



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DOS AÇOS SAE
52100 E SAE 1045 LUBRIFICADOS COM BIODIESEL E ÓLEO
DIESEL COMERCIAL**

VICTOR VELHO DE CASTRO
ENGENHEIRO MECÂNICO

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA
E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Porto Alegre

Março, 2015



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DOS AÇOS SAE
52100 E SAE 1045 LUBRIFICADOS COM BODIESEL E ÓLEO
DIESEL COMERCIAL**

VICTOR VELHO DE CASTRO
ENGENHEIRO MECÂNICO

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Joyson Luiz Pacheco

Dissertação de Mestrado realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

Porto Alegre
Março, 2015



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
 FACULDADE DE ENGENHARIA
 PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DOS AÇOS SAE 52100 E SAE 1045 LUBRIFICADOS COM BIODIESEL E ÓLEO DIESEL COMERCIAL

CANDIDATO: VICTOR VELHO DE CASTRO

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.



DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS - ORIENTADOR



DR. JOYSON LUIZ PACHECO - CO-ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA



DR. NEY FRANCISCO FERREIRA - DA ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS



DR. FELIPE DALLA VECCHIA - DA FACULDADE DE ENGENHARIA - PUCRS



DR. MARCUS SEFERIN - DO PGETEMA/FENG - PUCRS

*“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder entusiasmo.”
(Winston Churchill)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que iluminou meu caminho durante esta caminhada. Aos professores Carlos Alexandre dos Santos e Joyson Luiz Pacheco pela paciência na orientação. Aos meus pais, irmãos e toda a minha família que nunca mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa.

Um forte agradecimento ao colega William Trajano pela inestimável ajuda na execução dos experimentos e obtenção de resultados.

Agradeço também ao Programa do PGETEMA da PUCRS pela oportunidade e a CAPES pela bolsa de estudo.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
SUMÁRIO	6
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE QUADROS	14
LISTA DE SÍMBOLOS	15
RESUMO	18
ABSTRACT	19
1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS	22
2.1. Objetivos Específicos	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1. Tribologia	23
3.1.2. Superfície em Contato	23
3.2. Desgaste	24
3.2.1. Desgaste Adesivo	25
3.2.2. Desgaste por Corrosão	27
3.2.3. Desgaste Erosivo	28
3.2.4. Fadiga Superficial	28
3.2.5. Desgaste Abrasivo	30
3.2.5.1. Microcorte	31
3.2.5.2. Fratura	32
3.2.5.3. Fadiga por Microsulcamento.....	32
3.2.6. Resistência ao Desgaste Abrasivo de Ferrosos	33
3.2.7. Equação de Archard	33
3.2.8. Ensaios de Desgaste	35
3.2.8.1. Ensaio de Disco de Borracha com Areia	36
3.2.8.2. Ensaio de Erosão de Partículas Sólidas	36

3.2.8.3. Ensaio de Erosão por Cavitação	36
3.2.8.4. Ensaio de Desgaste de Quatro Esferas.....	37
3.2.8.5. Ensaio de Desgaste Pino-Sobre-Disco.....	37
3.3. Lubrificação	40
3.3.1. Regimes de Lubrificação	40
3.3.1.1. Lubrificação Hidrodinâmica.....	41
3.3.1.2. Lubrificação Hidrostática.....	41
3.3.1.3. Lubrificação Elastohidrodinâmica	41
3.3.1.4. Lubrificação de Contorno.....	42
3.4. Contatos Não-Conformantes.....	42
3.4.1. Desgaste em Superfícies Lubrificadas	47
3.5. Biodiesel	48
3.6. Óleo Diesel.....	49
4. MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1. Aço Carbono SAE 1045.....	53
4.1.1. Tratamento Térmico de Têmpera e Revenido	53
4.2. Aço SAE 52100	53
4.2.1. Tratamento Térmico de Têmpera e Revenido	54
4.2.2. Confecção dos Corpos de Prova.....	56
4.2.3. Micrografia.....	58
4.2.4. Ensaio Pino-Sobre-Disco	58
4.2.4.1. Lubrificantes.....	62
4.2.5. Ensaio de Dureza / Microdureza.....	62
4.2.6. Análise Superficial com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	63
5. RESULTADOS	65
5.1. Microestruturas Amostras de Aço SAE 1045.....	65
5.2. Microestruturas Amostras de Aço SAE 52100.....	67
5.3. Análise de Dureza	68
5.4. Caracterização dos Lubrificantes B100 e B50.....	69
5.5. Análise Tribológica Aço SAE 1045	70
5.5.1. Aço SAE 1045 sem Lubrificação	70
5.5.2. Ensaio Lubrificados Aço SAE 1045.....	71
5.5.2.1. SAE 1045 Bruto de Laminação.....	71

5.5.2.2. SAE 1045 Temperado e Revenido a 100°C	73
5.5.2.3. SAE 1045 Temperado e Revenido a 300°C	74
5.5.3. Ensaio Lubrificado Aço SAE 52100.....	75
5.5.3.1. SAE 52100 sem Lubrificação.....	75
5.5.3.2. SAE 52100 com Lubrificação.....	77
5.6. Análise do Coeficiente de Desgaste (k) e Dureza Aço SAE 1045.....	78
5.7. Análise do Coeficiente de Desgaste (k) e Dureza Aço SAE 52100.....	81
5.8. Análise Superficial com MEV	83
5.8.1. Microscopia do Aço SAE 1045 Bruto de Laminação	83
5.8.2. Microscopia Aço SAE 1045 Temperado e Revenido a 100°C.....	86
5.8.3. Microscopia Aço SAE 1045 Temperado e Revenido a 300°C.....	87
5.8.4. Microscopia Aço SAE 52100 Esferoidizado.....	89
5.8.5. Microscopia aço SAE 52100 Temperado e Revenido a 100°C	90
5.8.6. Microscopia Aço SAE 52100 Temperado e Revenido a 200°C.....	92
6. CONCLUSÕES	93
7. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	95
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96
ANEXO I – LARGURA DA PISTA DE DESGASTE.....	101
ANEXO II – VOLUME DESGASTADO MÉDIO	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Imperfeições superficiais.....	24
Figura 3.2. Escorreamento gerado por desgaste adesivo.....	26
Figura 3.3. Camada oxidada removida por cisalhamento.....	28
Figura 3.4. Crateração severa gerada por fadiga superficial nos dentes de uma engrenagem.	29
Figura 3.5. Mecanismos de desgaste por abrasão.....	31
Figura 3.6. Geração de trincas na superfície e interior de sólidos frágeis.	32
Figura 3.7. Riscos de desgaste abrasivo sendo interrompidos por carbetos.....	33
Figura 3.8. Representação de tribômetro pino-sobre-disco.....	37
Figura 3.9. Rugosidade x Lubrificação. a) Rugosidade das superfícies em contato sem lubrificação; b) Rugosidade das superfícies em contato com filme lubrificante entre elas.....	40
Figura 3.10. Pino-sobre-disco com geometria de contato não-conformante.....	43
Figura 3.11. Análise Microscópica através de um MEV da pista de desgaste.....	45
Figura 3.12. Análise microscópica através de um MEV da pista de desgaste apresentando defeitos superficiais típicos de desgaste adesivo.....	46
Figura 3.13. Análise microscópica através de um microscópio eletrônico de varredura da pista de desgaste apresentando defeitos superficiais resultantes de desgaste abrasivo.....	47
Figura 4.1. Fluxograma da metodologia empregada no estudo.....	52
Figura 4.2. Curva de revenimento aço SAE 1045. Têmpera: 850°C.....	53
Figura 4.3. Curva de revenimento aço SAE 52100. Têmpera: 845°C.....	55
Figura 4.4. Desenho tridimensional das amostras utilizadas no estudo.....	57
Figura 4.5. Microscópio óptico da marca Olympus utilizado neste estudo.....	58

Figura 4.6. Dispositivo de desgaste do tipo pino-sobre-disco utilizado no estudo	59
Figura 4.7. Medição da pista de desgaste. a) Medição da largura da pista de desgaste, gerada por ensaio a seco, na amostra 10B; b) Amostra desgastada da amostra 52A. Marcações vermelhas indicam os oito pontos de medição.....	61
Figura 4.8. Microdurômetro marca Shimadzu utilizado neste trabalho.	63
Figura 5.1. Análise micrográfica na amostra 10A, apresentando estrutura de um aço hipoeutetóide (Ferrita e Perlita). Ataque Químico: Nital: a) Aumento de 100x; b) Aumento de 500x	65
Figura 5.2. Análise micrográfica aço SAE 1045 temperado e revenido a 100°C, apresentando estrutura martensítica. Ataque Químico: Nital: a) Aumento de 100x; b) Aumento de 500x.	66
Figura 5.3. Análise micrográfica aço SAE 1045 temperado e revenido a 300°C apresentando estrutura martensítica. Ataque Químico: Nital: a) Aumento de 100x; b) Aumento de 500x.	66
Figura 5.4. Análise micrográfica aço SAE 52100 esferoidizado, apresentando estrutura esferoidita com carbeto de cromo distribuídos ao longo da matriz metálica. Ataque Químico: Nital: a) Aumento de 100x; b) Aumento de 500x.	67
Figura 5.5. Análise micrográfica aço SAE 52100 temperado e revenido 100°C, apresentando estrutura martensítica com carbeto de cromo distribuídos pela matriz metálica. Ataque Químico: Nital: a) Aumento de 100x; b) Aumento de 500x.	68
Figura 5.6. Análise micrográfica aço SAE 52100 temperado e revenido 200°C, apresentando estrutura martensítica com carbeto de cromo distribuídos pela matriz metálica. Ataque Químico: Nital: a) Aumento de 100x; b) Aumento de 500x.	68
Figura 5.7. Largura da pista de desgaste nas amostras de SAE 1045 (sem lubrificação).....	71
Figura 5.8. Largura da pista de desgaste na amostra 10A nos ensaios lubrificados	72
Figura 5.9. Largura da pista de desgaste na amostra 10B nos ensaios lubrificados	74
Figura 5.10. Largura da pista de desgaste na amostra 10C nos ensaios lubrificados	75
Figura 5.11. Largura da pista de desgaste na amostra de SAE 52100 nos ensaios sem lubrificação.	76

