

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

MARCOS SCHÜTZENBERGER TORRES

**AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA INFLUÊNCIA DA LUBRIFICAÇÃO COM ÓLEOS
COMBUSTÍVEIS NA TAXA DE DESGASTE DO AÇO AISI/SAE 52100**

CURITIBA

2016

MARCOS SCHÜTZENBERGER TORRES

**AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA INFLUÊNCIA DA LUBRIFICAÇÃO COM ÓLEOS
COMBUSTÍVEIS NA TAXA DE DESGASTE DO AÇO AISI/SAE 52100**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Diego Torres

CURITIBA

2016

**Página reservada para ficha catalográfica que deve ser confeccionada após
apresentação e alterações sugeridas pela banca examinadora.**

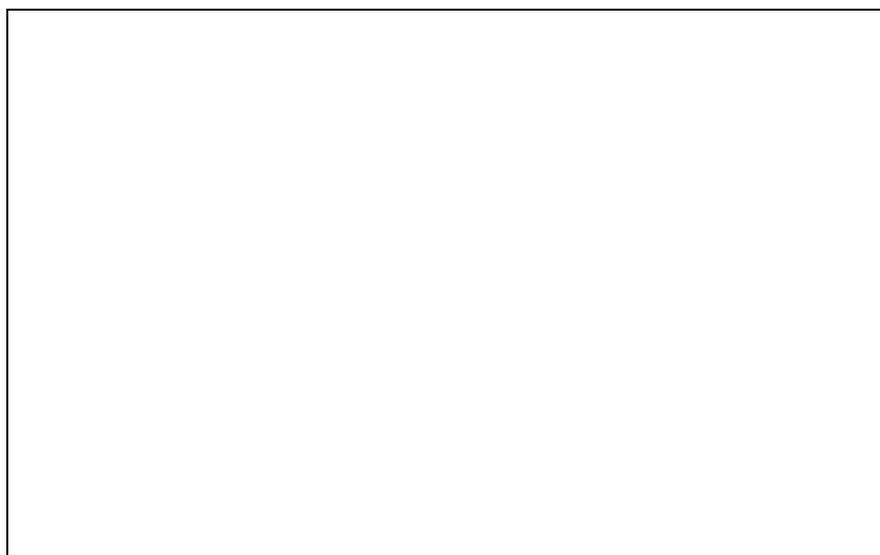
Deve ser impressa no verso da folha de rosto.

A Biblioteca da PUCPR oferece o serviço gratuitamente.

Para solicitar, necessário enviar o trabalho para o email

biblioteca.processamento@pucpr.br

Em até 48h a ficha será encaminhada para o email do solicitante.



MARCOS SCHÜTZENBERGER TORRES

**AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA INFLUÊNCIA DA LUBRIFICAÇÃO COM ÓLEOS
COMBUSTÍVEIS NA TAXA DE DESGASTE DO AÇO AISI/SAE 52100**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Diego Torres
PUC PR

Professor 2 (Titulação e nome completo)
Instituição 2

Professor 3 (Titulação e nome completo)
Instituição 3

Curitiba, ____ de _____ de 2016.

A minha família,
esposa e filhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Carlos Augusto Henning Laurindo pelo auxílio na execução dos ensaios de laboratório e comentários que contribuíram para a conclusão deste trabalho, além de ter participado da banca.

Agradeço ao Prof. Júlio César Giubilei Milan por ter participado da banca, por seus comentários e observações.

Agradeço à Prof^a. Michelle Sostag Meruvia por ter participado da banca, por seus comentários e observações.

Agradeço ao Prof. Jose Eloir Krupechacke pelo auxílio em assuntos que envolveram estatística, além de sua participação na banca.

Meu agradecimento especial ao Prof. Ricardo Diego Torres, pelo auxílio na elaboração do trabalho, dirimindo dúvidas e orientando no desenvolvimento do trabalho de mestrado e, principalmente, por possibilitar a obtenção da bolsa de estudos na PUCPR.

RESUMO

O biodiesel é um biocombustível cuja importância na matriz energética brasileira vem aumentando, pois pode substituir total ou parcialmente o óleo derivado de petróleo em motores de combustão, apresentando algumas vantagens, como a redução da poluição ambiental, além de diminuir a dependência brasileira da exploração de reservas de petróleo. Entre as características desejáveis de um óleo combustível está a capacidade de lubrificação dos sistemas de injeção acoplados aos motores de combustão. A proposta deste trabalho é comparar o desempenho do biodiesel com o óleo Diesel quanto à taxa de desgaste específica gerada em amostras metálicas em função de duas variáveis independentes: a carga suportada e a velocidade de deslizamento das peças envolvidas. Para tanto, foram conduzidos ensaios na configuração conhecida como pino no disco, utilizando-se cargas de 5 N, 10 N e 20 N, e velocidades de deslizamento de 5 cm/s, 10 cm/s e 20 cm/s. Posteriormente, foi feita uma análise estatística, por meio de análise de regressão, dos valores obtidos para a taxa de desgaste e uma avaliação visual das pistas de desgaste para identificação dos mecanismos de desgaste envolvidos. Foi observado que o desempenho do biodiesel e do óleo Diesel foi semelhante quanto à redução do desgaste; além disso, notou-se que a variável carga apresenta uma influência significativamente maior que a velocidade de deslizamento na taxa de desgaste em deslizamento lubrificado.

Palavras-chave: Biodiesel. Taxa de desgaste. Análise de regressão

ABSTRACT

Biodiesel is a biofuel whose importance in the Brazilian energy matrix is increasing, as it replaces full or partially the Diesel oil in combustion engines with some benefits, such as the reduction of environmental pollution and the decreasing of Brazilian dependency of oil reserves exploration. Among the desirable features of fuel oil is the lubrication of injection systems connected to combustion engines. The aim of this study is to compare the performance of biodiesel and diesel oil regarding wear rate in metallic samples considering two independent variables: the supported load and the sliding speed involved. To this end, tests were conducted in the configuration known as pin on disk, using loads of 5 N, 10 N and 20 N and sliding speed of 5 cm/s, 10 cm/s and 20 cm/s. Afterwards, a statistical analysis was performed with the obtained values for wear rate; besides, and a visual analysis of wear tracks was conducted in order to identify wear mechanisms involved. It was observed that biodiesel and diesel presented similar results regarding reduction wear; in addition, it was noted that the variable load presents an influence significantly greater than the sliding speed on wear rate in lubricated sliding.

Key-words: Biodiesel. Wear rate. Regression analysis.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	PROBLEMATIZAÇÃO.....	13
1.2	OBJETIVOS.....	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
1.3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	ÓLEOS COMBUSTÍVEIS.....	15
2.1.1	Óleo Diesel	15
2.1.2	Biodiesel	16
2.1.3	Propriedades dos óleos lubrificantes	18
2.2	REGIME DE LUBRIFICAÇÃO.....	19
2.2.1	Lubrificação de filme espesso	21
2.2.2	Lubrificação de filme fino	21
2.2.3	Lubrificação limítrofe	22
2.3	MECANISMOS DE DESGASTE.....	22
2.3.1	Avaliação do desgaste	23
2.3.2	Desgaste adesivo	23
2.3.3	Desgaste abrasivo	26
2.3.4	Fadiga de Contato	28
2.3.5	Desgaste Corrosivo	29
2.4	FERRAMENTA ESTATÍSTICA.....	30
2.4.1	Regressão Linear	30
2.4.2	Resíduos e a propriedade de mínimos quadrados	32
2.4.3	Adequabilidade da reta de regressão	32
2.4.4	Regressão Múltipla	34
2.4.5	ANOVA – Modelo de classificação dupla	38
2.4.6	Resumo da abordagem estatística	40
3	ANÁLISE DE ARTIGOS DE TESTES REALIZADOS SOBRE DESGASTE E LUBRIFICAÇÃO	42
3.1	ARTIGOS.....	42

3.1.1	Atrito e desgaste de vários tipos de ferro fundidos sob condições de deslizamento severas (friction and wear on several kinds of cast irons under severe sliding conditions).....	42
3.1.2	Competição de mecanismos no desgaste e mapa de desgaste para aços (the competing wear mechanism and wear maps for steel).	42
3.1.3	Influência da carga aplicada, velocidade de deslizamento e transformação martensítica no desgaste por deslizamento a seco de aços inoxidáveis (the influence of applied load, sliding velocity and martensitic transformation on the unlubricated sliding wear of austenitic stainless steels)...	43
3.1.4	Desenvolvimento de mapa simples de desgaste da temperatura versus velocidade de deslizamento para comportamento do desgaste por deslizamento de interfaces metálicas distintas (development of a simple temperature versus sliding speed wear map for sliding wear behaviour of dissimilar metallic interfaces).	43
3.1.5	Influência do regime de lubrificação no comportamento de desgaste por deslizamento em liga de aço (influence of lubrication regime on the sliding wear behaviour of an alloy steel).	44
3.1.6	Efeito da temperatura no desgaste por deslizamento em aço ferramenta (the effect of temperature on sliding wear of steel-tool steel pairs).....	44
3.1.7	Comportamento tribo-metalográfico de aço com alto teor de carbono em deslizamento a seco (tribo-metallographic behavior of high carbon steels in dry sliding).....	45
3.1.8	Desgaste por deslizamento a seco de a liga Ti-6AL-4V influenciado pelo contracorpo e condições de deslizamento (dry sliding wear of Ti-6Al-4V alloy as influenced by the counterface and sliding conditions).	45
3.1.9	Investigação das características do atrito e do desgaste do biodiesel de palma (Investigation of friction and wear characteristics of palm biodiesel)	46
3.2	CONCLUSÃO DA ANÁLISE DOS ARTIGOS	46
4	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	48
4.1	MATERIAIS.....	49
4.1.1	Corpos de prova.....	49
4.1.2	Óleos	50
4.1.3	Contra-corpo	50

4.1.4	Equipamentos	50
4.2	METODOLOGIA	52
4.2.1	Preparação dos corpos de prova	53
4.2.2	Teste dos corpos de prova	53
4.2.2.1	Teste a seco	53
4.2.2.2	Teste com lubrificante	54
4.2.3	Medição da taxa de desgaste específica e coeficiente de atrito	55
4.2.4	Coleta de dados	55
5	RESULTADOS	57
5.1	CONDIÇÃO: A SECO	57
5.1.1	Dados coletados	57
5.1.2	Plano de regressão	57
5.1.3	Coeficiente de regressão	58
5.1.4	Teste F	59
5.1.5	Avaliação de resíduos	60
5.1.6	ANOVA – Modelo de classificação dupla	61
5.1.7	Coeficiente de atrito	62
5.2	CONDIÇÃO: LUBRIFICAÇÃO COM BIODIESEL (B100)	62
5.2.1	Dados coletados	62
5.2.2	Plano de Regressão	62
5.2.3	Coeficiente de Regressão	63
5.2.4	Teste F	63
5.2.5	Avaliação de resíduos	64
5.2.6	ANOVA – Modelo de classificação dupla	65
5.2.7	Coeficiente de atrito	66
5.3	CONDIÇÃO: LUBRIFICAÇÃO COM DIESEL COMUM	66
5.3.1	Dados coletados	66
5.3.2	Plano de regressão	67
5.3.3	Coeficiente de Regressão	67
5.3.4	Teste F	68
5.3.5	Avaliação dos resíduos	68
5.3.6	ANOVA – Modelo de classificação dupla	69
5.3.7	Coeficiente de atrito	70
5.4	COMPARAÇÃO ENTRE TAXAS DE DESGASTE ESPECÍFICAS	71

5.4.1	Efeito da variação da carga	71
5.4.2	Efeito da variação da velocidade por carregamento	74
5.4.3	Efeito da variação da velocidade por situação de lubrificação.	77
5.5	TRILHAS DE DESGASTE.....	78
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	80
6.1	TAXA DE DESGASTE ESPECÍFICA	80
6.2	COEFICIENTE DE ATRITO	82
6.3	TRILHAS DE DESGASTE.....	83
6.3.1	Deslizamento a seco	83
6.3.2	Deslizamento lubrificado com biodiesel (B100) e Diesel comum:.....	85
7.	CONCLUSÃO	88
	REFERÊNCIAS	90
	APÊNDICE A – TAXA DE DESGASTE.....	93
A.1	Valores medidos para a taxa de desgaste:	93
A.2	Valores para geração do plano de regressão:.....	96
	APÊNDICE B – COEFICIENTE DE ATRITO	99
	APÊNDICE C – TRILHAS DE DESGASTE	105
C.1	Trilhas de desgaste com lubrificação de B100.....	105
C.2	Trilhas de desgaste com lubrificação de óleo Diesel	107
C.3	Trilhas de desgaste sem lubrificação	109

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

Fontes renováveis de energia têm sido consideradas como importantes alternativas aos combustíveis que tem como origem o petróleo. Há várias razões para tanto, entre as quais estão as seguintes: elevado custo de extração das novas bacias de óleo, como o Pré Sal, o fato de que parte significativa das reservas mundiais está em regiões de conflito, como o Oriente Médio, além da óbvia preocupação com o fim das reservas petrolíferas.

Entre as fontes renováveis, encontra-se o biodiesel, produzido a partir de fontes vegetais (soja, mamona, dendê, girassol, entre outros) ou gorduras animais (sebo bovino ou gordura bovina). Esta importância do biodiesel justifica estudos sobre seu comportamento, principalmente quando é possível comparar seu desempenho com o de óleos derivados do petróleo.

Uma das características dos óleos combustíveis é a lubricidade, importante para o adequado funcionamento dos sistemas de injeção, especialmente na antiga bomba injetora ou na bomba de alta pressão do atual sistema *common rail*, pois o próprio óleo combustível é utilizado para lubrificar partes internas destes mecanismos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é a avaliação estatística da influência da lubrificação na qualidade da previsão da taxa de desgaste por regressão, a qual foi desenvolvida a partir da comparação dos coeficientes de regressão múltipla obtidos através de medições em três situações: uma a seco e duas com lubrificação (uma com óleo Diesel e outra com óleo biodiesel).

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) medir taxas de desgaste nas condições apresentadas acima;
- b) obter as equações dos planos que envolvem as variáveis dependente e independentes;
- c) avaliar as trilhas de desgaste dos corpos de prova quanto aos mecanismos de desgaste.

1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

No presente trabalho, foi feita uma comparação entre a capacidade de lubrificação do biodiesel com a do óleo Diesel e também com deslizamento a seco, utilizando a configuração pino no disco. Tal capacidade de lubrificação foi avaliada observando-se as trilhas de desgaste, além da medição da taxa de desgaste específica em diferentes condições de velocidade de deslizamento e carga.

Considera-se que uma abordagem estatística facilita e enriquece o entendimento dos dados obtidos, uma vez que possibilita avaliação de como uma variável dependente (taxa de desgaste específica) se comporta em função de variáveis controláveis (carga e velocidade), além de permitir que previsões sejam feitas quanto a valores da variável dependente.

Tais previsões podem ser feitas utilizando-se o ajuste de curva, que envolve análise de regressão, a qual pode ser entendida como uma análise estatística que busca avaliar se há uma relação funcional entre a variável dependente com uma ou mais variáveis independentes, além de determinar uma curva que melhor se encaixe nos pontos conhecidos que relacionam as grandezas estudadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados conceitos relacionados aos óleos combustíveis, aos regimes de lubrificação, aos mecanismos de desgaste e à estatística envolvida no estudo dos modelos de regressão.

2.1 ÓLEOS COMBUSTÍVEIS

2.1.1 Óleo Diesel

O óleo Diesel é utilizado em motores de combustão interna e ignição por compressão (motores do ciclo Diesel), empregados nas mais diversas aplicações, como, por exemplo: automóveis, furgões, ônibus, caminhões.

Trata-se de um produto derivado do processo de destilação fracionada do petróleo, e é um combustível moderadamente volátil e de composição complexa. É constituído basicamente por hidrocarbonetos parafínicos, olefínicos e aromáticos e, em menor quantidade, por substâncias cuja fórmula química contém átomos de enxofre, nitrogênio, metais, oxigênio, entre outros. Estes hidrocarbonetos são formados por moléculas constituídas normalmente de 8 a 40 átomos de carbono (SOUZA, 2008).

O teor de enxofre é limitado para minimizar os efeitos de poluição atmosférica, pois, ao reagir com o oxigênio durante a combustão, resulta em dióxido de enxofre, um dos maiores poluentes do ar. Tal limitação é definida pela Agência Nacional do Petróleo, que é uma autarquia vinculada ao Ministério de Minas e Energia e tem como finalidade promover a regulação, a contratação e fiscalização de atividades do mercado de petróleo.

Conforme determina a Resolução nº 50 da ANP, a comercialização de óleo Diesel produzido por processos diversos do refino de petróleo e processamento de gás natural, ou a partir de matéria-prima distinta do petróleo, depende de autorização prévia da própria ANP. Esta mesma Resolução estabelece que os óleos Diesel de uso rodoviário se classificam em:

I - Óleo Diesel A: combustível produzido nas refinarias, nas centrais de matérias-primas petroquímicas e nos formuladores, ou autorizado nos termos do §1º do Art. 1º, destinado a veículos dotados de motores do ciclo Diesel, de uso rodoviário, sem adição de biodiesel;

II - Óleo diesel B: óleo Diesel A adicionado de biodiesel no teor estabelecido pela legislação vigente.

A resolução ainda acrescenta que os óleos Diesel A e B deverão apresentar as seguintes nomenclaturas, conforme o teor máximo de enxofre:

I - Óleo Diesel A S10 e B S10: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 10 mg/kg;

II - Óleo Diesel A S500 e B S500: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 500 mg/kg.

2.1.2 Biodiesel

Conforme Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005, a definição de biodiesel é a seguinte: biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil.

O biocombustível substitui total ou parcialmente o óleo Diesel de petróleo, em motores de caminhões e tratores, entre outros. Ou seja, pode ser usado puro ou misturado com o óleo Diesel derivado do petróleo em várias proporções. Uma mistura que contenha 5% de biodiesel é chamada de B5, por exemplo. Tal possibilidade de substituição é útil para países europeus, como Suécia, Alemanha e Inglaterra, para se adequarem às novas legislações sobre propriedades de combustíveis que exigem limite máximo de 50 ppm de enxofre nos combustíveis (SUKJIT e DEARN, 2011).

A qualidade dos combustíveis é consideravelmente afetada pelo nível de lubrificidade. Os componentes do combustível que aumentam a lubrificidade são hidrocarbonetos e compostos de enxofre. Estes aditivos podem afetar de forma adversa os materiais usados na construção do sistema de lubrificação. Descobriu-se que o enxofre tem uma tendência a causar corrosão. Além disso, combustão de combustível que tenha produtos contendo SO_2 e SO_3 forma ácidos no ambiente aquoso que causam corrosão nos elementos do sistema de exaustão e poluem o meio ambiente (chuva ácida). Entretanto, uma redução na concentração de enxofre em produtos derivados de petróleo, devido a considerações ecológicas, resulta em

uma redução nas propriedades de lubrificação dos óleos combustíveis (SULEK *et al*, 2010).

A introdução de combustíveis Diesel com baixa concentração de enxofre tem causado alguns sérios problemas nas propriedades dos combustíveis devido ao processo de redução do enxofre, o qual elimina não apenas quantidades de enxofre no combustível, mas também de compostos que tem influência na lubricidade do combustível. Tal redução na lubricidade pode ter efeito nocivo no equipamento de injeção de combustível (SUKJIT e DEARN, 2011).

Em anos recentes, biodiesel derivado de óleos vegetais e de gorduras animais tem sido usado com sucesso no aumento da lubricidade dos óleos Diesel (SUKJIT e DEARN, 2011).

A crescente necessidade por energia e por combustíveis amigos do meio ambiente tem chamado a atenção da comunidade científica nos últimos anos. Como resultado, uma quantidade considerável de pesquisa relacionada com a produção de biodiesel de diversas fontes renováveis pode ser encontrada na literatura como uma alternativa para o cada vez mais escasso e poluente petrodiesel derivado dos fósseis. Outra vantagem importante do biodiesel é a sua inerente propriedade de lubrificação, tornando-o um poderoso aditivo lubrificante para o Diesel com ultra baixa concentração de enxofre (ALMEIDA *et al*, 2013).

De acordo com a ANP, desde 1º de novembro de 2014 o óleo Diesel comercializado no Brasil contém 7% de biodiesel. É interessante mencionar que em 2008 era de apenas 2%; já em 2010 passou para 5%. Ainda de acordo com a ANP, o Brasil está entre os maiores produtores e consumidores de biodiesel do mundo, registrando em 2013 uma produção de 2,9 bilhões de litros, para uma capacidade instalada de 7,9 bilhões de litros.

Recentemente, de acordo com informação divulgada pela Associação dos Produtores de Biodiesel do Brasil, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) autorizou a comercialização e uso de biodiesel em quantidade superior ao percentual de adição obrigatória (atualmente em 7%). Entretanto, tal permissão não vale para a rede varejista de combustíveis, sendo destinada a somente grupos determinados de consumidores.

Com base nas informações mencionadas nos parágrafos anteriores, nota-se a crescente importância do biodiesel na matriz energética nacional.

2.1.3 Propriedades dos óleos lubrificantes

A Portaria ANP nº129, de 1999, lista como características principais dos óleos lubrificantes as descritas a seguir: aparência, cor, viscosidade, índice de viscosidade, ponto de fulgor, ponto de fluidez, índice de acidez total, cinzas, resíduo de carbono *Ramsbottom*, corrosividade ao cobre, estabilidade à oxidação, emulsão e perda por evaporação.

De especial interesse é a viscosidade, discutida em mais detalhes a seguir.

A viscosidade de um fluido é a propriedade que determina o valor de sua resistência ao cisalhamento devido à interação entre as moléculas do fluido (CARRETEIRO E BELMIRO, 2006).

O manual Fundamentos da Lubrificação, da empresa Mobil Oil do Brasil (1979) completa mencionando que a viscosidade está relacionada ao grau de atrito interno ou à resistência que um líquido oferece ao fluir. A viscosidade absoluta tem sido definida como o acréscimo de força necessária para deslocar uma superfície plana de um centímetro quadrado sobre outra, com a mesma configuração, à razão de um centímetro por segundo, estando os referidos planos separados entre si por uma camada de líquido de um centímetro de espessura.

O estudo da viscosidade envolve algumas definições que, de acordo com Carreteiro e Belmiro (2006), podem ser assim descritas:

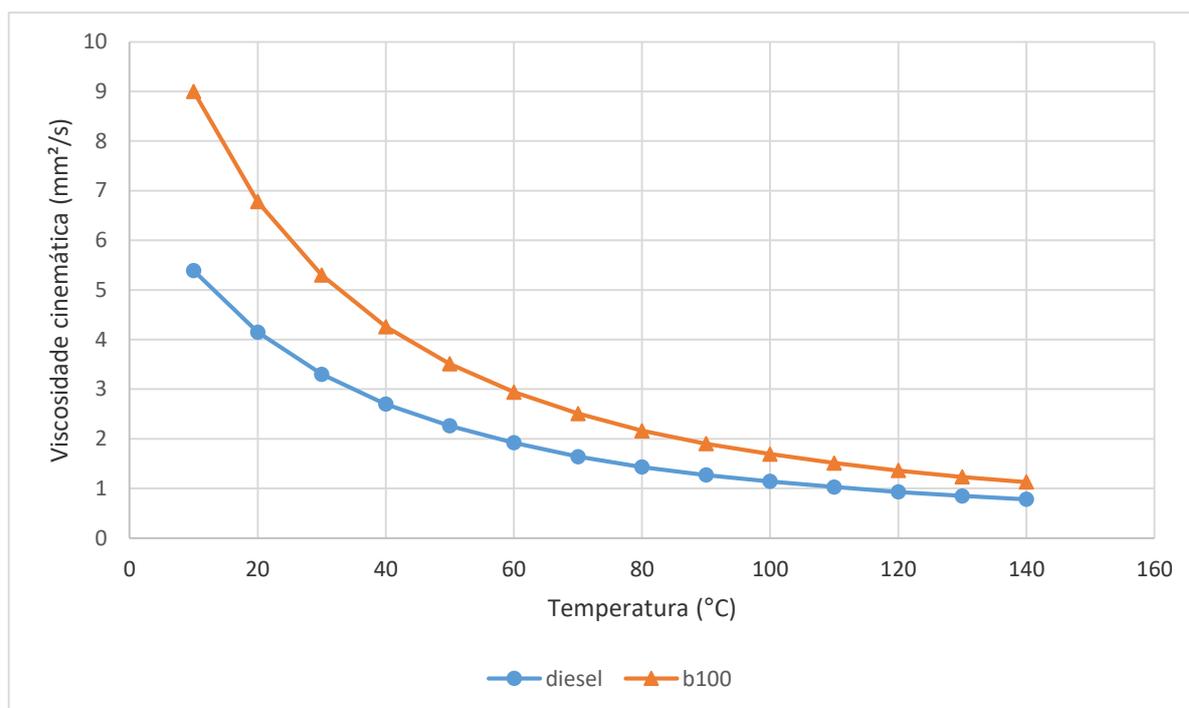
a) viscosidade absoluta (dinâmica) de um líquido newtoniano: é a força tangencial sobre uma área unitária de um de dois planos paralelos separados de uma distância unitária quando o espaço é preenchido com o líquido e um dos planos move-se em relação a outro com velocidade unitária em relação a outro com velocidade unitária no seu próprio plano. Líquido newtoniano é aquele no qual o grau de cisalhamento é proporcional à tensão de cisalhamento;

b) viscosidade cinemática de um líquido newtoniano: é o quociente da viscosidade dinâmica ou absoluta dividida pela densidade, ambos à mesma temperatura.

Para Roelands (1966), pode-se considerar que para os fluidos newtonianos a viscosidade é função apenas da temperatura e da pressão e que a maioria dos fluidos usados atualmente como lubrificantes pode ser considerada como newtoniana sob condições normalmente encontradas nos elementos de máquina.

O gráfico da Figura 2.1 apresenta como a viscosidade cinemática dos óleos Diesel e puro biodiesel comercial varia com a temperatura, com base nos dados levantado por (ESTEBAN *et al*, 2012). Nota-se que a viscosidade cinemática do óleo Diesel, na faixa de temperatura de 10°C a 140°C, apresenta sempre valores inferiores à viscosidade do biodiesel B100, embora com o aumento da temperatura, os valores de tais viscosidades se aproximem.

Figura 2.1 – Viscosidade cinemática



Fonte: Esteban *et al* (2016)

2.2 REGIME DE LUBRIFICAÇÃO

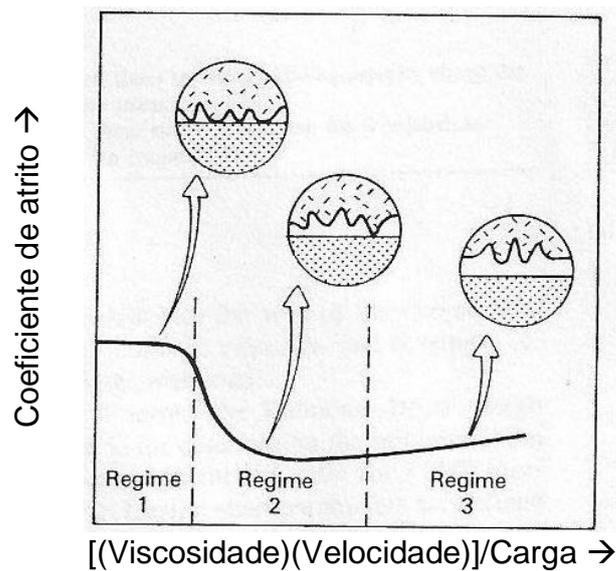
Para facilitar o deslizamento de uma superfície em relação a outra, aplica-se um lubrificante entre as superfícies de forma a separar suas asperezas, mesmo que não em sua totalidade.

A maneira como o lubrificante afeta o contato entre as partes deslizantes recebe o nome de regime de lubrificação. Há três regimes de interesse especial: lubrificação de filme espesso, lubrificação limítrofe e lubrificação mista, que é um meio termo entre os dois primeiros tipos. Lubrificação entre duas superfícies deslizantes pode se alterar de um destes três regimes para outro, dependendo da

carga, velocidade, viscosidade do lubrificante, geometria de contato e rugosidade da superfície de ambas as superfícies (ASM HANDBOOK, 1998).

Os limites destes três regimes tendem a se mover para a direita se as superfícies de contato se tornarem mais rugosas e, para a esquerda, se as superfícies se tornarem menos rugosas, conforme gráfico de Stribeck, apresentado na Figura 2.2 (ASM HANDBOOK, 1998).

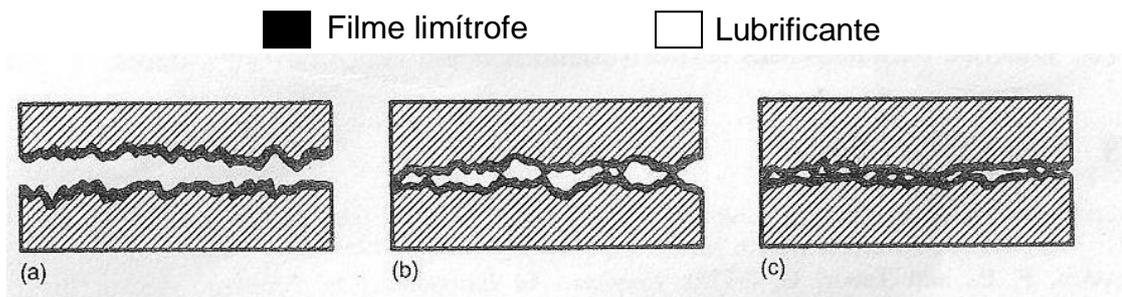
Figura 2.2 – Coeficiente de Atrito em função de $[(\text{viscosidade})(\text{velocidade})]/\text{carga}$



Fonte: ASM HANDBOOK, 1998.

A Figura 2.3 ilustra as condições de filme existentes em lubrificações de filme de fluido e limítrofe.

Figura 2.3 – Condição do Filme de Lubrificação nos Regimes de Lubrificação



(a) Lubrificação de filme espesso (b) Lubrificação parcial ou mista (c) Lubrificação limítrofe

Fonte: Hamrock; Schmid; Jacobson, 2004

2.2.1 Lubrificação de filme espesso

Ocorre quando há a separação total dos pontos de aspereza por um filme de lubrificante cuja espessura é muitas vezes maior que o tamanho das moléculas do lubrificante. Este modo também é conhecido como lubrificação hidrodinâmica. A eficácia de tal lubrificação depende diretamente da velocidade relativa e da viscosidade do lubrificante (ASM HANDBOOK, 1998).

Quando o fluido lubrificante está presente entre duas superfícies deslizantes, um filme espesso pressurizado pode ser gerado pelas velocidades das superfícies para redução do atrito e desgaste (ASM HANDBOOK, 1998).

A carga aplicada é suportada pela pressão positiva gerada dentro do fluido, resultante da convergência de uma superfície em relação a outra; a atrito de resistência ao movimento surge do cisalhamento do fluido viscoso (HAMROCK; SCHMID; JACOBSON, 2004).

A espessura do filme de lubrificação aumenta com o aumento do valor das velocidades das superfícies, da viscosidade do lubrificante, e diminui com o aumento do valor da carga (ASM HANDBOOK, 1998).

A temperatura afeta de forma significativa a lubrificação hidrodinâmica pela redução da viscosidade do lubrificante e da espessura do filme. Por esta razão, lubrificantes com alta estabilidade térmica, que implica em baixa redução da viscosidade a altas temperaturas, são normalmente preferidos (ASM HANDBOOK, 1998).

2.2.2 Lubrificação de filme fino

Neste regime, a carga é suportada tanto pela pressão hidrodinâmica quanto pelos pontos de asperezas que estão em contato com a outra superfície. Nesta forma de lubrificação a deformação elástica das superfícies lubrificadas torna-se significativa. Características importantes na lubrificação hidrodinâmica também são importantes na lubrificação de filme fino, como espessura do filme convergente, movimento de deslizamento e fluido viscoso entre as superfícies (HAMROCK; SCHMID; JACOBSON, 2004).

2.2.3 Lubrificação limítrofe

De maneira distinta do que ocorre nos modos de lubrificação descritos anteriormente, nos quais as características do lubrificante (como viscosidade) desempenham um importante papel, na lubrificação limítrofe os efeitos hidrodinâmicos do lubrificante não são relevantes, uma vez que uma das características deste regime é o contato entre as asperezas das superfícies (HIRONAKA, 1984).

