
Fonte: Autoria própria.

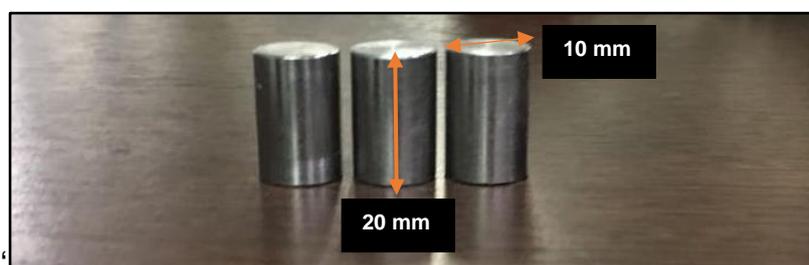


Figura 11 - Pino genérico usado como corpo de prova para o tribômetro *Reichert test*.
Fonte: Autoria própria.



Figura 12 - Anel normalizado adaptado para o tribômetro *Reichert test*.

Fonte: Autoria própria.

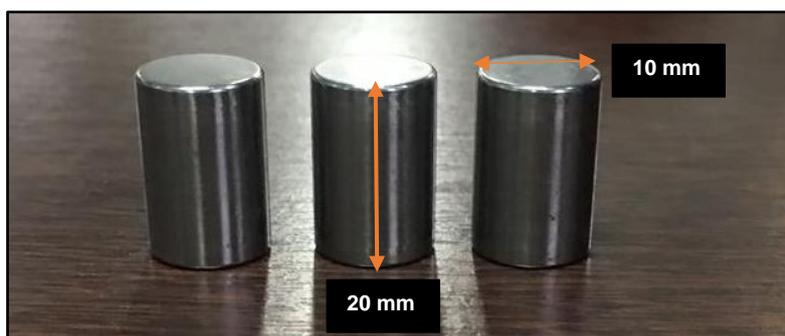


Figura 13 - Pino normalizado usado como corpo de prova para o tribômetro *Reichert test*.

Fonte: Autoria própria.

Para confirmação da composição química dos materiais utilizados nos corpos de prova normalizados, foi realizado um ensaio em um espectrofotômetro, mostrado na Figura 14, pertencente ao Laboratório de Ensaio da indústria Mecânica de Precisão Eirell (MGL) localizada na cidade de Cambé - PR.



Figura 14 - Espectrofotômetro utilizado.
Fonte: Autoria própria.

Para maior eficiência do resultado, o indicado é que o delineamento seja completamente aleatorizado no esquema fatorial. Para isso foi utilizado um pacote do software “R” (um programa estatístico de código aberto) que definiu a sequência dos experimentos, conforme apresentada na Tabela 1.

Para assegurar a completa aleatorização dos ensaios, optou-se por realizar um ensaio e mais quatro réplicas do mesmo ensaio, para cada condição de combinação entre tipo de pino e tipo de anel a ser empregado no tribômetro *Reichert Test*.

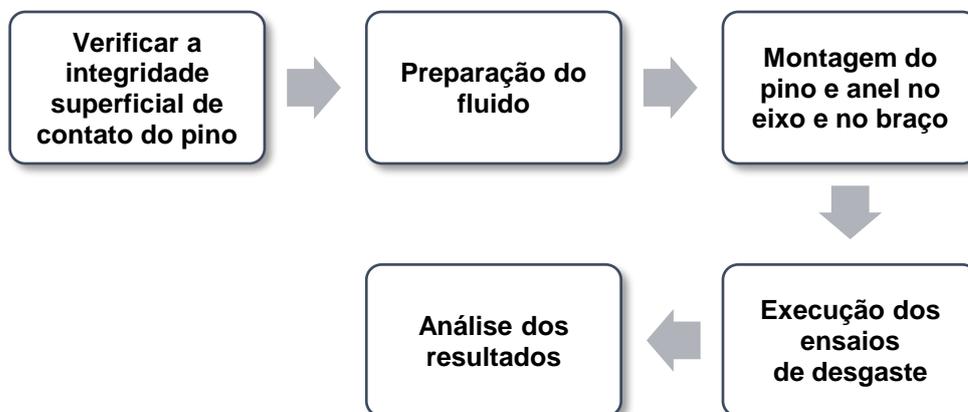
Tabela 1 - Sequência dos experimentos.

PARCELA	PINO	ANEL
1	N	G
2	G	N
3	N	G
4	G	G
5	N	G
6	N	N
7	G	N
8	N	N
9	G	G
10	G	N
11	G	N
12	G	G
13	G	G
14	N	N
15	N	G
16	G	N
17	N	N
18	N	G
19	N	N
20	G	G

N= Normalizado; G = genérico.

Fonte: Autoria própria.

A sequência de ações para realização dos ensaios tribológicos foi dividida em algumas etapas, as quais estão representadas esquematicamente na Figura 15 e que são descritas em seguida.



**Figura 15 - Sequência de ações para realização do ensaio tribológico de *Reichert Test*.
Fonte: Autoria própria.**

A) Verificar a integridade superficial de contato do pino (rugosidade e erro de forma), conforme o estabelecido na norma, DIN 50320 (Análise de Sistemas de Processos de Desgaste -1979) tendo como análise final o desgaste do pino.

B) Preparar o óleo: preencher o reservatório de maneira que $1/3$ do diâmetro externo do anel fique imerso no fluido.

C) Montagem do corpo de prova e verificação da perpendicularidade do pino em relação ao anel, para garantir a manutenção do pino na posição central sobre a superfície externa do anel.

D) Execução dos ensaios:

D.1) Acionar o tribômetro *Reichert Test*, estabelecer o tempo de dois minutos de modo a estabilizar o movimento do eixo árvore, garantindo que o mesmo arraste um filme de lubrificante no contato do pino com o anel.

D.2) Os ensaios foram realizados com tempo, carga, velocidade e quantidade de lubrificante constante. Para cada situação foram realizados um ensaio e

quatro réplicas, totalizando 5 repetições. Essas variáveis do processo foram selecionadas segundo a norma ASTM G 99 - 95a (*Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*). Os testes foram realizados mediante consulta bibliográfica e também em razão dos resultados serem comparativos entre os materiais do corpo de prova. O número de execuções para cada pino foi escolhido de acordo com ensaios preliminares, de modo que uma área de desgaste não comprometesse a outra. Para cada face desgastada, foi girado o pino a 90°, no sentido horário, estabelecendo assim uma sequência no sentido horário nas faces desgastadas, de modo que as cinco elipses fossem distribuídas de forma equidistante. Os ensaios foram realizados por um tempo de 60 segundos, empregando uma velocidade de deslizamento de 1,3 m/s. A quantidade de lubrificante empregada foi de 50 ml, determinada pela capacidade do reservatório do sistema, de modo a manter-se uma lubrificação constante do corpo de prova.

D.3) Para aquisição dos dados de temperatura; foi adaptado um dispositivo que consiste de uma placa módulo USB de aquisição de dados multifuncional com isolamento - tensão / temperatura, interligado a um computador por meio USB que foi possível captar os dados utilizando o software LabVIEW. Para avaliar o padrão de calor ou oscilação de temperatura no corpo de prova na interface de contato pino/anel e temperatura do fluido, utilizou-se um termopar do Tipo K (-40 °C a 750 °C/ - 40 °F a 1382 °F), sensibilidade por volta de 55 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$, dispositivo interligado a um computador que foi possível captar os dados utilizando um programa no LabVIEW. O objetivo foi analisar a variação da temperatura na região de contato pino/anel e também o calor gerado na região atritada que foi transferido para o fluido. Para cada face desgastada foi estabelecido um intervalo de tempo para que a temperatura do corpo de prova e do fluido estabilizassem a uma temperatura entre 30 °C a 34 °C.

E) Análise dos resultados:

E.1) As temperaturas para o óleo e as temperaturas dos corpos de provas foram tabuladas em planilhas que geraram os gráficos das temperaturas.

E.2) Para o controle das perdas de massa, foi utilizado uma balança semi-analítica da marca Marte Científica, série UX-4200H, com resolução de 0,01 g, do Laboratório de Materiais da UTFPR - Câmpus Cornélio Procópio; ao final de cada face desgastada, foi pesado o corpo de prova e subtraído os valores das perdas de massa, posteriormente lançado em planilhas as quais geraram os gráficos de perda de massa.

E.3) Para medir as áreas desgastadas dos pinos, foi utilizado um microscópio digital portátil da marca Dino-Lite Pro, modelo AM-313 T, que possibilita ampliação de até 200 x com auxílio do software Dino Capture 2.0.

E.4) As áreas de desgaste dos pinos possuem aspecto de elipses. Os cálculos dessas áreas foram realizados empregando-se a equação (1), que representa a equação da área da elipse:

$$A = a \cdot b \quad (1)$$

em que:

- A área da elipse (mostrada nas Figuras A1 até A5 do Apêndice);
- a área menor da elipse;
- b área maior da elipse.

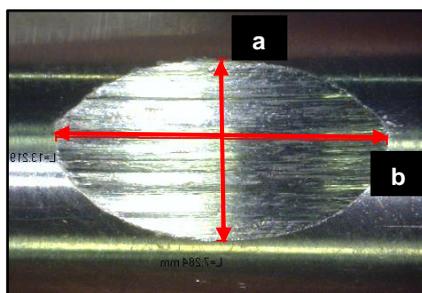


Figura 16 - Geometria utilizada para os cálculos da elipse.
Fonte: Autoria própria.

E.5) Para analisar a rugosidade superficial das áreas desgastadas utilizou-se um rugosímetro portátil da marca Mitutoyo®, modelo SJ-201P, mostrado na Figura 16. A rugosidade foi medida nos 3 parâmetros rugosidade média aritmética (Ra), rugosidade média quadrática (Rq) e rugosidade total (Rz).



Figura 17 - Rugosímetro portátil utilizado.

Fonte: Autoria própria.

E.6) Para analisar os mecanismos de desgastes dos corpos de prova, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca ZEISS®, modelo LS15, pertencente ao Laboratório de Anelasticidade e Biomateriais da Universidade Estadual Paulista (UNESP) - Câmpus de Bauru - SP.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para os ensaios de desgaste por meio do tribômetro *Reichert Test*, utilizou-se como óleo lubrificante o óleo de pinhão manso in natura, para avaliar o comportamento do material. Todos os procedimentos foram especificados no trabalho, e foram feitos da mesma forma para todos os pinos. A taxa de desgaste dos pinos foi o principal critério de comparação. Considerando os ensaios tribológicos foi possível observar que o desgaste nos pinos genéricos ocorreu de forma mais moderada do que nos pinos normalizados.

Os resultados apresentados inicialmente são referentes às aferições das perdas de massa e das áreas de desgaste dos pinos (ou áreas das elipses), das temperaturas dos corpos de prova e da temperatura do óleo obtidos nos ensaios realizados. Posteriormente, são apresentados os resultados referentes às aferições da rugosidade superficial em três parâmetros (R_a , R_q e R_z) e as imagens MEV das superfícies de desgaste dos pinos.