Figura 5.12. Largura da pista de desgaste nas amostras de SAE 52100 nos ensaios lubrificados com B100.....	78
Figura 5.13. Variação percentual de dureza dos ensaios tribológicos nas amostras de aço SAE 1045	79
Figura 5.14. Coeficientes de desgaste (k) - Aço SAE 1045	80
Figura 5.15. Variação percentual de dureza dos ensaios tribológicos realizados nas amostras de aço SAE 52100	82
Figura 5.16. Variação percentual de dureza dos ensaios tribológicos realizados nas amostras de aço SAE 52100	83
Figura 5.17. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura do aço SAE 1045 bruto de laminação (amostra 10A). Ensaio sem lubrificação e lubrificado com biodiesel B100.....	84
Figura 5.18. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura aço SAE 1045 no estado bruto de laminação (amostra 10A). Ensaio lubrificado com biodiesel B50 e com diesel B7.	85
Figura 5.19. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura do aço SAE 1045, temperado e revenido a 100°C. Ensaio sem lubrificação e lubrificado com biodiesel B100.....	86
Figura 5.20. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura aço SAE 1045 temperado e revenido a 100°C (amostra 10B). Ensaio lubrificado com biodiesel/diesel B50 e com diesel B7	87
Figura 5.21. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura da amostra 10C (aço SAE 1045 temperado e revenido a 300°C). Ensaio sem lubrificação e lubrificado com biodiesel B100	88
Figura 5.22. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura aço SAE 1045 temperado e revenido a 300°C. Ensaio lubrificado com B50 e lubrificado com diesel B7.	89
Figura 5.23. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura da amostra 52A (aço SAE 52100 esferoidizado). Ensaio sem lubrificação e lubrificado com biodiesel B100.....	90
Figura 5.24. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura da amostra 52B. Ensaio sem lubrificação e lubrificado com biodiesel B100.	91
Figura 5.25. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura da amostra 52C. Ensaio sem lubrificação e lubrificado com biodiesel B100.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Composição química do aço SAE 52100 [% em Peso]	54
Tabela 4.2. Tratamentos térmicos aplicados nas amostras ensaiadas.	55
Tabela 4.3. Composição química dos materiais utilizados no ensaio	57
Tabela 4.4. Parâmetros empregados no ensaio de desgaste.....	60
Tabela 4.5. Parâmetros empregados no espectrômetro InfraSpec VFA-IR.....	62
Tabela 5.1. Dureza inicial das amostras analisadas	69
Tabela 5.2. Percentual de ésteres metílicos nas misturas	69
Tabela 5.3. Resultados obtidos sem lubrificação nas amostras de aço SAE 1045 ..	70
Tabela 5.4. Largura da pista de desgaste nos ensaios lubrificados na amostra 10A72	
Tabela 5.5. Largura da pista de desgaste nos ensaios lubrificados na amostra 10B73	
Tabela 5.6. Largura da pista de desgaste nos ensaios lubrificados na amostra 10C74	
Tabela 5.7. Largura da pista de desgaste nas amostras de aço SAE 52100 sem lubrificação.	76
Tabela 5.8. Largura da pista de desgaste no aço SAE 52100 com lubrificação de B100.....	77
Tabela 5.9. Coeficiente de desgaste e microdureza superficial das amostras de aço SAE 1045.	79
Tabela 5.10. Coeficiente de desgaste e microdureza superficial das amostras de aço SAE 52100.	81
Tabela 9.1. Largura da pista de desgaste na amostra 10A, sem lubrificação	101
Tabela 9.2. Largura da pista de desgaste na amostra 10A, lubrificado com B100 .	101
Tabela 9.3. Largura da pista de desgaste na amostra 10A, lubrificado com B50 ...	102
Tabela 9.4. Largura da pista de desgaste na amostra 10A, lubrificado com B7	102

Tabela 9.5. Largura da pista de desgaste na amostra 10B, sem lubrificação.	102
Tabela 9.6. Largura da pista de desgaste na amostra 10B, lubrificado com B100.	103
Tabela 9.7. Largura da pista de desgaste na amostra 10B, lubrificado com B50. ...	103
Tabela 9.8. Largura da pista de desgaste na amostra 10B, lubrificado com B7.	103
Tabela 9.9. Largura da pista de desgaste na amostra 10C, sem lubrificação.	104
Tabela 9.10. Largura da pista de desgaste na amostra 10C, lubrificado com B100.	104
Tabela 9.11. Largura da pista de desgaste na amostra 10C, lubrificado com B50.	104
Tabela 9.12. Largura da pista de desgaste na amostra 10C, lubrificado com B7. ...	105
Tabela 9.13. Largura da pista de desgaste na amostra 52A, sem lubrificação.	105
Tabela 9.14. Largura da pista de desgaste na amostra 52A, lubrificado com B100.	105
Tabela 9.15. Largura da pista de desgaste na amostra 52B, sem lubrificação.	106
Tabela 9.16. Largura da pista de desgaste na amostra 52B, lubrificado com B100.	106
Tabela 9.17. Largura da pista de desgaste na amostra 52C, sem lubrificação.	107
Tabela 9.18. Largura da pista de desgaste na amostra 52C, lubrificado com B100.	107
Tabela 10.1 Volume desgastado médio das amostras de aço SAE 1045 obtido com a Equação 3.2.	108
Tabela 10.2. Volume desgastado das amostras de aço SAE 52100 obtido com a Equação 3.2.	109

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1. Classificação do desgaste.....	25
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
AA	Aluminium Association
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASM	American Society for Metals
ASTM	American Society for Testing and Materials
D	Perda de Massa
g	Gramas
GPa	Gigapascal
HB	Dureza Brinell;
HFRR	High Frequency Reciprocating Test Rig
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
k	Coeficiente de Desgaste
kg	Quilograma
L	Distância Percorrida
m	Metros
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
mm	Milímetros

MPa	Megapascal
N	Newton
NBR	Denominação de Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
P	Carga Aplicada no Pino Durante o Ensaio
R	Raio da Pista de Desgaste
r	Raio do Pino
RPM	Rotações por Minuto
s	Segundos
SAE	Society Automotive Engineers
V	Perda de Volume [mm ³];
V	Volume Desgastado
w	Largura da Pista de Desgaste [mm]
µm	Micrometro
ρ	Densidade
10A	Amostra de Aço SAE 1045 no Estado Bruto de Laminação
10B	Amostra de Aço SAE 1045 Temperado e Revenido a 100°C
10C	Amostra de Aço SAE 1045 Temperado e Revenido a 300°C
52A	Amostra de Aço SAE 52100 Esferoidizado
52B	Amostra de Aço SAE 52100 Temperado e Revenido a 100°C

52C Amostra de Aço SAE 52100 Temperado e Revenido a 200°C

WSD Wear Scar Diameter

RESUMO

DE CASTRO, Victor Velho. **Avaliação da Resistência ao Desgaste dos Aços SAE 52100 e SAE 1045, Lubrificados com Biodiesel e Diesel Comercial.** Porto Alegre. 2015. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a resistência ao desgaste de dois diferentes materiais (três amostras de SAE 1045 e três amostras de aço SAE 52100) em diferentes condições microestruturais, sem lubrificação e com lubrificação (utilizando biodiesel B100, óleo diesel B50 e óleo diesel comercial B7). Duas amostras de cada material foram submetidas a tratamento térmico de têmpera (850°C resfriado em água nas amostras de SAE 1045 e 830°C resfriado em óleo nas amostras de aço SAE 52100) seguida de revenimento (100°C e 300°C nas amostras de SAE 1045 e 100°C e 200°C nas amostras de aço SAE 52100). Assim, foram obtidas amostras com quatro durezas diferentes e diferentes condições microestruturais (martensita revenida no aço SAE 1045 e martensita revenida com uma terceira fase prioritariamente de carbeto de cromo no aço SAE 52100). Os ensaios foram realizados em um tribômetro do tipo pino-sobre-disco, com rotação de 300 RPM, 1,5kg de carga e 4400m de distância percorrida, seguindo as recomendações da norma ASTM G99-04, medição da microdureza superficial da pista de desgaste e avaliação da superfície desgastada das amostras com um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Ao final dos ensaios, observou-se a variação da resistência ao desgaste entre os diferentes materiais, diferentes microestruturas e diferentes lubrificantes aplicados no ensaio. Os resultados indicaram uma tendência de diminuição de desgaste nos ensaios realizados com lubrificação de biodiesel B100.

Palavras-Chaves: Tribologia, Biodiesel, Diesel, Pino-Sobre-Disco, Lubrificante.

ABSTRACT

DE CASTRO, Victor Velho. **Evaluation of Wear Resistance of SAE 52100 and SAE 1045 Steels, Lubricated by Pure Biodiesel, Biodiesel-Diesel Blend and Comercial Diesel Oil.** Porto Alegre. 2015. Master. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The present study aims to evaluate the wear resistance of two different materials (SAE 1045 steels and SAE 52100) in different microstructure conditions without lubrication and using biodiesel (B100), biodiesel-diesel blend (B50) and commercial diesel fuel (B7). Two samples of each material were subjected to hardening heat treatment of quenching (temperature: 850 °C and cooled in water in SAE 1045 samples and temperature: 830°C cooled in oil in SAE 52100 steel samples) followed by tempering (300°C in samples of SAE 1045 steel and 100°C and 200°C in SAE 52100 steel samples to 100 ° C). It was obtained samples with four different hardness and different microstructure conditions (tempered martensite in steel SAE 1045 and tempered martensite with Chromium Carbide in steel SAE 52100). The experiments will be conducted in a pin-on-disk tribometer, with rotation of 300 RPM, 1,5kg load and 4400 m distance covered, according to the recommendations of ASTM G99-04, followed by the wear track surface hardness measurement and evolution of the samples wear surface with a Scanning Electron Microscope. At the end of the trials, there was a variation of wear resistance between different materials, different microstructures and different lubricants applied in the test. The results showed a tendency to decrease in wear tests with B100 biodiesel lubrication.