O mecanismo de contato de lubrificação é governado por propriedades físicas e químicas da superfície do filme de proporções moleculares. As propriedades do lubrificante são de menor importância, e o coeficiente de atrito é essencialmente independente da viscosidade do fluido. As características de atrito são determinadas pelas propriedades dos sólidos e do filme de lubrificante em interfaces comuns (HAMROCK; SCHMID; JACOBSON, 2004).

A lubrificação de fronteira ocorre em casos de velocidade muito baixa, baixa viscosidade e alta carga. Neste regime, o coeficiente de atrito é usualmente insensível à velocidade, viscosidade e carga. A carga é totalmente suportada pelos pontos de aspereza, ou seja, há considerável contato entre as superfícies envolvidas (HAMROCK; SCHMID; JACOBSON, 2004).

Para Hironaka (1984), os mecanismos de desgaste que podem ocorrer numa condição de lubrificação limítrofe são os seguintes: desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste por fadiga e desgaste químico.

2.3 MECANISMOS DE DESGASTE

Desgaste tem sido descrito na literatura técnica como sendo um fenômeno de remoção de material de uma superfície devido à interação com uma outra superfície de contato em movimento relativo. Como consequência, a durabilidade de máquinas e equipamentos é afetada devido ao desgaste, o que faz com que o controle de desgaste se torne importante para o projeto de novos equipamentos.

Para a norma DIN 50-320 (1979), desgaste é a progressiva perda de material da superfície de um corpo sólido causada pela ação mecânica, isto é, contato e movimento relativo contra um sólido, líquido ou gás como contra peça.

Há vários mecanismos de desgaste: adesivo, abrasivo, por fadiga e corrosivo. O mecanismo de desgaste dominante pode mudar de um para outro por razões que incluem mudanças nas propriedades da superfície do material e comportamento dinâmico da superfície causado pelo aquecimento resultante de atrito, formação de filme químico, e desgaste (BHUSHAN, 2001).

Wang *et al* (1999) explicam que a transição de um mecanismo de desgaste para outro reflete as mudanças dinâmicas de estrutura e propriedades de um dado material devido aos parâmetros de trabalho, como carga, velocidade, temperatura e tempo de operação.

Para Bhushan (2001), o desgaste muda drasticamente mesmo com relativamente pequenas alterações no sistema tribológico, o qual é composto por parâmetros dinâmicos, ambientais e de materiais.

2.3.1 Avaliação do desgaste.

Em geral, desgaste é avaliado pela quantidade de volume perdido e pelo estado da superfície de desgaste. Pode ser expresso pela taxa de desgaste, taxa específica de desgaste, ou coeficiente de desgaste. Taxa de desgaste é definida como volume desgastado por unidade de distância. Taxa de desgaste específica é definida como volume desgastado por unidade de distância e unidade de carga. Coeficiente de desgaste é definido como o produto da taxa de desgaste específico e a dureza do material (BHUSHAN, 2001).

2.3.2 Desgaste adesivo

Ligações, ou formação de solda fria, podem ocorrer nos picos das asperezas de superfícies carregadas que estão em contato. Este é o primeiro estágio de um mecanismo de desgaste e não leva diretamente a nenhuma perda de material do sistema. A seção na qual ocorrem ligações pode ter sofrido endurecimento e, portanto, estar fortalecida e então o cisalhamento pode ocorrer não em uma junção das pontas de aspereza, mas dentro do corpo do material, permitindo desta forma a transferência de material de uma superfície para outra. Nenhum novo desgaste ocorre até o processo secundário resultar na quebra desta partícula. Algumas vezes o material transferido fica na nova superfície e é transferido de volta para a superfície original. Frequentemente, grupos de partículas são formados e rompem

como se fossem um elemento único. O rompimento ocorre quando a energia elástica excede a energia da superfície (MORTIER *et al*, 2010).

Se a interface de contato entre as duas superfícies sob contato plástico tiver suficientes ligações adesivas para resistir ao deslizamento relativo, grande deformação plástica causada pelo deslocamento é introduzido na região de contato submetida a compressão e cisalhamento. Como resultado de tamanha deformação na região de contato, uma trinca é iniciada e propagada (BHUSHAN, 2001).

Para Mortier *et al* (2010), a adesão pode ser limitada por:

- a) uso de combinações de metais que não se ligam com facilidade;
- b) aumento da espessura do filme de óleo.

De acordo com ASM HANDBOOK (1998), desgaste adesivo denota uma ação de desgaste na qual nenhum agente específico pode ser identificado como a causa do desgaste. Assim, se substâncias abrasivas não forem encontradas, se a amplitude de deslizamento for maior que aquela no desgaste por *fretting* (esfregamento cíclico entre duas superfícies, com remoção de material de pelo menos uma delas) e se a taxa de perda de material não for governada por princípios de oxidação, considera-se então que desgaste adesivo ocorreu.

Na prática, entretanto, desgaste adesivo pode ocorrer de várias maneiras, e o tamanho das partículas desgastadas não é sempre gerada apenas do material mais macio, mas pode ser de ambos os materiais. A probabilidade de geração de partículas em cada ponto de contato também não é a mesma. Depende da forma microscópica de contato, microestrutura do material na região de contato, microscópica contaminação da superfície (BHUSHAN, 2001).

A adesão não é causa do desgaste, mas apenas a consequência do contato. Desgaste ocorre quando interfaces em contato são postas a deslizarem uma sobre a outra e regiões que se aderiram localmente se separam (ASM HANDBOOK, 1998).

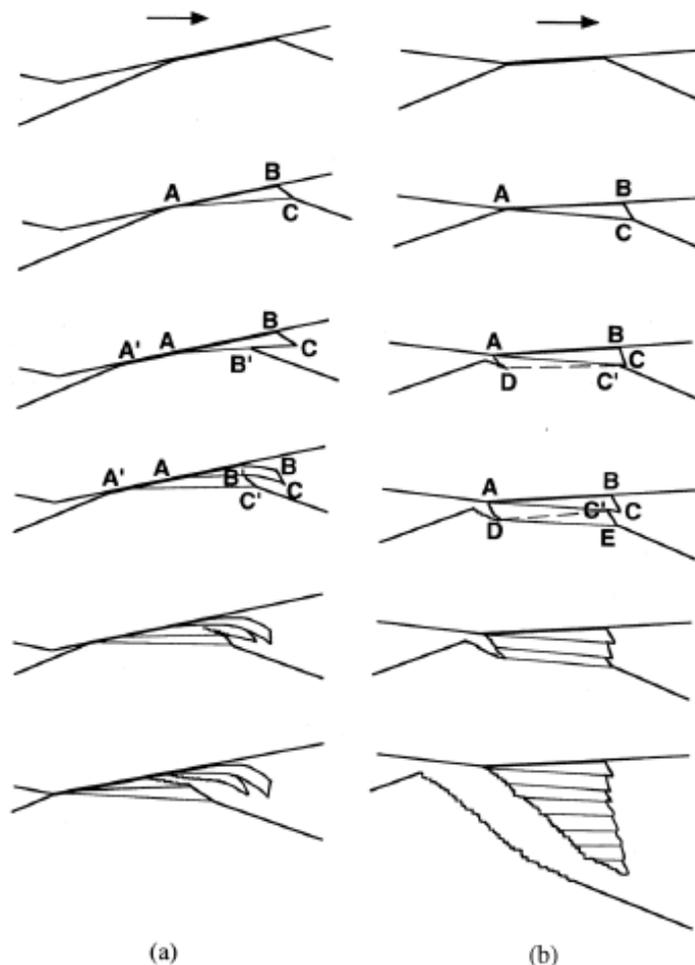
Para Bhushan (2001), o mecanismo de desgaste adesivo ocorre por meio de um corte tangencial na interface de contato de ligações adesivas fortes. Como resultado dos deslizamentos, flocos no formato de língua são formados, e são seguidos por início de ruptura e propagação na região do contato (Figura 2.4 a). A grande deformação plástica na região de contato algumas vezes assume forma de cunha, a qual é seguida pela formação de uma trinca e propagação da mesma (Figura 2.4 b).

Análise das superfícies das fraturas das partículas desgastadas da Figura 2.4 (a e b) indica que a maior parte da superfície da fratura da partícula em formato de floco mostra que a fratura ocorreu no modo compressão e corte (Figura 2.4 a); já no caso da partícula em formato de cunha mostra que a fratura ocorreu no modo tensão e corte, à direita da região de contato (Figura 2.4 b) (BHUSHAN, 2001).

No processo de desgaste adesivo, transferência de partículas de uma superfície a outra ocorre em muitos casos. Como resultado, partículas relativamente grandes compostas das duas superfícies são formadas. No sucessivo processo de deslizamento repetitivo, estas partículas deixam a interface de contato como partículas livres ou ficam em uma superfície riscando-a. (BHUSHAN, 2001).

Nos pequenos pontos de contato de substrato com substrato, a força da ligação depende dos materiais. Metais idênticos (aço com aço) apresentam melhor ligação do que metais distintos (ASM HANDBOOK, 1998).

Figura 2.4 – Processo de transferência adesiva



Para ASM HANDBOOK (1998), as discussões sobre desgaste adesivo envolvem muitas variáveis. Entretanto, poucas delas foram estudadas suficientemente a ponto de formular equações gerais de desgaste que possam ser usadas no projeto de equipamentos. Algumas equações podem ser encontradas na literatura, mas nenhuma que possa ser amplamente utilizada. A equação mais mencionada na literatura é aquela atribuída a Archard:

$$Y = kW / H \quad (2.1)$$

Onde Y é o volume desgastado por unidade de tempo, W é a carga normal, H é a dureza do material mais macio do par e k é a constante algumas vezes referida como coeficiente de desgaste.

Uma outra teoria surgiu para explicar o desgaste que ocorre em situações de deslizamento entre dois corpos: a teoria da delaminação.

Teorias sobre adesão são baseadas no postulado que o desgaste sob condições de deslizamento é consequência das interações do tipo aspéridade-aspéridade entre as duas superfícies de contato. Particularmente, é comumente assumido que as aspéridades de faces opostas se aderem uma a outra e que a mais fraca sofre posterior rompimento devido à componente tangencial da força de contato. Assim, no passado, muita atenção foi dada ao mecanismo de adesão entre diferentes materiais e à determinação da real área de contato na interface. As teorias de adesão normalmente citadas são aquelas de Archard (SUH *et al*, 1975)

O ponto de discussão entre a teoria de adesão e a teoria de delaminação é qual o papel da adesão no desgaste que ocorre no deslizamento. A teoria da delaminação postula que o papel principal da adesão é aumentar a tração superficial, que por sua vez causa maiores deformações, as quais levam ao aumento da nucleação de trincas e consequente aumento da taxa de propagação na superfície (SUH *et al*, 1975).

2.3.3 Desgaste abrasivo

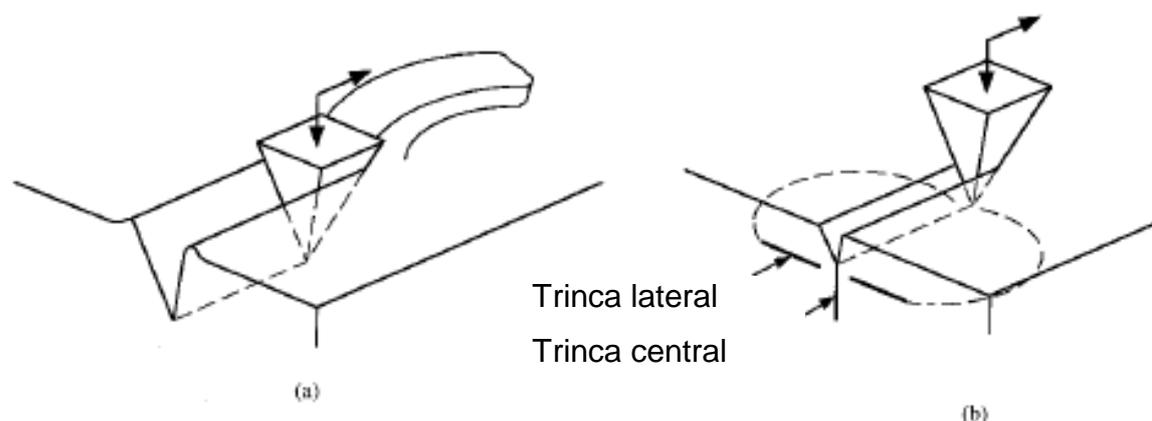
Desgaste causado por partículas duras presentes no contato é muito similar com aquele causado por usinagem, embora menos eficiente (MORTIER *et al*, 2010).

Durante a abrasão, o metal sofre endurecimento e por esta razão a dureza inicial das partículas abrasivas não é importante se as partículas de desgaste que

foram transformadas pelo calor são substancialmente mais duras que o metal da superfície. A partícula desgastada presente no contato tornar-se mais macia devido ao processo térmico gerado por atrito; então a partícula se deformará sob a pressão do contato e danos na superfície de deslizamento serão mínimos (MORTIER *et al*, 2010).

Para Bhushan (2001), se a interface de contato entre as duas superfícies ocorre de forma que uma superfície está inclinada em relação à outra, ocorre uma ação semelhante àquela que ocorre quando um arado está sendo utilizado. Como resultado deste arado, um certo volume da superfície é removido e um sulco abrasivo é formado na superfície mais macia. Quando o material que sofre desgaste possui propriedades dúteis, uma partícula na forma de arco é formada pelo mecanismo de micro cortes. No caso de materiais frágeis, entretanto, uma partícula é gerada como resultado de uma trinca (Figuras 2.5 a e 2.5 b).

Figura 2.5 – Desgaste abrasivo de material dútil.

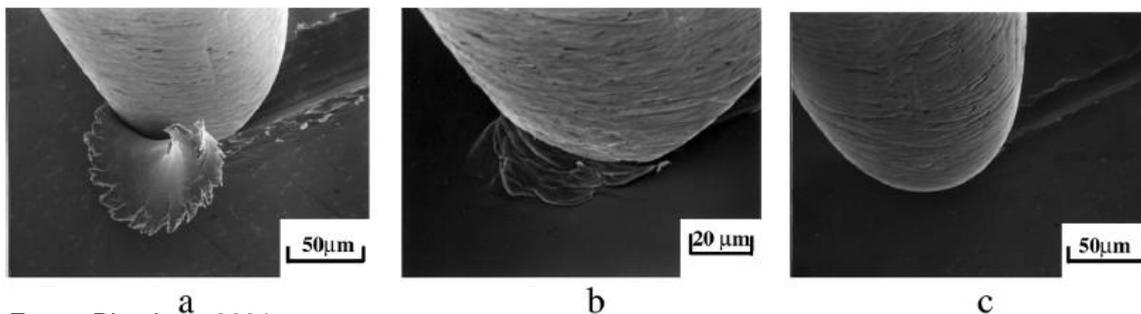


Fonte: Bhushan, 2001

De acordo com Bhushan (2001), mesmo em caso de contato no deslizamento entre duas superfícies macias do mesmo material dútil, sulcos paralelos são geralmente encontrados na superfície desgastada após o deslizamento. O pico e o vale coincidem nas superfícies deslizantes. Isto significa que os pontos ásperos abrasivos são formados nas superfícies deslizantes devido a endurecimento sofrido, transição de fase ou formação de terceiro corpo devido ao contato repetitivo no deslizamento. Desgaste abrasivo é reconhecido como sendo o modo de desgaste mais sofrido pelos materiais dúteis em deslizamento repetitivo.

A Figura 2.6 mostra três formas de desgaste abrasivo.

Figura 2.6 – Modos de desgaste abrasivo



Fonte: Bhushan, 2001

Em “a” ocorre formação de riscos por microcortes; em “b” ocorre desgaste abrasivo por atuação de uma cunha, a qual não aumenta em relação ao seu tamanho inicial, e em “c” ocorre por arado, na qual não há formação de partículas.

Para Mortier *et al* (2010), a abrasão pode ser limitada por:

- a) aumento da dureza das superfícies que entram em contato;
- b) aplicação de uma cobertura macia nas superfícies para segurar os detritos;
- c) melhora da filtragem do óleo;
- d) aumento da espessura do filme de óleo;
- e) redução da rugosidade da superfície.

2.3.4 Fadiga de Contato

Embora o mecanismo de fadiga possa operar sob condições de deslizamento, ele tendem a ser predominante em contato por rolagem, onde o estresse é alto e o deslizamento é pequeno (MORTIER *et al*, 2010).

Este tipo de falha da superfície é manifestado pela quebra de pequenas porções aproximadamente triangulares da superfície do material (MORTIER *et al*, 2010). Tal mecanismo não é de interesse do presente trabalho, pois o deslizamento da esfera sobre o disco não será por rolagem.

Quando dois materiais metálicos estão em atrito, no modo de fadiga, uma partícula de desgaste não é gerada por um simples passe de deslizamento, apenas um sulco raso é formado. No caso de repetido contato abrasivo em condição de deslizamento no mesmo sulco, polimento plástico torna-se predominante. Neste

modo de aragem, fratura por fadiga é esperada para acontecer após um determinado número de ciclos (BHUSHAN, 2001).

2.3.5 Desgaste Corrosivo

Quando ocorre deslizamento, especialmente em líquidos e gases corrosivos, produtos de reações são formados principalmente na superfície por interações químicas ou eletroquímicas. Se tais produtos aderem fortemente à superfície e se comportam como o material base, o mecanismo de desgaste deveria ser quase o mesmo que aquele para o material base. Em muitos casos, entretanto, tais reações produzem comportamentos bastante diferentes daqueles apresentados pelo material base. Assim, o desgaste é razoavelmente diferente daquele do material base, e é dominado pelos produtos formados pela interação dos materiais sólidos com o ambiente corrosivo. Este tipo de desgaste triboquímico acelerado pelo meio corrosivo é chamado de desgaste corrosivo (BHUSHAN, 2011).

Para Mortier *et al* (2010), este tipo de desgaste é perda de material por reação química. Tal desgaste pode ser limitado por:

- a) uso de inibidores de ferrugem e corrosão;
- b) limitação do acesso de água.

De acordo com ASM HANDBOOK (1998), desgaste por oxidação é uma forma de desgaste que ocorre durante condições nas quais não há lubrificação no deslizamento. Normalmente é, mas não sempre, uma forma de corrosão benéfica na qual um filme de óxido de aproximadamente 3 ou 4 μm de espessura se forma nas áreas de contato nos pontos de temperatura relativamente alta que se formam entre superfícies deslizantes.

Desgaste por oxidação também pode ocorrer sob condições de deslizamento lubrificado quando a espessura do filme de óleo é menor que a rugosidade combinada dos elementos tribológicos, como por exemplo, nas condições de lubrificação limítrofe (ASM HANDBOOK, 1998).

Na leitura de artigos sobre experimentos sobre desgaste, observa-se que vários mecanismos de desgaste podem se apresentar durante um mesmo experimento.

Em seu trabalho sobre o estudo dos mecanismos de desgaste dominantes e competitivos no aço, Rapoport (1995) observou que há desgaste por oxidação e

abrasão sob baixas cargas, enquanto que ocorre severo desgaste por oxidação, abrasão e delaminação sob altas cargas. Um aumento adicional na carga faz com haja um mecanismo adicional: adesão.

2.4 FERRAMENTA ESTATÍSTICA

2.4.1 Regressão Linear

Para Levine *et al* (2000), a análise de regressão é utilizada principalmente com o objetivo de previsão. O propósito é o desenvolvimento de um modelo estatístico que possa ser utilizado para prever os valores de uma variável dependente ou variável resposta, com base nos valores de pelo menos uma variável independente ou explicativa.

Cada distribuição dos valores de y tem sua própria média ou valor esperado. A equação que descreve como o valor esperado de y – designado por $E(y)$ – está relacionado com x é chamada de equação de regressão, que, para uma regressão linear simples, é dada por:

$$E(y) = \beta_0 + \beta_1 x \quad (2.2)$$

A inclinação da linha β_1 (ou coeficiente angular) representa a variação esperada em y (positiva ou negativa) para uma variação unitária em x . A interseção β_0 representa o valor médio de y quando x é igual a zero (SWEENEY *et al*, 2014).

Sweeney *et al* (2014) explicam que se os valores dos parâmetros populacionais β_0 e β_1 fossem conhecidos, seria possível usar a equação (2.2) mostrada anteriormente para o cálculo do valor médio de y para um dado valor de x . Entretanto, ocorre que, na prática, os valores não são conhecidos e precisam ser estimados utilizando-se cálculos amostrais. As estatísticas amostrais (designadas por b_0 e b_1) são calculadas como estimativas dos parâmetros populacionais β_0 e β_1 . Substituindo os valores das estatísticas amostrais na equação de regressão, obtém-se a chamada equação de regressão estimada:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x \quad (2.3)$$

A equação 2.3 expressa uma relação entre x (chamada variável independente ou variável preditora) e \hat{y} (chamada variável dependente ou variável resposta). O Quadro 2.1 mostra que b_0 e b_1 são estatísticas amostrais usadas para estimar os parâmetros populacionais β_0 e β_1 .

Quadro 2.1 – Notação de regressão

Notação para a Equação de Regressão		
	Parâmetro (populacional)	Estatística (amostral)
Intercepto y da equação de regressão (coeficiente linear)	β_0	b_0
Coeficiente angular da equação de regressão	β_1	b_1
Equação da reta de regressão	$y = \beta_0 + \beta_1 x$	$\hat{y} = b_0 + b_1 x$

Fonte: Triola, 1999

A determinação da equação da reta que melhor se encaixa no conjunto de pontos que associam as variáveis dependente e independente não pode ser feita a olho; deve-se lançar mão de métodos não subjetivos.

Johnson (1994) propõe formalmente o problema da seguinte maneira: há n pares de observação (x_i, y_i) para os quais é razoável assumir que a regressão y em x é linear, e deseja-se determinar a linha (a equação da reta) que de acordo com algum critério apresenta o melhor encaixe. Um critério comumente adotado é o método dos mínimos quadrados.

Uma das principais utilizações das equações de regressão é a predição do valor de uma variável (variável dependente), dado um valor determinado da outra variável (variável independente). Se a reta de regressão se ajusta bem aos dados, então é possível utilizar a equação para fazer predições, desde que não sejam ultrapassados os limites dos valores disponíveis (TRIOLA, 1999).

Triola (1999) apresenta algumas diretrizes para uso da equação de regressão:

- a) ao aplicar a equação de regressão para predições, deve-se manter-se dentro do âmbito dos dados amostrais;
- b) em áreas como economia, por exemplo, uma equação de regressão baseada em dados passados não é necessariamente válida hoje;

- c) não se deve fazer predições sobre uma população diferente daquela de onde provêm os dados amostrais.

2.4.2 Resíduos e a propriedade de mínimos quadrados

Conforme já discutido anteriormente, a equação de regressão representa a reta que melhor se ajusta aos dados; o critério utilizado se baseia na distância vertical entre os pontos que representam os dados originais e a reta de regressão. Tais distâncias chamam-se resíduos. Uma reta verifica a propriedade do método dos mínimos quadrados ao se admitir que a soma dos quadrados dos resíduos é a menor possível (TRIOLA, 1999).

2.4.3 Adequabilidade da reta de regressão

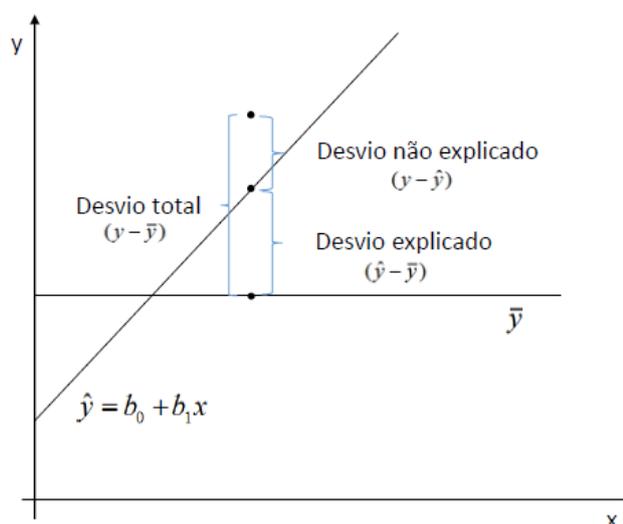
Para a avaliação da adequabilidade da reta de regressão é importante o entendimento de como o desvio entre o valor real e o valor predito é constituído.

Triola (1999) explica que seja uma coleção de dados emparelhados que contenha o ponto (x,y) , que \hat{y} seja o valor predito de y (obtido pela equação de regressão), e que a média dos valores amostrais de y seja \bar{y} .

A explicação a seguir, de Triola (1999), é para um ponto específico, mostrado na Figura 2.7:

$$\text{Desvio total} = \text{desvio explicado} + \text{desvio não-explicado} \quad (2.4)$$

Figura 2.7 – Desvio total, desvio explicado e desvio não explicado.



Fonte: Triola, 1999

Tal expressão se aplica a um ponto particular (x,y) , mas pode ser generalizada e modificada de modo a incluir todos os pares de dados amostrais, conforme equação 2.5:

Varição total = variação explicada + variação não explicada, ou

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.5)$$

A definição que segue utiliza os componentes desta última definição.

O coeficiente de determinação é o valor da variação de y que é explicado pela reta de regressão.

Para Sweeney (2014), tal coeficiente fornece uma medida da qualidade de ajuste da equação de regressão estimada.

É dado por:

$$r^2 = \text{variação explicada} / \text{variação total} \quad (2.6)$$

Levine (2000), por sua vez, complementa com a seguinte explicação:

Soma total dos quadrados = soma dos quadrados devido à regressão + soma dos quadrados dos resíduos.

$$STQ = SQReg + SQR \quad (2.7)$$

Onde:

$$STQ = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - n\bar{Y}^2 \quad (2.8)$$

$$SQR = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - b_0 \sum_{i=1}^n Y_i - b_1 \sum_{i=1}^n X_i Y_i \quad (2.9)$$

$$SQReg = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 = STQ - SQR = b_0 \sum_{i=1}^n Y_i + b_1 \sum_{i=1}^n X_i Y_i - n\bar{Y}^2 \quad (2.10)$$

O coeficiente de determinação r^2 pode ser definido como:

$$r^2 = SQReg / STQ \quad (2.11)$$

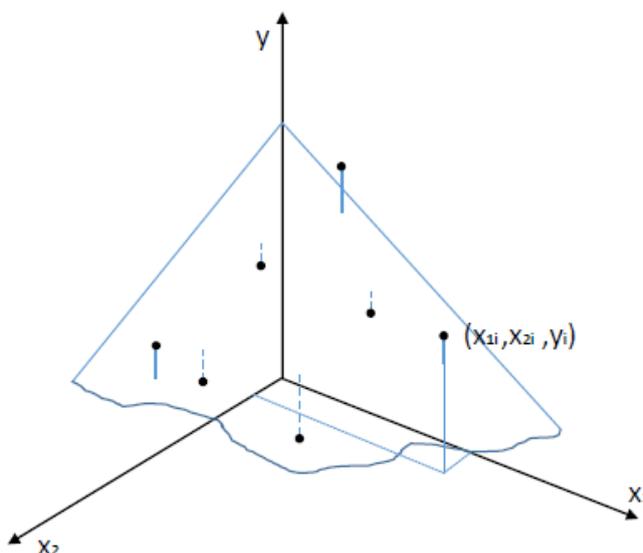
Nota-se que r^2 somente pode assumir valores entre 0 e 1.

Tal coeficiente mede a proporção da variação, que é explicada pela variável independente no modelo de regressão (LEVINE, 2000). Assim, apenas como exemplo, um valor de 0,80 para o coeficiente de determinação significa que 80% da variabilidade da variável dependente pode ser explicada por meio da relação linear existente entre a variável dependente e a variável independente.

2.4.4 Regressão Múltipla

A regressão múltipla trata de situações com mais de uma variável independente, como apresentado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Plano de regressão



Fonte: Johnson, 1994

Os conceitos de modelo de regressão e da equação de regressão apresentados para regressão simples são aplicáveis ao caso de regressão múltipla (SWEENEY, 2014).

A equação que descreve como variável dependente y está relacionada com as variáveis independentes x_1, x_2, \dots, x_k e com uma parcela de erro é denominada modelo de regressão múltipla. Considera-se que o modelo de regressão assuma a seguinte forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.12)$$

No modelo de regressão múltipla, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ são parâmetros, e a parcela de erro ε é uma variável aleatória. O erro aleatório ε é responsável pela variabilidade em y que não pode ser explicada pelo efeito linear das k variáveis independentes (SWEENEY, 2014).

Triola (1999) complementa com a notação seguinte, para a forma geral da equação de regressão múltipla estimada:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k \quad (2.13)$$

Onde k é o número de variáveis independentes (ou variáveis preditoras), \hat{y} é o valor predito de uma variável dependente y (calculado a partir da equação de regressão múltipla), x_1, x_2, \dots, x_k são as variáveis independentes, β_0 é o intercepto y , ou valor de y quando todas as variáveis preditoras são 0, b_0 é a estimativa de β_0 baseada nos dados amostrais, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ são os coeficientes das variáveis independentes x_1, x_2, \dots, x_k . Por fim, b_1, b_2, \dots, b_k são as estimativas amostrais dos coeficientes $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$.

Para duas variáveis independentes, este é um problema de ajustar um plano a um conjunto de pontos com coordenadas (x_{i1}, x_{i2}, y_i) como ilustrado na Figura 2.8. Aplica-se o método dos mínimos quadrados para se obter estimativas dos coeficientes β_0, β_1 e β_2 que minimizam a soma dos quadrados nas distâncias verticais das observações y_i ao plano (JOHNSON, 1994).

2.4.4.1 Coeficiente de determinação múltiplo

O mesmo procedimento mostrado para regressão linear simples também se aplica à soma dos quadrados na regressão múltipla.

Para a regressão linear simples, foi usado o coeficiente de determinação $r^2 = \text{SQReg} / \text{STQ}$ para medir a qualidade de ajuste da equação de regressão estimada. O mesmo conceito se aplica à regressão múltipla. O termo coeficiente de determinação múltiplo indica que se está medindo a qualidade de ajuste da equação de regressão múltipla estimada, ou seja, pode ser interpretado como a proporção da variabilidade da variável dependente que pode ser explicada pela equação de regressão estimada (SWEENEY, 2014).

O coeficiente de determinação múltiplo, designado por R^2 , é calculado da seguinte maneira:

$$R^2 = \text{SQReg} / \text{STQ} \quad (2.14)$$

2.4.4.2 Testando a significância

Sweeney (2014) explica que o teste F é utilizado para determinar se existe uma relação significativa entre a variável dependente e o conjunto de todas as variáveis independentes; o teste F é referido como teste de significância global.

Para o modelo de regressão múltipla, as hipóteses do teste F são:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad (2.15)$$

Já H_a refere-se a quando um ou mais dos parâmetros não são iguais a zero.

Se H_0 for rejeitada, o teste evidencia estatísticas suficientes para se concluir que um ou mais dos parâmetros não são iguais a zero e que a relação global entre y e o conjunto de variáveis independentes x_1, x_2, \dots, x_k é significativa. Entretanto, se H_0 não puder ser rejeitada, não há evidências suficientes para concluir que uma relação significativa está presente.

Para duas variáveis independentes, o teste F se apresenta da seguinte maneira:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = 0 \quad (2.16)$$

$$H_a : \beta_1 \text{ e/ou } \beta_2 \text{ não são iguais a zero.} \quad (2.17)$$

$$\text{Estatística de teste: } F = QMReg / QMR \quad (2.18)$$

Regra de rejeição: rejeitar H_0 se valor da estatística F calculada for maior que o valor de F tabelado.

A Raiz quadrada de QMR é a estimativa do desvio padrão da parcela de erro. Esse desvio é chamado de erro padrão da estimativa e é designado por s .

O quadro 2.2 apresenta como é calculado o valor de F.

Quadro 2.2 – ANOVA de um modelo de regressão múltipla com k variáveis independentes:

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F
Regressão	$SQReg$	k	$QMReg = SQReg/k$	$F = QMReg/QMR$
Resíduo	SQR	$n - k - 1$	$QMR = SQR/(n-k-1)$	
Total	SQT	$n - 1$		

Fonte: SWEENEY, 2014

2.4.4.3 Verificação da adequação do modelo

Johnson (1994) escreve que, assumindo que o modelo de regressão seja adequado, pode-se usar a equação de ajuste para fazer inferências. Mas antes de fazê-lo, é imperativo que se verifique as suposições consideradas na análise. No contexto do modelo de regressão com duas variáveis independentes, questiona-se se y_i é igual a $\beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \varepsilon_i$, onde os erros ε_i são independentes e tem a mesma variância σ^2 .