4.1 Resultados obtidos para as áreas de desgaste (áreas das elipses)

A Tabela 2 mostra os valores das áreas das elipses obtidos para os diversos pares de corpos de prova utilizados. As Figuras A1 até A5, apresentadas no Apêndice A, permitem visualizar as dimensões das faces desgastadas dos pinos genéricos e normalizados.

Tabela 2 - Áreas das elipses (mm^2).

	Pino genérico e anel genérico	Pino normalizado e anel normalizado	Pino normalizado e anel genérico	Pino genérico e anel normalizado
Repetição 1	46,55	52,52	52,59	10,02
Repetição 2	38,82	75,62	96,23	29,83
Repetição 3	37,78	51,71	68,91	32,77
Repetição 4	42,39	65,19	42,45	41,22
Repetição 5	38,44	47,44	62,46	48,66

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 17 é possível perceber que os ensaios feitos com o par anel normalizado e pino genérico foram os que obtiveram a menor área de desgaste.

Em contrapartida, os ensaios realizados com o par pino normalizado e anel genérico obtiveram as maiores áreas desgastadas em relação aos demais, na maioria das repetições. Exceto na repetição 5, em que o ensaio com pino e anel normalizados obtiveram uma maior área de desgaste.

Porém, de modo geral, o par de corpos de prova com maior área de desgaste foi o par pino normalizado e anel genérico.

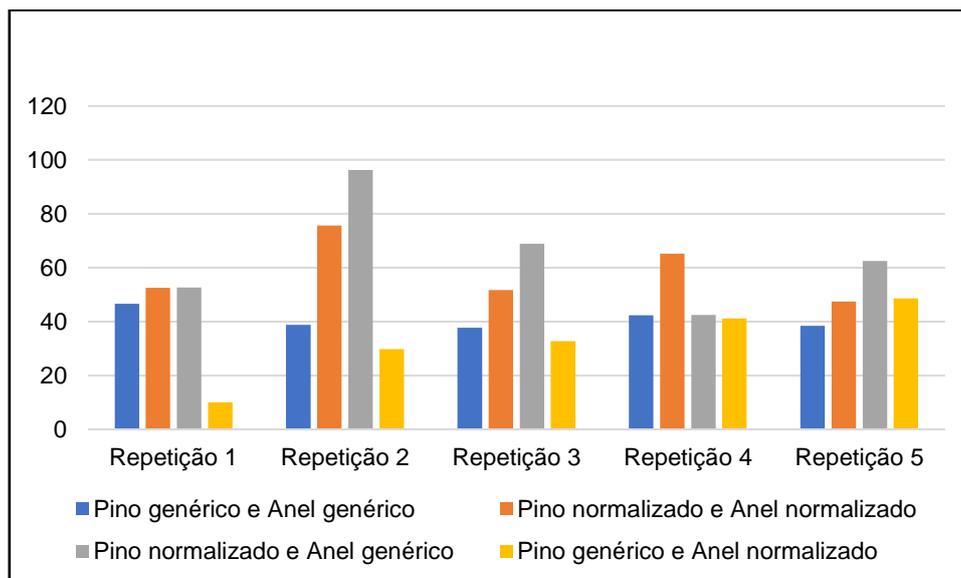


Figura 18 - Área das elipses dos corpos de prova - Ensaio *Reichert Test*.
Fonte: Autoria própria.

4.2 Resultados obtidos para as perdas de massa

A Tabela 3 apresenta a aferição das perdas de massas dos pinos para os ensaios realizados com todos os pares de corpos de prova.

Tabela 3 - Aferição das perdas de massa (g).

	Pino genérico e Anel genérico	Pino normalizado e Anel normalizado	Pino normalizado e Anel genérico	Pino genérico e Anel normalizado
Repetição 1	0,040	0,030	0,020	0,010
Repetição 2	0,040	0,050	0,080	0,010
Repetição 3	0,020	0,020	0,050	0,010
Repetição 4	0,010	0,040	0,040	0,020
Repetição 5	0,020	0,030	0,040	0,030

Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Figura 18 que na primeira repetição o par pino e anel genéricos apresentou a maior perda de massa, e na repetição 4 o par pino e anel normalizados teve a mesma perda de massa do par pino normalizado e anel genérico. Porém, semelhante aos resultados obtidos para as áreas das elipses, percebe-se que o par de corpos de prova composto por pino normalizado e anel genérico apresentou a maior média de perda de massa, quando comparado aos demais pares de corpos de prova.

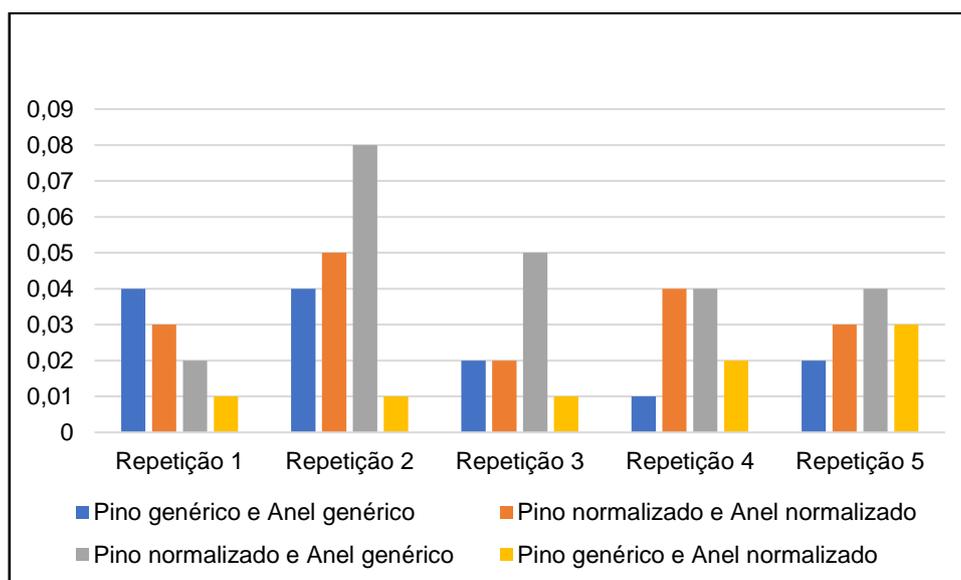


Figura 19 - Perda de massa dos corpos de prova - Ensaio *Reichert Test*.
Fonte: Autoria própria.

4.3 Resultados obtidos para as temperaturas dos corpos de prova

A Tabela 4 mostra as médias de temperaturas dos corpos de prova obtidas durante a realização dos ensaios.

Na Figura 19 observa-se uma elevação da temperatura nas repetições 2 e 3, principalmente no par de corpos de prova composto por pino normalizado e anel genérico. No caso do par pino e anel normalizados, as maiores alterações de temperatura foram verificadas nas repetições 2 e 4.

Tabela 4 - Temperaturas médias dos corpos de prova.

	Pino genérico e Anel genérico	Pino normalizado e Anel normalizado	Pino normalizado e Anel genérico	Pino genérico e Anel normalizado
Repetição 1	25,56	23,46	36,17	28,63
Repetição 2	27,09	45,81	49,90	27,91
Repetição 3	25,09	39,75	47,90	29,13
Repetição 4	28,19	46,65	34,59	31,57
Repetição 5	26,65	36,31	38,22	33,05

Fonte: Autoria própria.

O par de corpos de prova formado por pino e anel genéricos foi o que sofreu menor alteração de temperatura durante os ensaios. O par pino genérico e anel normalizado tiveram um aumento linear da temperatura nas repetições.

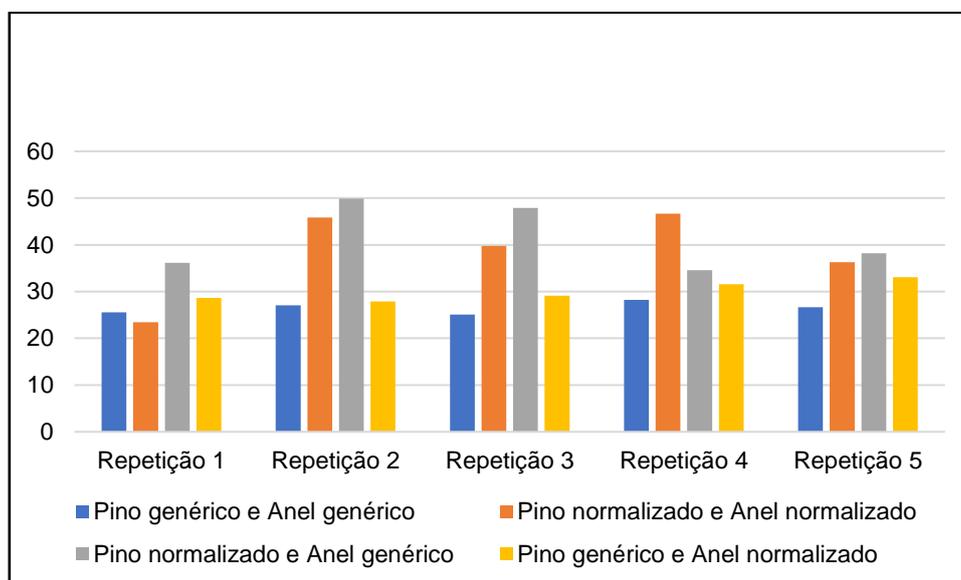


Figura 20 - Temperaturas médias dos corpos de prova - Ensaio *Reichert Test*.
Fonte: Autoria própria.

4.4 Resultados obtidos para as temperaturas do óleo

A Tabela 5 apresenta os valores das médias das temperaturas, em graus Celsius, obtidas para o fluido lubrificante nos ensaios.

Na Figura 20 observa-se a evolução das temperaturas do óleo lubrificante. A capacidade de lubrificar é de grande importância, pois reduz a ocorrência de danos na região de atrito.

Tabela 5 - Temperaturas médias do óleo (°C).

	Pino genérico e Anel genérico	Pino normalizado e Anel normalizado	Pino normalizado e Anel genérico	Pino genérico e Anel normalizado
Repetição 1	31,70	26,87	44,16	30,40
Repetição 2	34,40	37,41	55,26	29,90
Repetição 3	32,74	35,95	52,33	33,76
Repetição 4	34,72	50,58	40,22	36,48
Repetição 5	33,83	39,76	45,23	37,36

Fonte: Autoria própria.

Como já observado nas médias de temperaturas dos corpos de prova, nos ensaios com o par de corpos de prova genéricos, a temperatura do óleo também teve pequenas alterações nas repetições. Já no caso do par de corpos de prova normalizados, houve um aumento progressivo na temperatura, porém a repetição 4 foi a que obteve maior elevação de temperatura do óleo. No par de corpos de prova com pino normalizado e anel genérico, as repetições 2 e 3 tiveram a maior alteração da temperatura. Quando analisou-se o par pino genérico e anel normalizado, a elevação da temperatura do óleo foi linear.

Observa-se que na maioria dos casos, a elevação da temperatura do óleo ocorreu de maneira direta em relação à elevação da temperatura dos corpos de prova, o que confirma o comportamento do óleo na capacidade de troca de calor.