Key-words: Tribology, Biodiesel, Diesel, Pin-on-Disk, Lubricant.

1. INTRODUÇÃO

O biodiesel é um biocombustível oriundo da biomassa, ambientalmente correto, constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos a partir da reação de transesterificação, esterificação e hidroesterificação de qualquer triglicerídeo derivado de gordura animal ou vegetal. Os pesquisadores vêm estudando diversas fontes de óleo para a produção do biodiesel, mas no cenário atual, o biodiesel é feito basicamente de óleo de soja e gordura animal (sebo bovino) (MEHER, 2004; KNOTHE et. al, 2006).

O Brasil se encontra na vanguarda na produção e uso de biodiesel, com a criação do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) e aprovação da lei 11097/05, que estabelecia o uso obrigatório de 5% de adição de biodiesel ao diesel a partir do início de 2010. Em setembro de 2014 foi sancionada a adição obrigatória de 7% de biodiesel ao diesel distribuído ao consumidor final a partir de 1º de novembro de 2014.

Tendo em vista o crescente aumento do percentual de biodiesel que o governo federal vem impondo ao diesel fornecido para consumo, as perspectivas de aumento na utilização no futuro, aliado aos diversos e vitais setores da economia brasileira que são dependentes do óleo diesel como combustível (setor de transporte de carga e passageiros, implementos e máquinas agrícolas, geradores, usuários de automóveis movidos a motores de ciclo diesel, entre outros) a análise da influência que os diferentes percentuais de mistura diesel/biodiesel possam ter na vida útil de equipamentos utilizados pelos consumidores em geral é imprescindível.

Atualmente, existe um grande empenho em garantir que os proprietários de veículos não venham a ser prejudicados pelo uso do biodiesel, o que poderia afetar

a vida útil de seus veículos. Segundo a ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis) o uso de B7 (diesel com adição de 7% de biodiesel) é viável em motores ciclo diesel convencional, e não sofrem alterações de desempenho e vida útil.

A resistência ao desgaste é um importante tópico na seleção de materiais nos projetos e aplicações que envolvem tribologia. O homem a muito vem estudando, fazendo testes de laboratório, desenvolvendo pesquisas em diferentes tipos de materiais com o intuito de medir a resistência ao desgaste sob condições controladas, semelhantes às condições de operação, classificando os materiais de acordo com determinadas aplicações (BRESSAN, 2011).

Neste contexto, as análises realizadas com o tribômetro pino-sobre-disco no aço SAE 1045 demonstram a influência que as diferentes misturas de diesel/biodiesel (biodiesel B100, B50 e diesel comercial B7) tiveram em um material não preparado para trabalhar sob condições propícias ao desgaste. Para confirmar a capacidade de lubrificação do biodiesel B100, efetuaram-se análises com lubrificação de B100 e com ausência de lubrificação, em um material com grande resistência ao desgaste (SAE 52100), que é aplicado em grande parte dos elementos de máquina submetidos a desgaste.

Neste trabalho foi estabelecida a seguinte sequência: no Capítulo 2 é apresentado o objetivo principal da pesquisa, o Capítulo 3 mostra a fundamentação teórica dos conceitos aplicados, como por exemplo, conceitos de tribologia, lubrificantes, testes de desgaste. O Capítulo 4 apresenta o procedimento experimental utilizado, com todas as etapas das análises tribológicas desenvolvidas, enquanto que o Capítulo 5 dedica-se a apresentar os resultados obtidos durante as análises. As conclusões, propostas para trabalhos futuros e referências são apresentados nos capítulos seguintes.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é investigar a influência que diferentes percentuais de misturas de biodiesel/diesel têm na resistência ao desgaste de amostras dos aços SAE 1045 e SAE 52100 com diferentes tratamentos térmicos e, conseqüentemente, diferentes durezas e propriedades mecânicas.

2.1. Objetivos Específicos

- Investigar os mecanismos de desgaste presentes no ensaio pino-sobre-disco, a seco e lubrificado, através da análise superficial com Microscópio Eletrônico de Varredura;
- Realizar a análise comparativa da microdureza superficial da pista desgastada e superfície não desgastada através do ensaio de microdureza Vickers (mHV);
- Analisar o Volume Desgastado (V) e Largura da Pista de Desgaste (W) das amostras analisadas, acompanhando a evolução dos mesmos ao longo do ensaio;
- Determinar o Coeficiente de Desgaste (k) das amostras nas condições sem lubrificação, lubrificadas com biodiesel B100, óleo diesel comercial B7, e óleo diesel B50, através da Equação de Archard;
- Avaliar a influência do percentual de biodiesel na mistura biodiesel/diesel na resistência ao desgaste do material.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Tribologia

A palavra tribologia é derivada das palavras grega TRIBOS que significa atrito, e LOGOS que significa estudo, de forma que na tradução literal é: O Estudo Do Atrito ou a Ciência Que Estuda O Atrito.

É a ciência que estuda a interação de superfícies e seus assuntos relacionados. Popularmente conhecida como a ciência que estuda a lubrificação, desgaste e atrito, incluindo os estudos da interação física e química de componentes, distribuição de forças, alteração de topografia (BHUSHAN, 2002).

A evolução tecnológica dos novos materiais atribuiu a tribologia novas áreas de atuação, gerando avanços tecnológicos na área, os quais podem evitar danos a máquinas e equipamentos, conseqüentemente, redução de prejuízos na produção (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014).

É consenso entre os pesquisadores que as principais variáveis levadas em consideração na análise do desgaste são dependentes da condição de superfície, aspectos do contato mecânico e composição do material (METALLURGICAL ENGINEERING; MECHANICAL ENGINEERING, 1996).

3.1.2. Superfície em Contato

Segundo (SHUMALTZ, 1985), o conceito de superfície está fortemente relacionado com a noção espacial de interior e exterior. Uma superfície é caracterizada por delimitar um espaço fechado.

No entanto, do ponto de vista tribológico, uma superfície deixa de ser um simples plano geométrico que separa dois meios, passando a ser caracterizada

como a camada externa ao sólido com propriedades físicas de elevado significado. A camada externa dos metais consiste de várias zonas com características físico-químicas divergentes ao material de base e do componente externo em contato (NORTON, 2004).

Quando duas superfícies são pressionadas uma a outra, a área aparente de contato A_a , é calculada com relativa facilidade, no entanto a área de contato real A_r , é afetada pelas asperezas presentes em suas superfícies, conforme Figura 3.1.



Figura 3.1. Imperfeições superficiais

Fonte: MACHADO (2008)

As tensões resultantes serão muito altas, podendo em muitos casos superar a tensão de escoamento dos materiais em contato. À medida que a força de junção entre as superfícies é aumentada, as pontas ásperas escoam, até que sua área combinada seja suficiente para equilibrar a tensão de contato a um nível aceitável (NORTON, 2004).

3.2. Desgaste

Desgaste é um termo amplo que engloba vários tipos de falhas, todas envolvendo alterações na superfície da peça. Pode ser definido como um dano progressivo que envolve a perda de material, perda essa que ocorre na superfície de um componente, como resultado de um movimento relativo a um componente adjacente. Na maioria das aplicações em engenharia, quando ocorre o movimento relativo entre duas superfícies sólidas, este movimento ocorre na presença de lubrificantes (ASM Internacional, 1992).

O desgaste pode ser tanto *brando* como *severo*, dependendo das condições de contato entre as superfícies, pressão, temperatura de contato e das durezas dos materiais. A condição de contato ou *severidade do contato* é definida por uma equação que relaciona estas variáveis (BRESSAN, 2011). As características do desgaste leve e desgaste pesado são apresentados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1. Classificação do desgaste

DESGASTE LEVE	DESGASTE SEVERO
Resulta em superfícies suaves. Muitas vezes mais suave que o original	Resulta em superfícies ásperas, com ranhuras profundas, geralmente mais rugosas que a original
Produz partículas pequenas, na ordem de 0,01mm de diâmetro	Produz partículas grandes, com diâmetro médio acima de 0,1mm

Fonte: HUTCHINGS, 1992

A maioria dos pesquisadores descreve cinco mecanismos de desgaste (NORTON, 2004):

- Desgaste adesivo;
- Desgaste abrasivo;
- Erosão;
- Desgaste por corrosão;
- Fadiga superficial.

3.2.1. Desgaste Adesivo

O desgaste adesivo também é chamado por alguns autores como desgaste por deslizamento. É caracterizado por uma alta instabilidade do coeficiente de atrito, e

ocorre principalmente em movimentos de deslizamento (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014).

Esse tipo de desgaste pode ser associado à formação de junções adesivas entre as superfícies que estão se atritando (KATO, 2001). Quando superfícies “limpas” são pressionadas uma contra a outra, com uma carga, algumas das asperezas em contato tenderão a aderir umas às outras, devido à força de atração entre os átomos das superfícies em contato. À medida que se impõe um escorregamento, estas asperezas se quebram, gerando o desgaste da superfície. Este fenômeno também é chamado de escorreamento. A Figura 3.2 apresenta o exemplo de um eixo operando com lubrificação inadequada que sofreu desgaste adesivo (NORTON, 2004).



Figura 3.2. Escorreamento gerado por desgaste adesivo

Fonte: NORTON, 2004

Segundo BHUSHAN (2002), o desgaste adesivo pode evoluir para desgaste abrasivo, devido ao surgimento de partículas livres. Portanto, a aplicação do termo desgaste adesivo é limitada, podendo ser mais apropriado o termo desgaste metal-metal.

A compatibilidade metalúrgica entre dois metais pode ser descrita como a alta solubilidade mútua, ou a formação de compostos intermetálicos. Como o desgaste adesivo depende da interação entre os átomos, ela ocorre em materiais compatíveis. Assim, o uso de materiais incompatíveis é uma das possibilidades de se reduzir o problema (NORTON, 2004).

BUDINSKI (1988) apresenta as vibrações na interface (*fretting*), emperramento (*seizure*), escoriação (*galling*), como divisões para adesão como mecanismo de dano superficial.

O *galling* é uma forma severa de desgaste adesivo, que se caracteriza por danos macroscópicos e transferência de massa. Materiais dúcteis são mais propensos a este mecanismo de desgaste, o qual é facilitado pela ausência de lubrificação sob cargas elevadas (ASM Internacional, 2001).