Para Johnson (1994), toda a informação de falta de ajuste está contida nos resíduos, apresentados no sistema (2.19):

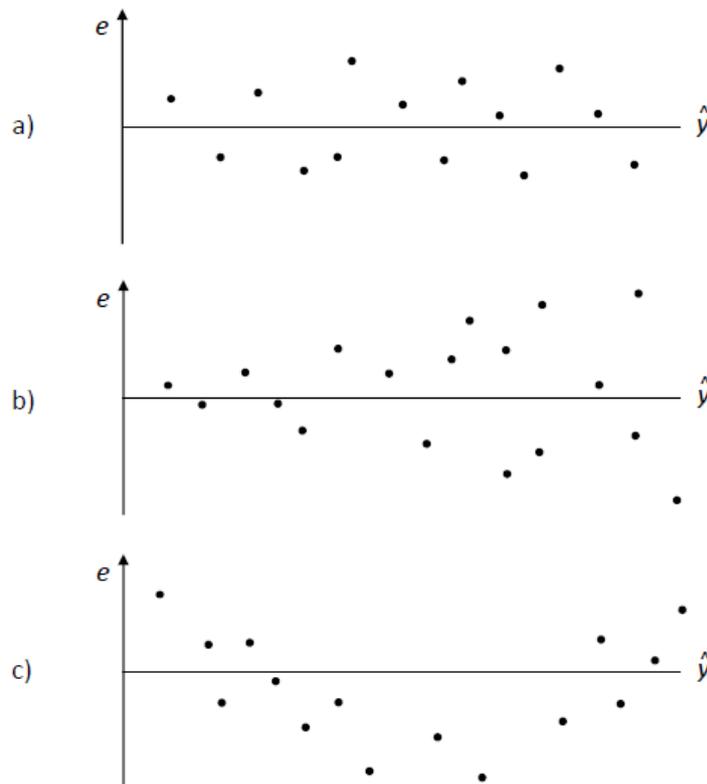
$$\begin{cases} e_1 = y_1 - \hat{y}_1 = y_1 - b_0 - b_1 x_{11} - b_2 x_{12} \\ e_2 = y_2 - \hat{y}_2 = y_2 - b_0 - b_1 x_{21} - b_2 x_{22} \\ \dots \\ e_n = y_n - \hat{y}_n = y_n - b_0 - b_1 x_{n1} - b_2 x_{n2} \end{cases} \quad (2.19)$$

Os resíduos devem ser apresentados em um gráfico de várias maneiras para detectar divergências sistemáticas das suposições.

A Figura 2.9 mostra:

- uma situação com faixa ideal;
- aumento de variação com o aumento da resposta; uma transformação é necessária;
- situação na qual o modelo $\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$ não é adequado.

Figura 2.9 – Plotagem de resíduos



2.4.4.4 Coeficiente de determinação múltipla ajustado

Triola (1999) comenta o valor de R^2 ajustado: R^2 denota o coeficiente de determinação múltipla, que é uma medida do grau de ajustamento da equação de regressão múltipla dos dados amostrais. Um ajuste perfeito resultaria em $R^2 = 1$. Um ajuste muito bom acarretaria um valor próximo de 1. E um ajuste fraco ocasionaria um valor de R^2 próximo de zero. O valor de R^2 indica qual a porcentagem da variação total que pode ser explicada pelas variáveis independentes. O coeficiente múltiplo de determinação R^2 é uma medida da aderência da equação de regressão de dados amostrais, mas tem uma séria falha: na medida que se incluem mais variáveis, R^2 aumenta. Embora o maior valor de R^2 seja atingido simplesmente com a inclusão de todas as variáveis disponíveis em um determinado estudo, a melhor equação de regressão múltipla nem sempre inclui todas as variáveis. Consequentemente, é melhor usar o coeficiente de determinação ajustado ao comparar diferentes equações de regressão múltipla, pois ele ajusta o valor de R^2 com base no número de variáveis e no tamanho da amostra.

$$R^2_{ajustado} = 1 - \frac{(n-1)(1-R^2)}{[n-(k+1)]} \quad (2.20)$$

Para Sweeney (1994) muitos analistas preferem ajustar o coeficiente R^2 pelo número de variáveis independentes a fim de evitar uma superestimação do impacto de adicionar uma variável independente à quantidade de variabilidade explicada pela equação de regressão estimada.

2.4.5 ANOVA – Modelo de classificação dupla

Além de sua utilidade para avaliar a qualidade do plano de regressão, a análise de variância também pode ser utilizada para testar, ao mesmo tempo, diferença entre médias, levando-se em conta o efeito de duas variáveis independentes.

Guerra (1991) explica que a observação admite a influência dos seguintes elementos:

$$x_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (2.21)$$

Onde μ é o efeito médio devido a população a que pertence x_{ij} , α_i é o efeito específico devido a coluna a que pertence x_{ij} , β_j é o efeito específico devido a linha a

que pertence x_{ij} e ε_{ij} é o efeito aleatório devido a causas específicas de x_{ij} (erro residual).

Para Werkema *et al* (1996), em um estudo de análise de variância com 2 fatores, considere-se que para o fator A haja a níveis e para o fator B haja b níveis, e que cada repetição do estudo contenha uma observação de todos os ab tratamentos. O k -ésimo valor da resposta obtida no i -ésimo nível do fator A e j -ésimo nível do fator B é representado por x_{ijk} .

Para uma situação em que haja dois fatores, A e B , a notação utilizada por Werkema *et al* (1996) é a seguinte: sejam $x_{i..}$ a soma das observações no i -ésimo nível do fator A , $x_{.j.}$ a soma das observações no j -ésimo nível do fator B , $x_{ij.}$ a soma das observações sob o ij -ésimo tratamento e $x_{...}$ a soma de todas as observações. Por fim, n se refere à quantidade de repetições (WERKEMA *et al*, 1996).

Werkema *et al* (1996) apresentam as equações de 2.22 a 2.31.

$$SQT = SQA + SQB + SQAB + SQR \quad (2.22)$$

A soma de quadrados total é dada por:

$$SQT = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (x_{ijk} - \bar{x}_{...})^2 \quad (2.23)$$

A soma de quadrados devida ao fator A é dada por:

$$SQA = bn \sum_{i=1}^a (\bar{x}_{i..} - \bar{x}_{...})^2 \quad (2.24)$$

A soma de quadrados devida ao fator B é dada por:

$$SQB = an \sum_{j=1}^b (\bar{x}_{.j.} - \bar{x}_{...})^2 \quad (2.25)$$

A soma de quadrados devida à interação entre A e B é dada por:

$$SQAB = n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{x}_{ij.} - \bar{x}_{i..} - \bar{x}_{.j.} + \bar{x}_{...})^2 \quad (2.26)$$

A soma de quadrados residual é dada por:

$$SQR = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (x_{ijk} - \bar{x}_{ij.})^2 \quad (2.27)$$

O quadrado médio devida ao fator A é dado por:

$$QMA = \frac{SQA}{a-1} \quad (2.28)$$

O quadrado médio devida ao fator B é dado por:

$$Q_{MB} = \frac{SQB}{b-1} \quad (2.29)$$

O quadrado médio devido à interação entre A e B é dada por:

$$Q_{MAB} = \frac{SQAB}{(a-1)(b-1)} \quad (2.30)$$

O quadrado médio residual é dado por:

$$Q_{MR} = \frac{SQR}{ab(n-1)} \quad (2.31)$$

A análise de variância para dois fatores é mostrada no Quadro 2.3:

Quadro 2.3 – ANOVA para dois fatores

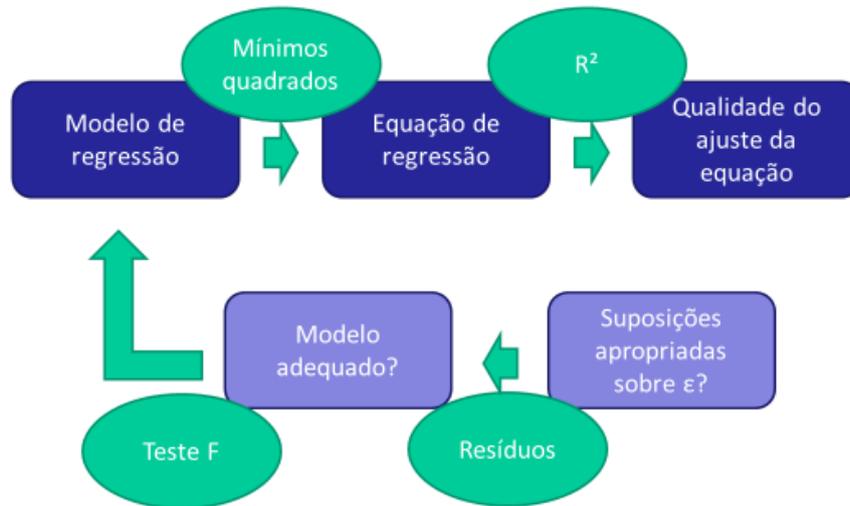
Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F
Fator A	SQA	$a-1$	QMA	$\frac{QMA}{QMR}$
Fator B	SQB	$b-1$	QMB	$\frac{QMB}{QMR}$
Interação AB	$SQAB$	$(a-1)(b-1)$	$QMAB$	$\frac{QMAB}{QMR}$
Residual	SQR	$ab(n-1)$	QMR	
Total	SQT	$abn-1$		

Fonte: WERKEMA *et al*, 1996.

2.4.6 Resumo da abordagem estatística

A Figura 2.10 resume a abordagem estatística utilizada neste trabalho.

Figura 2.10 – Resumo da abordagem estatística.



Fonte: o autor, 2016.

3 ANÁLISE DE ARTIGOS DE TESTES REALIZADOS SOBRE DESGASTE E LUBRIFICAÇÃO

Há vários estudos realizados que envolvem desgaste e lubrificação. Com o objetivo de estabelecer alguns parâmetros para este trabalho, foi feita uma análise de alguns dos estudos disponíveis em artigos.

3.1 ARTIGOS

3.1.1 Atrito e desgaste de vários tipos de ferro fundidos sob condições de deslizamento severas (friction and wear on several kinds of cast irons under severe sliding conditions).

Hirasata *et al* (2007) avaliaram o atrito a seco e características de desgaste de vários tipos de aço em condições de altas velocidades e pressão utilizando corpos de prova de ferro fundido na configuração pino no disco. O objeto era avaliar a variação do desgaste (medição da profundidade), em função da distância de deslizamento e da velocidade de deslizamento, a qual variou de 2 m/s a 20 m/s. Foi observado que aumento da temperatura reduziu a dureza e aumentou o desgaste.

3.1.2 Competição de mecanismos no desgaste e mapa de desgaste para aços (the competing wear mechanism and wear maps for steel).

Rapoport *et al* (1995) investigaram os mecanismos de desgaste dominantes em aço sob diferentes condições de contato na configuração pino no disco, utilizando-se corpos de prova de aço AISI 1040.

Foi realizada a medição do coeficiente de atrito, desgaste do disco e temperatura, esta última por meio de termopar na extremidade do disco, aplicando-se uma velocidade de deslizamento de 0,67 m/s e carga variando de 1,26 N a 35 N.

Observou-se que, para amostras com dureza inferior ou igual a 2000 MPa, vários mecanismos de desgaste ocorrem simultaneamente. Há desgaste por oxidação e aragem sob baixas cargas, enquanto que ocorre severo desgaste por oxidação, aragem e delaminação sob altas cargas. Um aumento adicional na carga fez com que houvesse um mecanismo adicional: adesão (RAPOPORT *et al*, 1995).

3.1.3 Influência da carga aplicada, velocidade de deslizamento e transformação martensítica no desgaste por deslizamento a seco de aços inoxidáveis (the influence of applied load, sliding velocity and martensitic transformation on the unlubricated sliding wear of austenitic stainless steels).

Farias *et al* (2007) estudaram o desgaste por deslizamento como função da carga e velocidade em corpos de prova de aços AISI 304 e AISI 316 na configuração pino no disco, utilizando valores de velocidade de deslizamento que variaram de 0,07 m/s a 0,81 m/s, carga de 6 N a 20 N, por um período de uma hora.

Foi realizado exame em microscópio eletrônico de varredura da superfície do pino e morfologia dos detritos e medição da microdureza Vickers da seção transversal das superfícies desgastadas, com posterior avaliação dos mecanismos de desgaste.

Observou-se que em condição severa (20 N a 0,8 m/s) não houve oxidação. O mecanismo de desgaste por deslizamento foi dominado por deformação plástica. Além disto, em condições de carregamento moderado, notou-se oxidação como mecanismo de desgaste (FARIAS *et al*, 2007).

3.1.4 Desenvolvimento de mapa simples de desgaste da temperatura versus velocidade de deslizamento para comportamento do desgaste por deslizamento de interfaces metálicas distintas (development of a simple temperature versus sliding speed wear map for sliding wear behaviour of dissimilar metallic interfaces).

Datta e Inman (2008) investigaram a variação do comportamento do desgaste por deslizamento a várias temperaturas (de 630°C a 750°C) e velocidades (de 0,314 m/s a 0,905 m/s) e uma carga constante de 7N por uma distância de deslizamento de 4500 m. Utilizaram a configuração bloco e cilindro (bloco de Nimonic 80 A e cilindro de Stellite 6).

Observou-se, à temperatura de 630°C, a predominância do mecanismo de desgaste por adesão, com formação de detritos; com o aumento de temperatura para 750°C, ocorreu a formação de esmalte protetivo, resultado da transferência de material, oxidação e detritos, tendo como consequência a diminuição do desgaste (DATTA e INMAN, 2008).

3.1.5 Influência do regime de lubrificação no comportamento de desgaste por deslizamento em liga de aço (influence of lubrication regime on the sliding wear behaviour of an alloy steel).

Jisheng e Gawne (1996) avaliaram o comportamento tribológico sob regimes misto e limítrofe com óleo comercial utilizando corpos de prova de aço 817M40 na configuração pino no disco, com carga variando de 10 N a 300 N e com velocidade constante de 2 m/s em ensaios de 10 horas de duração.

O desgaste foi avaliado através da medição do volume removido do pino. A superfície das pistas de desgaste foi avaliada com o auxílio de um microscópio eletrônico e foi feita contagem das partículas e detritos no óleo.

Para Jisheng e Gawne (1996), mecanismos de desgaste abrasivo e adesivo foram observados na produção de superfícies polidas. Na lubrificação limítrofe, predominaram a delaminação e desgaste abrasivo.

3.1.6 Efeito da temperatura no desgaste por deslizamento em aço ferramenta (the effect of temperature on sliding wear of steel-tool steel pairs).

Okonkwo *et al* (2012) investigaram mecanismos de desgaste e avaliaram a influência da temperatura, variando-a de ambiente a 150°C, em deslizamento a seco, na configuração esfera no disco, confeccionados em aço AISI D2 e AISI 1018, respectivamente, sob carga de 5 N e velocidade de deslizamento de 10 mm/s por 200 revoluções.

Foi avaliada a perda de material do disco para cálculo do volume perdido por desgaste e utilizado microscópio eletrônico de varredura para caracterizar a superfície de desgaste.

Para Okonkwo *et al* (2012), o aparecimento de depósito de diferentes tamanhos de material transferido da esfera para a superfície do disco (temperatura ambiente e 50°C) sugere que desgaste adesivo é o mecanismo de desgaste predominante nas condições testadas. Já em temperaturas mais elevadas, como 150°C, o mecanismo predominante é a transferência de material.

3.1.7 Comportamento tribo-metalográfico de aço com alto teor de carbono em deslizamento a seco (tribo-metallographic behavior of high carbon steels in dry sliding).

Wang *et al* (1999) avaliaram mudança nos mecanismos de desgaste devido a variações de carga e velocidade de deslizamento, utilizando corpos de prova de aço AISI 52100, na configuração pino no disco, variando a carga de 20 N a 140 N e variando a velocidade de 0,6 m/s a 2,4 m/s, por uma distância de deslizamento de 600 metros. O desgaste sofrido pelo pino foi obtido pela variação da massa.

Os pinos apresentaram uma baixa taxa de desgaste a velocidades baixas e cargas baixas (exemplo: 20N e 0,6 m/s). Na condição na qual a velocidade era de 2 m/s e a carga de 20 N, foi observado desgaste médio: a superfície desgastada era macia, com pouca formação de sulcos, e algumas partículas sofreram oxidação (análise ferográfica). Pouca deformação plástica e transferência adesiva. Já após a transição do desgaste médio para desgaste severo, as pistas de desgaste eram rugosas, sulcos eram mais profundos e junções adesivas ocorreram (WANG *et al*, 1999).

3.1.8 Desgaste por deslizamento a seco dea liga Ti-6AL-4V influenciado pelo contracorpo e condições de deslizamento (dry sliding wear of Ti-6Al-4V alloy as influenced by the counterface and sliding conditions).

Straffelini e Molinari (1999) avaliaram a taxa de desgaste em função da carga, velocidade de deslizamento e material da contrapeça, liga de Ti-6AL-4V e aço ferramenta AISI M2, na configuração disco e disco. A velocidade de deslizamento variou de 0,3 m/s a 0,8 m/s e a carga variou de 50N a 200 N.

O valor do desgaste foi obtido através da medida da perda de massa tanto da peça como da contrapeça. Também foi realizada avaliação dos detritos e pistas de desgaste por meio de microscópio eletrônico de varredura.

Para Straffelini e Molinari (1999), dois mecanismos de desgastes foram identificados: desgaste por oxidação a baixas velocidades (0,3 a 0,5 m/s) e desgaste por delaminação a altas velocidades (0,6 a 0,8 m/s). Nas velocidades mais baixas (0,2 a 0,5 m/s) a formação de oxidação na superfície desgastada foi observada, mostrando forte interação com o ambiente (oxigênio da atmosfera). A formação

destes óxidos ocorre principalmente nos períodos em que não houve contato entre o pino e o disco, o que fez com que, à medida que a velocidade de deslizamento aumentasse, a taxa de desgaste decrescesse.

3.1.9 Investigação das características do atrito e do desgaste do biodiesel de palma (Investigation of friction and wear characteristics of palm biodiesel)

Fazal *et al* (2013) investigaram o comportamento do atrito e do desgaste com lubrificação de biodiesel de palma em diferentes concentrações com a utilização de um equipamento de desgaste do tipo quatro esferas. As concentrações testadas foram as seguintes: Diesel (B0), biodiesel (B100), além de concentrações de biodiesel intermediárias, a saber, B10, B20 e B50.

Observou-se que tanto o desgaste quanto o atrito diminuíram com o aumento da concentração do biodiesel, o que pode ser explicado pela presença de moléculas insaturadas e componentes de ácidos graxos livres (FAZAL *et al*, 2013)

3.2 CONCLUSÃO DA ANÁLISE DOS ARTIGOS

A análise destes artigos permite algumas observações quanto a métodos e parâmetros empregados em trabalhos que estudam o desgaste de peças metálicas.

Quanto à configuração empregada, nota-se que aquela que utiliza o pino no disco foi comumente utilizada quando o objeto de estudo foi o desgaste e seus mecanismos.

Já quanto às variáveis utilizadas, pode-se listar a velocidade de deslizamento, carga, temperatura e material dos corpos de prova. Para a velocidade de deslizamento, na maioria das vezes, os valores empregados foram inferiores a 2,5 m/s; já para a carga, na maioria das vezes, os valores foram inferiores a 50N.

Por fim, quanto à avaliação dos resultados, comumente empregou-se análise visual dos corpos de prova utilizando-se microscópio eletrônico de varredura e medição do desgaste por variação de volume ou massa.

Entretanto, dentre os artigos analisados, poucos apresentaram uma análise estatística dos resultados, algo que foi utilizado no presente trabalho.

Assim, como diferencial em relação aos artigos acima apresentados, o presente trabalho adicionou uma análise estatística, por meio de análise de

regressão, dos valores encontrados para a taxa específica de desgaste nas diferentes condições de ensaio.

4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A avaliação estatística da influência da lubrificação na qualidade da previsão por regressão da taxa de desgaste foi feita através da comparação dos coeficientes de regressão múltipla obtidos através de medições em três situações: uma a seco e duas com lubrificação (uma com óleo Diesel e outra com óleo biodiesel).

A norma ASTM G99-05 – Método de Teste Padrão para Teste de Desgaste em um Aparelho Pino no Disco foi utilizada como base para os testes reportados neste trabalho, cujo escopo cobre o procedimento em laboratório para determinação do desgaste de material durante ensaio de deslizamento.

A construção utilizada para realização do experimento trata-se de um pino em cuja ponta há uma esfera metálica fixa que está apoiado perpendicularmente sobre um disco metálico que apresenta movimento de rotação.

O texto da norma supramencionada alerta que, uma vez que o método de teste pino no disco não tem por objetivo replicar todas as condições que possam ser encontradas em campo (por exemplo, lubrificação, carga, pressão, geometria de contato, remoção de detritos e presença de ambiente corrosivo), não há garantia que o teste fornecerá a taxa de desgaste de um dado material sob condições diferentes daquelas do teste.

Considerou-se como variável dependente a taxa de desgaste do disco na superfície do disco e como variáveis independentes a carga aplicada ao pino, contra o disco, e a velocidade de deslizamento.

O presente trabalho também leva em consideração a norma ASTM D6079-11 (Standard Test Method for Evaluating Lubricity of Diesel Fuels by High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR)).

Esta norma é aplicável para avaliação da lubricidade de combustíveis à base de óleo Diesel e outros combustíveis à base de petróleo utilizados em motores Diesel. Também pode ser aplicada para misturas de biodiesel.

O método utilizado na referida norma consiste em mover uma esfera sobre uma placa imersa em um fluido. O movimento da esfera é realizado em alta frequência e as marcas resultantes de desgaste da superfície do disco são medidas para se obter uma avaliação da lubrificação do fluido.

Ao final do teste, a imagem das marcas de desgaste é capturada por meio de um microscópio com câmera digital, e as dimensões dos eixos maior e menor das marcas de desgaste são medidas.

Embora o método utilizado neste trabalho não seja o HFRR, serão observados alguns aspectos apresentados pela norma D6079-11 ASTM:

- a) disco completamente imerso no fluido (nas situações nas quais há lubrificação);
- b) umidade relativa do ambiente: de 30% a 85%;
- c) regime de lubrificação: regime limítrofe;
- d) esfera e corpo de prova do mesmo material.

O ASM HANDBOOK (1998) considera que diferentes abordagens têm sido usadas para determinar a quantidade de desgaste: medição da variação de massa ou da variação dimensional da peça. No caso em tela, foi empregada a medição do volume desgastado da trilha no disco de prova. Tal volume multiplicado pela distância percorrida e dividido pela carga aplicada resulta na taxa de desgaste específica.

4.1 MATERIAIS

Foram utilizados como materiais de teste os itens apresentados a seguir.

4.1.1 Corpos de prova.

Para cada condição de teste (a seco, com óleo biodiesel e com óleo Diesel) foram utilizados 27 corpos de prova, o que faz um total de 81 corpos de prova ensaiados. Considera-se como relevantes as seguintes características para os corpos de prova utilizados neste trabalho:

- a) forma: disco;
- b) material: aço AISI/SAE 52100 recozido;
- c) dimensão: 25,4 mm de diâmetro e 5 mm de espessura;
- d) dureza: R_a inferior a 50 μm .

Quadro 4.1 – Dureza dos corpos de prova

Medida	1	2	3	4	5	Média	Desvio-padrão
Dureza (HB)	195	192	194	198	197	194,8	1,92

Fonte: o autor, 2016

4.1.2 Óleos

Os seguintes óleos foram utilizados:

- a) Biodiesel etílico de soja sem acréscimo de óleo Diesel (B100);
- b) Óleo Diesel S10 comum (adquirido em um posto de combustível).

4.1.3 Contra-corpo

A extremidade do pino em contato com o disco de teste alojou uma esfera de aço AISI/SAE 52100 temperado de 6mm de diâmetro.

4.1.4 Equipamentos

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) Tribômetro: equipamento para teste de desgaste (Figura 4.1).

Marca do equipamento: CSM Instruments.

Modelo do equipamento: não identificado.

Figura 4.1 – Tribômetro



Fonte: o autor, 2016.

- b) Perfilômetro: equipamento que permite a medição da topografia da superfície desgastada (Figura 4.2). O valor encontrado é usado por um software para cálculo da taxa de desgaste.

Marca do equipamento: Taylor Hobson Precision

Modelo do equipamento: Surtronic 25

Figura 4.2 – Perfilômetro



Fonte: o autor, 2016.

- c) Microscópio eletrônico de varredura: equipamento para avaliação visual da trilha de desgaste (Figura 4.3).

Marca do equipamento: Tescan

Modelo do equipamento: Vega 3

Figura 4.3 – Microscópio eletrônico de varredura.

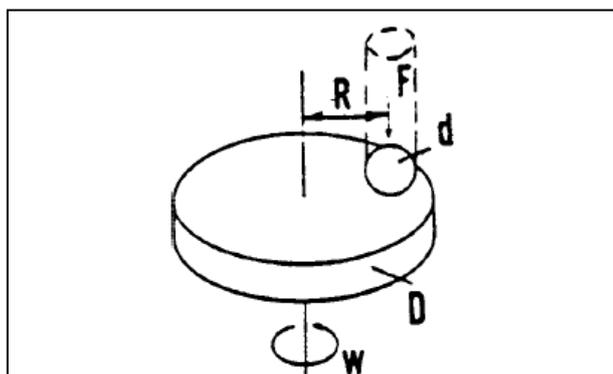


Fonte: o autor, 2015

4.2 METODOLOGIA

A configuração utilizada para realização do experimento tratou-se de um pino em cuja ponta há uma esfera metálica fixa apoiada perpendicularmente sobre um disco metálico, o qual apresentava movimento de rotação, conforme mostrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Sistema pino- disco



Fonte: norma ASTM G99-05

O pino foi pressionado sobre disco devido a uma carga suportada pelo braço que segurava o pino. Como resultado do teste, foi produzida uma trilha de desgaste circular sobre uma das faces do disco.

A Figura 4.4 mostra de maneira simples o sistema pino no disco, o qual consiste em um apoio para o corpo de prova (um disco, com diâmetro “D”) sob o qual é colocado perpendicularmente um pino (com uma esfera em sua extremidade de diâmetro “d”) a uma distância “R” do centro do disco. Sobre este pino é aplicada uma carga “F”. O equipamento faz com que o disco gire a uma velocidade angular controlada “w”, ou velocidade tangencial “v”.

A configuração de testes de laboratório requer especial atenção, pois numerosas características, parâmetros, e fatores devem ser levados em consideração. Isto deve-se ao fato de que atrito e desgaste não são propriedades intrínsecas dos materiais, mas dependem da interação dos componentes do sistema, conhecidos como pares de materiais e lubrificação interna (ASM HANDBOOK, 1998).

Os resultados de desgaste foram obtidos pela seleção de parâmetros de teste como distância de deslizamento, velocidade de rotação e carga.

Considera-se como variável dependente a taxa de desgaste específica da trilha gerada na superfície do disco e como variáveis independentes a carga aplicada ao pino, contra o disco, e a velocidade de deslizamento.

4.2.1 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova (discos) passaram pelas seguintes etapas:

- retífica: retificados de forma a garantir o paralelismo entre as faces;
- polimento: a face de teste foi polida com a utilização de lixas de gramatura 320, 500, 800, 1000, 1200 e finalmente polimento com alumina 1 μm ;
- limpeza: imediatamente antes do teste de desgaste, o disco foi submetido à limpeza com álcool etílico.

4.2.2 Teste dos corpos de prova

4.2.2.1 Teste a seco

Os corpos foram fixados em uma castanha, conforme mostrado na Figura 4.5; a perpendicularidade do pino foi garantida por meio de um prumo.

Figura 4.5 – Configuração para teste a seco.



Fonte: o autor, 2015.

Os parâmetros de teste foram os seguintes:

- cargas aplicadas: 5 N, 10 N e 20 N

b) velocidades de deslizamento: 5 cm/s, 10 cm/s e 20 cm/s;

c) distância de percorrida (deslizamento): 100 m;

d) raio da trilha de desgaste: 7 mm.

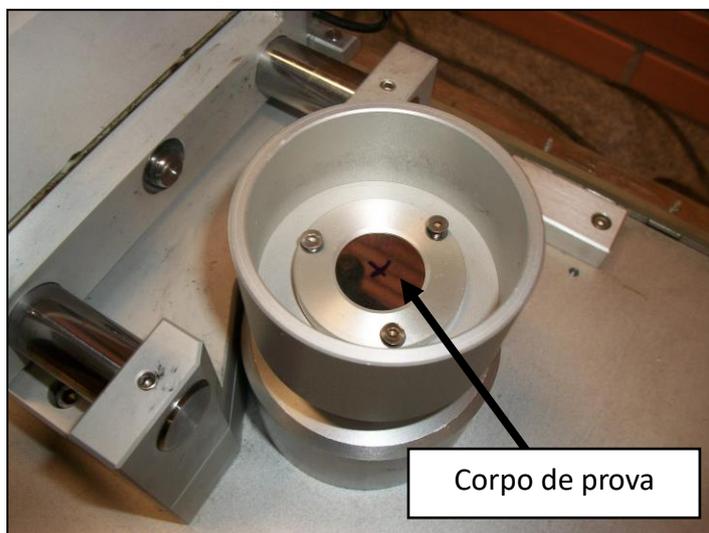
Considerou-se que a distância de 100 m é suficiente para apresentar resultados significativos para as condições testadas.

Imediatamente antes do teste a esfera (contra-corpo) foi limpa em álcool etílico.

4.2.2.2 Teste com lubrificante

Os corpos foram fixados na superfície interior de um recipiente rotativo através de um anel de contenção, fixado no fundo do recipiente por meio de três parafusos (Figura 4.6).

Figura 4.6 – Configuração para teste com lubrificante.



Fonte: o autor, 2015.

O óleo foi adicionado ao recipiente de forma a garantir que a superfície de teste ficasse sempre lubrificada; a perpendicularidade do pino foi garantida por meio de um prumo.

Os parâmetros de teste foram os mesmos do teste a seco, assim como o procedimento de limpeza da esfera.

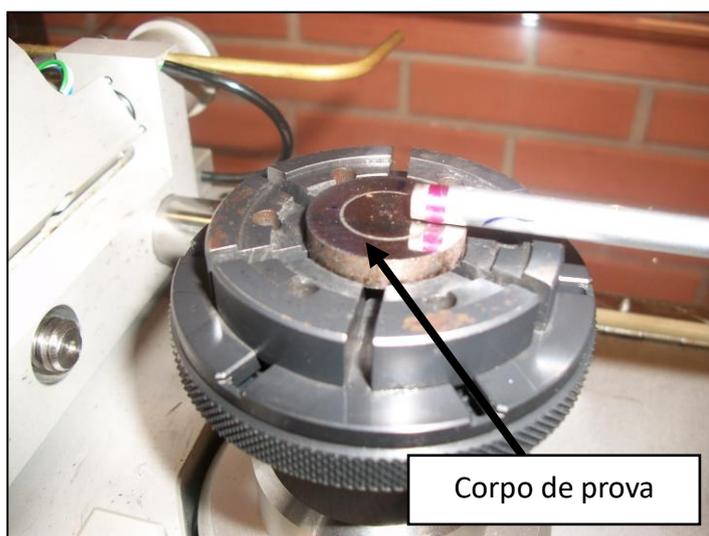
4.2.3 Medição da taxa de desgaste específica e coeficiente de atrito

A avaliação estatística da influência da lubrificação na qualidade da previsão por regressão da taxa de desgaste foi feita através da comparação dos coeficientes de regressão múltipla obtidos através de medições em três situações: uma a seco e duas com lubrificação (uma com óleo Diesel e outra com biodiesel).

Para cada um dos corpos de prova, quatro pontos da trilha foram medidos, de forma que pontos seguintes estivessem separados um do outro por cerca de 90°. O valor médio das quatro medições realizadas foi o valor considerado como taxa de desgaste atribuído ao corpo de prova. A Figura 4.7 mostra a medição de um corpo de prova.

A unidade de medida da taxa de desgaste específica é dada por mm^3/Nm , ou seja, leva-se em conta o volume desgastado da trilha pela carga aplicada ao pino e pela distância de deslizamento percorrida.

Figura 4.7 – Medição da trilha de desgaste.



Fonte: o autor, 2016.

4.2.4 Coleta de dados

Há três condições de teste: a seco, com lubrificante biodiesel e com lubrificante óleo Diesel comum. Para cada uma destas condições, os parâmetros previstos para variar foram a velocidade de deslizamento (assumindo valores 5 cm/s, 10 cm/s e 20 cm/s) e a carga aplicada (assumindo valores 5 N, 10 N e 20 N).

Para cada combinação de carga e velocidade foram feitos três ensaios, cada um com um corpo de prova, de forma a completar 27 corpos de prova ensaiados para cada condição de teste, perfazendo um total de 81 corpos ensaiados.