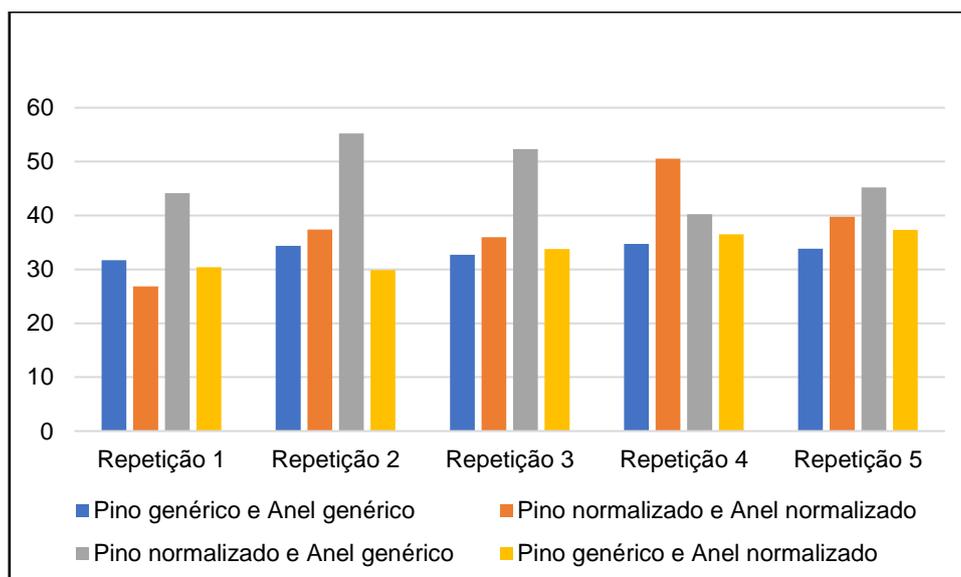


Figura 21 - Temperaturas médias do óleo - Ensaio *Reichert Test*.

Fonte: Autoria própria.

4.5 Resultados de rugosidade superficial

Este tópico apresenta os resultados referentes à rugosidade superficial das áreas de desgaste dos pinos desgastados, em relação aos parâmetros utilizados nos ensaios.

Existe um conjunto de fatores que influenciam a textura e a integridade da superfície de uma peça usinada, como por exemplo: o processo de fabricação, a microestrutura e a composição química do material dos corpos de prova e os parâmetros de ensaio.

As Tabelas 6 a 8 mostram, respectivamente, os valores dos parâmetros de rugosidade Ra, Rq e Rz obtidos para as áreas desgastadas dos pinos utilizados nos ensaios. As aferições de rugosidade foram realizadas no sentido transversal em relação aos riscos provocados pela abrasão na superfície dos pinos.

Tabela 6 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade Ra (μm).

	Pino genérico e Anel genérico	Pino normalizado e Anel normalizado	Pino normalizado e Anel genérico	Pino genérico e Anel normalizado
Repetição 1	0,30	0,21	0,21	0,22
Repetição 2	0,29	0,24	0,26	0,25
Repetição 3	0,30	0,25	0,28	0,27
Repetição 4	0,50	0,25	0,20	0,33
Repetição 5	0,39	0,25	0,23	0,49

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade Rq (μm).

	Pino genérico e Anel genérico	Pino normalizado e Anel normalizado	Pino normalizado e Anel genérico	Pino genérico e Anel normalizado
Repetição 1	0,41	0,26	0,27	0,29
Repetição 2	0,42	0,39	0,33	0,31
Repetição 3	0,38	0,31	0,42	0,33
Repetição 4	0,62	0,31	0,25	0,41
Repetição 5	0,53	0,32	0,28	0,62

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade Rz (μm).

	Pino genérico e Anel genérico	Pino normalizado e Anel normalizado	Pino normalizado e Anel genérico	Pino genérico e Anel normalizado
Repetição 1	1,47	0,88	0,87	1,15
Repetição 2	1,78	1,36	1,40	1,24
Repetição 3	1,49	1,01	1,67	1,37
Repetição 4	2,66	1,19	0,80	1,61
Repetição 5	2,27	1,25	1,01	2,42

Fonte: Autoria própria.

Como mostra a Figura 21, os valores individuais médios do parâmetro de rugosidade Ra. Os pares de corpos de prova compostos por pino e anel normalizados e pino genérico e anel normalizado têm valores muito próximos, o que indica que o comportamento nos ensaios foi equivalente. Para os pares formados por pino e anel genéricos e pino normalizado e anel genérico, os valores também foram próximos e indicam a equivalência de comportamento entre os ensaios. Ao analisar a Figura 21 percebe-se que o melhor nível de acabamento superficial ocorreu para os pares de corpos de prova pino e anel normalizados e pino normalizado e anel genérico, os quais apresentaram os menores valores médios de rugosidade Ra, respectivamente de 0,24 μm e 0,23 μm .

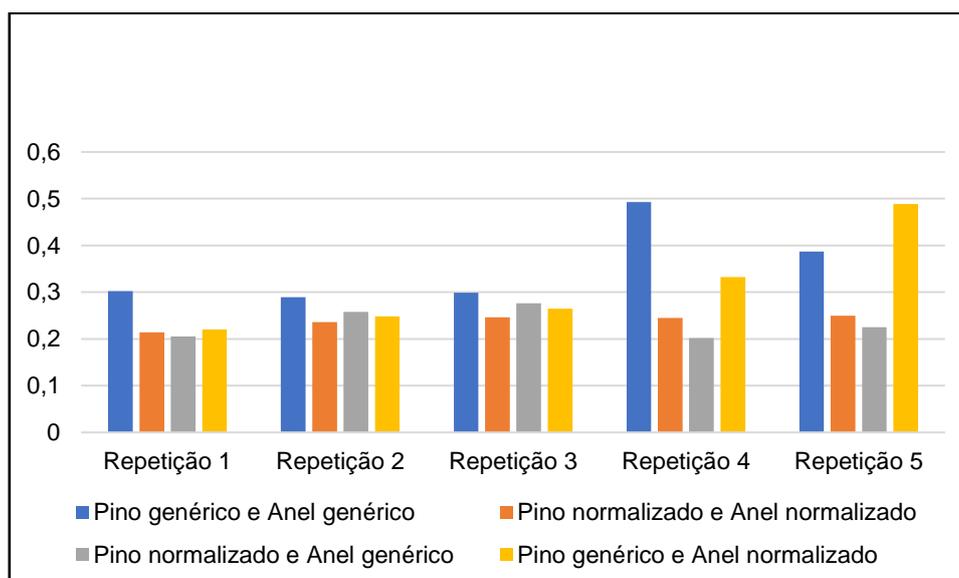


Figura 22 - Resultados de rugosidade superficial (Ra).

Fonte: Autoria própria.

A Figura 22 apresenta os valores individuais médios do parâmetro de rugosidade R_q . O valor médio de rugosidade R_q do par de pino e anel normalizados foi de $0,317 \mu\text{m}$ e o do par de pino normalizado e anel genérico foi de $0,311 \mu\text{m}$. Por se tratar de uma diferença de valores muito pequena, pode-se dizer que os pares de corpos de prova formados por pino e anel normalizados e por pino normalizado e anel genérico apresentaram valores equivalentes de rugosidade, constituindo os pares de melhor nível de acabamento superficial, considerando o parâmetro de rugosidade R_q .

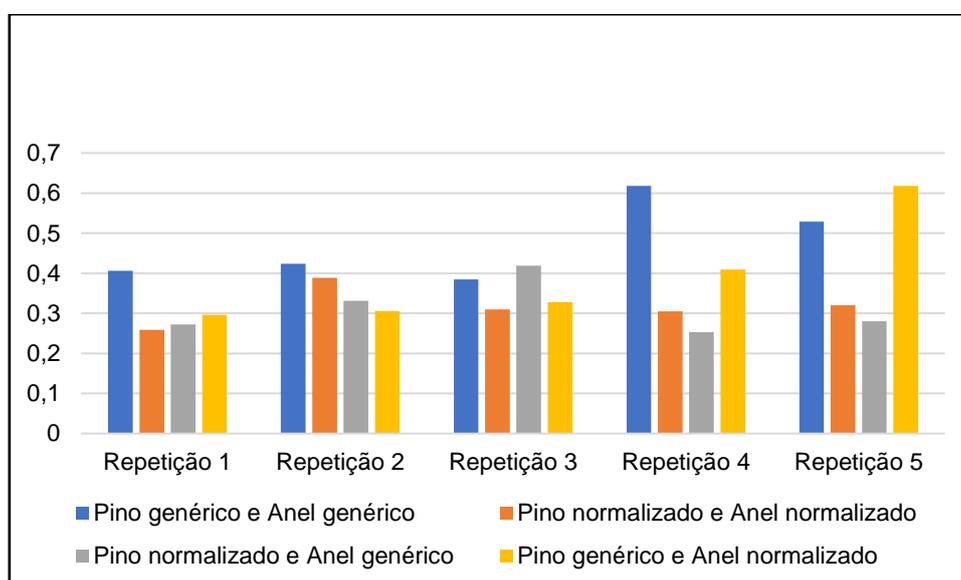


Figura 23 - Resultados de rugosidade superficial (R_q).
Fonte: Autoria própria.

A Figura 23 mostra os valores individuais médios obtidos para o parâmetro de rugosidade R_z . Observa-se na Figura 23 que a média de rugosidade superficial do par pino e anel normalizados foi de $1,14 \mu\text{m}$ e a do par pino normalizado e anel genérico foi de $1,15 \mu\text{m}$, uma diferença muito pequena. Sendo assim, verifica-se novamente que os pares de corpos de provas formados por pino e anel normalizados e por pino normalizado e anel genérico apresentaram o melhor nível de acabamento superficial para o parâmetro de rugosidade R_z .

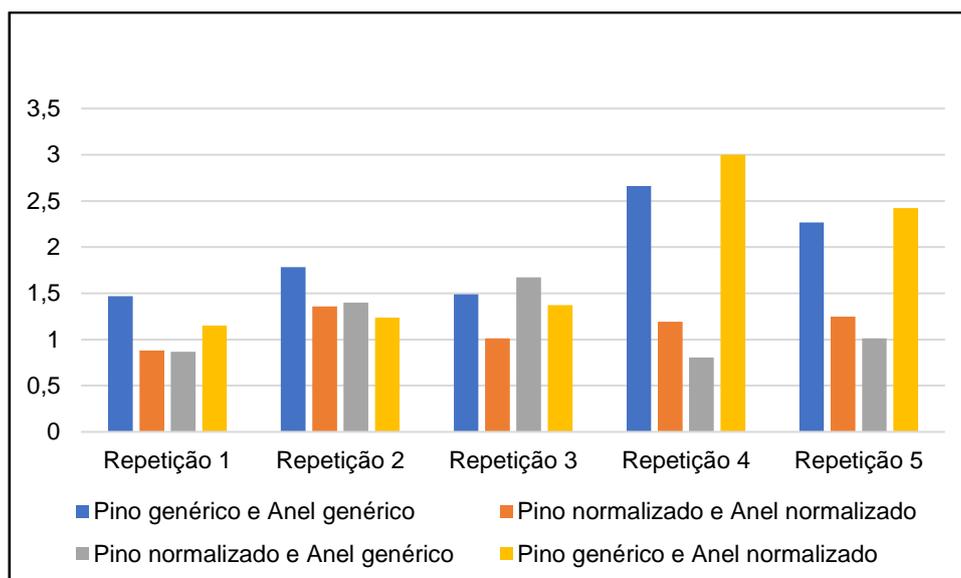


Figura 24 - Resultados de rugosidade superficial (Rz).
Fonte: Autoria própria.