O *seizure* é a interrupção do movimento entre as superfícies provocado pela soldagem local (surgimento de partículas que acabam promovendo a solda) e pelo atrito entre as superfícies (ASM International, 1992). Segundo HUTCHINGS (1992) se o desgaste por adesão se tornar severo, ou seja, com transferência de grande volume de material, o fenômeno é chamado *galling* (escoriação). Se a escoriação se tornar tão severa que as duas superfícies aderirem uma a outra em uma ampla região, de maneira que as forças atuantes não produzam movimento relativo entre elas, o fenômeno é chamado emperramento (*seizure*).

O mecanismo de desgaste do tipo *fretting* é verificado em superfícies de contato projetadas para serem estáticas, mas normalmente por vibração, realizam movimentos oscilatórios de baixa amplitude. O *fretting* pode estar associado à falha por fadiga no mecanismo chamado *fretting-fatigue* (ASM International, 2001).

Como a lubrificação isola as superfícies e diminui o contato entre as mesmas, a lubrificação sempre é eficaz na redução do desgaste adesivo (ASM International, 2001).

3.2.2. Desgaste por Corrosão

Os desgastes corrosivos podem ocorrer em inúmeras situações, sendo a causa predominante a reação química entre o material e o meio ou lubrificante que está em contato (KATO, 2001). O meio pode ser o oxigênio do ar, gás, lubrificante líquido ou até mesmo outro material sólido (BUCKLEY, 1981).

O fator que determinará a magnitude da oxidação será o grau de interação entre a superfície e o meio. Parâmetros como composição, reatividade do óxido com o meio, espessura, porosidade e fragilidade do óxido irão determinar as características do processo de corrosão (BUCKLEY, 1981).

A Figura 3.3 apresenta a representação esquemática do processo de desgaste por corrosão, onde a camada oxidada é removida por cisalhamento.

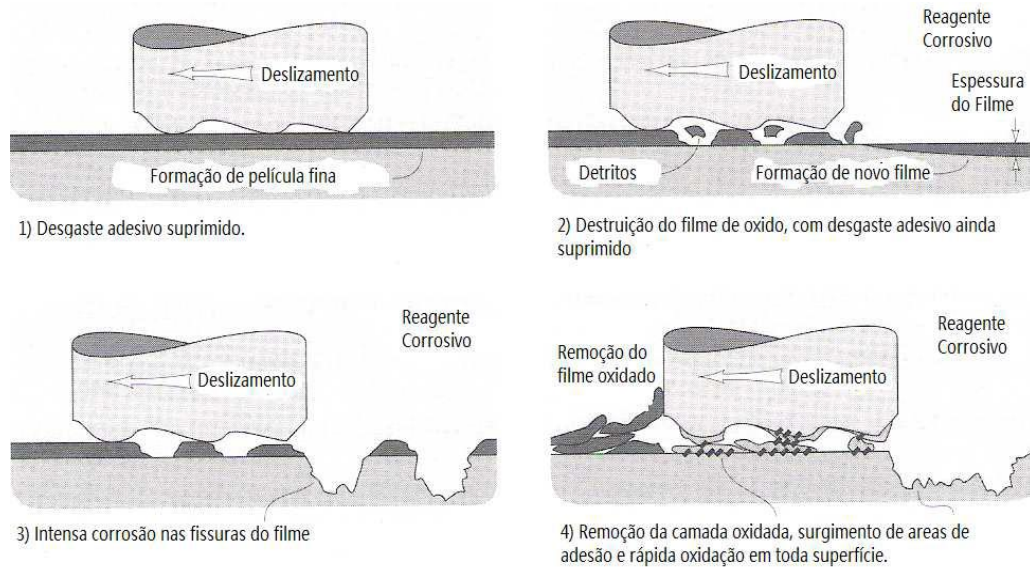


Figura 3.3. Camada oxidada removida por cisalhamento

Fonte: (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014).

3.2.3. Desgaste Erosivo

No desgaste erosivo, as partículas não são pressionadas contra a superfície como no desgaste abrasivo, mas sofrem choque mecânico contra as superfícies. Os principais parâmetros deste fenômeno são o ângulo de incidência da partícula na superfície do material, a velocidade da partícula, o tamanho da partícula e a dureza da superfície (BAYER, 2004).

As tensões impostas pela implosão de bolhas de vapor, formadas no interior de um fluido, danificam as superfícies sólidas adjacentes, provocando perda de material, associada à intensa concentração de tensões na superfície (WANTANG, 2001). O desgaste erosivo gerado por este fenômeno é conhecido como erosão por *cavitação*, sendo responsável por grandes custos de manutenção em sistemas hidráulicos (GAVRILJUJK, 1999).

3.2.4. Fadiga Superficial

Quando duas superfícies estão em contato por rolamento puro ou quando rolam com uma pequena porção de deslizamento, ocorre um mecanismo de falha

de superfície chamado fadiga superficial. O mecanismo de falha conhecido por fadiga de contato é comum em componentes mecânicos como rolamentos, engrenagens, cilindros de laminação, etc. (NORTON; 2004).

As tensões introduzidas nos mecanismos de contato são altamente dependentes da geometria de contato das superfícies, bem como do carregamento e das propriedades do material. Em todos os tipos de geometria, o raio de curvatura das superfícies em contato são fatores significativos. (NORTON, 2004). A Figura 3.4 apresenta os danos causados por fadiga superficial nos dentes de uma engrenagem.

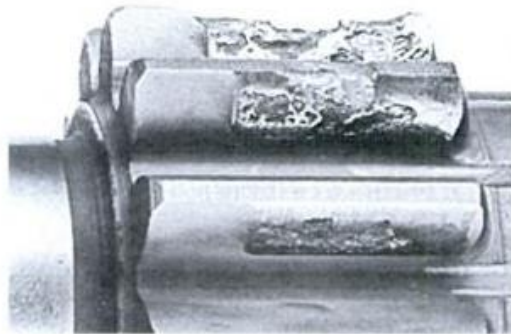


Figura 3.4. Crateração severa gerada por fadiga superficial nos dentes de uma engrenagem.

Fonte: NORTON, (2004)

A pressão na região de contato cria um estado triplo de tensões no material. As três tensões aplicadas, que nas coordenadas cartesianas são chamadas de σ_x , σ_y , σ_z são de compressão e são máximas na superfície na região de contato. Elas são chamadas Tensões de Hertz, em homenagem ao seu descobridor. As máximas de Hertz se localizam abaixo na superfície dos materiais em contato. Acredita-se que a localização abaixo da superfície da máxima tensão de cisalhamento é um fator significativo na falha por fadiga superficial. Segundo esta teoria, as trincas iniciam abaixo da superfície e crescem até que o material se separe, formando uma pequena cratera. Quando se afasta do centro da área de contato na superfície da esfera as tensões diminuem. (NORTON; 2004).

3.2.5. Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo ocorre quando duas superfícies de durezas diferentes são colocadas em contato. Assim, a carga mais dura penetra na mais macia, produzindo deformações (KATO, 2001). A fragilidade do material deve ser analisada, pois, podem ocorrer trincas, e conseqüentemente, um maior desgaste na camada superficial (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014). A proporção do desgaste depende muito de aspectos como tamanho, dureza, pressão de contato e velocidade das partículas (BAYER, 2004).

Segundo NORTON (2004) as classificações mais utilizadas na literatura dividem o desgaste abrasivo em duas principais categorias:

- Desgaste abrasivo a dois corpos: as partículas estão fortemente fixadas em um corpo permitindo riscos mais profundos no primeiro corpo;
- Desgaste abrasivo a três corpos, onde as partículas abrasivas estão livres. Isto permite o rolamento das partículas entre os corpos, fazendo com que permaneça apenas parte do tempo em que esteja em movimento, e atue no riscamento da superfície.

A visualização dos mecanismos de desgaste por abrasão só se tornou possível após o desenvolvimento da microscopia eletrônica de varredura, que possibilitou a observação de alguns aspectos do desgaste por abrasão com maiores detalhes. Para facilitar o entendimento, por exemplo, foram realizados estudos como construir um sistema pino disco dentro de um MEV (KAYABA, 1984).

O desgaste produzido por uma partícula abrasiva pode ser provocado por um processo de microcorte, por um processo de fadiga gerada por microsulcamento, ou por microlascamento se a superfície for frágil (TOMANIK, 2000).

Estudos realizados por (SWAIN, 1975) através de microscopia eletrônica mostram que o desgaste produzido por desgaste abrasivo pode ser provocado não somente por corte, mas por outros mecanismos indiretamente envolvidos (ilustrados na Figura 3.5), como por exemplo:

- Microcorte;

- Fratura;
- Fadiga por microsulcamento;

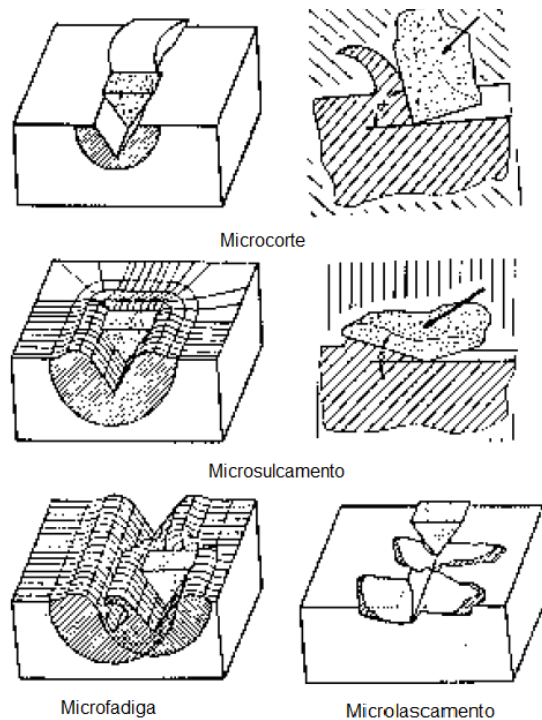


Figura 3.5. Mecanismos de desgaste por abrasão

Fonte: TOMANIK (2000); VATAVUK (1994)

3.2.5.1. Microcorte

O microcorte representa um modelo de uma “ponta” dura que corta uma superfície mole. Quando o material é um material de alta dureza, como materiais cerâmicos, trincas na superfície podem ocorrer. Nesse caso, o particulado gerado pelo desgaste é resultado de uma convergência de trincas (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014).