5 RESULTADOS

Os resultados das medições das taxas de desgaste das combinações testadas são apresentados nos quadros encontrados no Apêndice A.

5.1 CONDIÇÃO: A SECO

5.1.1 Dados coletados

Os dados coletados são apresentados no Quadro A.1 no Apêndice A.

Em relação ao Quadro A.1, há uma observação a ser feita: a análise dos dados relativos ao teste na condição sem lubrificação apresenta um valor discrepante, o qual pode afetar negativamente a qualidade da avaliação dos efeitos das variáveis independentes na taxa de desgaste específica. Trata-se do valor de 17,65 mm³/Nm para a taxa de desgaste obtido para o segundo corpo de prova na combinação velocidade igual a 20 cm/s e carga igual a 20 N. Para comparação, os dois outros corpos de prova (ensaiados nas mesmas condições) apresentaram os seguintes valores: 9,57 mm³/Nm e 10,24 mm³/Nm. O valor discrepante ocorreu devido a uma oscilação indevida do corpo de prova durante o teste. Por tal motivo este valor não foi considerado nos cálculos.

5.1.2 Plano de regressão

Com os dados coletados é possível determinar a equação do plano de regressão, que relaciona as variáveis independentes (velocidade de deslizamento e carga) à variável dependente (taxa de desgaste específica).

Para a determinação do plano é necessária a solução do sistema apresentado anteriormente na seção “2.4.4 Regressão Múltipla”, no qual as incógnitas são b_0 , b_1 e b_2 .

Para tanto, utilizam-se os valores contidos no Quadro A.4 apresentado no apêndice A.

Desse modo, o sistema apresenta-se como mostrado abaixo:

$$\begin{cases} 26b_0 + 295b_1 + 295b_2 = 53,6425 \\ 295b_0 + 4325b_1 + 3275b_2 = 901,0375 \\ 295b_0 + 3275b_1 + 4325b_2 = 816,25 \end{cases} \quad (5.1)$$

E possui a seguinte solução:

$$b_0 = -4,20$$

$$b_1 = 0,31$$

$$b_2 = 0,24$$

Assim, a equação de regressão múltipla estimada resulta em:

$$\hat{w} = -4,2 + 0,31c + 0,24v \quad (5.2)$$

Sendo que c representa a carga, v a velocidade de deslizamento e \hat{w} o valor estimado da taxa de desgaste para a situação de deslizamento a seco.

Pode-se entender os coeficientes da equação 5.4 da seguinte maneira:

-4,2: ponto em que o plano cruza o eixo da taxa de desgaste, quando a carga e a velocidade assumem valores nulos. Neste caso, não há sentido físico para este valor da taxa de desgaste, pois apresenta valor negativo. Tal valor foi obtido devido ao método de mínimos quadrados. Além disso, a avaliação do gráfico de resíduos indicou que o modelo empregado (sem elementos quadráticos) não é adequado; ou seja, a presença da parcela -4,2 pode ser resultado desta inadequação.

0,31: indica de quanto a taxa específica de desgaste aumenta quando a carga aumenta de uma unidade (1N), supondo que não haja alteração na velocidade de deslizamento.

0,24: indica de quanto a taxa específica de desgaste aumenta quando a velocidade de deslizamento aumenta de uma unidade (1 cm/s), supondo que não haja alteração na carga.

O mesmo entendimento pode ser empregado nos coeficientes das outras duas equações de planos (lubrificação com biodiesel e Diesel comum).

5.1.3 Coeficiente de regressão

A obtenção dos coeficientes de b_0 , b_1 e b_2 por sua vez permitiu o cálculo da variação explicada e da variação total, de forma a ser possível o cálculo de R^2 :

$$R^2 = \text{variação explicada} / \text{variação total} \quad (5.3)$$

Onde variação total é dada por $STQ = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ e variação explicada é dada

por $SQReg = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$

Com base nos valores coletados, obtém-se:

Variação explicada (SQReg) = 141,43

Variação total (STQ) = 198,47

Ou seja, $R^2 = 0,71$

E o valor ajustado resulta em:

R^2 ajustado = 0,68

Pode-se interpretar este valor da seguinte maneira: 68% da variação da taxa de desgaste a seco pode ser explicada pelas variáveis carga e velocidade de deslizamento.

Quanto maior o valor de R^2 , melhor a qualidade da predição.

5.1.4 Teste F

Utiliza-se o teste F para determinar se existe uma relação significativa entre a variável dependente (taxa específica de desgaste) e o conjunto de todas as variáveis independentes (carga e velocidade de deslizamento).

Para a construção da ANOVA, tem-se que:

$n = 26$ (uma vez que um dos corpos ensaiados foi desconsiderado)

$k = 2$

SQReg = 141,43

SQR = 57,04

Quadro 5.1: ANOVA para deslizamento a seco.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F
Regressão	141,43	2	70,72	28,52
Resíduo	57,04	23	2,48	
Total	198,47	25		

Fonte: o autor, 2016.

O valor F apresentado no Quadro 5.1 é $F = 28,52$; tabelas de distribuição F, para $\alpha = 0,05$, encontradas na literatura estatística, mostram que com dois graus de

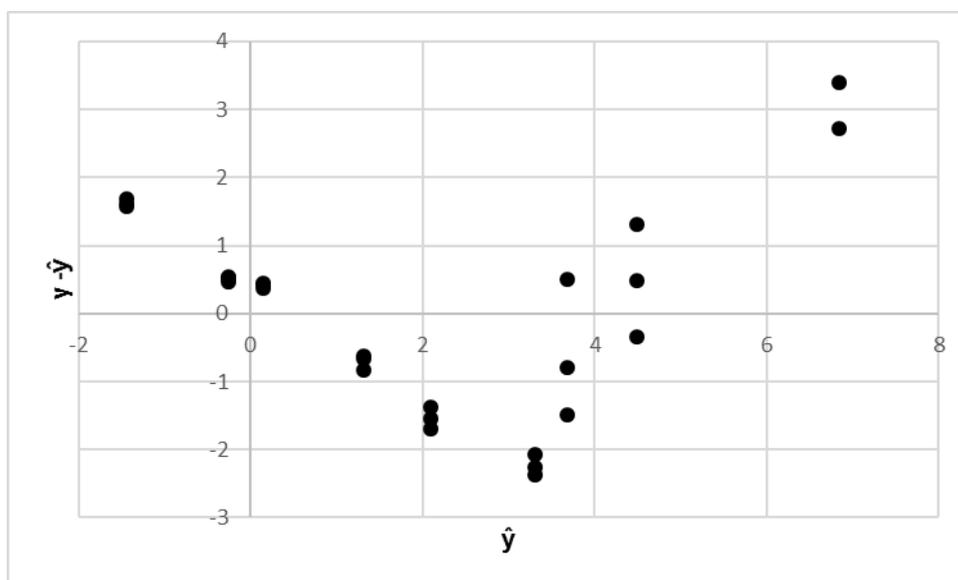
liberdade no numerador e vinte e três graus de liberdade no denominador tem-se que $F_{0,05} = 3,42$. Como o valor de F apresentado no quadro ANOVA (28,52) é maior que o valor de $F_{0,05} (3,42)$, rejeita-se H_0 e conclui-se que há uma relação significativa entre a taxa de desgaste e as variáveis independentes (carga e velocidade de deslizamento) quando se considera a situação de deslizamento a seco.

5.1.5 Avaliação de resíduos

Utiliza-se a avaliação do diagrama de resíduos versus \hat{y} para validação das suposições do modelo de regressão.

Para a situação de deslizamento a seco, os resíduos se apresentam conforme Figura 5.1:

Figura 5.1 – Resíduos: deslizamento a seco



Fonte: o autor, 2015

A avaliação do diagrama da Figura 5.1 indica a existência de indícios de padrão compatível com o formato de uma parábola. Tal comportamento pode indicar que o modelo linear não é adequado. É oportuno mencionar que a literatura alerta que o bom julgamento e experiência são importantes na interpretação dos diagramas de resíduos, uma vez que dificilmente um diagrama de resíduos se molda de maneira precisa aos padrões apresentados no tópico 2.4.4.3. Entretanto, considera-se tal modelo inadequado para relacionar as variáveis independentes

(carga e velocidade de deslizamento) com a variável dependente (taxa específica de desgaste).

5.1.6 ANOVA – Modelo de classificação dupla

É possível avaliar se a variável independente afeta de maneira significativa o comportamento da variável dependente. Como há duas variáveis independentes, é utilizada a ANOVA do modelo de classificação dupla.

Quadro 5.2: ANOVA para deslizamento a seco.

Fonte da variação	Soma de quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Teste F	F crítico
Velocidade	108,84	2	54,42	22,38	3,55
Carga	174,14	2	87,07	35,80	3,55
Interações	105,67	4	26,42	10,86	2,93
Dentro	43,77	18	2,43		
Total	432,43	26			

Fonte: o autor, 2016

Interpretação do Quadro 5.2:

Linha “amostra”: $F > F_{\text{crítico}}$, logo há diferenças mínimas significativas entre as taxas de desgaste em função da variação da velocidade;

Linha “coluna”: $F > F_{\text{crítico}}$, logo há diferenças mínimas significativas entre as taxas de desgaste em função da variação da carga;

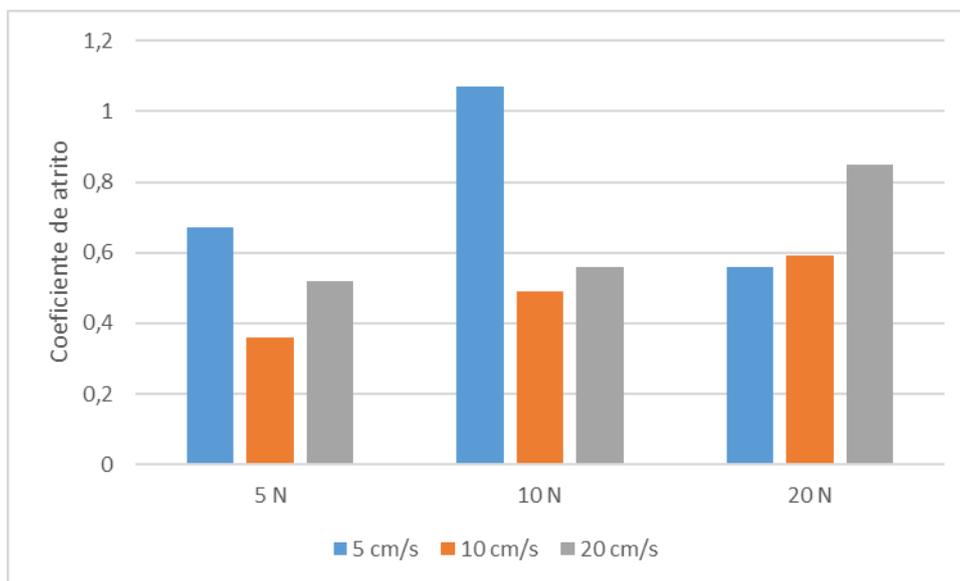
Linha “interações”: $F > F_{\text{crítico}}$, logo há diferenças mínimas significativas entre as repetições.

Assim, a variação de velocidade, a variação da carga, e a interação entre a carga e velocidade alteram, de modo significativo (ao nível de significância de 5%), a taxa de desgaste.

5.1.7 Coeficiente de atrito

Os vários coeficientes de atrito obtidos para diferentes combinações de carga e velocidade de deslizamento (medição de uma amostra por combinação), na condição de deslizamento a seco, são apresentados na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Coeficiente de atrito no deslizamento a seco



Fonte: o autor, 2016

5.2 CONDIÇÃO: LUBRIFICAÇÃO COM BIODIESEL (B100)

5.2.1 Dados coletados

Ver Quadro A.5 apresentado no Apêndice A.

5.2.2 Plano de Regressão

Para a determinação do plano de ajuste aos dados coletados é necessária a solução do sistema apresentado anteriormente na seção “2.4.4 Regressão Múltipla”, no qual as incógnitas são b_0 , b_1 e b_2 .

Para tanto, utiliza-se os valores contidos no Quadro A.5 apresentado no Apêndice A.

Desse modo, o sistema apresenta-se como mostrado no sistema 5.4:

$$\begin{cases} 27b_0 + 315b_1 + 315b_2 = 20,72 \\ 315b_0 + 4725b_1 + 3675b_2 = 300,69 \\ 315b_0 + 3675b_1 + 4725b_2 = 224,69 \end{cases} \quad (5.4)$$

E possui a seguinte solução:

$$b_0 = 0,301$$

$$b_1 = 0,056$$

$$b_2 = -0,016$$

Assim, a equação de regressão múltipla estimada resulta em:

$$\hat{w} = 0,301 + 0,056c - 0,016v \quad (5.5)$$

Sendo que c representa a carga, v a velocidade de deslizamento e \hat{w} o valor estimado da taxa de desgaste para a situação de deslizamento com lubrificante biodiesel B100.

5.2.3 Coeficiente de Regressão

A obtenção dos valores de b_0 , b_1 e b_2 por sua vez permitiu o cálculo da variação explicada e da variação total, de forma a ser possível o cálculo de R:

Com base nos valores coletados, obtem-se:

$$\text{Variação explicada (SQReg)} = 3,58$$

$$\text{Variação total (STQ)} = 4,43$$

$$\text{Ou seja, } R^2 = 0,81$$

E o valor ajustado resulta em:

$$R^2_{\text{ajustado}} = 0,79$$

Pode-se interpretar este valor da seguinte maneira: 79% da variação da taxa de desgaste com lubrificante biodiesel pode ser explicada pelas variáveis carga e velocidade de deslizamento.

5.2.4 Teste F

Utiliza-se o teste F para determinar se existe uma relação significativa entre a variável dependente (taxa específica de desgaste) e o conjunto de todas as variáveis independentes (carga e velocidade de deslizamento).

Para este caso:

$$n = 27$$

$$k = 2$$

$$SQReg = 2,58$$

$$SQR = 0,85$$

Quadro 5.3: ANOVA para deslizamento lubrificado por biodiesel.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F
Regressão	3,58	2	1,79	44,75
Resíduo	0,85	24	0,04	
Total	4,43	26		

Fonte: o autor, 2016.

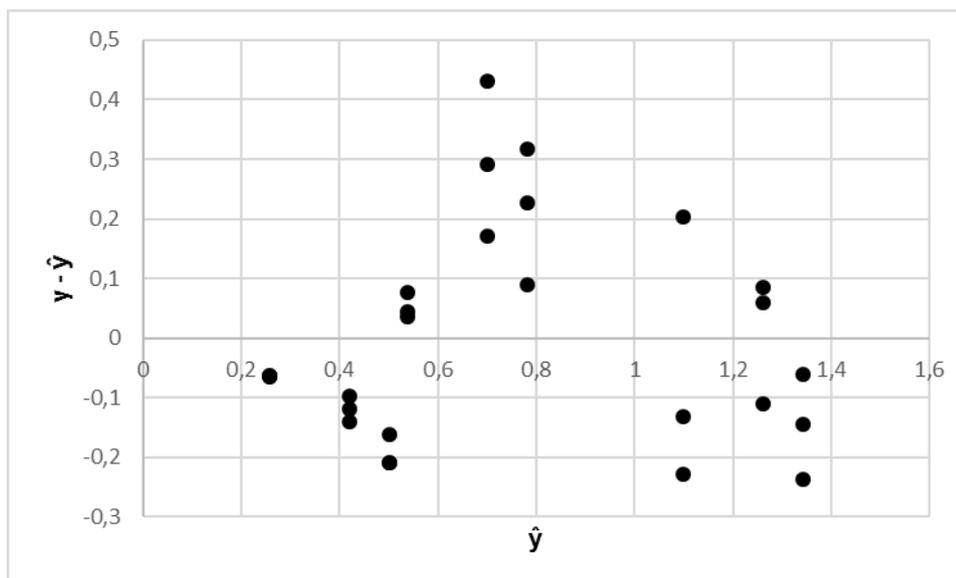
O valor F apresentado no quadro 5.3 é $F = 44,75$; tabelas de distribuição F, para $\alpha = 0,05$, encontradas na literatura estatística, mostram que com dois graus de liberdade no numerador e vinte e quatro graus de liberdade no denominador tem-se $F_{0,05} = 3,40$. Como o valor de F apresentado no quadro ANOVA (44,75) é maior que o valor de $F_{0,05}$ (3,40), rejeita-se H_0 e concluímos que há uma relação significativa entre a taxa de desgaste e as variáveis independentes (carga e velocidade de deslizamento) quando se considera a situação de deslizamento lubrificado com biodiesel.

5.2.5 Avaliação de resíduos

Utiliza-se a avaliação do diagrama de resíduos versus \hat{y} para validação das suposições do modelo de regressão.

Para a situação de deslizamento lubrificado por biodiesel, os resíduos se apresentam conforme Figura 5.3:

Figura 5.3 – Resíduos: deslizamento lubrificado com biodiesel



Fonte: o autor, 2015

A avaliação do diagrama da figura 5.2 indica que não há padrão que possa levar à negação das suposições feitas sobre o modelo. Assim, conclui-se que o modelo é válido.

5.2.6 ANOVA – Modelo de classificação dupla

De maneira similar à análise da situação com deslizamento a seco, utiliza-se a ANOVA para avaliar se a variável independente afeta de maneira significativa o comportamento da variável dependente.

Quadro 5.4 - ANOVA para deslizamento com biodiesel

Fonte da variação	Soma de quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Teste F	F crítico
Velocidade	0,33	2	0,17	14,78	3,55
Carga	3,80	2	1,90	168,31	3,55
Interações	0,10	4	0,02	2,21	2,93
Dentro	0,20	18	0,01		
Total	4,44	26			

Fonte; o autor, 2016.

Interpretação do Quadro 5.4:

Linha “amostra”: $F > F_{\text{crítico}}$, logo há diferenças mínimas significativas entre as taxas de desgaste em função da variação da velocidade;

Linha “coluna”: $F > F_{\text{crítico}}$, logo há diferenças mínimas significativas entre as taxas de desgaste em função da variação da carga;

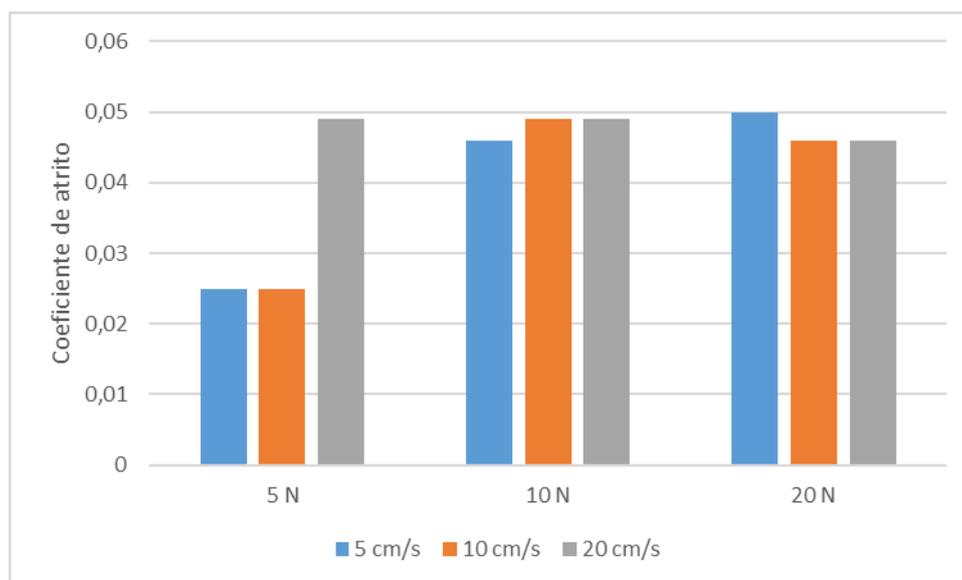
Linha “interações”: $F < F_{\text{crítico}}$, logo não há diferenças mínimas significativas entre as repetições.

Assim, tanto a variação de velocidade como a variação da carga alteram, de modo significativo, a taxa de desgaste (nível de significância de 5%). Entretanto não é possível afirmar que haja interação entre as variáveis.

5.2.7 Coeficiente de atrito

Os vários coeficientes de atrito obtidos para diferentes combinações de carga e velocidade de deslizamento (medição de uma amostra por combinação), na condição de deslizamento lubrificado com óleo biodiesel, são apresentados na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Coeficiente de atrito no deslizamento com biodiesel



Fonte: o autor, 2016

5.3 CONDIÇÃO: LUBRIFICAÇÃO COM DIESEL COMUM

5.3.1 Dados coletados

Ver Quadro A.3 apresentado no Apêndice A.

5.3.2 Plano de regressão

Para a determinação do plano de ajuste aos dados coletados é necessária a solução do sistema apresentado anteriormente na seção “2.4.4 Regressão Múltipla”, no qual as incógnitas são b_0 , b_1 e b_2 .

Para tanto, utilizam-se os valores contidos no Quadro A.6 apresentado no Apêndice A.

Desse modo, obtém-se o sistema 5.6:

$$\begin{cases} 27b_0 + 315b_1 + 315b_2 = 18,49 \\ 315b_0 + 4725b_1 + 3675b_2 = 223,72 \\ 315b_0 + 3675b_1 + 4725b_2 = 199,96 \end{cases} \quad (5.6)$$

E possui a seguinte solução:

$$b_0 = 0,770$$

$$b_1 = 0,0076$$

$$b_2 = -0,015$$

Assim, a equação de regressão múltipla estimada resulta em:

$$\hat{w} = 0,77 + 0,0076c - 0,015v \quad (5.7)$$

Sendo que c representa a carga, v a velocidade de deslizamento e \hat{w} o valor estimado da taxa de desgaste para a situação de deslizamento com lubrificante Diesel comum.

5.3.3 Coeficiente de Regressão

A obtenção dos valores de b_0 , b_1 e b_2 por sua vez permitiu o cálculo da variação explicada e da variação total, de forma a ser possível o cálculo de R^2 :

Com base nos valores coletados, obtém-se:

$$\text{Variação explicada (SQReg)} = 0,91$$

$$\text{Variação total (STQ)} = 1,21$$

$$\text{Ou seja, } R^2 = 0,75$$

E o valor ajustado resulta em:

$$R^2_{\text{ajustado}} = 0,73$$

Pode-se interpretar este valor da seguinte maneira: 73% da variação da taxa de desgaste com lubrificante Diesel comum pode ser explicada pelas variáveis carga e velocidade de deslizamento.

5.3.4 Teste F

Utiliza-se o teste F para determinar se existe uma relação significativa entre a variável dependente (taxa específica de desgaste) e o conjunto de todas as variáveis independentes (carga e velocidade de deslizamento).

Para este caso:

$$n = 27$$

$$k = 2$$

$$SQReg = 0,91$$

$$SQR = 0,30$$

Quadro 5.5 - ANOVA para deslizamento lubrificado por diesel comum.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F
Regressão	0,91	2	0,46	46
Resíduo	0,30	24	0,01	
Total	1,21	26		

Fonte: o autor, 2016.

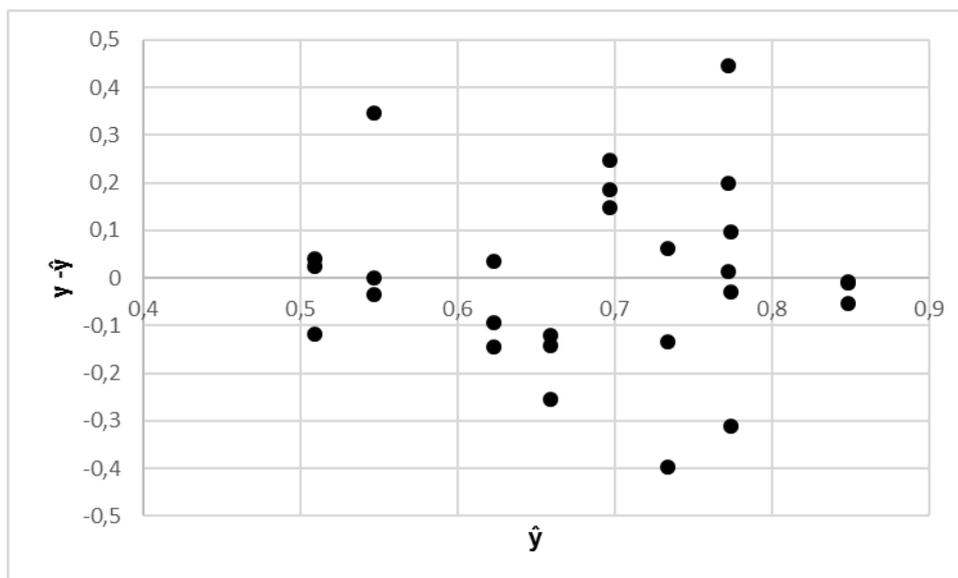
O valor F apresentado no Quadro 5.5 é $F = 46$; tabelas de distribuição F, para $\alpha = 0,05$, encontradas na literatura estatística, mostram que com dois graus de liberdade no numerador e vinte e quatro graus de liberdade no denominador tem-se $F_{0,05} = 3,40$. Como o valor de F apresentado no quadro ANOVA (46) é maior que o valor de $F_{0,05}$ (3,40), rejeita-se H_0 e conclui-se que há uma relação significativa entre a taxa de desgaste e as variáveis independentes (carga e velocidade de deslizamento) quando se considera a situação de deslizamento lubrificado com Diesel comum.

5.3.5 Avaliação dos resíduos

Utiliza-se a avaliação do diagrama de resíduos para validação das suposições do modelo de regressão.

Para a situação de deslizamento lubrificado por Diesel comum, os resíduos se apresentam conforme Figura 5.5:

Figura 5.5 – Resíduos: deslizamento lubrificado com diesel comum.



Fonte: o autor, 2015.

A avaliação do diagrama da Figura 5.5 indica não indica a existência de padrão que implique a negação das suposições do modelo. Assim, concluímos que o modelo é válido.

5.3.6 ANOVA – Modelo de classificação dupla

De maneira similar à análise da situação com deslizamento a seco, utiliza-se a ANOVA para avaliar se a variável independente afeta de maneira significativa o comportamento da variável dependente.

Interpretação do Quadro 5.6:

Linha “amostra”: $F > F_{\text{crítico}}$, logo há diferenças mínimas significativas entre as taxas de desgaste em função da variação da velocidade;

Linha “coluna”: $F > F_{\text{crítico}}$, logo há diferenças mínimas significativas entre as taxas de desgaste em função da variação da carga;

Linha “interações”: $F < F_{\text{crítico}}$, logo não há diferenças mínimas significativas entre as repetições.

Na avaliação mostrada no Quadro 5.6, a velocidade está como amostra e a carga está como coluna:

Quadro 5.6 - ANOVA para deslizamento com Diesel comum

Fonte da variação	Soma de quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Teste F	F crítico
Velocidade	0,24	2	0,12	5,12	3,55
Carga	0,48	2	0,24	10,12	3,55
Interações	0,07	4	0,02	0,69	2,93
Dentro	0,43	18	0,02		
Total	1,21	26			

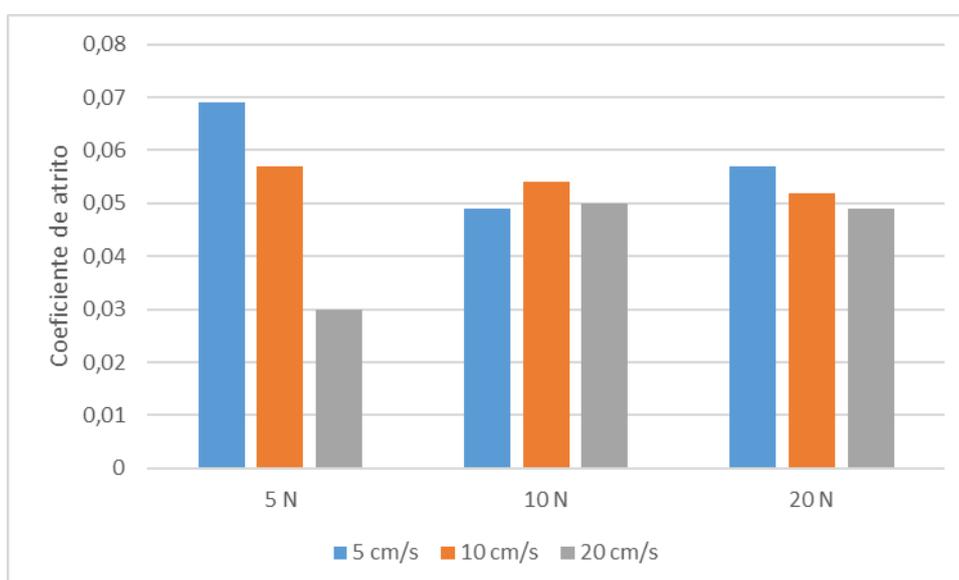
Fonte: o autor, 2016.

Assim, tanto a variação de velocidade como a variação da carga alteram, de modo significativo, a taxa de desgaste (nível de significância de 5%). Entretanto não é possível afirmar que haja interação entre as variáveis.

5.3.7 Coeficiente de atrito

Os vários coeficientes de atrito obtidos para diferentes combinações de carga e velocidade de deslizamento (medição de uma amostra por combinação), na condição de deslizamento lubrificado com óleo Diesel, são apresentados na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Coeficiente de atrito no deslizamento com Diesel



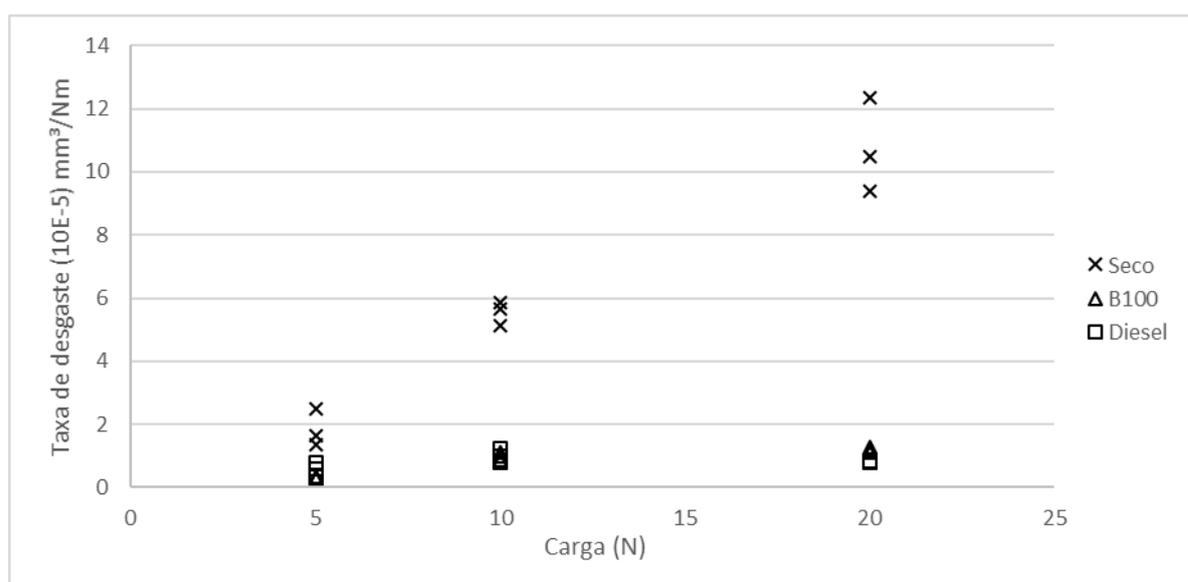
Fonte: o autor, 2016

5.4 COMPARAÇÃO ENTRE TAXAS DE DESGASTE ESPECÍFICAS

5.4.1 Efeito da variação da carga

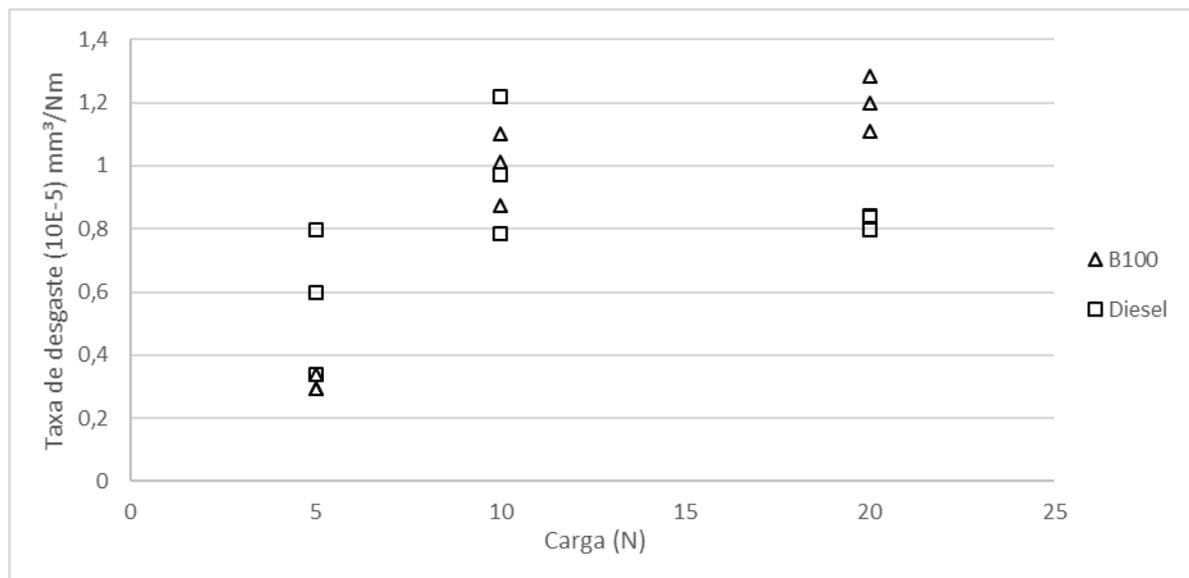
As Figuras de 5.7 a 5.12 apresentam uma comparação entre os resultados obtidos nas três situações de ensaio (sem lubrificação, lubrificação com biodiesel e lubrificação com Diesel comum), para as velocidades de 5 cm/s, 10 cm/s e 20 cm/s.