4.6 Mecanismo de desgaste tribológico

As Figuras 24 a 47 apresentam as imagens MEV obtidas das superfícies desgastadas dos pinos decorrentes dos ensaios tribológicos realizados.

As Figuras 24 até 28 mostram o desgaste resultante dos ensaios realizados com o par de corpos de prova pino e anel genéricos. Observa-se nos detalhes das imagens da superfície desgastada do pino que em todos os casos, os desgastes aconteceram de maneira muito semelhante e caracterizou-se desgaste abrasivo. Os riscos paralelos e na mesma direção caracterizam o mecanismo de desgaste, e através disto consegue-se observar que o desgaste neste caso foi moderado. Em alguns detalhes percebe-se saliências que possivelmente são rebarbas.

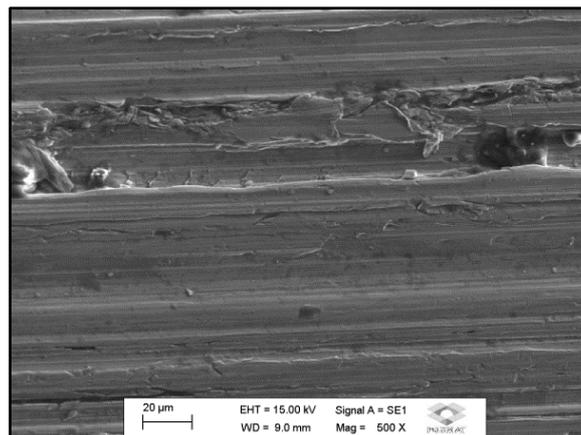


Figura 25 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino e anel genéricos: Repetição 1.
Fonte: Autoria própria.

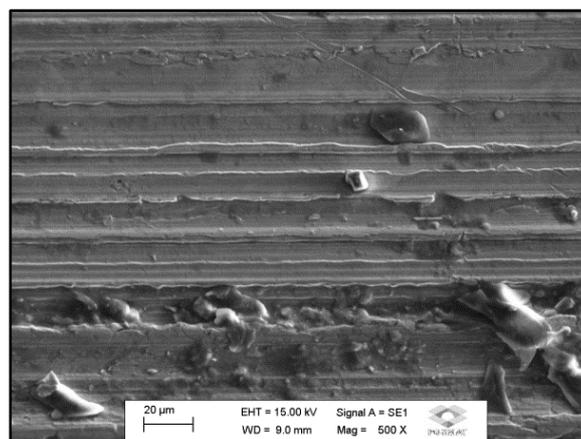


Figura 26 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino e anel genéricos: Repetição 2.
Fonte: Autoria própria.

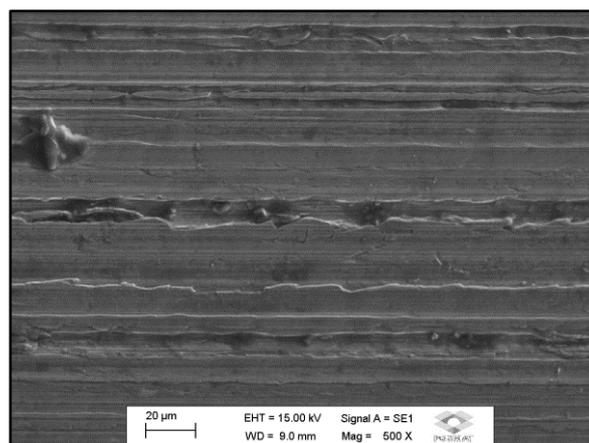


Figura 27 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino e anel genéricos: Repetição 3.
Fonte: Autoria própria.

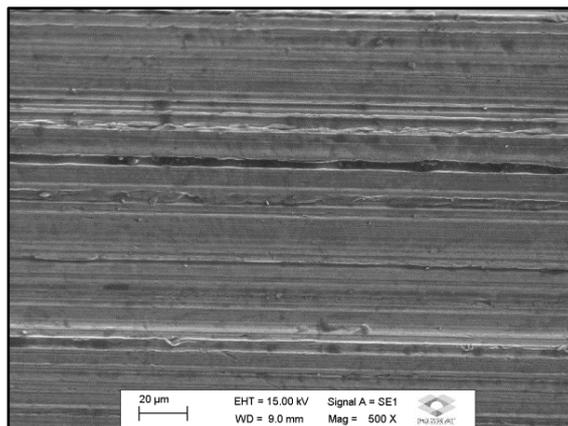


Figura 28 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino e anel genéricos: Repetição 4.
Fonte: Autoria própria.

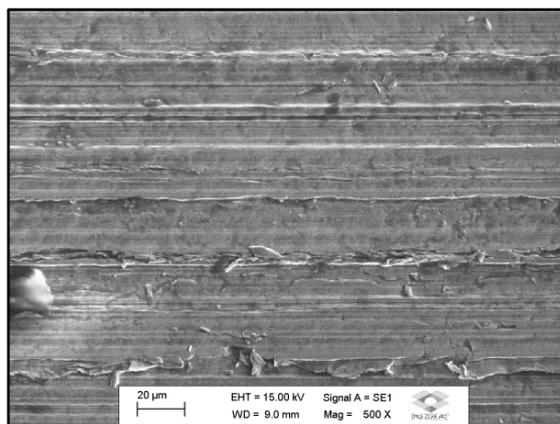


Figura 29 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino e anel genéricos: Repetição 5.
Fonte: Autoria própria.

Quando se avalia a superfície desgastada do anel utilizado nestes ensaios no detalhe da Figura 29, observa-se a mesma característica de desgaste. O detalhe em vermelho mostra uma elevação, o que pode caracterizar adesão do material do pino no anel. (FALTOU INSERIR ESTE DETALHE EM VERMELHO NESTA FIGURA 29)

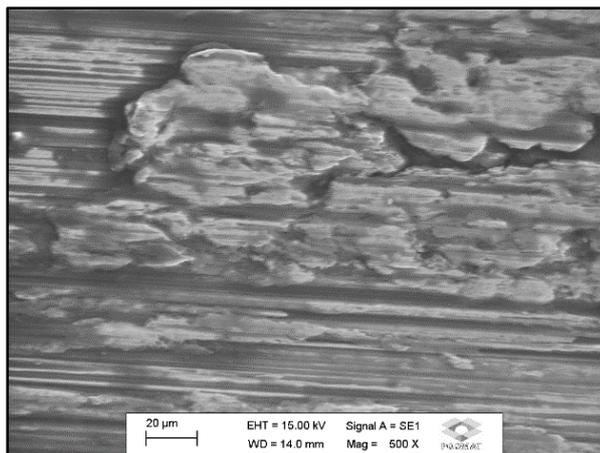


Figura 30 - Imagem da região de desgaste do anel do par de corpos de provas pino e anel genéricos. Fonte: Autoria própria.

As imagens mostradas nas Figuras 30 até 34 mostram o desgaste da superfície do pino do par de corpos de prova composto por pino e anel normalizados. Percebe-se que o desgaste ocorrido nestes ensaios foi maior, e que ocorreram de maneira semelhante em todos os ensaios feitos com esse par. O comportamento do material mostra que o atrito neste caso foi mais severo, o que indica que provavelmente o fluido lubrificante teve mais dificuldade em desenvolver a sua função neste caso.

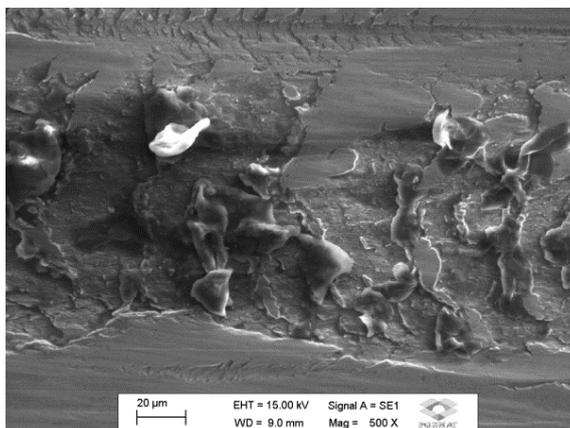


Figura 31 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino e anel normalizados: Repetição 1. Fonte: Autoria própria.

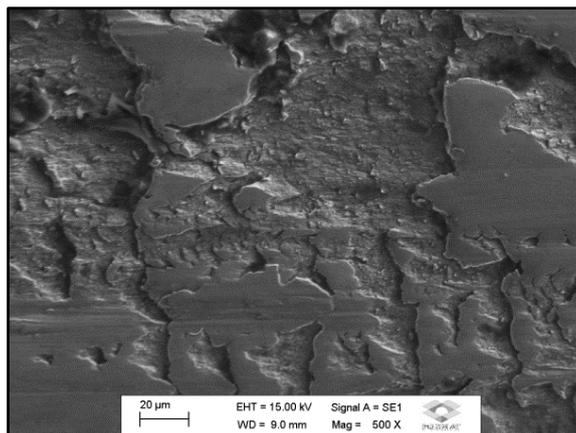


Figura 32 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino e anel normalizados: Repetição 2.
Fonte: Autoria própria.

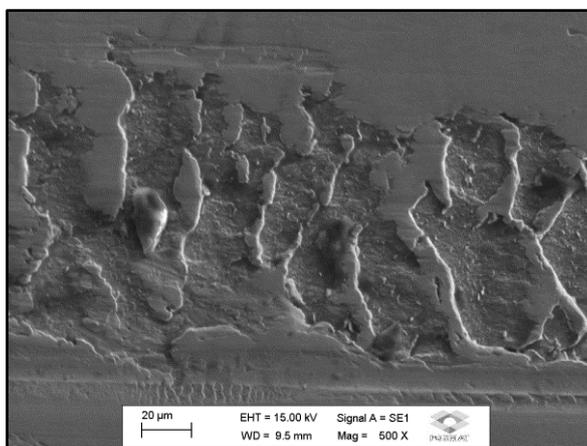


Figura 33 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino e anel normalizados: Repetição 3.
Fonte: Autoria própria.

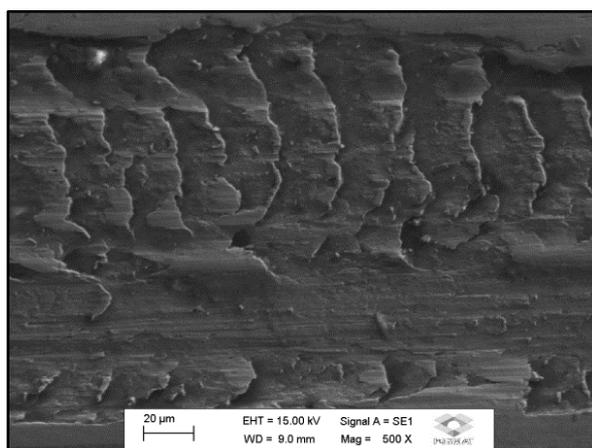


Figura 34- Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino e anel normalizados: Repetição 4.
Fonte: Autoria própria.