Quando o lubrificante está presente, o corte ocorre com uma pequena penetração do particulado se comparado ao tamanho da penetração em um sistema sem lubrificação. Outro fator que influencia no mecanismo de desgaste por abrasão é a geometria da partícula. Tem-se observado que a superfície fraturada contendo “fragmentos microcortantes” remove mais material do que materiais com “asperezas” piramidais ou esféricas (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014).

Debaixo do material que sofreu o corte, ocorre uma considerável deformação plástica. Assim, abaixo da superfície, o material sofre encruamento, se tornando mais duro e usualmente mais resistente ao desgaste por abrasão (MOORE; KING, 1980).

3.2.5.2. Fratura

As trincas (ilustrada na Figura 3.6) geralmente se iniciam a 30° da superfície e conforme o particulado avança sobre a superfície há um acumulo de trincas, que acabam liberando uma porção do material. A fragilidade do substrato pode influenciar na fratura do material (MOORE; KING, 1980).

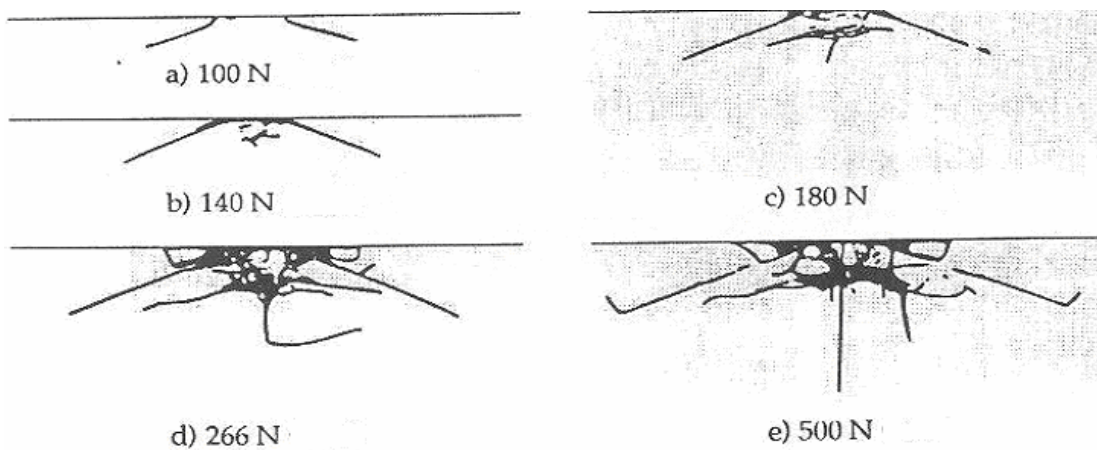


Figura 3.6. Geração de trincas na superfície e interior de sólidos frágeis.

Fonte: TEIXEIRA, (2011).

3.2.5.3. Fadiga por Microsulcamento

Desgaste por repetidos deslocamentos em um lado do material também é uma forma de desgaste por abrasão, que sob condição de repetidas deformações podem produzir desgaste (VINGSBO;HOGMARK, 1981).

Quando um material dúctil está em contato com um particulado sem ponta ou “cego” em movimento de deslizamento o corte não é bom e a superfície é desgastada e repetitivamente deformada. Nesse caso, o particulado é resultado da fadiga do material (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014). O mecanismo ocorre principalmente em materiais cerâmicos quando o contorno entre os grãos é relativamente fraco (SWAIN,1975).

3.2.6. Resistência ao Desgaste Abrasivo de Ferrosos

A resistência ao desgaste abrasivo dos aços e ferros fundidos pode-se resumir a seleção da dureza e fase metalúrgica do material. Em termos metalúrgicos, a resistência a abrasão de ferrosos pode ser determinada pela razão de austenita, bainita, martensita, perlita, ferrita e a presença ou não de cementita (GAHR, 1987).

Uma matriz martensítica com carbeto secundários uniformemente distribuídos confere em geral, uma melhor resistência ao desgaste abrasivo. Ao aumentar a dureza dos carbeto adicionando-se elementos de liga, a resistência ao desgaste também será aumentada. Elementos de liga como Mo, Cr, Ni e outros, formam carbeto muito duros (entre 1300 e 1500 HV), melhorando a resistência do desgaste, uma vez que a presença destes elementos propicia a formação de carbeto não metálicos (XU, KENNON, 1991). A Figura 3.7 demonstra a influência de carbeto no aumento da resistência ao desgaste abrasivo.

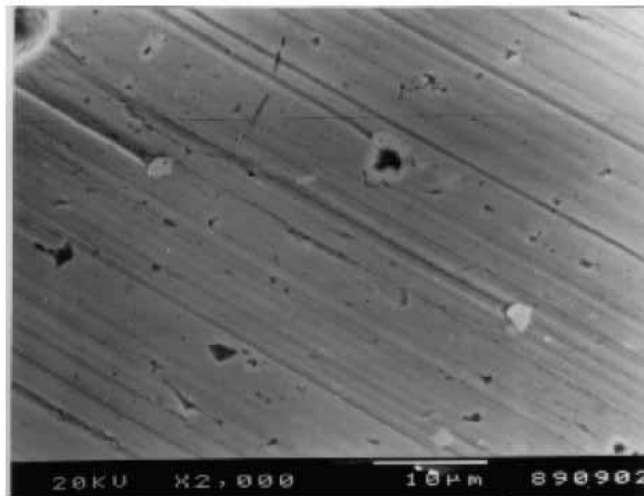


Figura 3.7. Riscos de desgaste abrasivo sendo interrompidos por carbeto.

Fonte: VATAVUK, (1994).

3.2.7. Equação de Archard

A Equação de Archard é o ponto de partida para o início dos estudos sobre desgaste (Equação 3.1). Essa equação relaciona a forma e o tamanho da área de contato com o desgaste, o carregamento e a dureza da superfície do material por

meio de uma constante k . É normalmente utilizada para modelar o desgaste por adesão e abrasão (NORTON, 2004).

$$V = k \frac{Fl}{H} \quad (3.1)$$

Onde:

V : Volume desgastado do material mais mole [mm^3];

F : Força normal [kgf];

l : Comprimento de deslizamento [mm];

H : Dureza a penetração em kg/mm^2 ou psi ;

k : Coeficiente de desgaste.

O coeficiente de desgaste k é uma propriedade adimensional do sistema deslizante, de suma importância no estudo do desgaste, e provê um importante meio de comparação do rigor dos processos de desgaste em diferentes sistemas tribológicos. Por isso, a equação de Archard fornece importantes parâmetros que descrevem a severidade do desgaste, através do coeficiente k . No entanto, a sua validade não pode ser usada para determinar a existência ou não de um dos diferentes tipos de mecanismos de remoção de material. Por isso, é necessário o uso de microscópio para identificar os principais mecanismos de desgaste atuantes (BRESSAN, 2007).

HUTCHINGS (1992) e NORTON (2004) apresentam algumas relações na Equação de Archard:

- k é proporcional ao desgaste. A constante k não é uma característica do material, mas sim do sistema tribológico. Deve-se obter esta constante no estudo do sistema estudado;

- O desgaste aumenta com a carga. No entanto, a linearidade da equação vale em intervalos pequenos;
- Geralmente o desgaste é inversamente proporcional a dureza do corpo mole. Devido a isso, é uma prática comum em projeto o aumento da dureza superficial para redução do desgaste.

Segundo NORTON (2004), valores de k para os mesmos materiais, sendo testados nas mesmas condições, variam em um fator de aproximadamente dois (2) de ensaio para ensaio. As razões não são totalmente conhecidas, sendo atualmente atribuída à dificuldade de reproduzir precisamente as mesmas condições superficiais.

Apesar das limitações, provavelmente seja a única forma de análise de desgaste que tenha ampla aceitação. Por isso ela é válida, desde que os regimes envolvidos não se alterem (TOMANIK, 2000).

Conforme BRESSAN (2007), a resistência ao desgaste dos materiais pode ser obtida através da realização de ensaios de desgaste, em um equipamento de laboratório chamado Tribômetro. Uma das técnicas de ensaio padrão, que simula as condições severas de desgaste em componentes mecânicos é o ensaio de “pino-sobre-disco”, de acordo com a norma ASTM G99-04 e a Equação de Archard (Equação 3.1).

3.2.8. Ensaio de Desgaste

Através dos ensaios de desgaste é possível realizar um estudo de degradação acelerada de dispositivos e elementos de máquina, simulando longos períodos de utilização em campo em um período de ensaio relativamente curto.

Os testes de laboratório dividem-se em duas categorias. A primeira categoria são os testes chamados fenomenológicos, que priorizam alguma situação particular de desgaste, como erosão, abrasão ou oxidação. Os testes operacionais, da segunda categoria, priorizam a aplicação do dispositivo como um todo (BAYER, 2004).

Ao contrário de outras técnicas de caracterização, não existe uma técnica geral para os testes de desgaste, mas há várias aceitas mundialmente. As diversas técnicas existem devido aos diversos tipos de desgaste que ocorrem na prática (TEDESCO, 2010).

3.2.8.1. Ensaio de Disco de Borracha com Areia

A ASTM normatizou este ensaio como ASTM G65 (ASTM G65, 2010) com uso de areia seca e, ASTM G105 (ASTM G105, 2010), com uso de areia molhada (BAYER, 2004). Tem como princípio de funcionamento o esmerilhamento de um corpo-de-prova padronizado com areia, de tamanho de grão controlado (MACHADO, 2008).

O abrasivo é introduzido entre o corpo-de-prova e um anel de borracha, provocando o riscamento. O corpo de prova é pressionado contra a roda de borracha que está girando através de um braço de alavanca (MACHADO, 2008).