Figura 5.7 - comparativo de taxa de desgaste (seco, B100, Diesel) para velocidade de deslizamento de 5 cm/s



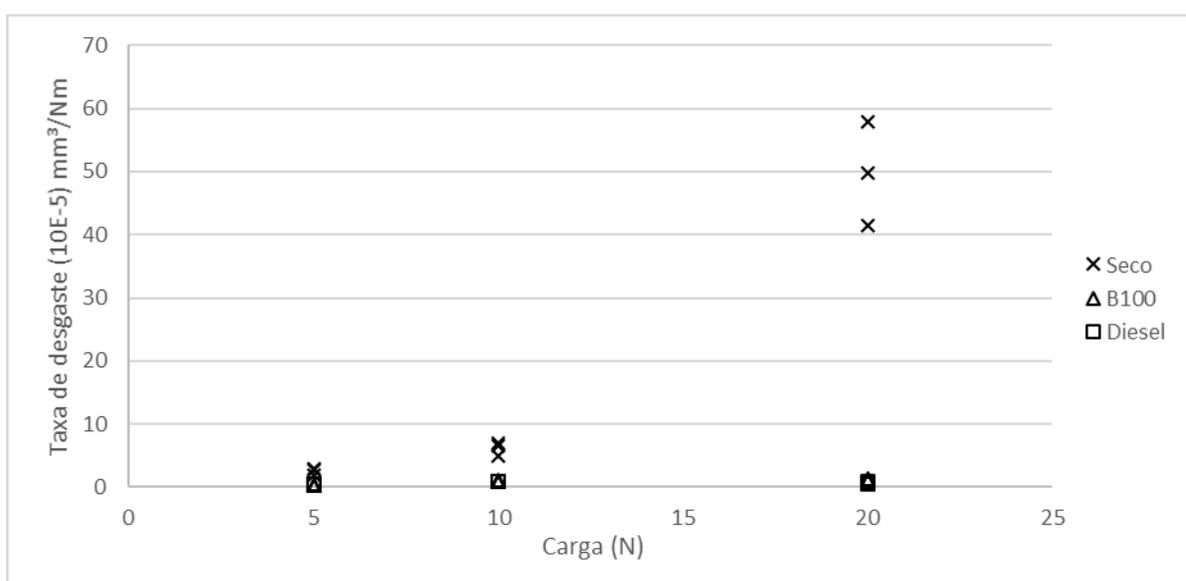
Fonte: o autor, 2016.

Figura 5.8 - comparativo de taxa de desgaste (B100, Diesel) para velocidade de deslizamento de 5 cm/s



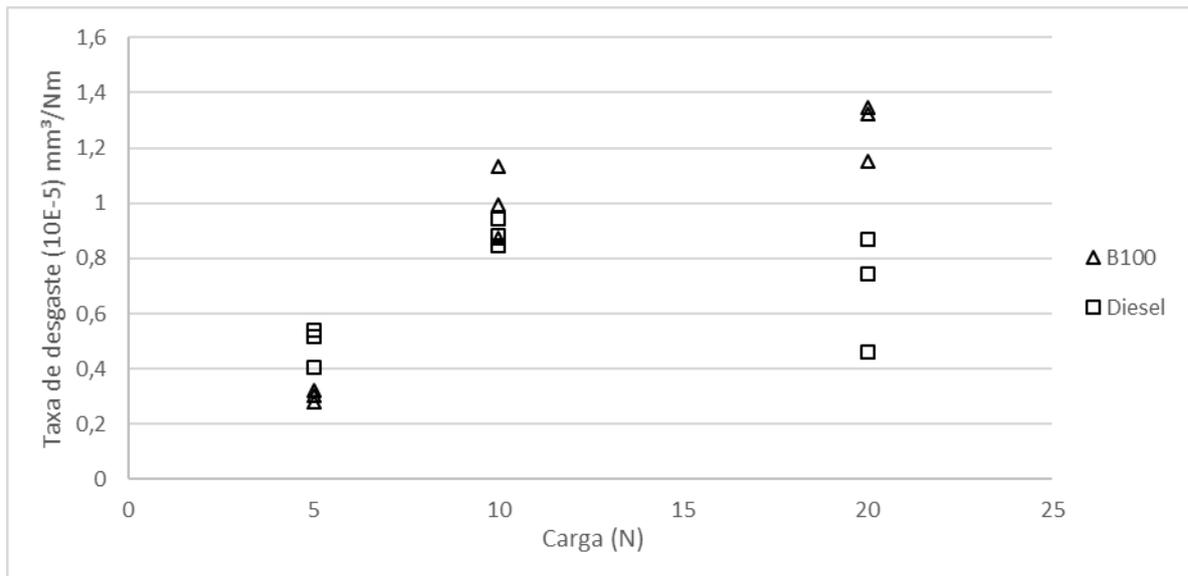
Fonte: o autor, 2016.

Figura 5.9 - comparativo de taxa de desgaste (seco, B100, Diesel) para velocidade de deslizamento de 10 cm/s



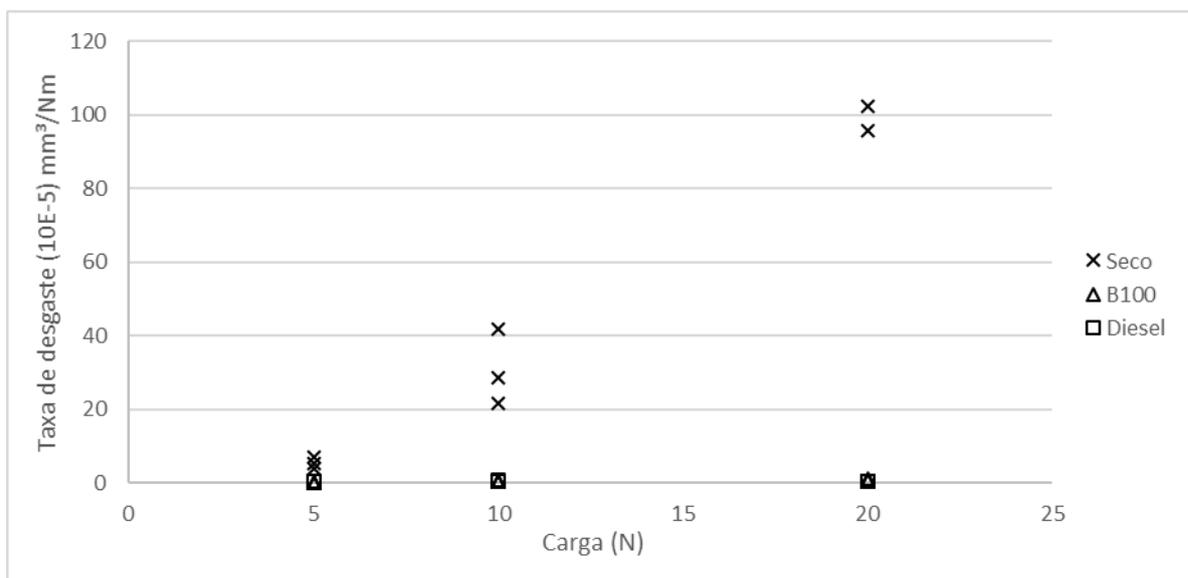
Fonte: o autor, 2016.

Figura 5.10 - comparativo de taxa de desgaste (B100, Diesel) para velocidade de deslizamento de 10 cm/s



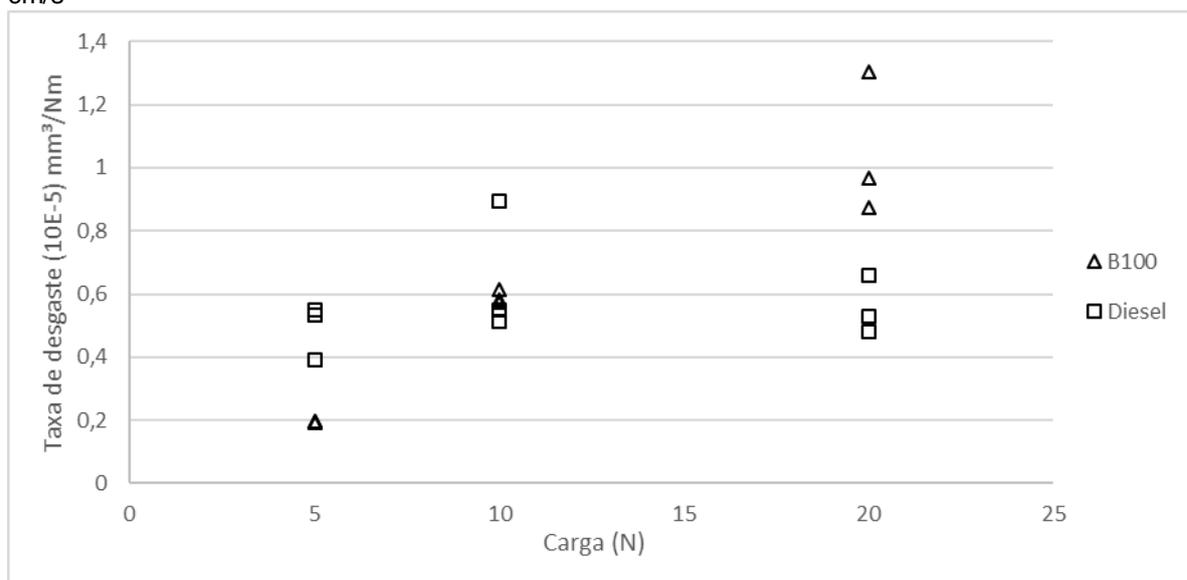
Fonte: o autor, 2016.

Figura 5.11 - comparativo de taxa de desgaste (seco, B100, Diesel) para velocidade de deslizamento de 20 cm/s



Fonte: o autor, 2016.

Figura 5.12 - comparativo de taxa de desgaste (B100, Diesel) para velocidade de deslizamento de 20 cm/s

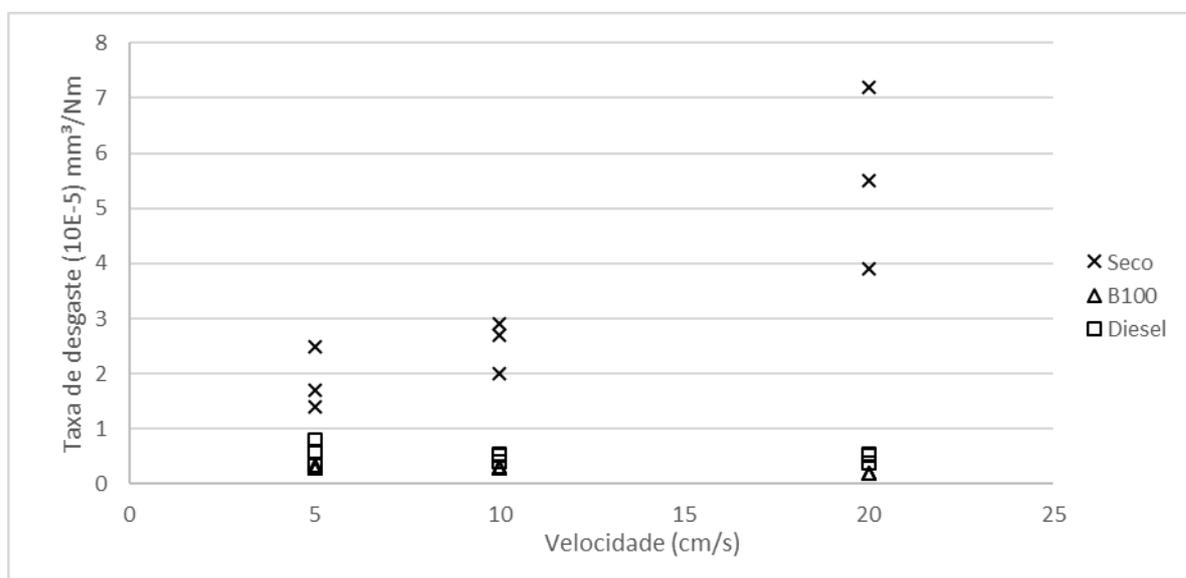


Fonte: o autor, 2016.

5.4.2 Efeito da variação da velocidade por carregamento

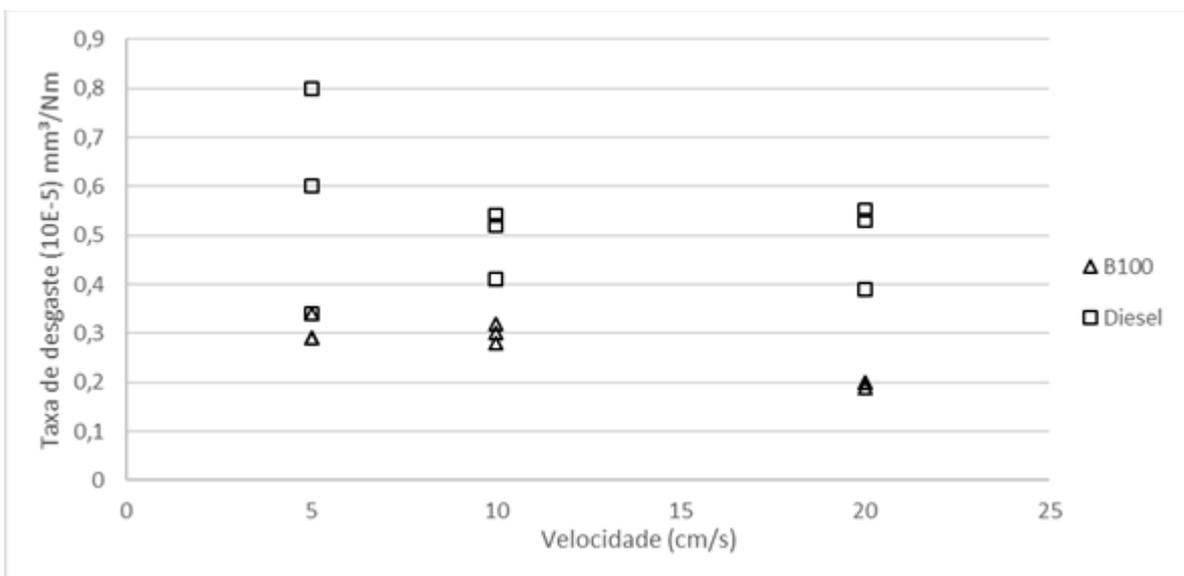
As Figuras de 5.13 a 5.18 apresentam uma comparação entre os resultados obtidos nas três situações de ensaio (sem lubrificação, lubrificação com biodiesel e lubrificação com Diesel comum), para as cargas de 5 N, 10 N e 20 N.

Figura 5.13 - comparativo de taxa de desgaste (seco, B100, Diesel) para carga de 5N



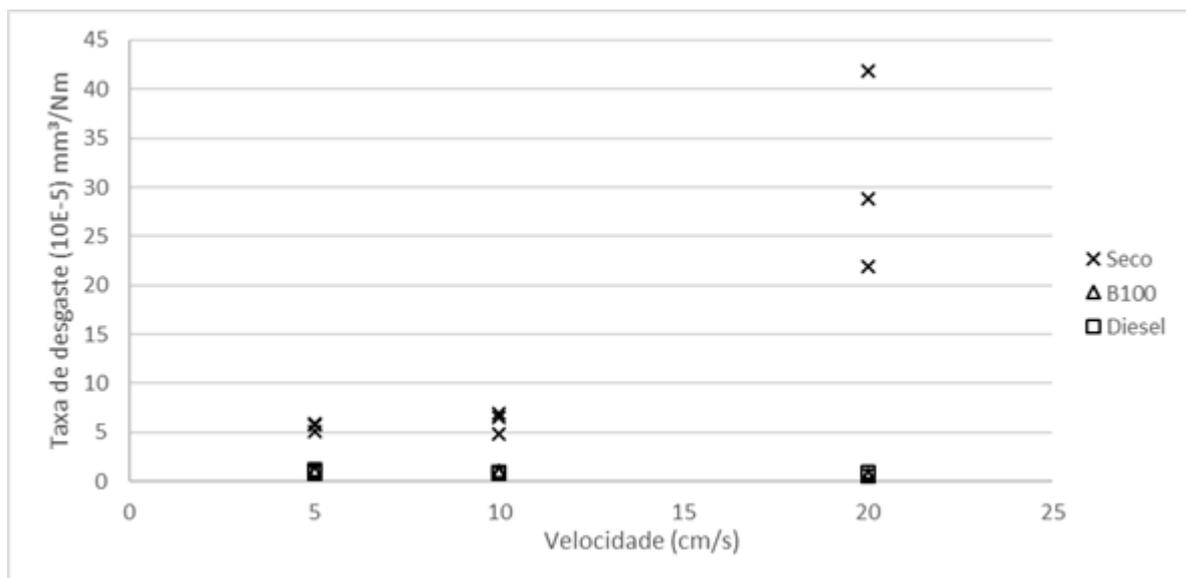
Fonte: o autor, 2016.

Figura 5.14 - comparativo de taxa de desgaste (B100, Diesel) para carga de 5N



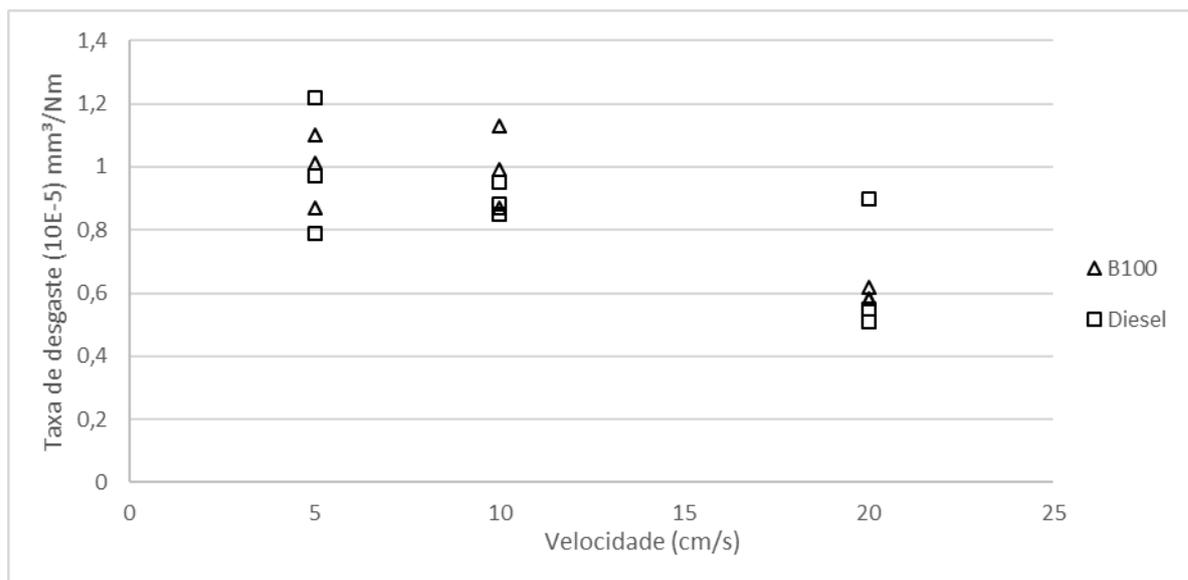
Fonte: o autor, 2016.

Figura 5.15 - comparativo de taxa de desgaste (seco, B100, Diesel) para carga de 10N



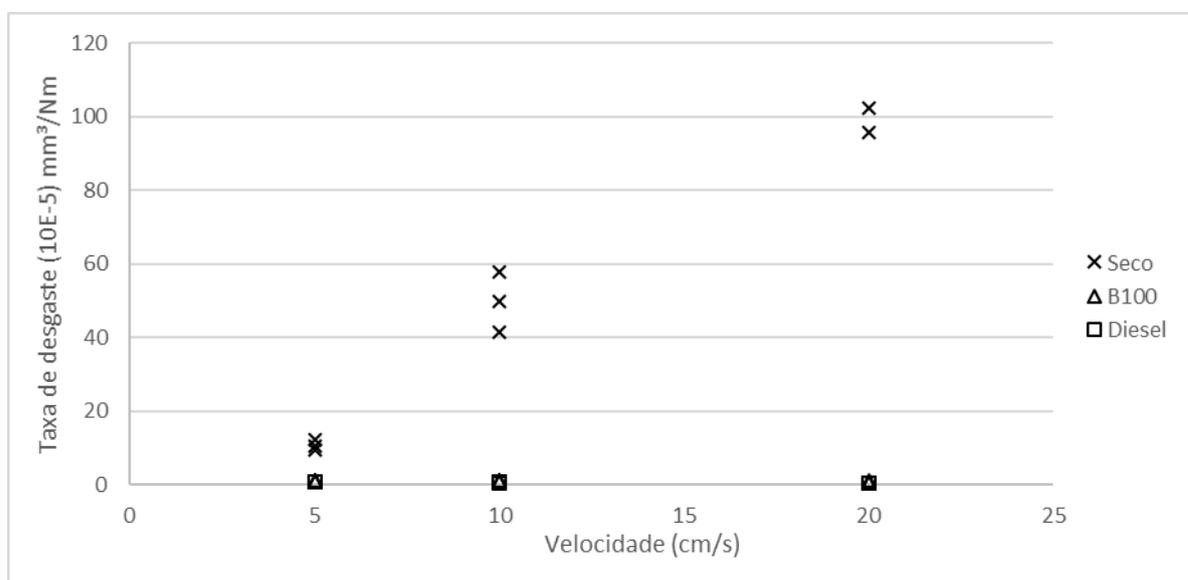
Fonte: o autor, 2016.

Figura 5.16 - comparativo de taxa de desgaste (B100, Diesel) para carga de 10N



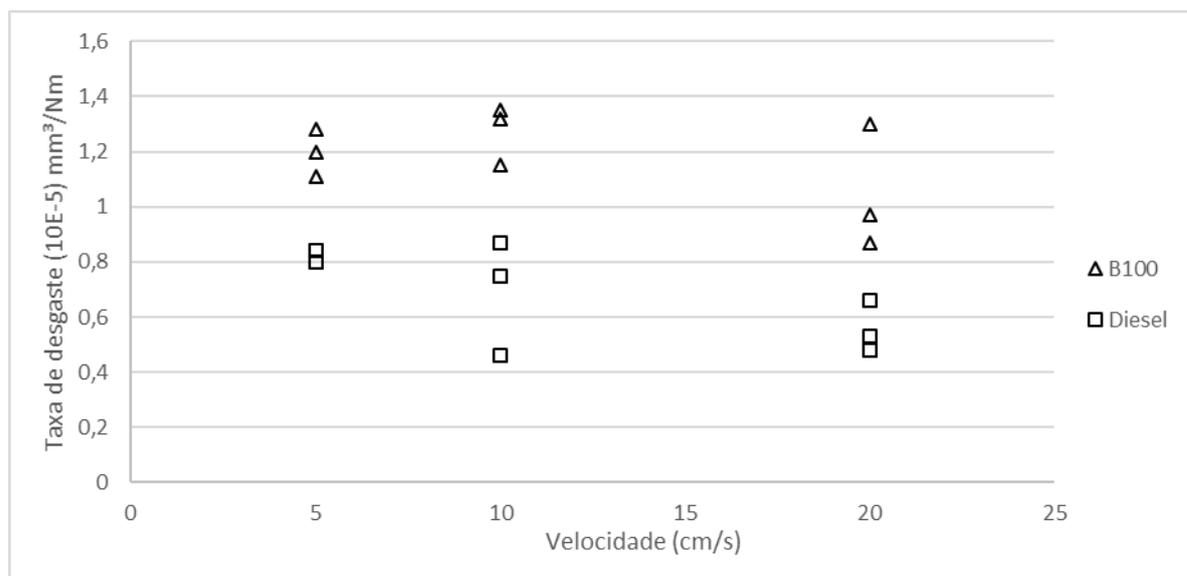
Fonte: o autor, 2016.

Figura 5.17 - comparativo de taxa de desgaste (seco, B100, Diesel) para carga de 20N



Fonte: o autor, 2016.

Figura 5.18 - comparativo de taxa de desgaste (B100, Diesel) para carga de 20 N

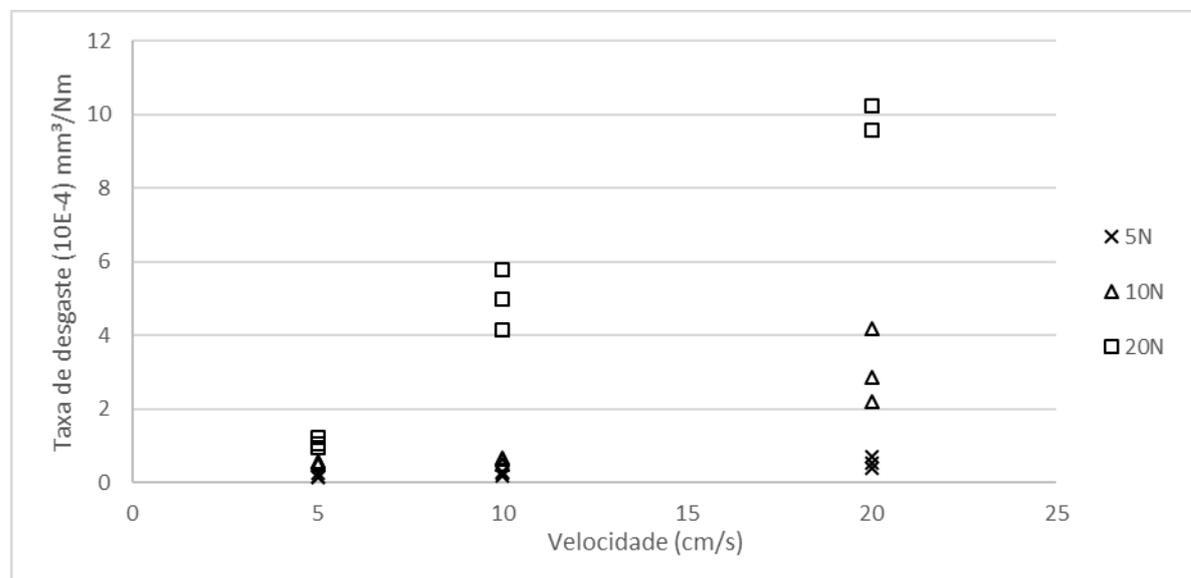


Fonte: o autor, 2016.

5.4.3 Efeito da variação da velocidade por situação de lubrificação.

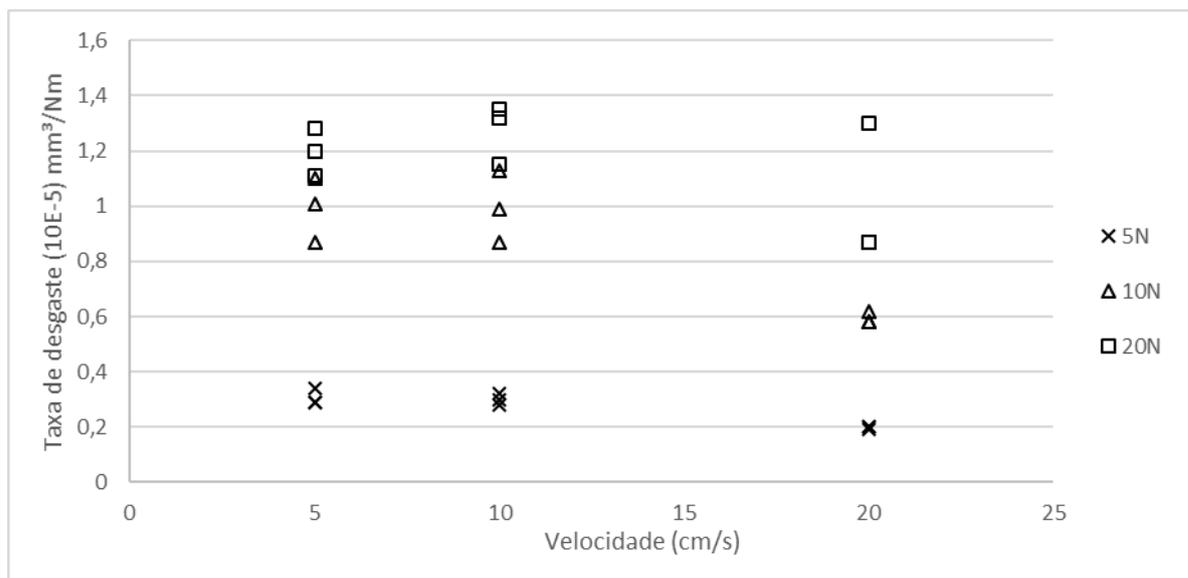
As Figuras de 5.19 a 5.21 a seguir apresentam uma comparação entre os resultados obtidos para a taxa de desgaste específica em função da velocidade, para as cargas de 5 N, 10 N e 20 N.

Figura 5.19 - comparativo de taxa de desgaste (seco) em função da carga e velocidade



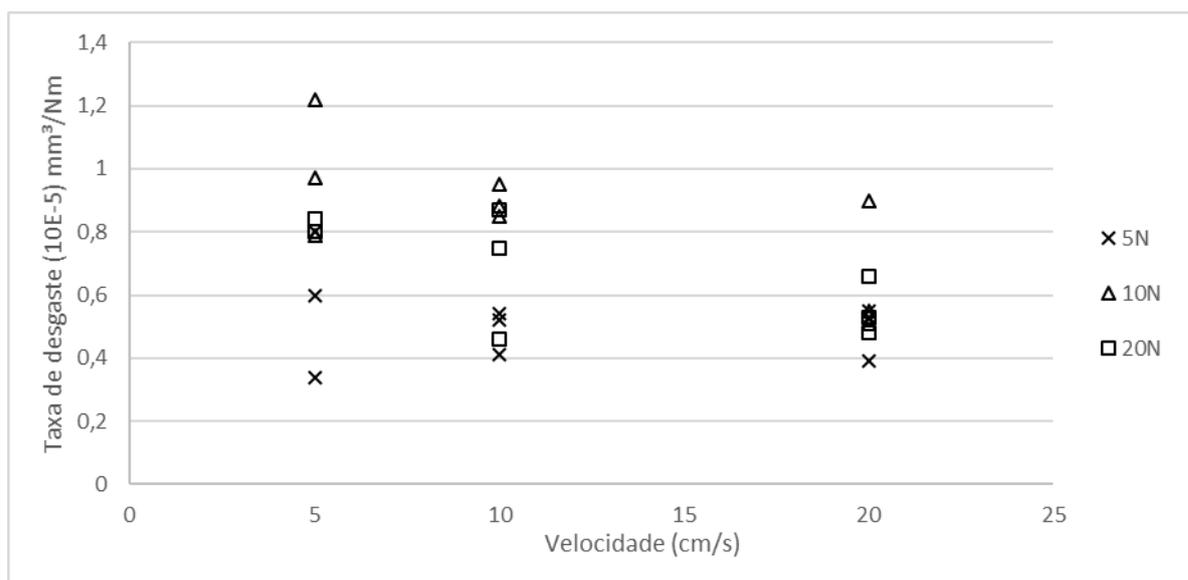
Fonte: o autor, 2016.

Figura 5.20 - comparativo de taxa de desgaste (B100) em função da carga e velocidade



Fonte: o autor, 2016.

Figura 5.21 - taxa de desgaste (Diesel) em função da carga e velocidade



Fonte: o autor, 2016.