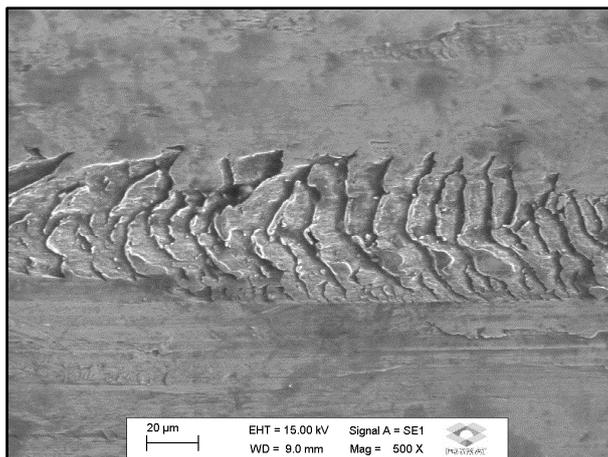


Figura 35 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino e anel normalizados: Repetição 5.
Fonte: Autoria própria.

Analisando a imagem MEV da superfície desgastada do anel que foi utilizado nestes ensaios, mostrada na Figura 35, observa-se que aparecem placas de transferência de material, que se apresentam na forma de zonas salientes, que possivelmente são aglomerados de partículas com fortes deformações plásticas, decorrentes de um atrito elevado ocorrido durante os ensaios.

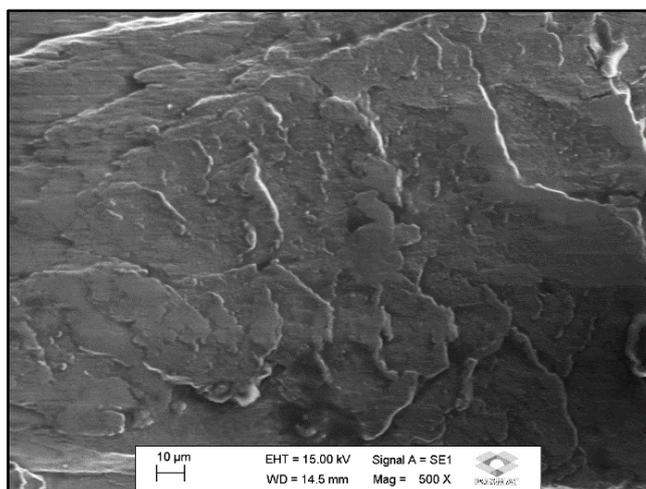


Figura 36 - Imagem da região de desgaste do anel do par de corpos de prova pino e anel normalizados.
Fonte: Autoria própria.

As imagens MEV das regiões desgastadas do pino do par de corpos de prova formado por pino normalizado e anel genérico estão apresentadas nas Figuras 36 até 40. Os detalhes mostrados evidenciam que as características dos desgastes do pino neste caso foram semelhantes aos detalhes observados no

par de corpo de prova com ambos normalizados, vistos na Figura 26. Porém, percebe-se que o desgaste ocorreu de maneira mais moderada, o que indica que o lubrificante conseguiu agir de maneira mais eficiente.

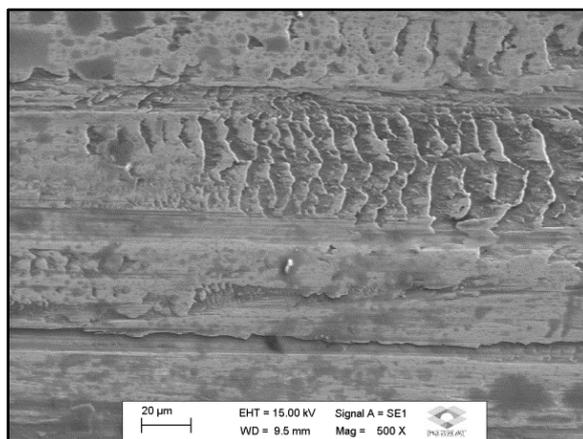


Figura 37 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino normalizado e anel genérico: Repetição 1.
Fonte: Autoria própria.

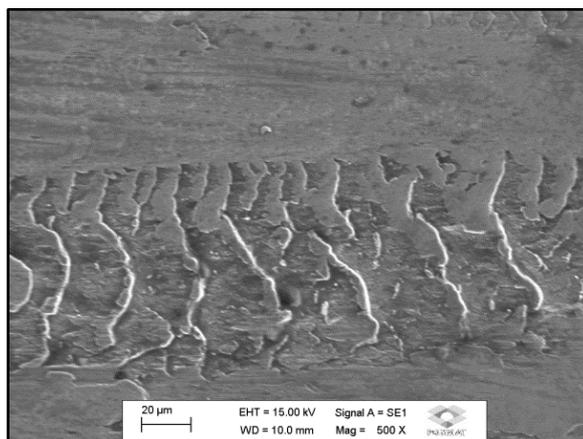


Figura 38 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino normalizado e anel genérico: Repetição 2.
Fonte: Autoria própria.

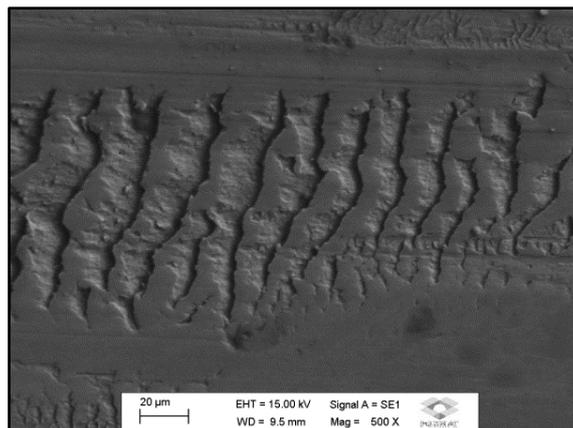


Figura 39 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino normalizado e anel genérico: Repetição 3.
Fonte: Autoria própria.

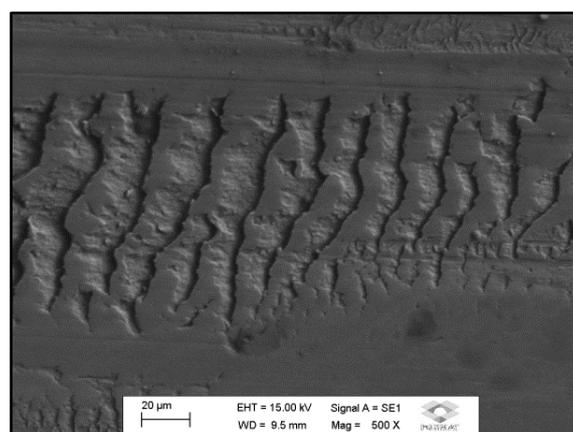


Figura 40 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino normalizado e anel genérico: Repetição 4.
Fonte: Autoria própria.

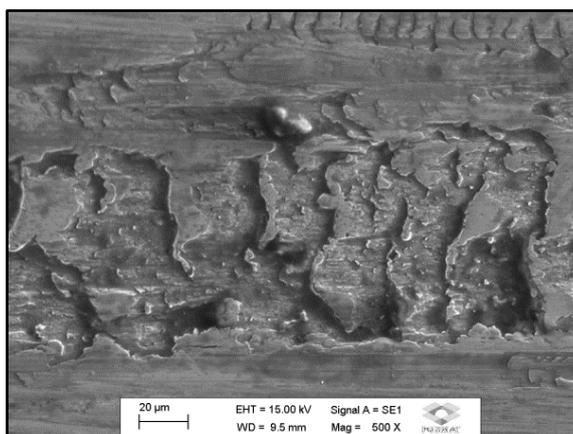


Figura 41 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino normalizado e anel genérico: Repetição 5.
Fonte: Autoria própria.

O anel utilizado neste ensaio, mostrado na Figura 41, teve comportamento de desgaste semelhante aos anéis dos demais ensaios, apresentando zonas salientes que indicam adesão de material.

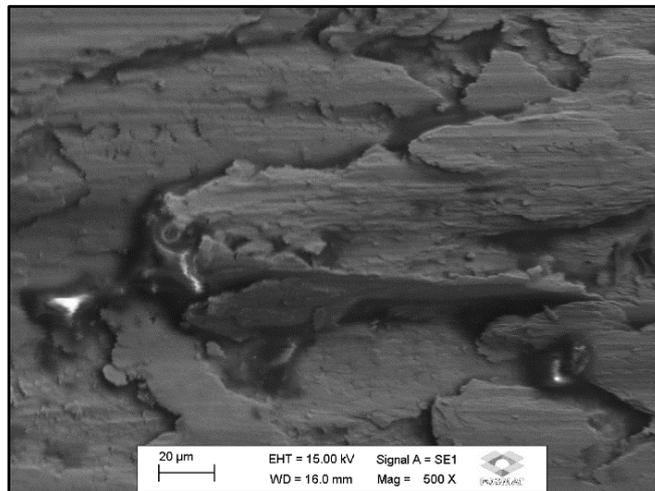


Figura 42 - Imagem da região de desgaste do anel do par de corpos de prova pino normalizado e anel genérico.
Fonte: Autoria própria.

O último par de corpos de provas a ser analisado é formado por pino genérico e anel normalizado. As imagens MEV da superfície desgastada do pino são vistas nas Figuras 42 até 46. Observa-se que, neste caso, o mecanismo predominante é a abrasão. Em todos os ensaios realizados para esta condição os resultados foram semelhantes. Percebe-se que o desgaste neste caso foi moderado, o que indica a eficiência do lubrificante utilizado.

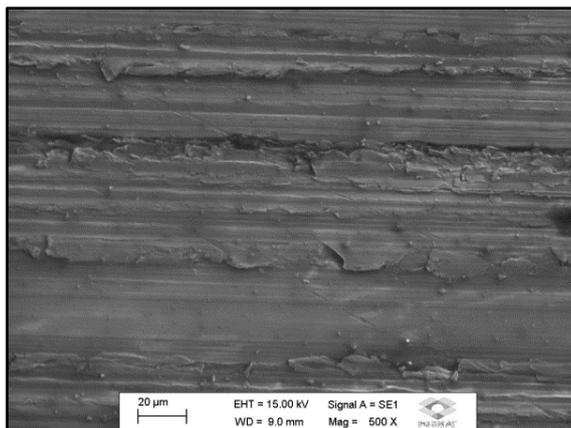


Figura 43 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino genérico e anel normalizado: Repetição 1.
Fonte: Autoria própria.