3.2.8.2. Ensaio de Erosão de Partículas Sólidas

A erosão por partícula sólida (ASTM G76, 2010), é um processo de desgaste caracterizado pela remoção de material pelo impacto de material particulado, que se move a velocidades superiores a 1,0 m/s. A perda de massa é utilizada para determinar a quantidade de desgaste. A simulação do desgaste de superfície sendo atacada por areia, soprada pelo vento, é um dos exemplos de aplicação da norma (KUNIOSHI, 2004).

3.2.8.3. Ensaio de Erosão por Cavitação

A máquina de ensaio de erosão por cavitação (ASTM G32, 2010) foi desenvolvida com o objetivo de simular o fenômeno da cavitação em corpos de provas. A máquina de ensaio de erosão por cavitação consiste de uma câmara de aço inoxidável e um disco rotativo onde é fixado o corpo de prova. O disco é colocado na câmara, onde fica imerso em água, sendo submetido a uma rotação. A cavitação é provocada por furos ou pinos existentes no disco, que tem a função de formar as bolhas. O colapso das bolhas gera o desgaste por cavitação das superfícies (BAYER, 2004).

3.2.8.4. Ensaio de Desgaste de Quatro Esferas

Este ensaio se destina a classificar as graxas e óleos lubrificantes. Três esferas de 12,7 mm de diâmetro são fixadas juntas, imersas em óleo lubrificante. A quarta esfera é colocada no topo das esferas e pressionada na cavidade das esferas fixas. Assim que o lubrificante é aquecido, a esfera do topo é girada, induzindo o cisalhamento entre as quatro esferas. A análise do teste consiste em mensurar o diâmetro das depressões provocadas nas esferas fixas (ASTM D4172, 2010).

3.2.8.5. Ensaio de Desgaste Pino-Sobre-Disco

Um tribômetro pino-sobre-disco funciona com movimento relativo de deslizamento entre dois corpos, sendo um pino e um disco (TEDESCO, 2010). Em muitos modelos pode-se configurar o dispositivo tanto na horizontal quanto na vertical, onde o eixo do pino deve estar obrigatoriamente na posição perpendicular com a face do disco. Com carga pré-definida, o pino é pressionado contra o disco que está em movimento, simulando a carga utilizada em dispositivos mecânicos, hidráulicos, pneumáticos e elétricos, conforme ilustrado na Figura 3.8 (VERDI, 2011).

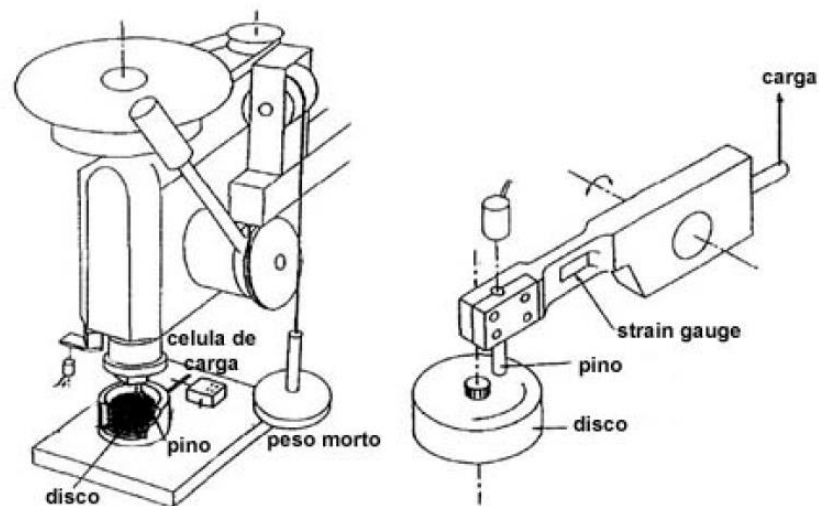


Figura 3.8. Representação de tribômetro pino-sobre-disco

Fonte: TEDESCO, 2010

O desgaste é obtido analisando a perda de massa ou a variação das medidas do disco realizadas antes e depois dos testes. O desgaste é resultado de uma

combinação de fatores como força aplicada, velocidade de deslizamento, distância percorrida, lubrificantes e propriedades dos materiais (VERDI, 2011).

No ensaio de desgaste, os parâmetros que influenciam no resultado são classificados em dois tipos: intrínsecos e extrínsecos ao material de estudo. Os parâmetros intrínsecos são aqueles que não podem ser alterados sem que haja alteração de microestrutura do material (tamanho de grão, propriedades mecânicas, térmicas, etc.). Os parâmetros extrínsecos são provenientes do meio tribológico escolhido (meio ambiente, lubrificação, presença de partículas abrasivas, etc.) e condições de operação do tribômetro. No sistema de deslizamento do tipo pino-sobre-disco, a carga aplicada, distância percorrida, velocidade, temperatura das superfícies, tempo de operação, entre outros, são considerados parâmetros extrínsecos (TEDESCO, 2010).

Nas análises de desgaste do disco, é considerado o raio da pista de desgaste obtido no ensaio, assumindo que o desgaste do pino é desprezível. (ASTM G99, 2004). A Equação 3.2 determina a perda de volume do disco:

$$V_{Disco} = 2\pi R \left[r^2 \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{w}{2r} \right) - \frac{w}{4} (4r^2 - w^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3.2)$$

Onde:

V = Perda de volume [mm³];

R = Raio da pista de desgaste [mm];

w = Largura da pista de desgaste [mm];

r = Raio do pino [mm].

No ensaio com análise de massa, transforma-se a perda de massa em perda de volume, conforme Equação 3.3.

$$V = \frac{D}{\rho} \quad (3.3)$$

Onde:

V = Perda de volume [mm³];

D = Perda de massa [g];

ρ = Massa Específica [g/mm³]. No caso do aço: 7,85g/cm³.

O parâmetro adimensional obtido através da perda de volume é o coeficiente de desgaste k, sendo calculado através da Equação 3.4:

$$k = \frac{HB \times V}{PL} \quad (3.4)$$

Onde:

k = Coeficiente de desgaste;

V = Perda de volume [mm³];

HB = Dureza Brinell;

P = Carga aplicada no pino durante o ensaio [kg];

L = Distância percorrida [mm].

Uma das características deste ensaio é a alta taxa de desgaste no início do deslizamento, seguido de uma fase estável. Segundo YANG (2005), a imprecisão na determinação do coeficiente de desgaste na fase de alta taxa de desgaste pode chegar a 1000%. Portanto, a obtenção do coeficiente de desgaste k deve ser realizada somente na fase estável.

3.3. Lubrificação

Lubrificação é a introdução de uma substância sólida, líquida ou gasosa entre duas superfícies sólidas que estejam em contato, com o objetivo de reduzir a fricção e o desgaste entre as mesmas. O processo de lubrificação pode ser realizado de muitas formas diferentes, dependendo da geometria dos corpos em contato, a rugosidade e textura das superfícies de deslizamento, a carga de contato, a pressão e temperatura, as condições ambientais, as propriedades físicas e químicas do lubrificante, entre outras, ilustrado na Figura 3.9. Os lubrificantes podem ser gasosos, líquidos ou sólidos. (ASM - METALS HANDBOOK, 1994).

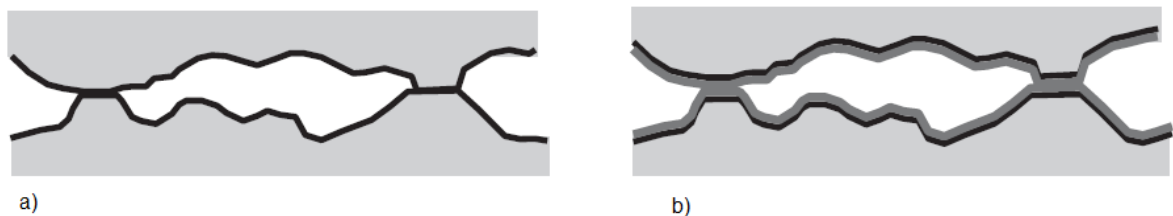


Figura 3.9. Rugosidade x Lubrificação. a) Rugosidade das superfícies em contato sem lubrificação; b) Rugosidade das superfícies em contato com filme lubrificante entre elas

Fonte: STLE, (2012)

A introdução de um lubrificante em uma interface deslizante tem muitos efeitos benéficos no coeficiente de atrito. Os lubrificantes líquidos e sólidos são altamente resistentes a tensão de compressão, e uma baixa resistência às tensões de cisalhamento. Como os lubrificantes líquidos cisalham de imediato ao sofrerem tensões externas, ele se torna o material mais fraco na interface, e sua baixa resistência ao cisalhamento reduz o coeficiente de atrito. Os lubrificantes podem atuar como contaminantes para as superfícies metálicas e podem revesti-las com monocamadas de moléculas que inibem a adesão até mesmo entre metais compatíveis. (NORTON; 2004).

3.3.1. Regimes de Lubrificação

Geralmente, a lubrificação é dividida em quatro regimes:

- *Lubrificação Hidrodinâmica;*
- *Lubrificação Hidrostática*

- *Lubrificação Elastohidrodinâmica;*

- *Lubrificação de Contorno*

3.3.1.1. Lubrificação Hidrodinâmica

A lubrificação hidrodinâmica é a condição de lubrificação onde as superfícies em contato conformantes estão separadas por película de lubrificante relativamente espessa. Este regime de lubrificação é estável e o contato superfície-superfície não ocorre. A pressão gerada é na ordem de Megapascal (MPa). Tipicamente, a mínima espessura da película que separa as superfícies é de alguns micrômetros e o coeficiente de atrito fica na ordem de 10^{-2} (ASM - METALS HANDBOOK, 1994).

Refere-se ao suprimento suficiente de lubrificante à interface de contato para permitir que a velocidade relativa das superfícies bombeie o lubrificante para dentro do espaço entre elas e separe as superfícies por um filme dinâmico de líquido (NORTON, 2004).