5.5 TRILHAS DE DESGASTE

As trilhas de desgaste dos discos de prova foram avaliadas em microscópio eletrônico de varredura como intuito de identificar os mecanismos de desgaste

envolvidos nos testes realizados. Podem ser observadas no Apêndice C, Figuras C.1 a C.6.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 TAXA DE DESGASTE ESPECÍFICA

Para a faixa de valores utilizados de carga e velocidade de deslizamento, observou-se que, para um aumento da carga, mantendo-se constante a velocidade, ocorre um aumento da taxa de desgaste específica, o que é compatível com a equação de Archard, apresentada anteriormente (equação 2.1). Já para um aumento da velocidade de deslizamento, mantendo-se constante a carga, há dois comportamentos observados: na condição de deslizamento a seco nota-se um aumento significativo da taxa de desgaste, mas na condição lubrificada, não há variação significativa quando o aumento é de 5 cm/s para 10 cm/s, e há uma leve redução quando o aumento ocorre de 10 cm/s para 20 cm/s, como pode ser observado nas Figuras 5.19 a 5.21. Tal redução pode ser explicada pelo surgimento de uma pressão hidrodinâmica no interior do óleo, resultante do aumento da velocidade de deslizamento, o que reduz a força aplicada no disco, o que acaba por reduzir a taxa de desgaste.

Com base nas medições realizadas, foi possível determinar os planos de regressão que relacionam as variáveis independentes (carga e velocidade de deslizamento) e a variável dependente (taxa específica de desgaste) nas três condições de deslizamento (sem lubrificação, e lubrificado com óleo biodiesel e óleo Diesel).

Para cada um dos planos foi calculado seu respectivo coeficiente de determinação, que avalia quão boa é a capacidade de o plano explicar como o comportamento das variáveis independentes afeta a variável dependente.

Os resultados apresentados anteriormente mostram os seguintes valores para os coeficientes de determinação ajustado das três situações ensaiadas:

Biodiesel (B100): R^2 ajustado = 0,79

Diesel comum: R^2 ajustado = 0,73

Seco: R^2 ajustado = 0,68

Nota-se que a equação gerada para a situação de deslizamento lubrificado com óleo biodiesel é aquela na qual o comportamento das variáveis independentes (velocidade de deslizamento e carga) melhor explica o comportamento da variável dependente (taxa de desgaste), uma vez que apresenta o maior R^2 ajustado. Uma

possível explicação para o melhor ajuste em relação ao biodiesel pode ser a melhor lubrificação e conseqüentemente menor variabilidade de resultados, o que pode ser corroborado pelos resultados do coeficiente de atrito.

Por sua vez, a equação gerada para a situação de deslizamento a seco é aquela na qual as variáveis independentes menos explicam o comportamento da variável dependente, já que R^2 ajustado é de apenas 0,68. Tal valor pode ser explicado pelo fato de que o modelo linear não é adequado para relacionar as variáveis independentes com a variável dependente, conforme a análise de resíduos indicou.

Quanto ao coeficiente de determinação ajustado, a equação gerada para a situação de deslizamento com óleo Diesel ocupa uma posição intermediária.

Uma vez que se utiliza o método dos mínimos quadrados para obtenção dos coeficientes das equações dos planos, um maior valor de R^2 ajustado para a situação de deslizamento lubrificado com óleo biodiesel significa que os pontos resultantes das combinações de velocidade, carga e taxa de desgaste para esta situação se aproximam mais do plano do que as outras situações (lubrificação com óleo Diesel comum e sem lubrificação). Tal comportamento para o coeficiente do caso óleo biodiesel pode ser explicado por dois motivos: para o aumento da carga, com velocidade constante, a taxa de desgaste específica do óleo biodiesel apresenta um comportamento que mais se aproxima de uma reta, em relação as duas outras situações; quando a carga é mantida constante e apenas a velocidade sofre variação, o comportamento da taxa de desgaste específica dos óleos biodiesel e Diesel são semelhantes, e mais próximos de uma reta que na situação sem lubrificação.

As equações dos planos-resposta estão apresentadas abaixo:

Situação de deslizamento a seco, conforme equação 5.4, reproduzida abaixo:

$$\hat{w} = -4,2 + 0,31c + 0,24v$$

Situação de deslizamento lubrificado com óleo biodiesel, conforme equação 5.8, reproduzida abaixo:

$$\hat{w} = 0,301 + 0,056c - 0,016v$$

Situação de deslizamento lubrificado com óleo diesel comum, conforme equação 5.12, reproduzida abaixo:

$$\hat{w} = 0,77 + 0,0076c - 0,015v$$

Para todas as equações acima, c se refere à carga aplicada, v à velocidade de deslizamento, e \hat{w} se refere à taxa de desgaste.

No deslizamento a seco, nota-se que a carga tem mais influência que a velocidade para o resultado da taxa de desgaste: a cada variação de uma unidade da carga resulta em um aumento de 0,31 no valor da taxa de desgaste quando a outra variável se mantém constante; já a variação de uma unidade da velocidade resulta em um aumento no valor da taxa de apenas 0,24.

No deslizamento lubrificado com óleo biodiesel, a carga tem um efeito positivo na taxa de desgaste, uma vez que o aumento da carga causa aumento na taxa de desgaste específica já o aumento da velocidade resulta numa diminuição da taxa de desgaste. Além disso, uma variação na carga causa maior impacto que uma variação da velocidade na variação da taxa de desgaste específica.

Para o deslizamento lubrificado com óleo Diesel, similar à situação do biodiesel, o aumento da carga de 5 N para 10 N tem um efeito diretamente proporcional na taxa de desgaste específica; entretanto, para a carga de 20 N, nota-se a manutenção, ou até mesmo redução, do valor da taxa de desgaste específica em relação a cargas inferiores. Por sua vez, o aumento da velocidade tem um efeito negativo, similar ao observado nos ensaios com biodiesel. Uma vez que a variação da taxa de desgaste específica em função da variação da carga não ocorre linearmente, o método dos mínimos quadrados calculou um coeficiente menor para a carga do que para a velocidade, em módulo.

6.2 COEFICIENTE DE ATRITO

As Figuras de B.1 a B.18 no Apêndice B apresentam a variação do coeficiente de atrito nas três condições de lubrificação: sem lubrificação, lubrificado com óleo Diesel e lubrificado com biodiesel.

Pode-se observar que, de um modo geral, o coeficiente de atrito na situação sem lubrificação é maior uma ordem de grandeza do que nas situações lubrificadas com óleo. Por sua vez, quando se compara os resultados nas situações lubrificadas, nota-se que para a carga de 5 N, o coeficiente de atrito encontrado para lubrificação com Diesel é maior (aproximadamente o dobro) que aquele para lubrificação com biodiesel. Tal resultado é compatível com o fato de que o biodiesel apresenta maior viscosidade que o Diesel. Já para as cargas de 10 N e 20 N (nas três velocidades de

deslizamento), os valores do coeficiente de atrito para ambos os óleos é o mesmo. Novamente, tal resultado é esperado, uma vez que com o aumento da carga (de 5 N para 10 N e 20 N) aproxima-se do regime de lubrificação limítrofe, no qual o coeficiente de atrito independe das características do óleo que atua como lubrificante.

6.3 TRILHAS DE DESGASTE.

Inicialmente foi feita a análise dos resultados de cada uma das três condições de teste: deslizamento a seco, lubrificado com biodiesel e lubrificado com Diesel comum. Posteriormente foi feita a comparação entre os resultados das diferentes condições.

6.3.1 Deslizamento a seco

Observando-se as imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura para o deslizamento a seco, é possível notar a ocorrência de pelo menos dois mecanismos de desgaste: adesão e abrasão. É possível também que tenha ocorrido oxidação; entretanto não foi feita análise química dos corpos de prova de forma a se ter uma conclusão a respeito. Abaixo há uma descrição, sob a ótica dos mecanismos de desgaste, do que pode ser observado nas trilhas.

Carga de 5 N:

- velocidade de 5 cm/s: possível identificar as marcas de deformação plástica paralelas, características do modo de desgaste abrasivo com formação de sulcos e ou riscos, conforme apresentado na Figura 6.1;
- velocidade de 10 cm/s e 20 cm/s: presença de material transferido, característico de modo de desgaste por adesão; não há diferenças visuais significativas entre as duas velocidades;

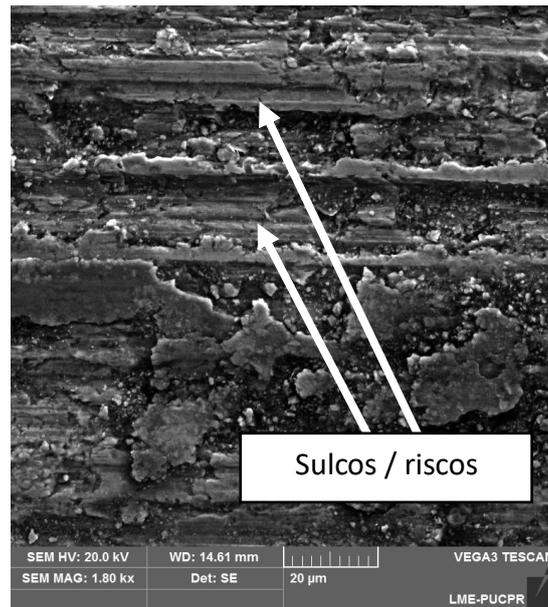
Carga de 10N:

- velocidade de 5 cm/s, 10 cm/s e 20 cm/s: presença de material transferido, característico de modo de desgaste por adesão;

Carga de 20N:

- velocidade de 5 cm/s: presença de material transferido, característico de modo de desgaste por adesão

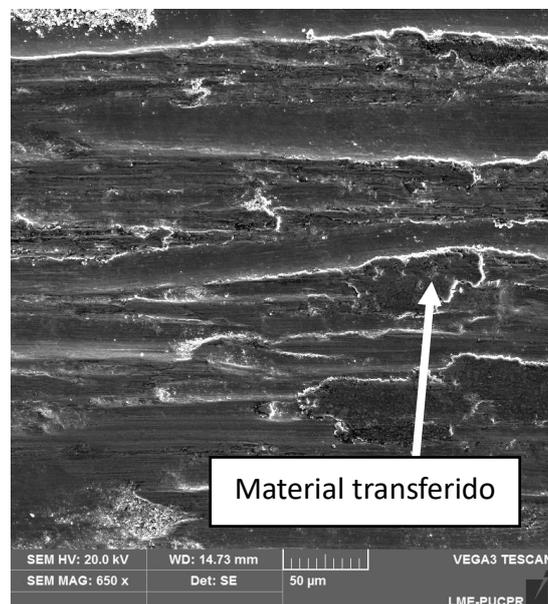
Figura 6.1 – Ensaio com carga de 5 N e velocidade de 5 cm/s (seco)



Fonte: o autor, 2016.

- velocidade de 10 cm/s: presença de material transferido, característico de modo de desgaste por adesão; presença de desgaste abrasivo, com deformação plástica.
- velocidade de 20 cm/s: presença de material transferido, característico de modo de desgaste por adesão; presença de desgaste abrasivo, com deformação plástica, de maneira mais acentuada que o encontrado na velocidade de 10 cm/s, conforme apresentado na Figura 6.2.

Figura 6.2 – Ensaio com carga de 20 N e velocidade de 20 cm/s



Fonte: o autor, 2016.

A presença do modo de desgaste por adesão pode ser explicada pelo seguinte motivo: ASM HANDBOOK (1998) destacou que metais idênticos (aço e aço) apresentam melhores ligações que materiais distintos. Assim, a adesão é favorecida na condição testada, uma vez que os corpos envolvidos (pino e disco) são do mesmo material.

Como apresentado na Figura 5.19, na situação de desgaste a seco, a taxa de desgaste aumenta com o aumento da velocidade e com o aumento da carga.

Tal comportamento está, em parte, de acordo com a equação de Archard, na qual o volume desgastado é diretamente proporcional à carga. Entretanto nota-se que a taxa de desgaste é mais sensível à variação da velocidade quanto maior for a carga.

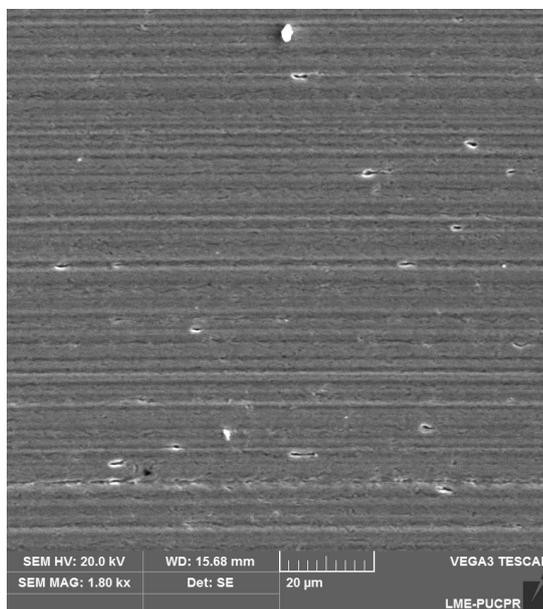
6.3.2 Deslizamento lubrificado com biodiesel (B100) e Diesel comum:

A análise dos mecanismos de desgaste por meio das imagens do microscópio eletrônico indica que:

Carga de 5 N:

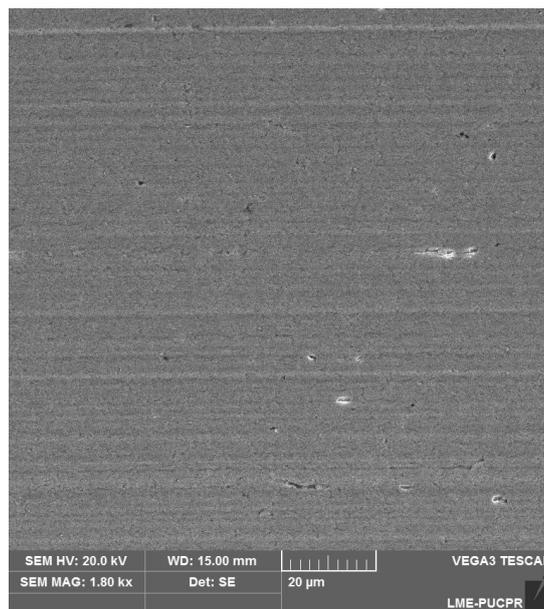
- velocidade de 5 cm/s, 10 cm/s e 20 cm/s: possível identificar sulcos e ou riscos paralelos, características do modo de desgaste abrasivo (Figura 6.3); entretanto com o aumento da velocidade nota-se uma leve redução dos sulcos e ou riscos (Figura 6.4).

Figura 6.3 – Ensaio com carga de 5 N e velocidade de 5 cm/s (biodiesel)



Fonte: o autor, 2016.

Figura 6.4 – Ensaio com carga de 5 N e velocidade de 20 cm/s (biodiesel)



Fonte: o autor, 2016.

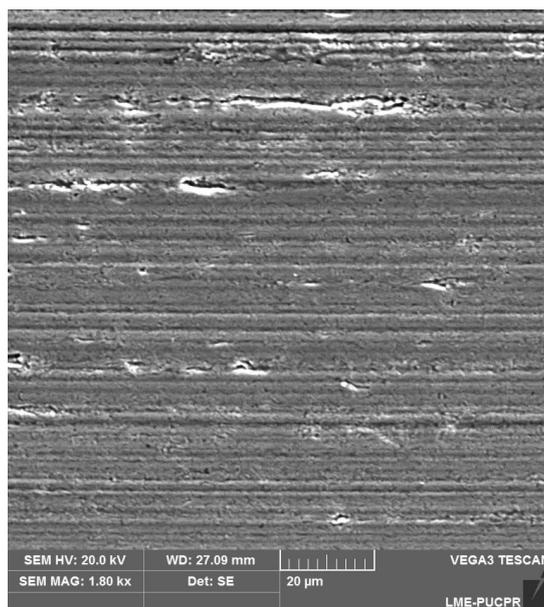
Carga de 10 N:

- velocidade de 5 cm/s, 10 cm/s e 20 cm/s: de maneira semelhante ao ocorrido com o carregamento de 5 N, aqui também é possível identificar os sulcos e ou riscos paralelos, características do modo de desgaste abrasivo. Também nota-se que com o aumento da velocidade há uma leve redução dos sulcos e ou riscos.

Carga de 20 N:

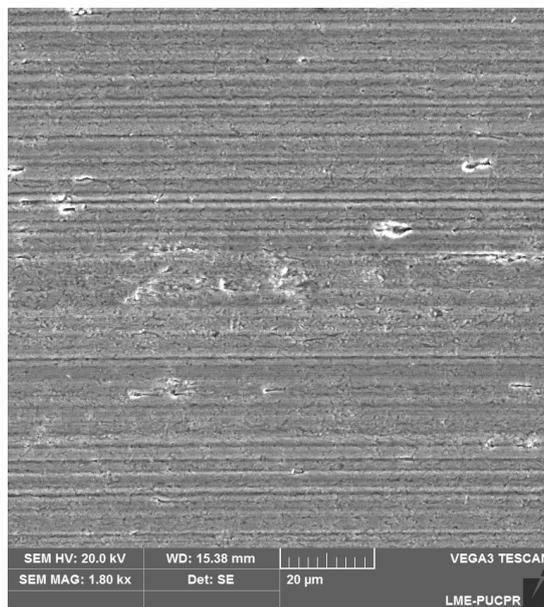
- velocidade de 5 cm/s, 10 cm/s e 20 cm/s: os sulcos e ou riscos paralelos, também podem ser observadas; entretanto, nesta amostra, diferentemente do ocorrido nos carregamentos de 5N e 10N, não se observa uma variação nas marcas acompanhando a variação de velocidade, como pode ser observado na comparação entre a Figura 6.5 (carga de 20 N e velocidade de 5 cm/s) e a Figura 6.6 (carga de 20 N e velocidade de 20 cm/s), ambas para deslizamento lubrificado com óleo Diesel.

Figura 6.5 – Ensaio com carga de 20 N e velocidade de 5 cm/s (Diesel)



Fonte: o autor, 2016.

Figura 6.6 – Ensaio com carga de 20 N e velocidade de 20 cm/s (Diesel)



Fonte: o autor, 2016.

A redução da deformação plástica observado com o aumento da velocidade pode ser explicado pelo aumento da pressão hidrodinâmica, resultando no afastamento da lubrificação em regime limítrofe em direção ao regime misto.

O descrito acima é confirmado por meio das Figuras 5.20 e 5.21, no qual se nota uma redução da taxa de desgaste com o aumento da velocidade.

7. CONCLUSÃO

A análise dos resultados obtidos permite afirmar que a taxa de desgaste específica é mais sensível à variação da carga do que à variação da velocidade de deslizamento; entretanto, enquanto na condição com lubrificação a influência do aumento da velocidade é inversamente proporcional e pouco significativa, na condição com deslizamento a seco a influência da velocidade é diretamente proporcional e significativa.

O desempenho dos óleos biodiesel e Diesel foi semelhante nas avaliações feitas: taxa de desgaste, coeficiente de atrito e aspecto das trilhas de desgaste.

Nas avaliações de taxa de desgaste foi observado o seguinte: para cargas baixas (5 N) a lubrificação com óleo biodiesel resultou em uma taxa de desgaste específica inferior àquela apresentada pelo óleo Diesel; para cargas médias (10 N), os valores da taxa de desgaste específica foi o mesmo para os óleos biodiesel e Diesel; já para cargas elevadas (20 N) a utilização de óleo Diesel resultou em uma taxa de desgaste específica menor que a do biodiesel.

Outro aspecto abordado na avaliação das taxas de desgaste específico foi a qualidade dos planos de regressão. Os coeficientes de determinação encontrados indicam que com a utilização do biodiesel, a variação da taxa de desgaste específica em função da carga e da velocidade de deslizamento apresenta um comportamento mais próximo de um plano que quando o Diesel é utilizado.

Os gráficos dos coeficientes de atrito mostram que para uma carga de 5 N, o coeficiente de atrito obtido com a utilização de biodiesel foi inferior aos valores encontrados com a utilização de óleo Diesel. Já para as cargas de 10 N e 20 N, os resultados foram praticamente iguais, uma vez que o regime de lubrificação era o regime limítrofe.

As trilhas de desgaste foram analisadas com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura, e foi possível observar que a presença de um lubrificante influencia em quais mecanismos de desgaste se fazem presentes: no deslizamento a seco, observou-se que o mecanismo de desgaste por adesão predominava em relação ao mecanismo por abrasão; já com a utilização de um lubrificante, o mecanismo de desgaste predominante foi a abrasão. Não houve diferenças visuais

entre o aspecto das trilhas de corpos de prova testado com óleo biodiesel e óleo Diesel.

Devido à similaridade de resultados encontrados para os dois óleos empregados quanto à lubricidade, é possível concluir que, levando-se em conta esta característica dos óleos, a substituição do óleo Diesel pelo biodiesel não compromete o desempenho de sistemas de injeção de combustível em relação ao comportamento tribológico.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Portaria ANP nº129. Brasília, 1999.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS.

Disponível em:

<www.anp.gov.br/?pg=73292&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&1445292912430>.

Acesso em: 19 out. 2015.

ALMEIDA, F. A.; MARU, M. M.; SHABANI, M.; OLIVEIRA, F. J.; SILVA, R. F.; ACHETE, C. A. Enhancing the tribological performance under biodiesel lubrication using CVD diamond coated parts. **Wear**, v.302, p.1370-1377, 2013.

ASM HANDBOOK. Volume 18 – Friction, Lubrication, and Wear Technology. 1998.

ASSOCIAÇÃO DOS PRODUTORES DE BIODIESEL DO BRASIL. Disponível em:

<www.aprobio.com.br/noticia_new.aspx?noticia=137>. Acesso em: 18 out. 2015.

ASTM – American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Evaluating Lubricity of Diesel Fuels by the High-Frequency Reciprocating Rig. D6079-11, 2011.

ASTM – American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. G99-05, 2016.

BHUSHAN, B. (Ed.). **Modern Tribology Handbook**. Columbus, Ohio: CRC Press, 2001.

BRASIL. Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Brasília: [s.n.], 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira.

CARRETEIRO, R. P.; BELMIRO, P. N. A. **Lubrificantes e Lubrificação Industrial**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2006.

DATTA, P.S.; INMAN, I.A. Development of a simple temperature versus sliding speed wear map for sliding wear behaviour of dissimilar metallic interfaces II. **Wear**, v.265, p.1592-1605, 2008.

DIN – Deutsches Institut für Normung. Standard Wear: Systematic analysis of wear process. Classification of wear phenomena. 50-320, 1979.

ESTEBAN, B.; RIBA J.; BAQUERO, G.; RIUS, A.; PUIG, R. - Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils. **Biomass and Bioenergy**, v.42, p.164-171, 2012.

FARIAS, M.C.M.; SOUZA, R.M.; SINATORA, A.; TANAKA, D.K. The influence of applied load, sliding velocity and martensitic transformation on the unlubricated sliding wear of austenitic stainless steels. **Wear**, v.263, p.773-781, 2007.

FAZAL M.A.; HASEEB A.S.M.A.; MASJUKI H.H. Investigation of friction and wear characteristics of palm biodiesel. **Energy Conversion and Management**, v.67, p.251-256, 2013.

GUERRA, M. J.; DONAIRE, D. **Estatística Indutiva: teoria e aplicações**. São Paulo: LTC, 1991.

HAMROCK B. J.; SCHMID S. R.; JACOBSON B.O. **Fundamentals of Fluid Film Lubrication**. 6. ed. Marcel Dekker, 2004.

HIRASATA, K.; HAYASHI K.; IANAMOTO Y. Friction and wear of several kinds of cast irons under severe sliding conditions. **Wear**, v.263, p.790-800, 2007.

HIRONAKA, S. Boundary Lubrication and Lubricants. **Three Bond Technical News**, Toquio, 1984. Disponível em: <www.threebond.co.jp/en/technical/technicalnews/pdf/tech09.pdf>. Acesso em 26 ago. 2016.

JISHENG, E.; GAWNE, D.T. Influence of lubrication regime on the sliding wear behaviour of an alloy steel. **Wear**, v.211, p.1-8, 1997.

JOHNSON, R. A. **Miller & Freund's Probability & Statistics for Engineers**. 5. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1994.

LEVINE, D.; BERENSON, M.; STEPHAN, D. **Estatística: teoria e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

MOBIL OIL do BRASIL. Fundamentos da Lubrificação, 1979.

MORTIER, R.M.; FOX, M.F.; ORSZULIK, S.T. (Ed.). **Chemistry and Technology of Lubricants**. 3. ed. Springer, 2010.

OKONKWO, P.C.; KELLY, G; ROLFE, B.F.; PEREIRA, M.P. The effect of temperature on sliding wear of steel-tool steel pairs. **Wear**, v.282-283, p.22-30, 2012.

RAPOPORT, L. The competing wear mechanism and wear maps for steel. **Wear**, v.181-183, p.280-289, 1995.

ROELANDS, C. J. A. Correlational Aspects of the Viscosity – Temperature – Pressure Relationship of Lubricating Oils. Dissertação (Doutorado), Groningen: Technische Hogeschool, 1966.

SOUZA, T. B. Revisão da Equação de Cálculo de Índice de Ceteno para as Características do Diesel Comercializado no Paraná. Dissertação (Mestrado), Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2008.

SUH, N.; JAHANMIR, S.; FLEMING, J.; ABRAHAMSON II, E.; SAKA, N.; TEIXEIRA, J. The Delamination Theory of Wear-II – Massachusetts Institute of Technology, 1975. Disponível em: <www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a020126.pdf>. Acesso em 26 jul. 2016.

SUKJIT, E; DEARN, K.D. Enhancing the lubricity of an environment friendly swedish diesel fuel MK1. **Wear**, v.271, p.1772-1777, 2011.

STRAFFELINI, G.; MOLINARI, A. Dry sliding wear of Ti-6Al-4V alloy as influenced by the counterface and sliding conditions. **Wear**, v.236, p.328-338, 1999.

SULEK, M.W.; KULCZYCKI, A.; MALYSA, A. Assessment of lubricity of compositions of fuel oil with biocomponents derived from rape-seed. **Wear**, v.268, p.104-108, 2010.

SWEENEY, D.; WILLIAMS, T.; ANDERSON, D. **Estatística Aplicada à Administração e Economia**. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning. 2014.

TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

WANG, Y.; LEI, T.; LIU, J. Tribo-metallographic behavior of high carbon steels in dry sliding. **Wear**, v.231, p.1-11, 1999.

WERKEMA, M.C.C.; DRUMOND, F.B; AGUIAR, S. **Análise de Variância: Comparação de Várias Situações**. Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1996.

APÊNDICE A – TAXA DE DESGASTE

A.1 Valores medidos para a taxa de desgaste:

Quadro A.1 – Taxa de desgaste na situação de deslizamento a seco ($10E-4 \text{ mm}^3/\text{Nm}$).

			Carga (N)		
			5	10	20
Velocidade de deslizamento (cm/s)	5	medida 1	0,32	0,42	1,12
		medida 2	0,11	0,75	1,15
		medida 3	0,24	0,55	1,36
		medida 4	0,32	0,62	1,31
		média	0,25	0,59	1,24
		medida 1	0,14	0,40	1,07
		medida 2	0,12	0,59	1,28
		medida 3	0,19	0,72	0,99
		medida 4	0,10	0,34	0,86
		média	0,14	0,51	1,05
		medida 1	0,05	0,54	0,96
		medida 2	0,10	0,42	0,97
		medida 3	0,50	0,61	0,82
		medida 4	0,01	0,70	1,01
		média	0,17	0,57	0,94
	10	medida 1	0,25	0,67	3,94
		medida 2	0,19	0,28	4,14
		medida 3	0,17	0,36	4,37
		medida 4	0,19	0,66	4,14
		média	0,20	0,49	4,15
		medida 1	0,39	0,61	4,81
		medida 2	0,33	0,59	4,84
		medida 3	0,27	0,71	5,09
		medida 4	0,16	0,85	5,17
		média	0,29	0,69	4,98
		medida 1	0,08	0,61	5,47
		medida 2	0,49	0,69	5,98
		medida 3	0,31	0,52	5,99
		medida 4	0,18	0,79	5,71
		média	0,27	0,65	5,79
	20	medida 1	0,60	4,19	9,35
		medida 2	0,67	4,09	10,20
		medida 3	0,43	3,87	9,16
		medida 4	0,49	4,56	9,56
		média	0,55	4,18	9,57
		medida 1	0,55	2,26	20,50
medida 2		0,37	1,89	17,10	
medida 3		0,25	2,18	15,60	
medida 4		0,39	2,41	17,40	
média		0,39	2,19	17,65	
medida 1		0,94	2,90	11,42	
medida 2		0,85	3,47	9,75	
medida 3		0,63	2,55	8,97	
medida 4		0,45	2,61	10,80	
média		0,72	2,88	10,24	

Fonte: o autor, 2015.

Quadro A.2 – Taxa de desgaste na situação de deslizamento com Biodiesel 100 (10E-5 mm³/Nm).

			Carga (N)		
			5	10	20
Velocidade de deslizamento (cm/s)	5	medida 1	0,32	1,21	1,31
		medida 2	0,29	1,67	1,13
		medida 3	0,27	0,79	0,89
		medida 4	0,29	0,73	1,47
		média	0,29	1,10	1,20
		medida 1	0,36	1,61	1,51
		medida 2	0,30	0,76	1,58
		medida 3	0,38	0,86	1,07
		medida 4	0,32	0,81	0,97
		média	0,34	1,01	1,28
		medida 1	0,32	0,78	0,90
		medida 2	0,31	0,89	0,71
		medida 3	0,25	0,80	1,47
		medida 4	0,29	1,02	1,35
	média	0,29	0,87	1,11	
	10	medida 1	0,34	0,82	1,38
		medida 2	0,34	1,34	1,09
		medida 3	0,28	1,38	0,88
		medida 4	0,33	0,99	1,26
		média	0,32	1,13	1,15
		medida 1	0,24	0,78	0,97
		medida 2	0,27	0,89	1,47
		medida 3	0,25	0,80	1,79
		medida 4	0,45	1,02	1,16
		média	0,30	0,87	1,35
		medida 1	0,40	0,74	1,07
		medida 2	0,24	1,14	1,55
		medida 3	0,22	1,28	1,50
		medida 4	0,26	0,81	1,17
	média	0,28	0,99	1,32	
	20	medida 1	0,20	0,68	0,99
		medida 2	0,21	0,53	0,73
		medida 3	0,19	0,79	0,77
		medida 4	0,18	0,46	1,00
		média	0,20	0,62	0,87
		medida 1	0,18	0,60	1,17
medida 2		0,18	0,53	1,46	
medida 3		0,24	0,52	1,48	
medida 4		0,17	0,65	1,10	
média		0,19	0,58	1,30	
medida 1		0,21	0,53	1,20	
medida 2		0,18	0,43	1,03	
medida 3		0,21	0,53	0,86	
medida 4		0,18	0,84	0,78	
média		0,20	0,58	0,97	

Fonte: o autor, 2015.

Quadro A.3 – Taxa de desgaste na situação de deslizamento com Diesel comum (10-5 mm³/Nm).

		Carga (N)			
		5	10	20	
Velocidade de deslizamento (cm/s)	5	medida 1	0,57	1,12	0,85
		medida 2	0,72	1,18	0,72
		medida 3	0,48	1,17	0,73
		medida 4	0,63	1,40	0,88
		média	0,60	1,22	0,80
		medida 1	0,30	0,87	0,71
		medida 2	0,25	0,80	0,71
		medida 3	0,46	0,75	0,59
		medida 4	0,34	0,72	1,34
		média	0,34	0,79	0,84
		medida 1	0,86	0,27	0,60
		medida 2	0,78	1,53	1,08
		medida 3	0,82	0,79	1,06
		medida 4	0,73	1,30	0,62
		média	0,80	0,97	0,84
	10	medida 1	0,44	0,54	1,12
		medida 2	0,34	0,79	0,61
		medida 3	0,44	1,00	0,77
		medida 4	0,40	1,05	0,98
		média	0,41	0,85	0,87
		medida 1	0,71	1,08	0,93
		medida 2	0,40	0,77	0,54
		medida 3	0,52	0,94	0,59
		medida 4	0,52	0,99	0,92
		média	0,54	0,95	0,75
		medida 1	0,51	0,95	0,41
		medida 2	0,45	1,03	0,48
		medida 3	0,60	0,51	0,40
		medida 4	0,51	1,04	0,56
		média	0,52	0,88	0,46
	20	medida 1	0,26	0,80	0,65
		medida 2	0,30	1,08	0,44
		medida 3	0,41	0,88	0,80
		medida 4	0,60	0,82	0,74
		média	0,39	0,90	0,66
		medida 1	0,50	0,59	0,63
medida 2		0,37	0,47	0,52	
medida 3		0,58	0,37	0,51	
medida 4		0,68	0,76	0,46	
média		0,53	0,55	0,53	
medida 1		0,89	0,60	0,51	
medida 2		0,38	0,39	0,62	
medida 3		0,46	0,35	0,40	
medida 4		0,47	0,71	0,39	
média		0,55	0,51	0,48	

Fonte: o autor, 2015.