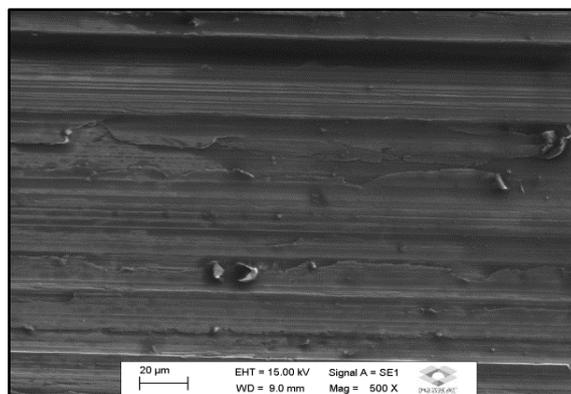


Figura 44 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino genérico e anel normalizado: Repetição 2.
Fonte: Autoria própria.

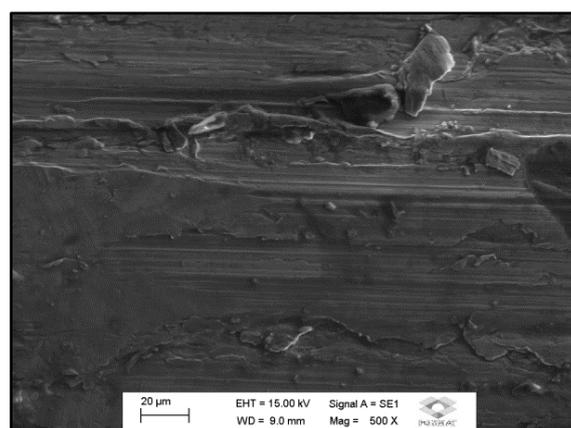


Figura 45 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino genérico e anel normalizado: Repetição 3.
Fonte: Autoria própria.

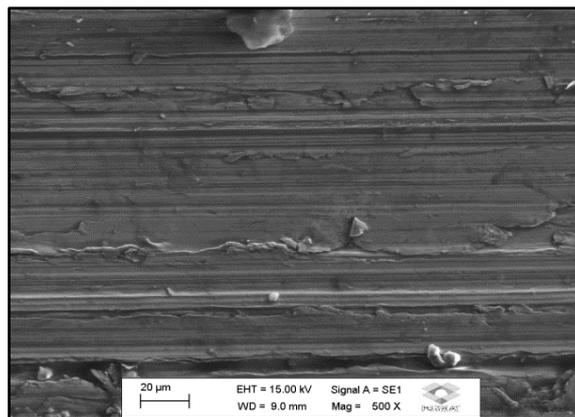


Figura 46 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino genérico e anel normalizado: Repetição 4.
Fonte: Autoria própria.

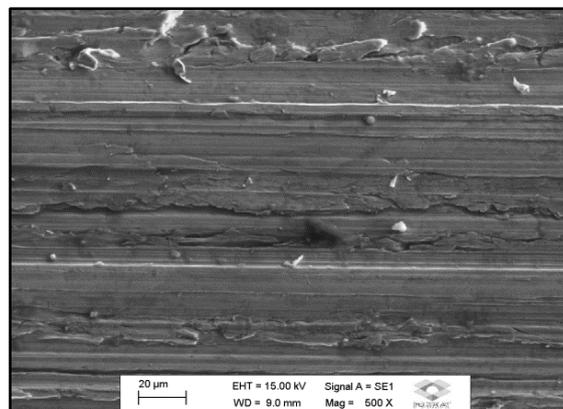


Figura 47 - Imagem da região de desgaste do pino para o par de corpos de prova pino genérico e anel normalizado: Repetição 5.
Fonte: Autoria própria.

A superfície desgastada do anel utilizado nestes ensaios e mostrada na Figura 47, originou o mais diferente dos resultados. O desgaste observado não ocorreu de maneira tão uniforme como nos outros casos, porém também apresenta zonas de saliências que indicam a ocorrência de adesão de material.

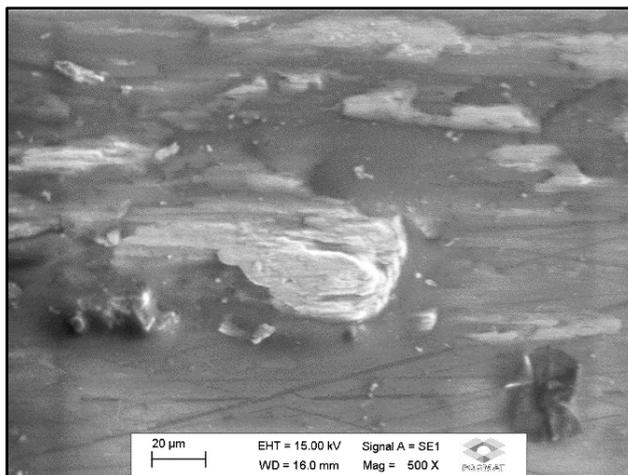


Figura 48 - Imagem da região de desgaste do anel do par de corpos de prova pino genérico e anel normalizado.

Fonte: Autoria própria.

Com esses resultados percebe-se que:

- Para as áreas de desgaste dos pinos, o melhor desempenho ficou para o par de corpos de prova formado por pino genérico e anel normalizado, com média final de 32,50 mm², seguido pelo par de corpos de prova pino e anel genéricos, com média final de 40,79 mm². O par de corpos de provas pino e anel normalizados obteve média de 58,49 mm² e o par formado por pino normalizado e anel genérico apresentou média de 64,53 mm²;
- Considerando as perdas de massa dos pinos, o melhor desempenho ficou para o par de corpos de prova formado por pino genérico e anel normalizado, com média final de 0,016 g, seguido pelo par pino e anel genéricos, com 0,026 g, enquanto que o par composto por pino e anel normalizados e pino normalizado e anel genérico apresentaram, respectivamente, médias de 0,034 g e 0,046 g;
- Para as temperaturas dos corpos de provas, o par formado por pino e anel genéricos apresentou a menor média final de 26,52 °C, seguido pelo par pino genérico e anel normalizado com média de 30,06 °C. Para os pares

formados por pino e anel normalizados e pino normalizado e anel genérico as médias finais foram, respectivamente, de 38,40 °C e 41,36 °C;

- Para as temperaturas do óleo, o par de corpos de prova formado por pino e anel genéricos apresentou a menor média final de 33,48 °C, seguido pelo par pino genérico e anel normalizado com média de 33,58 °C. O par pino e anel normalizados obteve média final de 38,11 °C enquanto o par pino normalizado e anel genérico obteve a maior média final de 47,44 °C;
- Considerando os parâmetros de rugosidade avaliados o par de corpos de prova composto por pino e anel normalizados e pino normalizado e anel genérico foram os que obtiveram, respectivamente, os menores valores médios: Ra 0,24 µm e Ra 0,23 µm; Rq 0,32 µm e Rq 0,31 µm; Rz 1,13 µm e Rz 1,15 µm. Para o par pino e anel genéricos e pino genérico e anel normalizado os valores médios obtidos foram, respectivamente, de: Ra 0,36 µm e Ra 0,31 µm; Rq 0,42 µm e Rq 0,39 µm; Rz 1,94 µm e Rz 1,56 µm. Portanto, os valores de rugosidade resultaram menores quando utilizou-se os pinos normalizados;

5 CONCLUSÕES

Através de um sistema de análise de decisão qualitativa por pesos, no qual o par de corpos de prova que apresenta melhor desempenho, ou seja, menor desgaste, é o que recebe a maior pontuação, apresenta-se a tabela 9.

Tabela 9 - Análise de decisão qualitativa por pesos.

	Pino e Anel genéricos	Pino e Anel normalizados	Pino genérico e Anel normalizado	Pino normalizado e Anel genérico
Perda de Massa	3	2	4	1
Área da Elipse	3	2	4	1
Temperatura do Fluido	4	2	3	1
Temperatura do Corpo de Prova	4	2	3	1
Parâmetros de Rugosidade	1	3	2	4
Total	15	11	16	8

Fonte: Autoria própria.

Após uma análise entre os corpos de prova percebeu-se que, de modo geral, os pares de corpos de prova contendo pino normalizado apresentaram rendimento inferior quando comparados aos pares de corpos de prova contendo pinos genéricos.

Quando comparados os resultados de áreas de desgaste (áreas das elipses), de perda de massa, de temperaturas dos corpos de provas e de temperaturas dos fluidos, é possível verificar que os resultados para os mesmos tipos de pinos ocorreram de formas semelhantes, mesmo quando o tipo de anel foi alterado.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

- Realizar ensaios tribológicos empregando o tribômetro *Reichert Test* utilizando outros fluidos lubrificantes de base vegetal, como por exemplo, óleo de tungue, óleo de moringa, etc.;
- Realizar ensaios tribológicos empregando o tribômetro *Reichert Test* utilizando outros tipos de materiais e/ou realizando apenas um único ensaio com cada par de corpos de prova, sem reutilizá-los;
- Realizar ensaios tribológicos empregando o tribômetro *Reichert Test* captando a vibração do equipamento.

REFERÊNCIAS

ALTERA, F. A. **Desgaste abrasivo de Níquel e de Liga Binária Níquel-Cobalto Eletro depositados em Substrato de Cobre.** Dissertação Apresentada a Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. REDEMAT. 2009.

ALVES, Fernando Ribeiro. **Desenvolvimento de um tribômetro, tipo cilindro sob disco, para ensaios tribológicos em formulações com óleos vegetais.** Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2014.

ANTUNES, Flávio de Oliveira. **Efeito da porosidade e dos tratamentos termoquímicos de nitretação e nitrocementação na resistência à corrosão de ferro puro sinterizado e tratado via plasma.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2017.

ASTM- **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus;** Designation: G 99 - 95a (Reapproved 2000). Disponível em <https://bungkusbakwan.files.wordpress.com/2015/02/g99.pdf>. Acessado em Janeiro 2016.

BAYER, R. G. **Wear analysis for engineers.** New York: HNB, 2002.

BHUSHAN, Bharat. **Introduction to tribology.** John Wiley & Sons: New York, 732 p., 2002.

BRISCOE, B. J; SINHA, S. K. **Polymer tribology.** Singapore. 2009.

CARDOSO, K. P.; SOUZA, J. F.; SOUZA, M. C.; KAWACHI, E. Y.; GOMES, J. O. **Caracterização do óleo de Pinhão-manso como base para fluidos lubrificantes.** II Congresso Brasileiro de Pesquisas de Pinhão-Manso. Brasília, 2011.

CARDOSO, K. P. **Óleo de Pinhão-manso e fluido de corte emulsionável: estabilidade oxidativa e propriedades lubrificantes.** Tese de mestrado - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil. 108f., 2012.

CARDOSO, K. P. **Óleo de Tungue Fluido de Corte Emulsionável: (Teste de Bancada)** Centro de Competência em Manufatura (CCM), Laboratório de Pesquisa Localizado no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) 2016

COZZA, Ronaldo Camara. **Estudo do Comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgastes micro-abrasivos.** Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DIN 50320 Desgaste - Termos - Análise de sistemas de processos de desgaste - Classificação do campo de desgaste. 1979.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C. e COPPINI, N. L., **Tecnologia da usinagem dos metais**, 3. Ed.; São Paulo - SP, Artliber, 2002.