3.3.1.2. Lubrificação Hidrostática

É obtido pela introdução do lubrificante na área de suporte de carga, a uma pressão alta o suficiente para separar as superfícies com um filme espesso de lubrificante. Portanto, diferentemente da lubrificação hidrodinâmica, esta lubrificação não requer o movimento de uma superfície em relação à outra (SHIGLEY, et. al. 2005). Para isso, a pressão de trabalho do lubrificante é elevada (entre 10^2 a 10^4 psi). Isso requer um reservatório para guardar o lubrificante, uma bomba para pressurizá-lo e tubulação para distribuí-lo. As superfícies são separadas por uma película de lubrificante que se mantido livre de contaminantes, mantém as taxas de desgaste próximas de zero (NORTON, 2004).

3.3.1.3. Lubrificação Elastohidrodinâmica

É o regime de lubrificação que ocorre entre superfícies que estão em contato rolante, como engrenagens ou mancais de rolamento, ou seja, superfícies não conformantes (SHIGLEY, et. al. 2005).

O contato entre superfícies não-conformantes tendem a expulsar o fluido ao invés de prendê-lo, dificultando a formação de um filme completo de lubrificante. Em

baixas velocidades, estas juntas estarão em lubrificação de contorno, e podem resultar altas taxas de desgaste, com possíveis riscos e marcas. A carga cria uma pequena área de contato de deflexões elásticas das superfícies. Essa pequena área de contato pode permitir a formação de um filme hidrodinâmico, principalmente em velocidades de deslizamento elevadas. Essa condição é denominada lubrificação elasto-hidrodinâmica porque ela depende das deflexões elásticas das superfícies e pelo fato de que pressões elevadas (100 a 500 kpsi) aumentam a viscosidade do fluido (NORTON, 2004).

3.3.1.4. Lubrificação de Contorno

A lubrificação de contorno ocorre em situações nas quais algumas combinações de geometria da interface, nível de cargas elevadas, baixa velocidade ou quantidade insuficiente de lubrificante excluem a formação de uma condição hidrodinâmica (NORTON, 2004). Quando isso ocorre, as asperezas mais elevadas podem estar separadas por filmes de lubrificante de somente algumas dimensões moleculares em espessura. Isso é denominado lubrificação de contorno (SHIGLEY, et. al. 2005).

A lubrificação de contorno implica que sempre existe algum contato de metal com metal na interface. Se o filme lubrificante não for espesso para cobrir as asperezas das superfícies, esta condição de lubrificação ocorrerá (NORTON, 2004).

3.4. Contatos Não-Conformantes

A lubrificação nas superfícies do tipo não-conformante se concentra em uma área extremamente pequena, conhecida como Hertziana. Nestes contatos, a espessura da película lubrificante é muito fina, da mesma ordem de grandeza das rugosidades superficiais, tornando a pressão do lubrificante muito alta. Devido à pressão do conjunto ser extremamente alta, a relação pressão – coeficiente de viscosidade tem um grande efeito na geração do filme lubrificante e, a relação temperatura-coeficiente de viscosidade influencia fortemente a fricção das superfícies de contato (ASM - METALS HANDBOOK, 1994). A Figura 3.10 exemplifica este processo.

A orientação da rugosidade da superfície em relação à superfície de movimento pode ter uma influência significativa sobre o desempenho da lubrificação, principalmente no regime de lubrificação de contorno. Efeitos de rugosidade são particularmente importantes em contatos não-conformantes, pois, a maioria destas interações ocorre no regime de lubrificação mista (ASM - METALS HANDBOOK, 1994).

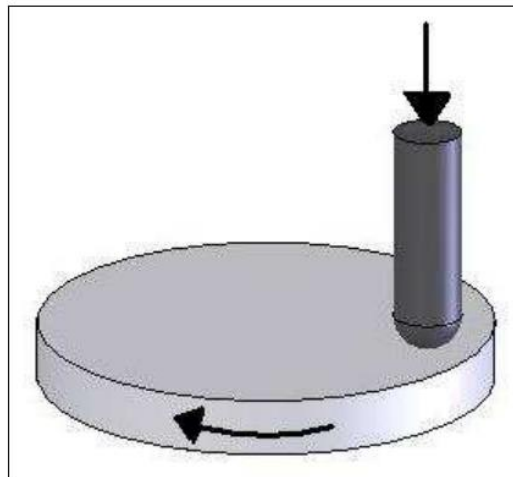


Figura 3.10. Pino-sobre-disco com geometria de contato não-conformante.

Fonte: ZANATA (2007).

Quanto ao percentual de carbono no aço, BRESSAN (2011) cita que em aços, a microestrutura destaca-se como fator chave no desgaste resultante. CHIAVERINI (2005) narra que o percentual de carbono de um aço está diretamente ligado à temperabilidade da liga, sendo, portanto, um elemento primordial na obtenção de estruturas com elevada resistência ao desgaste (martensita). Porém, para obtenção de ligas com altíssima resistência ao desgaste é necessária a utilização de elementos de liga adicionais que propiciem a formação de estruturas ainda mais resistentes, principalmente através da formação de carbeto (BRESSAN, 2007).

SCHEMMELE (2006) apresentou resultados que apontam que o aumento da quantidade de carbeto na matriz de aços ferramenta, diminui a ação do desgaste adesivo. Além disso, a presença de carbeto superduros, na maioria dos casos, apresenta afinidade química menor com o metal da face contrária. Quando se aumenta a quantidade ou o tamanho dos carbeto, os espaços entre carbeto dentro da matriz são reduzidos, diminuindo a probabilidade de formação de uma

área de contato real entre a matriz com a menor dureza do sistema e a face oposta, minimizando a propensão ao desgaste adesivo.

BRESSAN (2007) investigou a resistência ao desgaste superficial de amostras nitretadas de aço AISI 422, com diferentes tratamentos termoquímicos (nitretação a plasma e revestimentos superficiais por aspersão térmica) utilizando um tribômetro do tipo pino-sobre-disco. As amostras foram ensaiadas contra uma esfera de zircônia de 9,75mm, com velocidade de deslizamento de 0,6m/s, sob uma carga de 30N. As amostras foram desgastadas por uma distância de 2400m. As amostras temperadas e revenidas apresentaram coeficientes de desgaste $k = 0,070 \times 10^{-3}$. Os mecanismos de desgaste identificados pelo MEV foram microriscagem e descamação.

BRU (2006) realizou ensaios de desgaste através do mecanismo de desgaste do tipo pino-sobre-disco em amostras de aço SAE 4144 em diferentes condições microestruturais. Utilizou-se velocidade constante de 2m/s e cargas de 10 e 20N. Os pinos percorreram distância de 500, 1000, 2000 e 6000m. Observou-se que o aumento da dureza da superfície implicou em redução da perda de massa.

ANDRADE (2013) investigou a influência da carga normal aplicada sobre o pino no ensaio utilizando o dispositivo pino-sobre-disco. Os pinos foram confeccionados em aço AISI 1020 e AISI 4340. O disco foi fabricado em aço AISI 1020. As cargas variaram entre 9,9N e 18,7 N. O aumento da carga normal elevou a taxa de desgaste em ambos os pares pino e disco ensaiados. Os valores do coeficiente de atrito encontrados ficaram em torno de 0,25 na carga de 5N e 0,80 com carga igual a 62,9 N no par pino disco SAE 1020/SAE 1020.

YANG (2004) analisou o comportamento do coeficiente de desgaste em discos de aço ferramenta, com o pino fabricado em carboneto de tungstênio em diferentes temperaturas (entre 25°C a 600°C), alterando o ângulo de contato do pino no disco. O objetivo foi simular as condições tribológicas presentes na operação de usinagem por torneamento. Os resultados indicaram que os coeficientes de desgaste a alta temperatura foram maiores aos obtidos a 25°C. Da mesma forma, os ensaios

realizados com ângulo de contato diferente de 90°C reduziram o coeficiente de desgaste encontrado.

TEIXEIRA (2011) avaliou o comportamento tribológico através do ensaio pino-sobre-disco em amostras de ferro fundido cinzento em diferentes velocidades (0,5 m/s, 1,0 m/s e 1,5 m/s). Para os pares pinos/discos fabricados em Ferro Fundido Cinzento Centrifugado a taxa de desgaste decresceu linearmente com o aumento da velocidade de deslizamento, já para os pinos em Ferro Fundido Cinzento Centrifugado, a taxa de desgaste decresceu até 1,0 m/s, e a 1,5 m/s a taxa de desgaste apresentou um ligeiro aumento, gerada pelo aquecimento da superfície e formação da camada de óxido. Através da análise da morfologia dos defeitos superficiais encontrados na pista de desgaste, foram determinados os mecanismos de desgaste atuantes no fenômeno tribológico. O principal mecanismo de desgaste encontrado foi o desgaste adesivo (Figura 3.11).

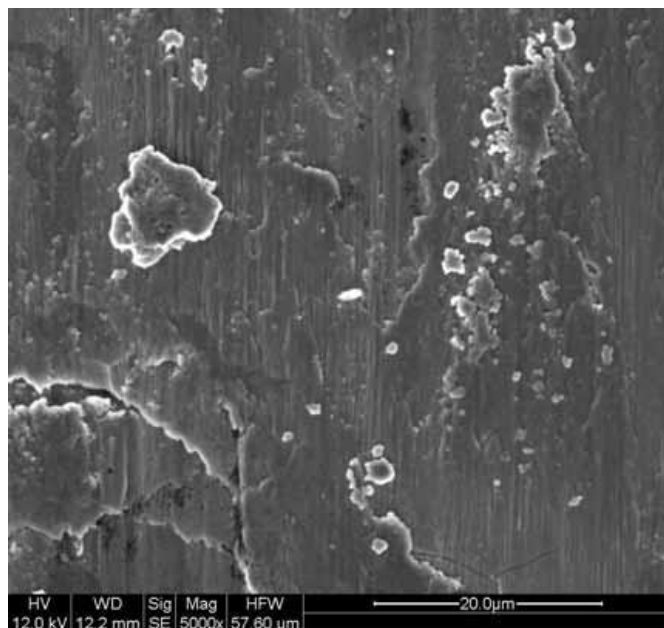


Figura 3.11. Análise Microscópica através de um MEV da pista de desgaste

Fonte: TEIXEIRA (2011).