A.2 Valores para geração do plano de regressão:

Quadro A.4: valores para cálculo do plano de regressão (situação de deslizamento a seco).

	y	carga (N)	v (cm/s)	x_1^2	x_2^2	x_1x_2	x_1y	x_2y
1	0,25	5	5	25	25	25	1,24	1,24
2	0,14	5	5	25	25	25	0,69	0,69
3	0,17	5	5	25	25	25	0,83	0,83
4	0,20	5	10	25	100	50	1,00	2,00
5	0,29	5	10	25	100	50	1,44	2,88
6	0,27	5	10	25	100	50	1,33	2,65
7	0,55	5	20	25	400	100	2,74	10,95
8	0,39	5	20	25	400	100	1,95	7,80
9	0,72	5	20	25	400	100	3,59	14,35
10	0,59	10	5	100	25	50	5,85	2,93
11	0,51	10	5	100	25	50	5,13	2,56
12	0,57	10	5	100	25	50	5,68	2,84
13	0,49	10	10	100	100	100	4,93	4,93
14	0,69	10	10	100	100	100	6,90	6,90
15	0,65	10	10	100	100	100	6,53	6,53
16	4,18	10	20	100	400	200	41,78	83,55
17	2,19	10	20	100	400	200	21,85	43,70
18	2,88	10	20	100	400	200	28,83	57,65
19	1,24	20	5	400	25	100	24,70	6,18
20	1,05	20	5	400	25	100	21,00	5,25
21	0,94	20	5	400	25	100	18,80	4,70
22	4,15	20	10	400	100	200	82,95	41,48
23	4,98	20	10	400	100	200	99,55	49,78
24	5,79	20	10	400	100	200	115,75	57,88
25	9,57	20	20	400	400	400	191,35	191,35
26	10,24	20	20	400	400	400	204,70	204,70
Σ	53,64	295,00	295,00	4325,00	4325,00	3275,00	901,04	816,25

Fonte: o autor, 2015.

Quadro A.5: valores para cálculo do plano de regressão (situação de deslizamento com Biodiesel 100).

	y	carga (N)	v (cm/s)	x_1^2	x_2^2	x_1x_2	x_1y	x_2y
1	0,29	5	5	25	25	25	1,46	1,46
2	0,34	5	5	25	25	25	1,70	1,70
3	0,29	5	5	25	25	25	1,46	1,46
4	0,32	5	10	25	100	50	1,61	3,23
5	0,30	5	10	25	100	50	1,51	3,03
6	0,28	5	10	25	100	50	1,40	2,80
7	0,20	5	20	25	400	100	0,98	3,90
8	0,19	5	20	25	400	100	0,96	3,85
9	0,20	5	20	25	400	100	0,98	3,90
10	1,10	10	5	100	25	50	11,00	5,50
11	1,01	10	5	100	25	50	10,10	5,05
12	0,87	10	5	100	25	50	8,73	4,36
13	1,13	10	10	100	100	100	11,33	11,33
14	0,87	10	10	100	100	100	8,73	8,73
15	0,99	10	10	100	100	100	9,93	9,93
16	0,62	10	20	100	400	200	6,15	12,30
17	0,58	10	20	100	400	200	5,75	11,50
18	0,58	10	20	100	400	200	5,83	11,65
19	1,20	20	5	400	25	100	24,00	6,00
20	1,28	20	5	400	25	100	25,65	6,41
21	1,11	20	5	400	25	100	22,15	5,54
22	1,15	20	10	400	100	200	23,05	11,53
23	1,35	20	10	400	100	200	26,95	13,48
24	1,32	20	10	400	100	200	26,45	13,23
25	0,87	20	20	400	400	400	17,45	17,45
26	1,30	20	20	400	400	400	26,05	26,05
27	0,97	20	20	400	400	400	19,35	19,35
Σ	20,72	315,00	315,00	4725,00	4725,00	3675,00	300,69	224,69

Fonte: o autor, 2015.

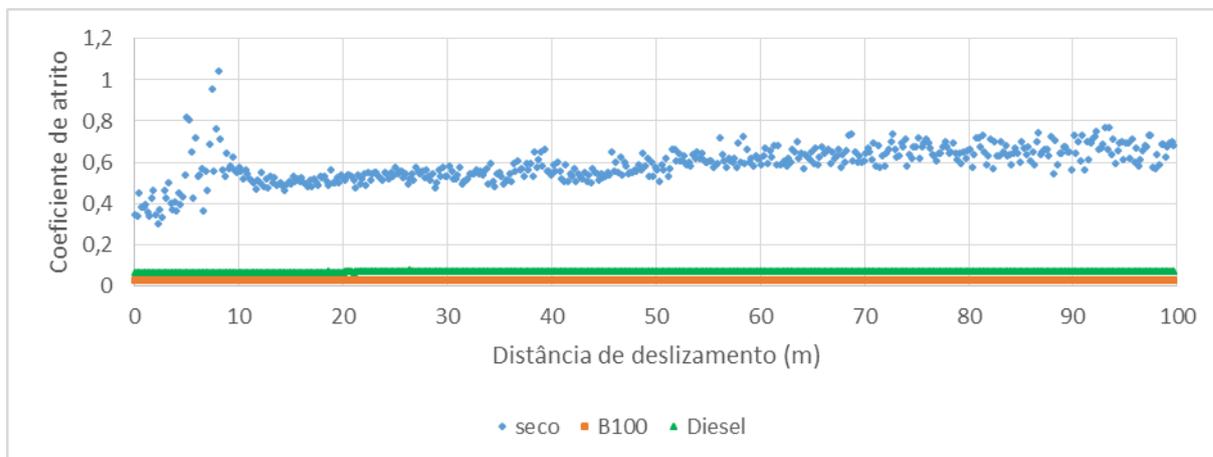
Quadro A.6: valores para cálculo do plano de regressão (situação de deslizamento com Diesel comum).

	y	carga (N)	v (cm/s)	x_1^2	x_2^2	x_1x_2	x_1y	x_2y
1	0,60	5	5	25	25	25	3,00	3,00
2	0,34	5	5	25	25	25	1,69	1,69
3	0,80	5	5	25	25	25	3,99	3,99
4	0,41	5	10	25	100	50	2,03	4,05
5	0,54	5	10	25	100	50	2,69	5,38
6	0,52	5	10	25	100	50	2,59	5,18
7	0,39	5	20	25	400	100	1,96	7,85
8	0,53	5	20	25	400	100	2,66	10,65
9	0,55	5	20	25	400	100	2,75	11,00
10	1,22	10	5	100	25	50	12,18	6,09
11	0,79	10	5	100	25	50	7,85	3,93
12	0,97	10	5	100	25	50	9,73	4,86
13	0,85	10	10	100	100	100	8,45	8,45
14	0,95	10	10	100	100	100	9,45	9,45
15	0,88	10	10	100	100	100	8,83	8,83
16	0,90	10	20	100	400	200	8,95	17,90
17	0,55	10	20	100	400	200	5,48	10,95
18	0,51	10	20	100	400	200	5,13	10,25
19	0,80	20	5	400	25	100	15,90	3,98
20	0,84	20	5	400	25	100	16,75	4,19
21	0,84	20	5	400	25	100	16,80	4,20
22	0,87	20	10	400	100	200	17,40	8,70
23	0,75	20	10	400	100	200	14,90	7,45
24	0,46	20	10	400	100	200	9,25	4,63
25	0,66	20	20	400	400	400	13,15	13,15
26	0,53	20	20	400	400	400	10,60	10,60
27	0,48	20	20	400	400	400	9,60	9,60
Σ	18,49	315,00	315,00	4725,00	4725,00	3675,00	223,73	199,96

Fonte: o autor, 2015.

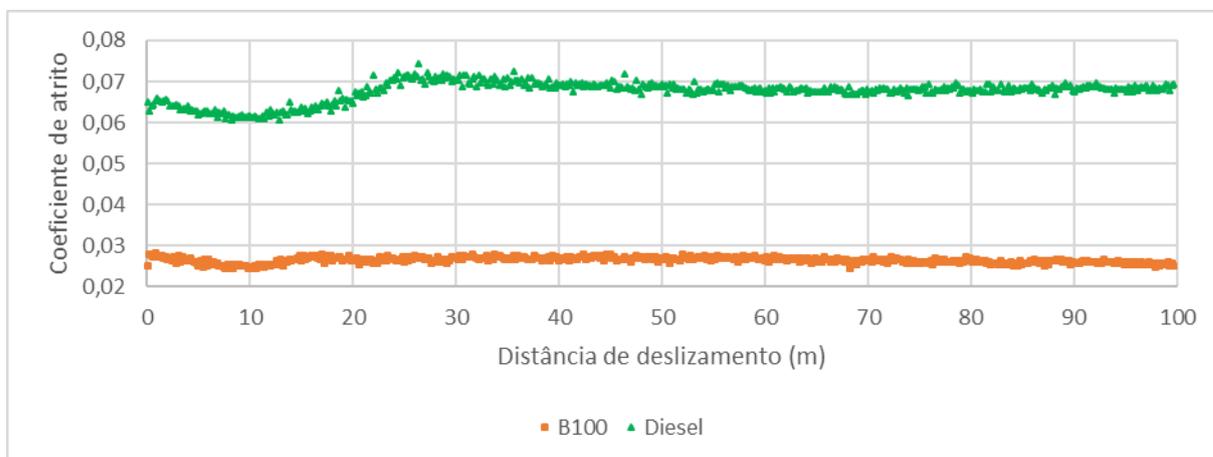
APÊNDICE B – COEFICIENTE DE ATRITO

Figura B.1 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 5N e velocidade 5 cm/s para deslizamento a seco, com óleo B100 e com óleo Diesel comum



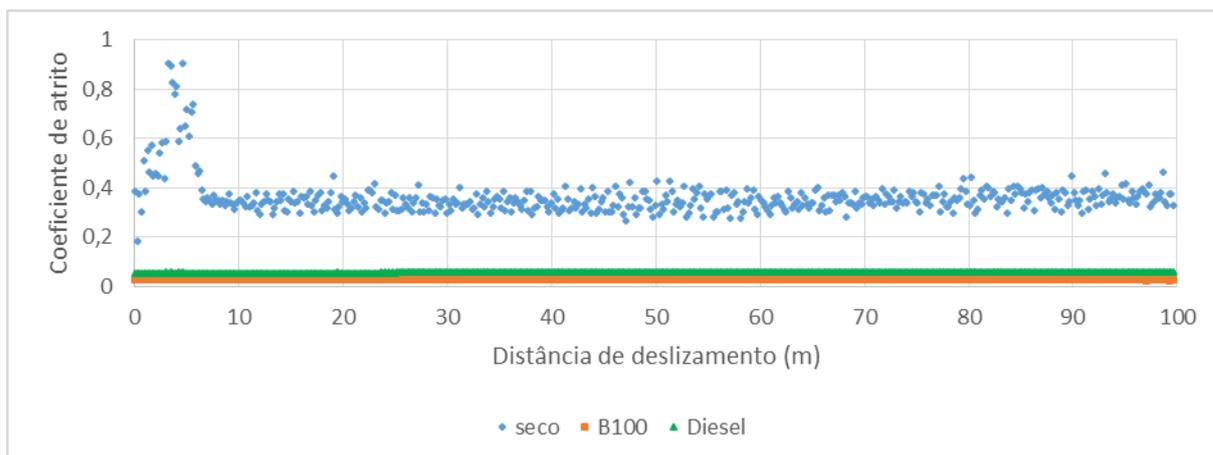
Fonte: o autor, 2015.

Figura B.2 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 5N e velocidade 5 cm/s para deslizamento com óleo B100 e com óleo Diesel comum



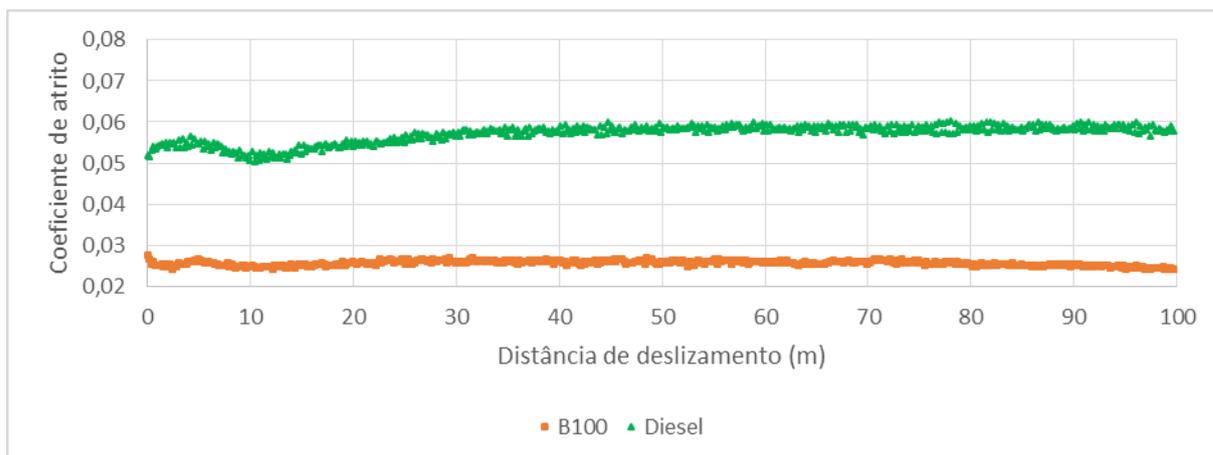
Fonte: o autor, 2015.

Figura B.3 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 5N e velocidade 10 cm/s para deslizamento a seco, com óleo B100 e com óleo Diesel comum



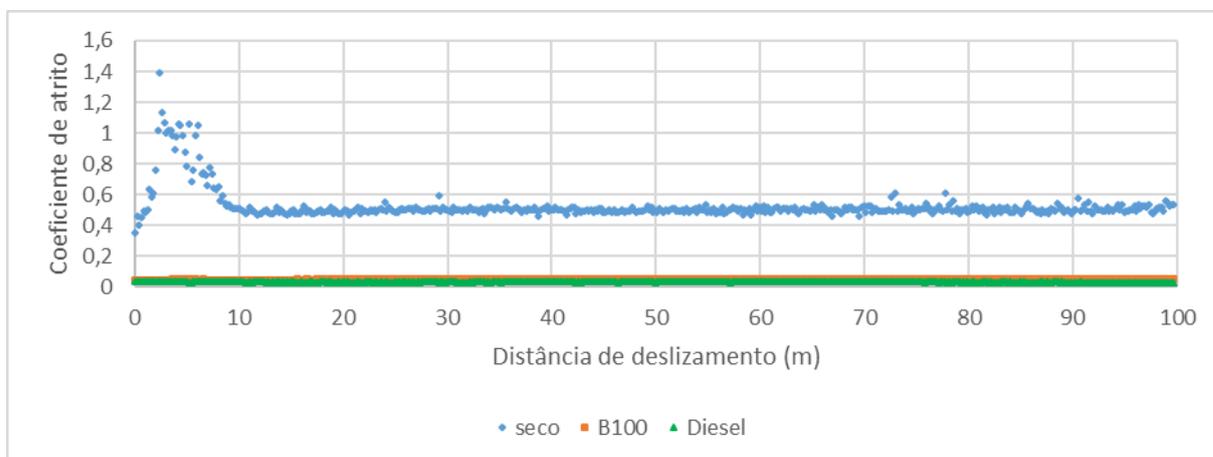
Fonte: o autor, 2015.

Figura B.4 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 5N e velocidade 10 cm/s para deslizamento com óleo B100 e com óleo Diesel comum



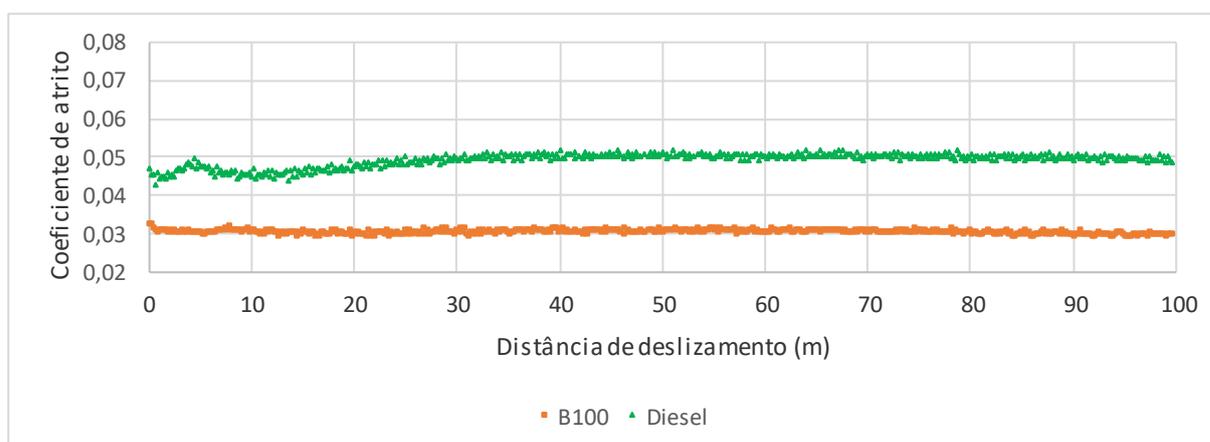
Fonte: o autor, 2015.

Figura B.5 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 5N e velocidade 20 cm/s para deslizamento a seco, com óleo B100 e com óleo Diesel comum



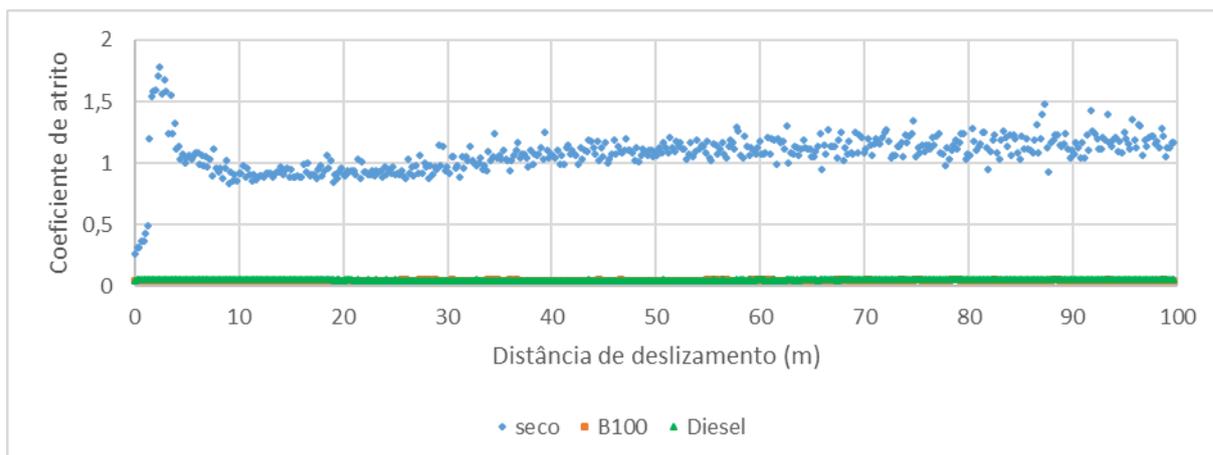
Fonte: o autor, 2015.

Figura B.6 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 5N e velocidade 20 cm/s para deslizamento com óleo B100 e com óleo Diesel comum



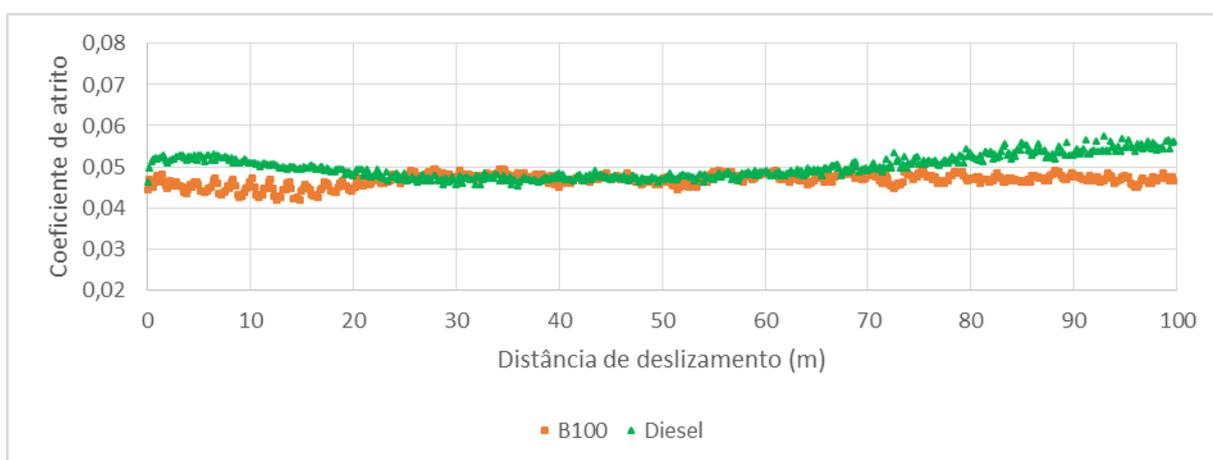
Fonte: o autor, 2015.

Figura B.7 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 10N e velocidade 5 cm/s para deslizamento a seco, com óleo B100 e com óleo Diesel comum



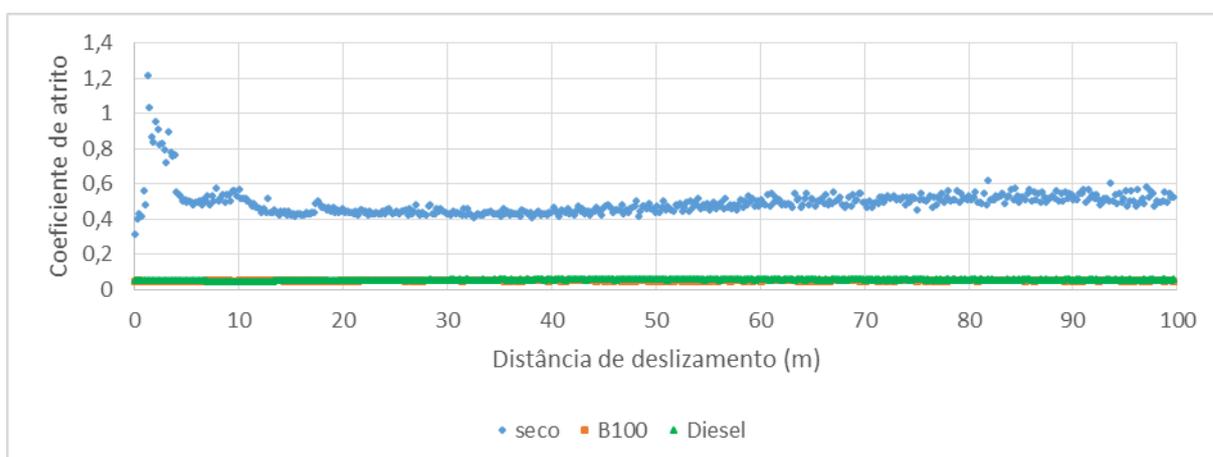
Fonte: o autor, 2015.

Figura B.8 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 10N e velocidade 5 cm/s para deslizamento com óleo B100 e com óleo Diesel comum



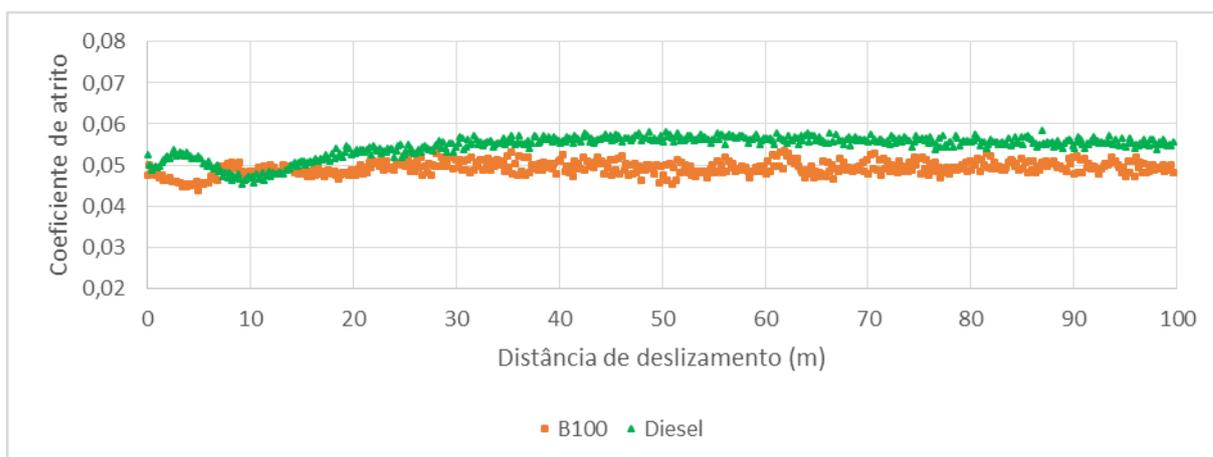
Fonte: o autor, 2015.

Figura B.9 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 10N e velocidade 10 cm/s para deslizamento a seco, com óleo B100 e com óleo Diesel comum



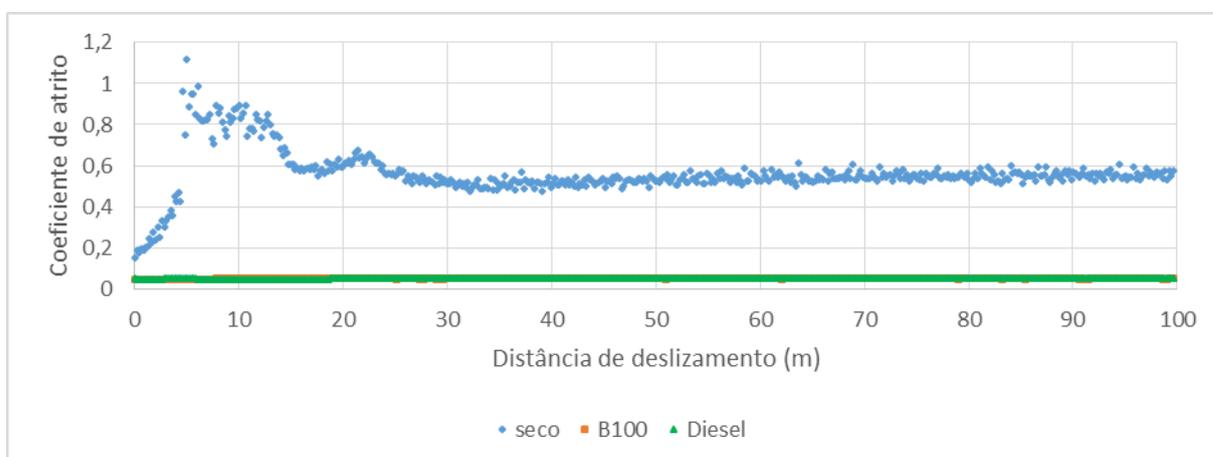
Fonte: o autor, 2015.

Figura B.10 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 10N e velocidade 10 cm/s para deslizamento com óleo B100 e com óleo Diesel comum



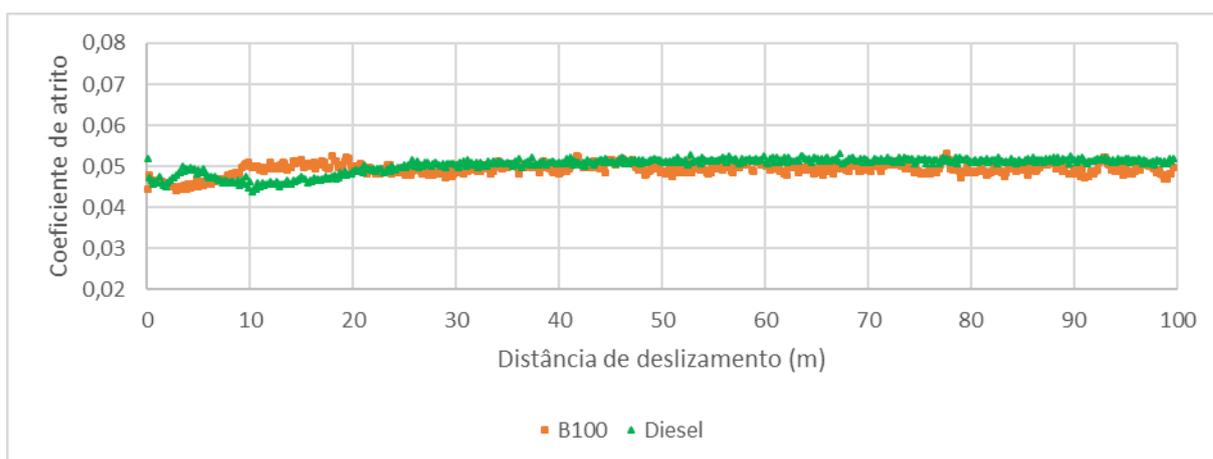
Fonte: o autor, 2015.

Figura B.11 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 10N e velocidade 20 cm/s para deslizamento a seco, com óleo B100 e com óleo Diesel comum



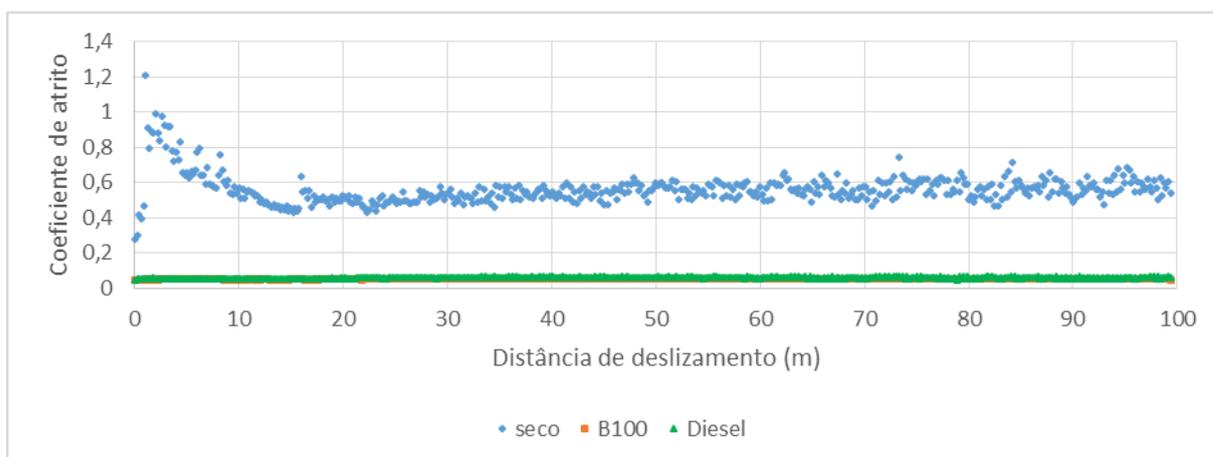
Fonte: o autor, 2015.

Figura B.12 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 10N e velocidade 20 cm/s para deslizamento com óleo B100 e com óleo Diesel comum



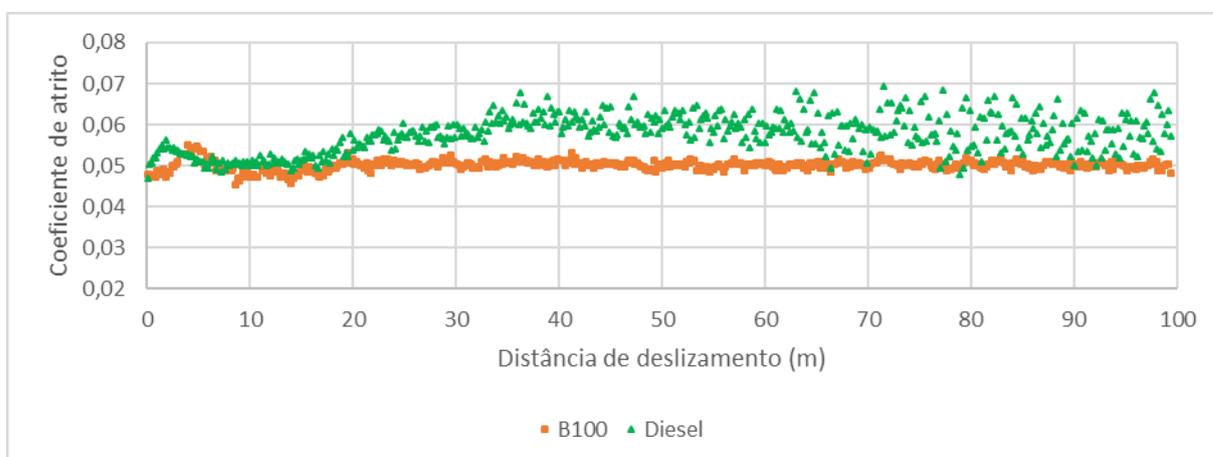
Fonte: o autor, 2015.