FRANCESCHINI, Joel. **Avaliação do fenômeno de *Stick-Slip* em materiais de fricção com a utilização de um tribômetro**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

GOLFETTO, N. C. **Estudo e aplicação da amêndoa do Tungue (*Aleurites fordii*) na produção do biodiesel**, Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente. V. 2. P. 55-68. Nov-abr. 2011.

GONÇALVES, J. F. S. **Proposição de método de desenvolvimento de fluido de corte de base vegetal**. Tese de doutorado - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2013.

GONÇALVES, J. F. S.; SOUZA, M. C.; LUTIF, S. Y. S.; CARDOSO, K. P.; GOMES, J. de O.; MARQUES, Y. **COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO ÓLEO DE MORINGA EM ENSAIOS DE ATRITO POR DESLIZAMENTO**. In: V Encontro Nacional de Moringa oleifera, Maringá. 2014.

GOMES, J. de O.; MARQUES, Y. **Comportamento tribológico do óleo de moringa em ensaios de atrito por deslizamento**. In: V Encontro Nacional de Moringa oleifera, Maringá. 2014.

HELLER, J. Physic nut (*Jatropha curcas* L.). **Promiting the conservation and use of underutilized and neglected crops** 1. IBPGR 161. Roma, IBPGR, 1996. 66p.

ISO 3685. **Tool Life Testing with Single Point Turning**, ISO 1993.

JOST, H. P. **Tribology, Origin and Future**. Wear, v. 136, p. 9-27, 1989.

KATO, K.; ADACHI, K. **Wear Mechanisms, MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK**, Ed. CRC Press LLC Vol. 2 Cap. 22. 2001.

LEITE, M. V.; FIGUEROA, C. A.; BAUMVOL, I. J. R.; BASSO, R. L. O. MEI, P. R.; SINATORA, A. **Desgaste e Atrito da Camada Nitretada do Aço ABNT H 13 Nitretado por Plasma Pulsado**. Technol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 6, n. 2, p. 67-72, out.-dez. 2009.

LOVELL R. M et al. Influence of boric acid additive size on green lubricant performance. **Philosophical Transactions. Série A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences**, London, v. 368, n. 1929, p. 4851-4861, 2010.

LUTIF, S. Y. S SOUZA, M. C. GONÇALVES, J. F.; CARDOSO, K. P. GOMES, J. O., **Comportamento do Óleo de Moringa em Análises de Lubrificação Utilizando Tribômetro Reichert Test**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, Centro de Competência em Manufatura - CCM, / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Divisão de Engenharia Mecânica. Revista Tecnológica - Edição Especial 2014.

MATOS, P. R. R. **Utilização de óleos vegetais como bases lubrificantes**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Instituto de Química, Universidade de Brasília, 2011.

MORAES, Adriano. **Estudo Comparativo do Desgaste de Navalhas de Aço AISI S1 e SAE 4340 Durante o Corte da Sucata**. Porto Alegre, 2008. Dissertação. Programa de Pós graduação em Engenharia de Minas, Metalurgica e de Materiais, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.

NEIS, P. D. **Projeto e construção de um tribômetro para estudos relacionados a materiais de atrito veiculares**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

OLIVEIRA, Carlos Gonçalves; SILVA, Ivete P. P. **Os Estudos Tribológicos no Ensino de Engenharia Mecânica**. Revista de ensino de Engenharia, v. 34, n. 2, p. 3-10, 2015.

OLIVEIRA, Carlos, K. N. **Avaliação de camadas de Carboneto e Boretos produzidas nos aços AISI H13 e D2 por meio de tratamentos termo-reativos**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2006.

PEREIRA, A. A. **Análise do desgaste da ferramenta à base de β -Si₃N₄ na usinagem do ferro fundido cinzento FC 250 utilizando técnicas avançadas e de alta resolução**. 226 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2010.

PUTTEN, E. V., FRANKEN, Y. J., JONGH, J. de. **Manual de Jatropha** - Versión en Español. Sección 1: Datos generales de la Jatropha. FACT Foundation, p. 7-14, 2009.

RABINOWICZ, E. **Friction and Wear of Materials**. New York, John Wiley and Sons (DESGASTE) 1995.

RADI, P. A; SANTOS, L. V.; BONETTI, L. F.; TRAVA-AIROLDI, V. J; **Tribologia, Conceitos e Aplicações**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 2007.

RAO, D. N.; KRISHNA, P. V. Performance profiling of boric acid as lubricant in machining. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 3, p. 239-244, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/jbsmse/v30n3/a09v30n3.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2014.

REEVES, C. J. et al. Evaluating the tribological performance of green liquid lubricants and powder additives based green liquid lubricants. In: ANNUAL MEETING & EXHIBITION, 2012, St. Louis. **Proceedings of the STLE 2012...** Sta. Louis: [S.n.], 2012.

REGNEY, D. A. **Comments on the sliding wear of metals.** *Tribology International*, v. 30, p.361-367, 1997.

RIBEIRO, E. L. F.; MARANDUBA, H. L.; OLIVEIRA, L. B.; ALMEIRA NETO, J. A.; OLIVEIRA, F. B. S. **Relação Energética e Emissão de Gee do Biodiesel de Pinhão Manso: Análise sob uma perspectiva dinâmica.** *Revista Produção e Desenvolvimento*, v. 1, n. 2, p. 79-89, mai/ago, 2015.

SCHIRMANN, Guilherme. **Estudo de desgaste de ferro fundido nodular GGG 60, aço LNE 380 e aço LNE 250 através de ensaios de pino contra disco.** Monografia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

SERBINO, Edison Marcelo. **Um estudo dos mecanismos de desgaste em um disco de frio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar.** Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

SHABTAY, D.; KASPI, M. **Optimization of machining economics problem under the failure replacement strategy.** *International Journal of Production Economics*, v. 80, ed. 3, pp. 213-230, Dez. 2002.

SILVA, Genésio Lopes da. **Análise do desempenho do óleo de tungue para o desenvolvimento de um fluido de corte.** Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

SILVA, J. A. C. **Obtenção de um lubrificante biodegradável a partir de ésteres do biodiesel de mamona via catálise enzimática e estudos de estabilidade oxidativa e térmica.** 2012. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SILVA, Leonardo Chagas da. **Avaliação do desgaste triboquímico de agulhas dos bicos injetores em motores diesel operando com biodiesel.** 2015. 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

SINATORA, A. **Tribologia: um resgate histórico e o estado-da-arte.** 33 f. Erudição (Professor Titular) Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

SOUTO, U. B. **Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento via emissão acústica.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

SOUZA, M. C.; LUTIF, S. Y. S.; GONÇALVES, J. F. S.; CARDOSO, K. P.; GOMES, J. de O.; **O Potencial uso do óleo de amendoim, moringa e pinhão-manso para o setor metal mecânico.** In: V Encontro Nacional de Moringa oleífera, Maringá. 2015.

STACHOWIAK, Gwidon W.; BATCHELOR, Andrew W. **Engineering Tribology.** 3. ed. Butterworth-Heinemann: Boston, 832 p., 2005.

STOETERAU, R. L. **Análise da Influência do Material sobre o Desgaste da Ferramenta de Usinagem**, 2007.

SUSKI, C. A. **Estudo do efeito de tratamentos e revestimentos superficiais na vida de ferramentas de conformação mecânica à frio**. Dissertação Submetida à Universidade Federal de Santa Catarina Para a Obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais. Florianópolis, 2004.

WILLIAMS, J. **Engineering tribology**. 1 Ed. New York: Cambridge University Press, 2005.

APÊNDICE A

1) Imagens das áreas das elipses dos pinos

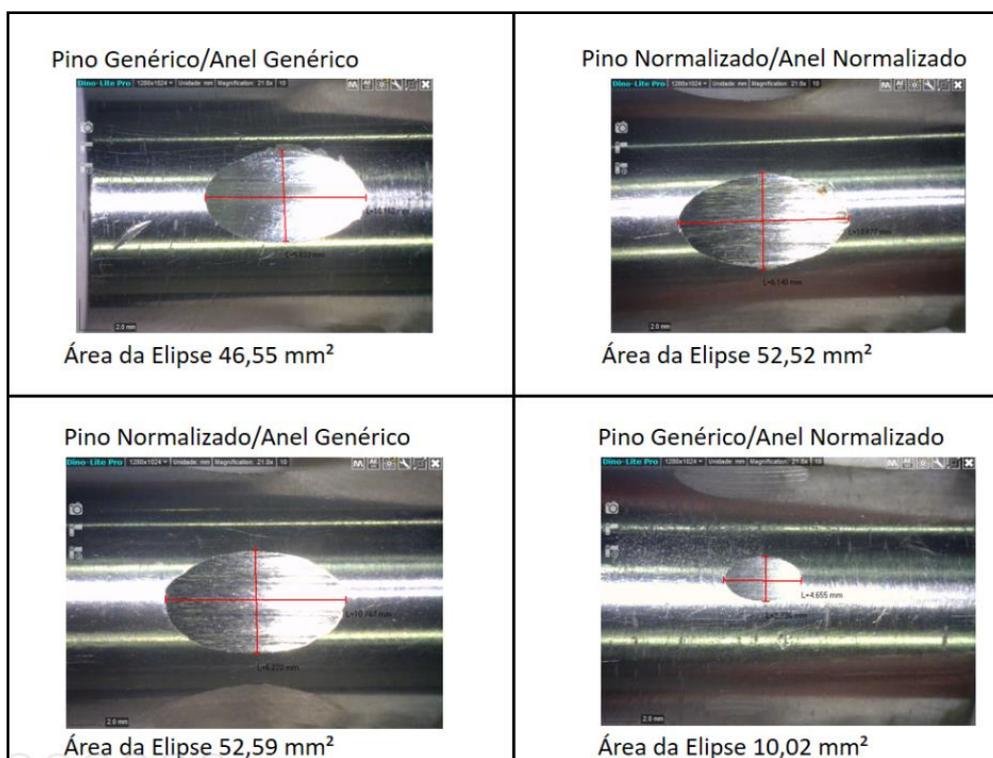


Figura A1 - Imagens dos pinos desgastados – Repetição 1.
 Fonte: Autoria própria.

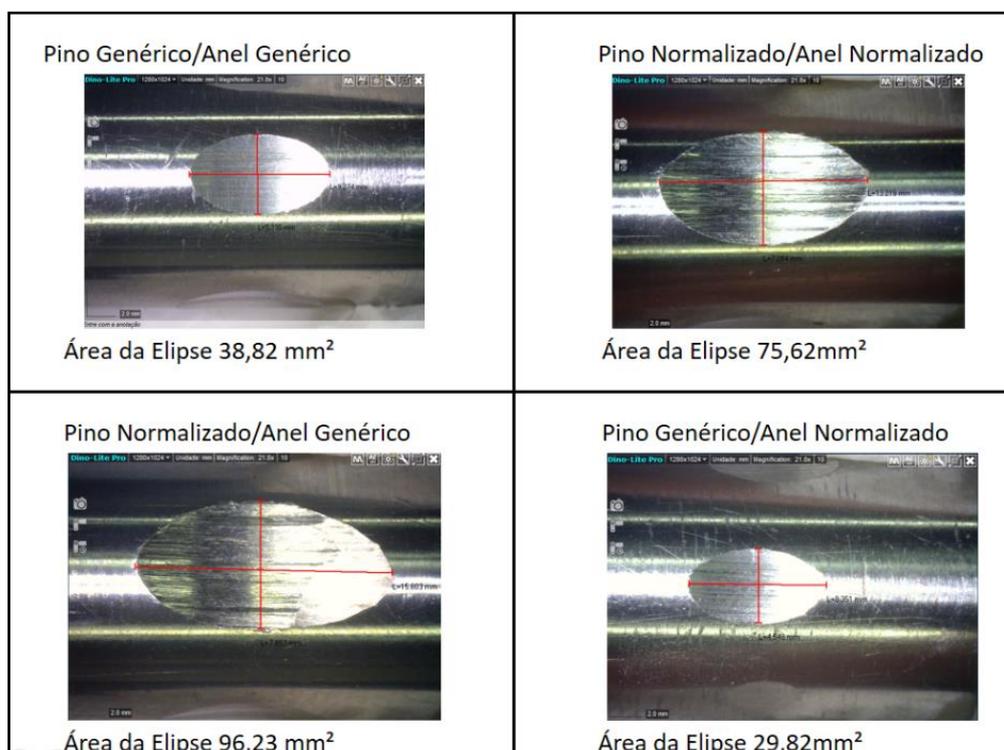


Figura A2 - Imagens dos pinos desgastados - Repetição 2.
 Fonte: Autoria própria.

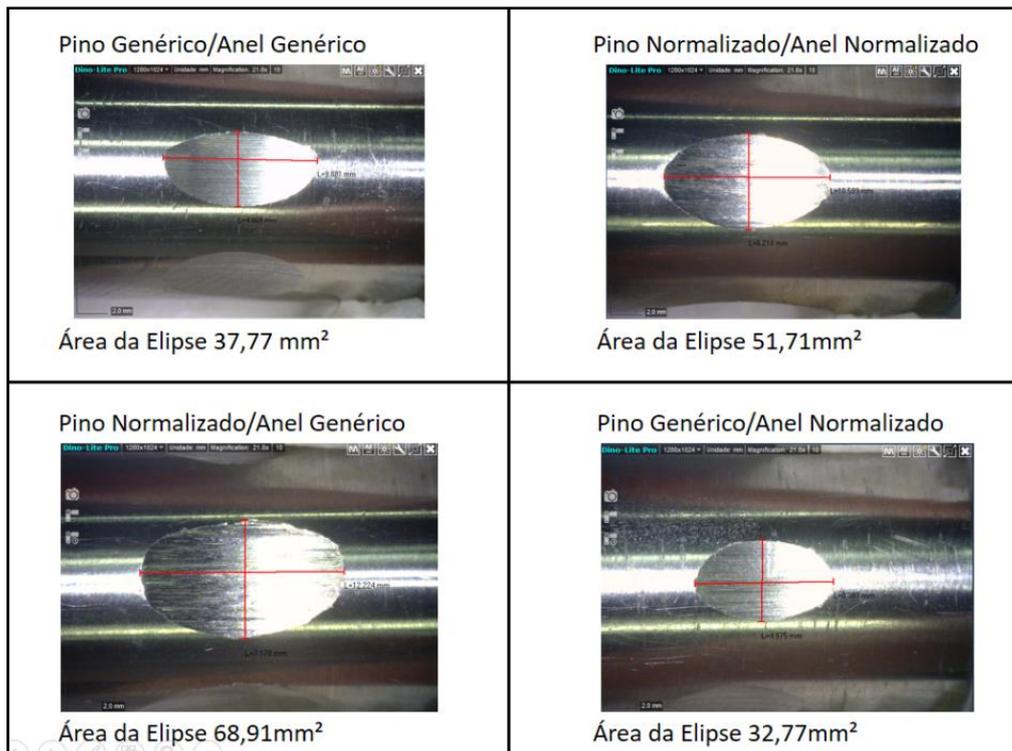


Figura A3 - Imagens dos pinos desgastados - Repetição 3.
Fonte: Autoria própria.

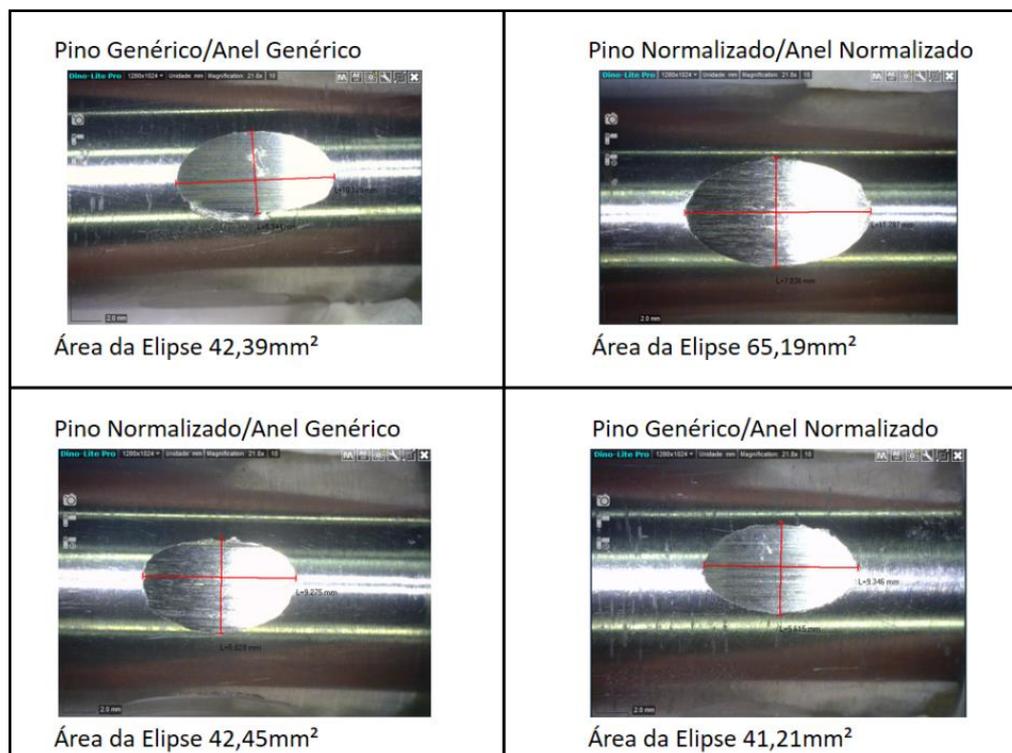


Figura A4 - Imagens dos pinos desgastados - Repetição 4.
Fonte: Autoria própria.

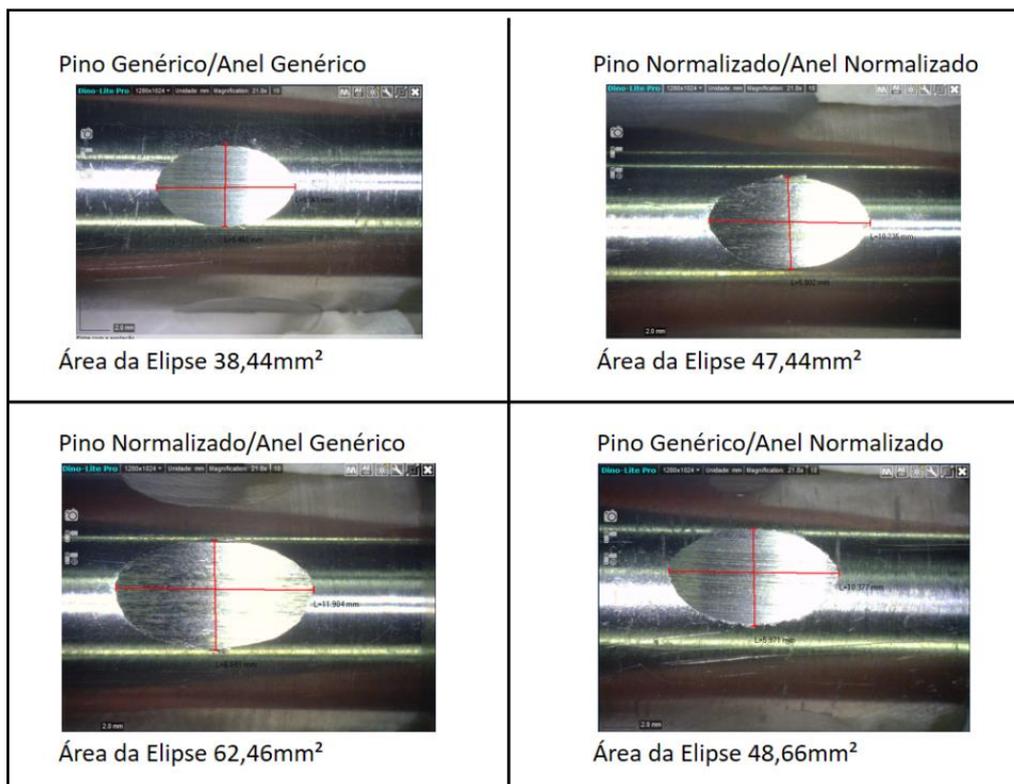


Figura A5 - Imagens dos pinos desgastados - Repetição 5.
Fonte: Autoria própria.

Certificado de análise química
SPECTROMAXx 133893

Nome do resultado	Tipo	Data Hora analisado	Data Hora do recálculo	Origem					
ANALISE MESTRADO	Descor.	30/11/2017 16:15	30/11/2017 16:15	Analisado					
Método	Operador	Verifique Tipo	Verificar Estado	Nome Verificação Liga					
Fe-20-F	SPECTRO SUL AMERICANA	Lim. ext. Liga	Ok	SUCATA DE AÇO					
Liga similar	Tipo Correção	Tipo	Estado						
0	Sem	Sem	Não Utiliz.						
Descrição	Cliente	Liga/Material	No. da Corrida	Codigo Peça	Forno				
ANALISE MESTRADO		SUCATA DE AÇO							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	Conc	Conc	Conc	Conc	Conc	Conc	Conc	Conc	Conc
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Média	0,21	0,20	0,79	0,024	0,009	0,02	<0,00	0,03	0,027
Lim Max. externo	0,50	0,40	1,00	--	0,080	0,10	--	--	0,200
	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Mg
	Conc	Conc	Conc	Conc	Conc	Conc	Conc	Conc	Conc
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Média	0,004	0,002	<0,001	<0,001	0,001	<0,010	<0,004	<0,001	<0,001
Lim Max. externo	--	0,200	--	--	--	--	--	0,100	--
	As	Zr	Bi	Sb	B	Zn	La	Fe	Ce
	Conc	Conc	Conc	Conc	Conc	Conc	Conc	Conc	Conc
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Média	0,002	<0,002	0,006	0,003	0,0004	<0,002	<0,001	98,65	<0,003000
Lim Max. externo	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Figura A6 - Resultado da análise no espectrofotômetro.
Fonte: Autoria própria.