Figura B.13 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 20N e velocidade 5 cm/s para deslizamento a seco, com óleo B100 e com óleo Diesel comum



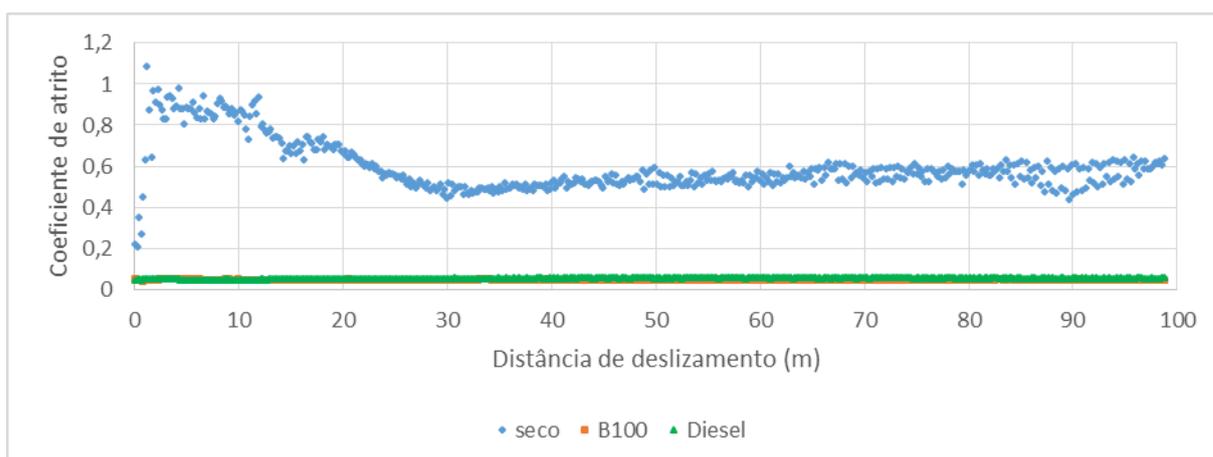
Fonte: o autor, 2015.

Figura B.14 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 20N e velocidade 5 cm/s para deslizamento com óleo B100 e com óleo Diesel comum



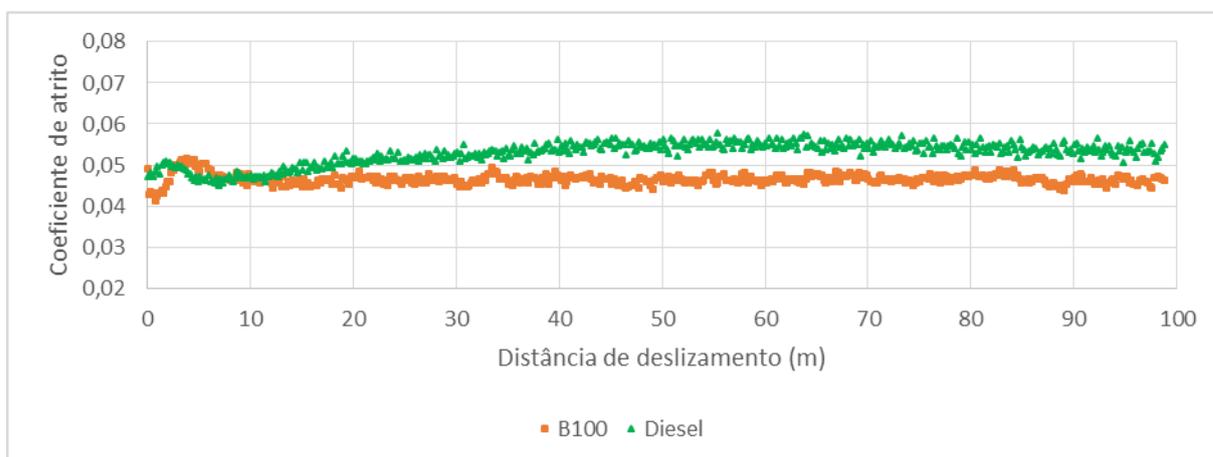
Fonte: o autor, 2015.

Figura B.15 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 20N e velocidade 10 cm/s para deslizamento a seco, com óleo B100 e com óleo Diesel comum



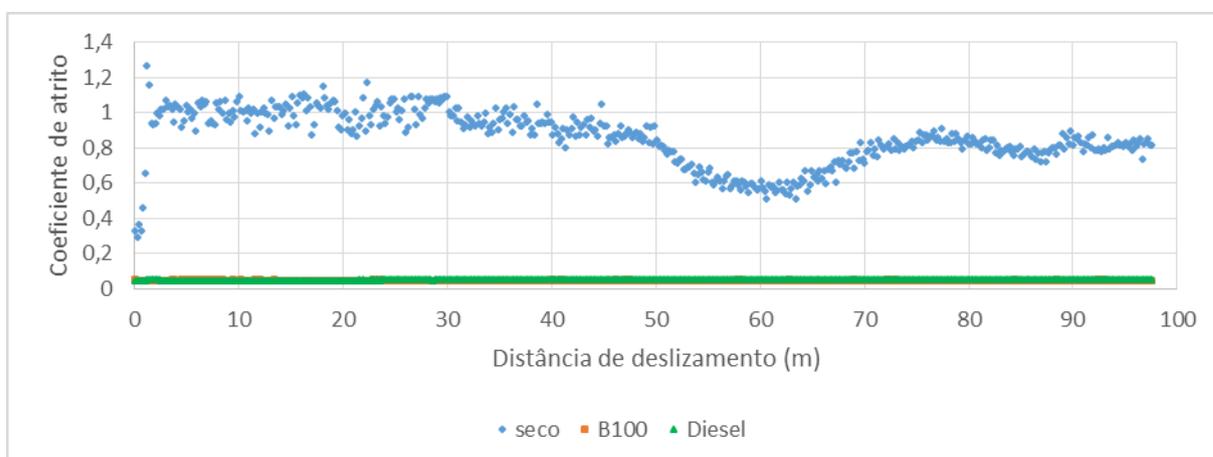
Fonte: o autor, 2015.

Figura B.16 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 20N e velocidade 10 cm/s para deslizamento com óleo B100 e com óleo Diesel comum



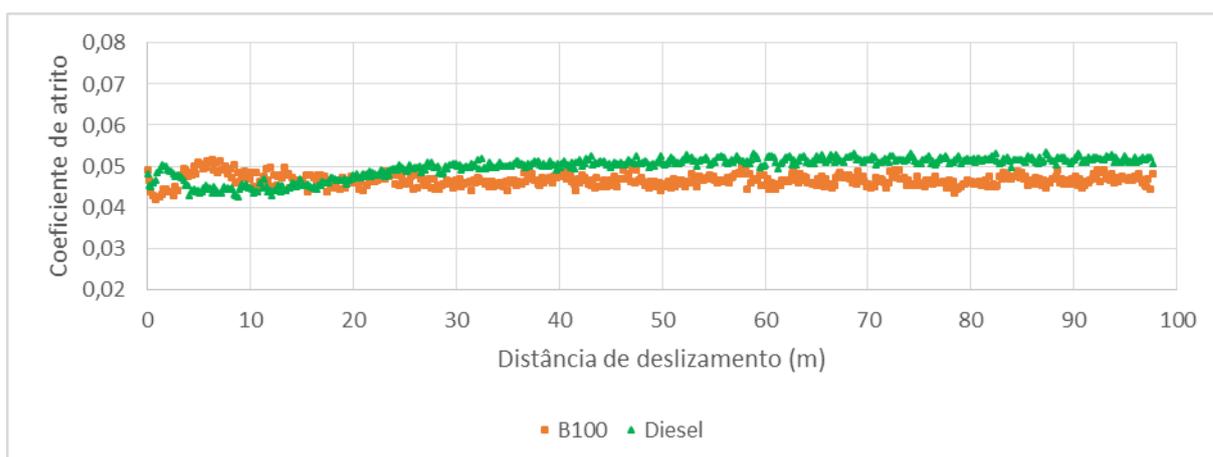
Fonte: o autor, 2015.

Figura B.17 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 20N e velocidade 20 cm/s para deslizamento a seco, com óleo B100 e com óleo Diesel comum



Fonte: o autor, 2015.

Figura B.18 - coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento na situação de carga 20N e velocidade 20 cm/s para deslizamento com óleo B100 e com óleo Diesel comum

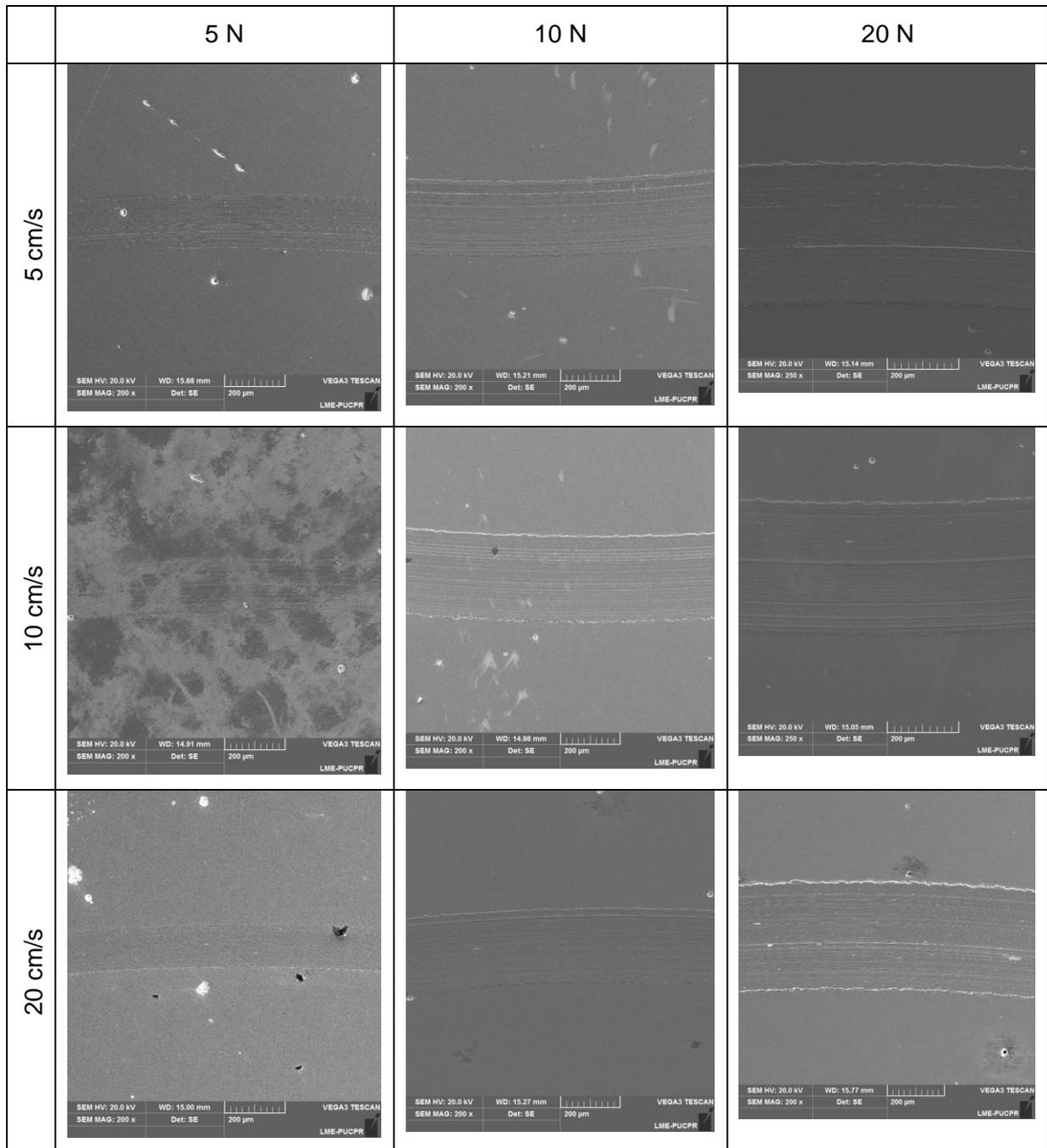


Fonte: o autor, 2015.

APÊNDICE C – TRILHAS DE DESGASTE

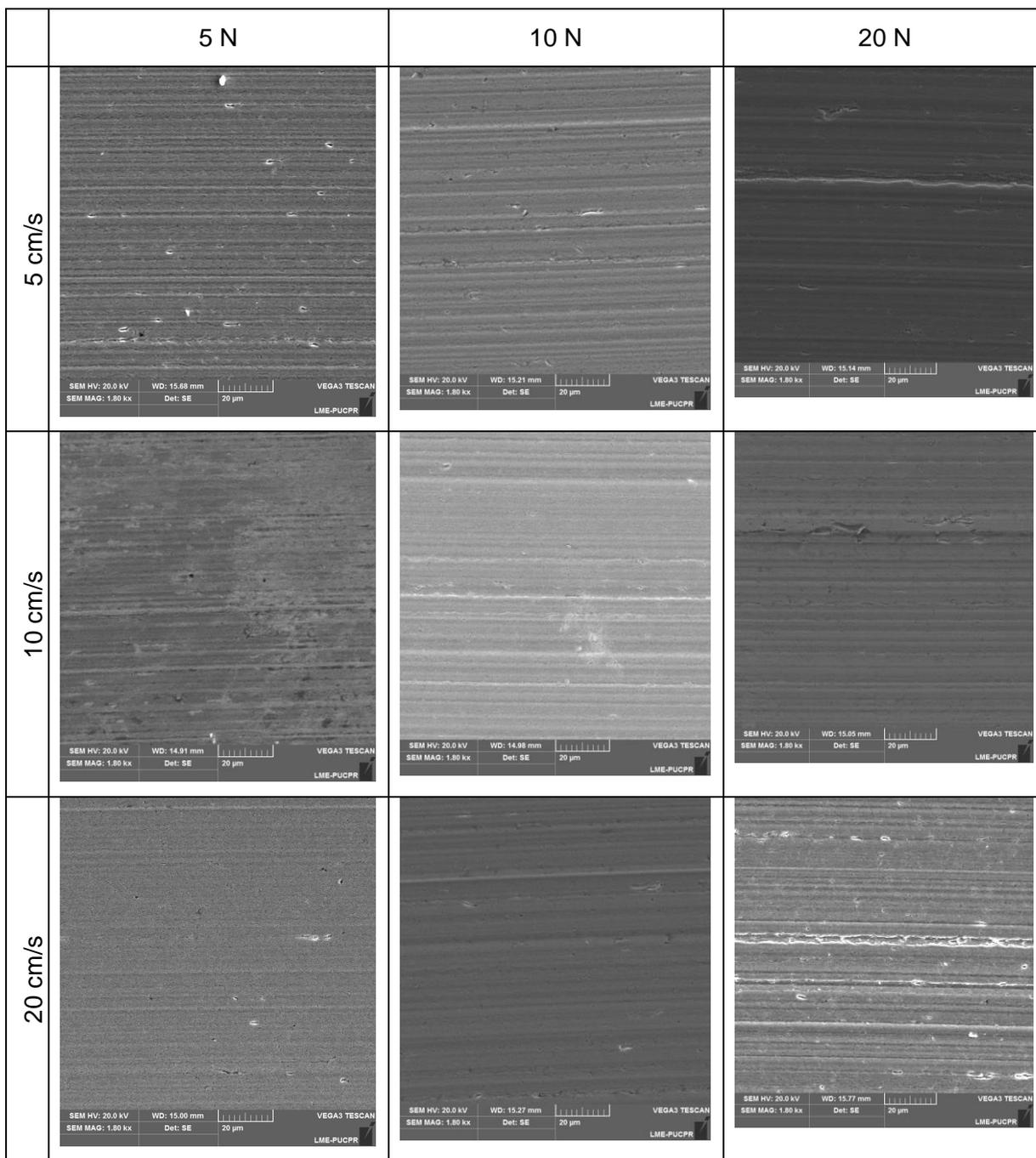
C.1 Trilhas de desgaste com lubrificação de B100

Figura C.1: imagens das pistas de desgaste para lubrificação com B100 (200 - 250x)



Fonte: o autor, 2015.

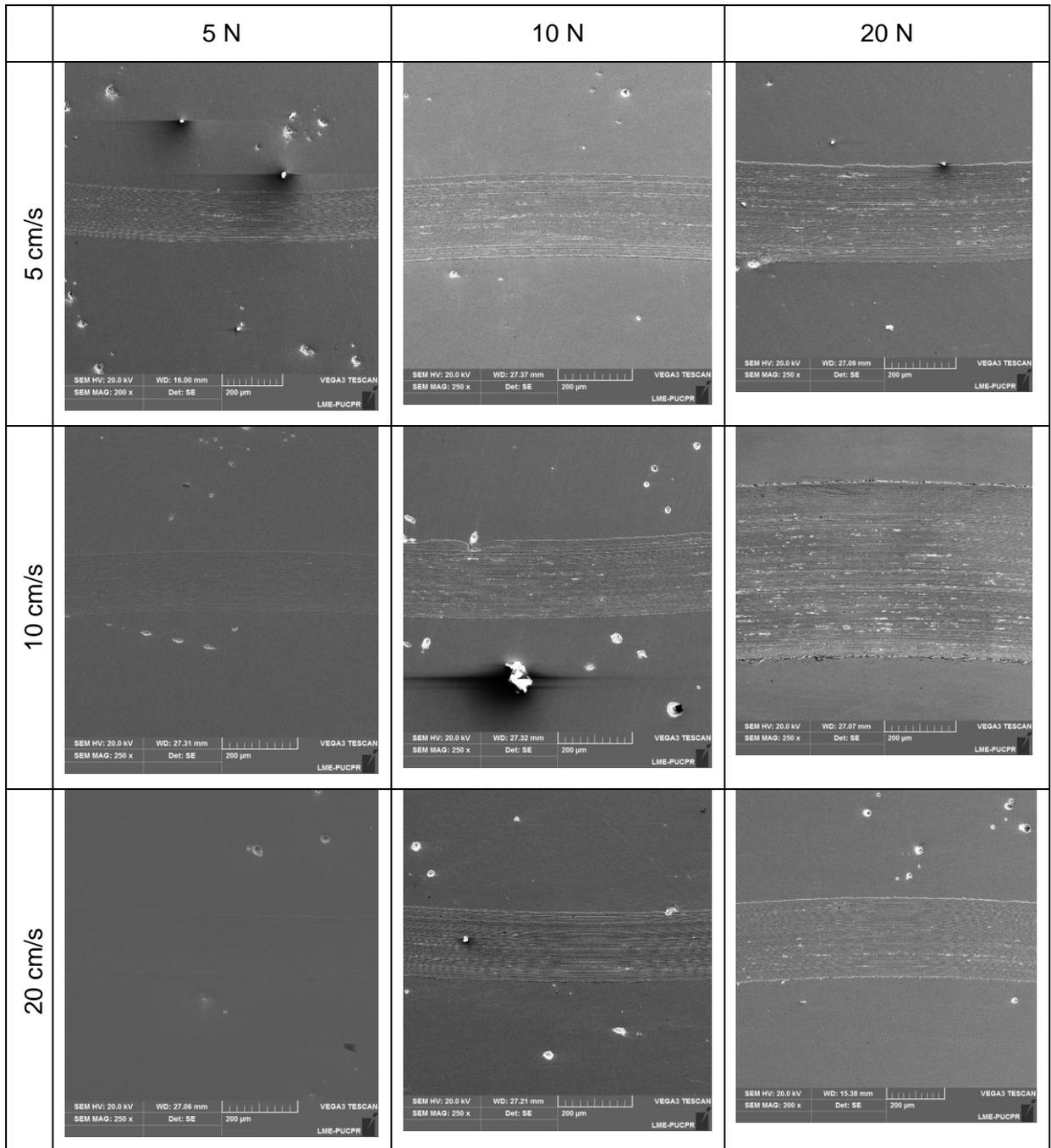
Figura C.2: imagens das pistas de desgaste para lubrificação com B100 (1,8kx)



Fonte: o autor, 2015.

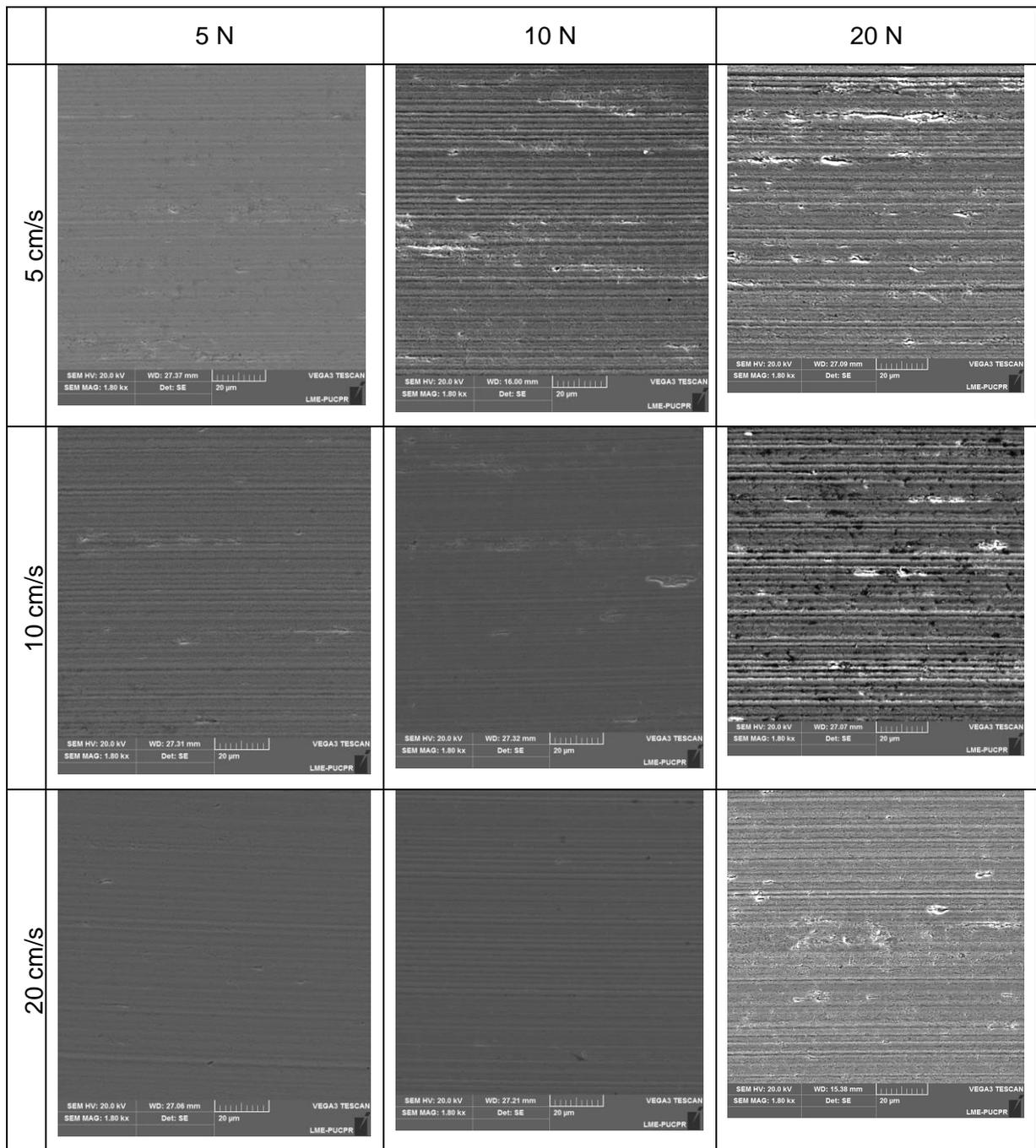
C.2 Trilhas de desgaste com lubrificação de óleo Diesel

Figura C.3: imagens das pistas de desgaste para lubrificação com diesel comum (200 - 250x)



Fonte: o autor, 2015.

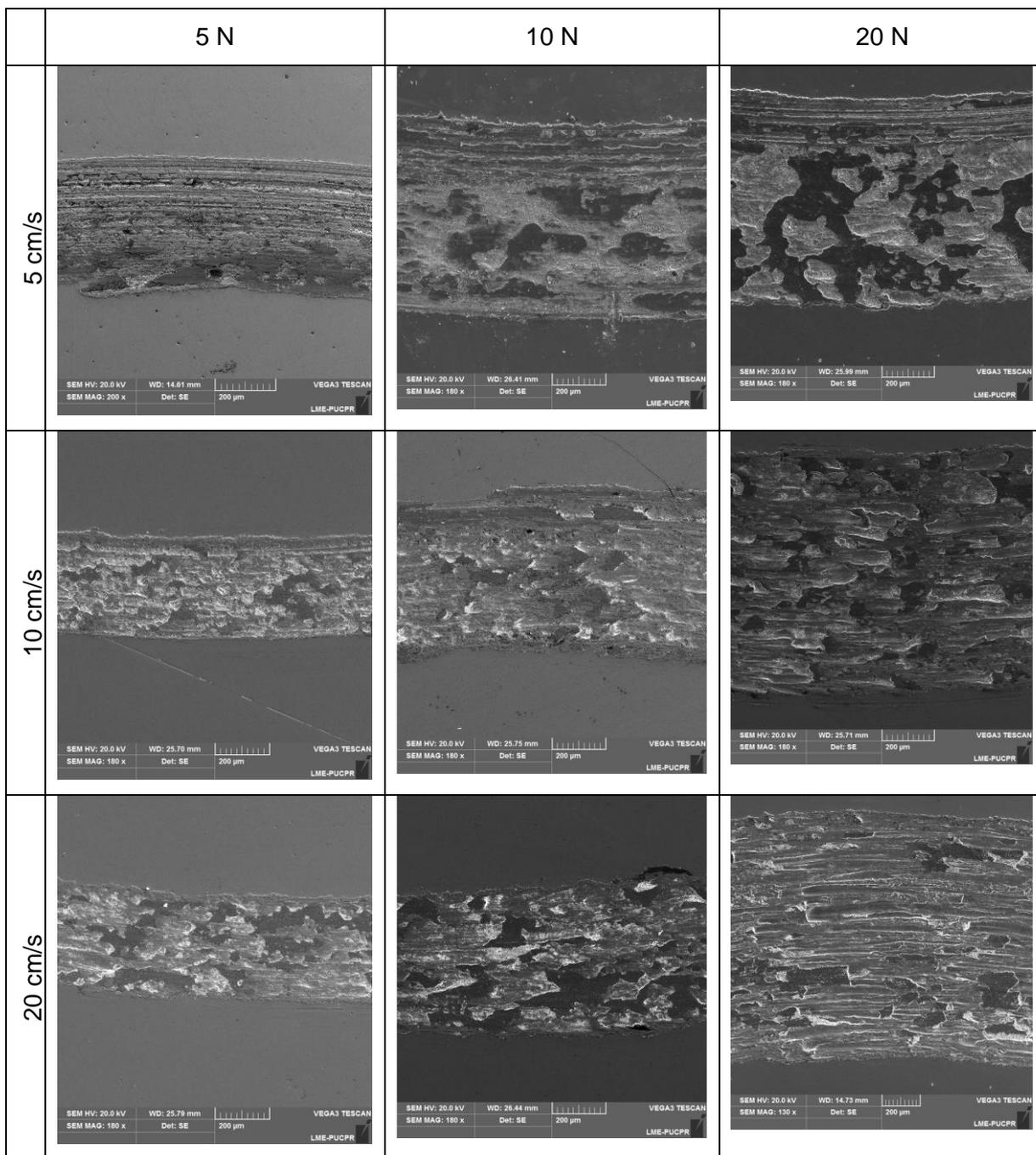
Figura C.4: imagens das pistas de desgaste para lubrificação com diesel comum (1,8kx)



Fonte: o autor, 2015.

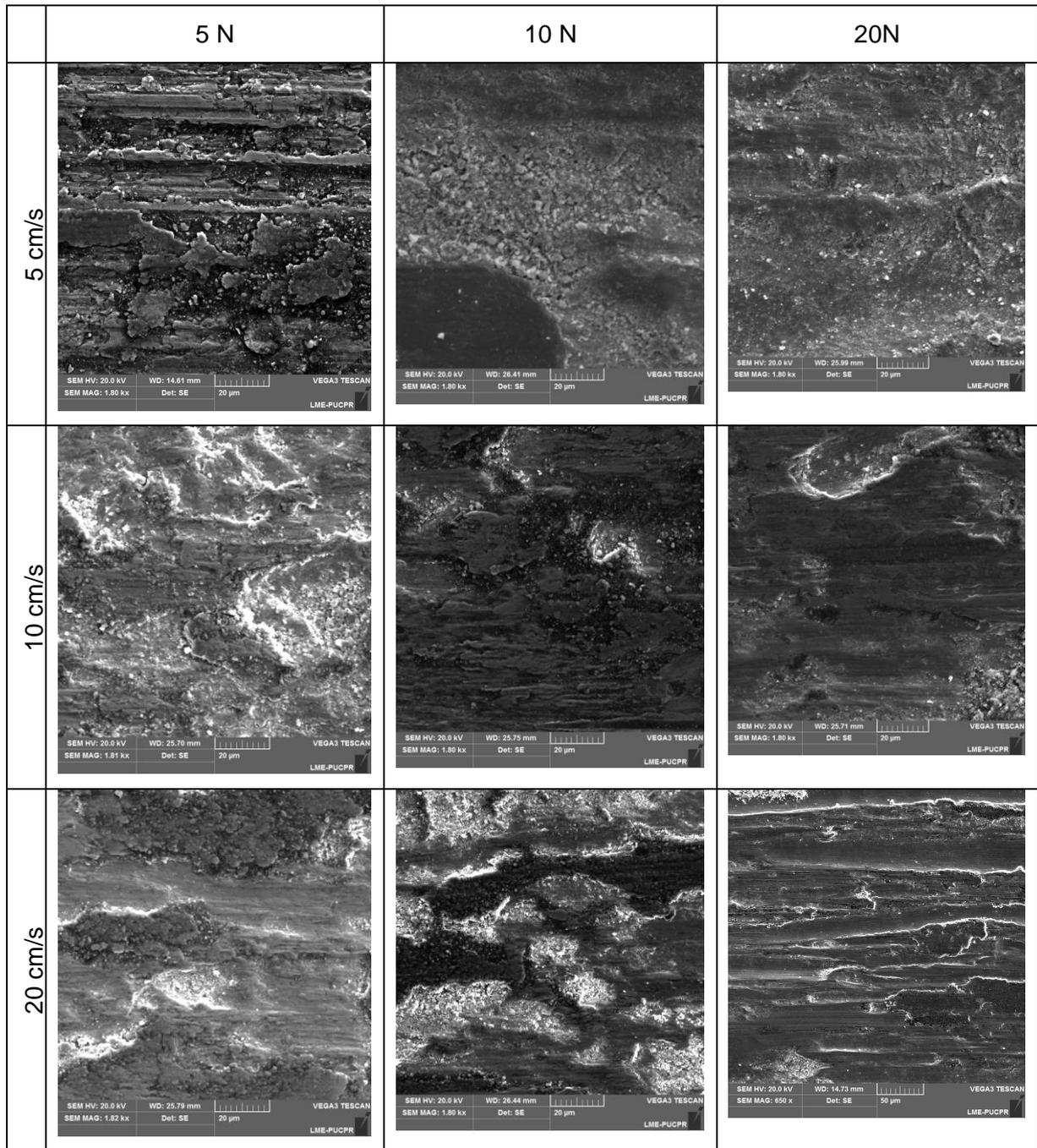
C.3 Trilhas de desgaste sem lubrificação

Figura C.5: imagens das pistas de desgaste sem lubrificação (150 - 200x)



Fonte: o autor, 2015.

Figura C.6: imagens das pistas de desgaste sem lubrificação (650 - 1,8kx)



Fonte: o autor, 2015.