LI (2015) comparou os coeficientes de desgaste obtidos em ensaios lubrificados de materiais sinterizados com aços utilizados na confecção de engrenagens. O par pino e disco confeccionados com os mesmos materiais obtiveram os menores coeficientes de desgaste. A amostra sinterizada de molibidênio com 2% de cobre apresentou o menor coeficiente de desgaste, devido ao elevado grau de porosidade apresentada, o que possibilitou uma melhor

lubrificação. As análises com o microscópio eletrônico de varredura confirmaram o desgaste adesivo como o principal mecanismo de desgaste no fenômeno tribológico, pois apresentaram o defeito superficial do tipo *scuffing*, indicando um desgaste adesivo severo (Figura 3.12).

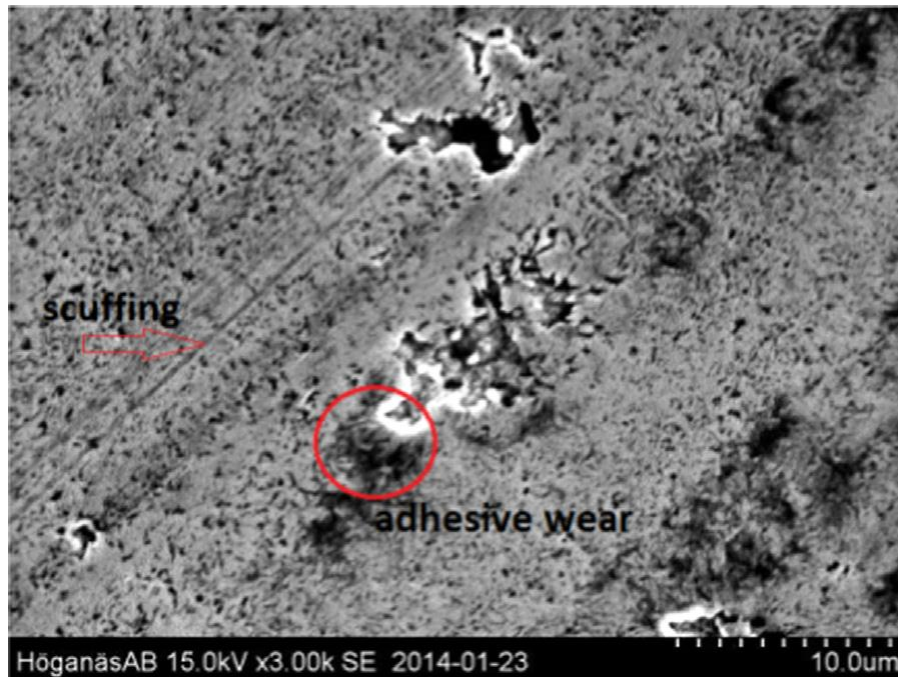


Figura 3.12. Análise microscópica através de um MEV da pista de desgaste apresentando defeitos superficiais típicos de desgaste adesivo.

Fonte: LI (2015).

LYU (2015) investigou a influência na resistência ao desgaste de óxidos criados em mecanismos de máquina expostos a intempéries de um ambiente de trabalho externo, utilizando o dispositivo de desgaste pino-sobre-disco. O estudo priorizou a análise microscópica dos mecanismos de desgaste que atuaram no processo. O desgaste adesivo esteve presente nas análises nas amostras expostas a baixa umidade.

As amostras expostas a alta umidade obtiveram o desgaste corrosivo como o mecanismo de desgaste principal. Mesmo que o ambiente propiciasse desgaste corrosivo, os óxidos formados neste processo protegeram a superfície contra o desgaste formado pelo ensaio pino-sobre-disco, portanto, reduziram o desgaste adesivo.

Assim, com o aumento da umidade ao quais as amostras foram expostas, ocorreu a inversão dos mecanismos de desgaste atuantes. Quanto maior a umidade

ao qual a amostra foi exposta, maior o desgaste corrosivo e conseqüentemente menor o desgaste adesivo, desgaste abrasivo e fadiga de superfície, ilustrado na Figura 3.13.

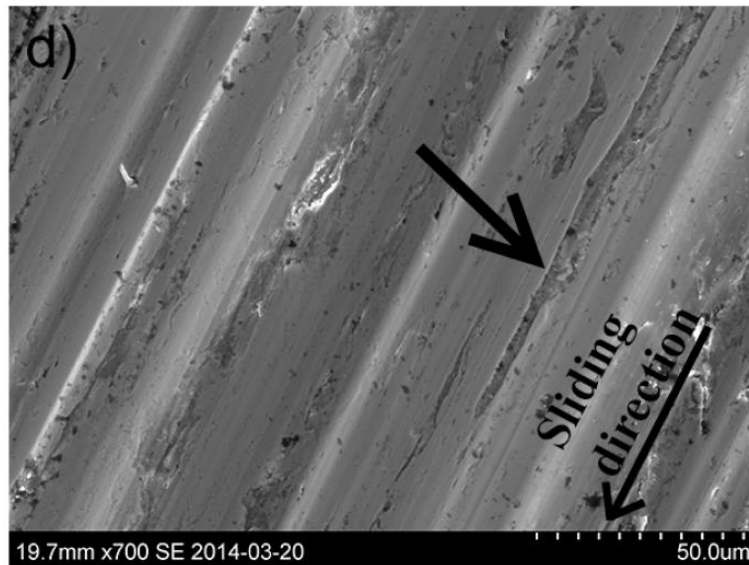


Figura 3.13. Análise microscópica através de um microscópio eletrônico de varredura da pista de desgaste apresentando defeitos superficiais resultantes de desgaste abrasivo.

Fonte: Lyu (2015).

3.4.1. Desgaste em Superfícies Lubrificadas

A ASM - METALS HANDBOOK (1994) faz algumas considerações quanto ao desgaste em superfícies lubrificadas:

- Em teoria, desgaste adesivo não ocorre em superfícies em escorregamento separadas por um filme de fluido, como na lubrificação hidrostática, lubrificação hidrodinâmica e lubrificação elastohidrodinâmica, no entanto, o desgaste pode ocorrer nos arranques e nas paradas, como nos elementos de máquina, quando pode ocorrer contato momentâneo gerado por vibrações, ou por contaminação de partículas sólidas no filme lubrificante;
- Lubrificantes mantêm sua eficácia enquanto a temperatura na interface se mantiver abaixo da temperatura de transição, valor específico de temperatura característica desse lubrificante. Se essa temperatura é excedida, a qualidade do lubrificante cai rapidamente.

3.5. Biodiesel

O biodiesel é um biocombustível oriundo da biomassa, ambientalmente correto, constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos a partir da reação de transesterificação, esterificação e hidroesterificação de qualquer triglicerídeo derivado de gordura animal ou vegetal com um álcool de cadeia curta. O biodiesel é totalmente miscível ao óleo diesel mineral, e possui características físico-químicas semelhantes ao óleo diesel. (MEHER, 2006; KNOTHE et al, 2006).

A mistura entre o biodiesel e o diesel mineral é definida pela letra B, adicionado ao número que corresponde à quantidade percentual de biodiesel na mistura. Sendo assim, a mistura com 5% de biodiesel, é chamada B5 (ENCARNAÇÃO, 2008).

Os fabricantes de componentes automotivos apresentam restrições na garantia em relação ao percentual máximo de biodiesel que pode ser usado. O biodiesel puro (B100) não é compatível com a borracha comum, podendo atacar mangueiras e vedações dos motores. Entretanto, misturas até B20 têm-se mostrado absolutamente seguras (ENCARNAÇÃO, 2008).

No Brasil existem muitas espécies de vegetais que podem ser utilizadas na produção do biodiesel, como por exemplo: o óleo de girassol, de amendoim, de mamona, de soja, etc.

Atualmente, 75% da produção brasileira é feita a partir do óleo de soja, 20% com gordura animal e o restante com diversas outras fontes, como o dendê, o óleo de algodão e de canola. Em julho de 2014 esse percentual subiu para 6% e em novembro de 2014 para 7% (O QUE É BIODIESEL, 2014).

Segundo NETO (2012), a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) estabeleceu como parâmetro de caracterização a viscosidade cinemática do biodiesel a 40°C que deve ficar entre 3,0 mm²/s e 6,0 mm²/s, devendo ser límpido e isento de impurezas.

O óleo ou gordura não podem ser utilizados como combustível em sua forma natural, pois possuem alta densidade. Para reduzir a viscosidade, o processo

chamado transesterificação converte uma molécula de óleo em três moléculas de ésteres e uma molécula de glicerina. A glicerina é removida. Os ésteres resultantes são o que chamamos de biodiesel (HASEEB, 2010).

Na reação de transesterificação o triglicerídeo reage com um álcool simples (metanol ou etanol), formando ésteres (metílico ou etílico), que constituem o biodiesel, e glicerol. O álcool é adicionado em excesso com objetivo de permitir a formação da fase separada de glicerol e deslocar o equilíbrio para um máximo rendimento de biodiesel. (ENCARNAÇÃO, 2008).

Normalmente aplica-se para a fração de álcool o metanol ou etanol. Se for utilizado metanol, a reação produzirá ésteres metílicos e se for utilizado etanol serão produzidos ésteres etílicos. A reação utilizando metanol apresenta-se mais viável, pois o etanol possui teores de água próximos a 5% que prolongam a reação. O uso do metanol permite a separação da glicerina pelo processo de decantação (JULIATO, 2006).

3.6. Óleo Diesel

O óleo diesel é o principal produto derivado de petróleo comercializado no Brasil, sendo utilizado no transporte de cargas e passageiros, na indústria, na geração de energia, nas máquinas de construção civil, nas máquinas agrícolas entre outros (PETROBRAS, 2014).

O óleo diesel é obtido a partir da destilação do petróleo, constituído principalmente por hidrocarbonetos que na maioria são alcanos de cadeia normal, e em menor proporção, ramificado e cíclico. Enxofre, nitrogênio e oxigênio também são encontrados no óleo diesel em baixas concentrações (MARIANO, 2006; ARRUDA, 2011).

Comparada a produção de diesel baseados em óleo mineral a produção de biodiesel não é viável economicamente, assim, deve ser amplamente subsidiada. Mesmo tendo um custo de produção superior ao diesel produzido a partir de petróleo, o biodiesel é a solução viável para minimizar os problemas gerados pelo consumo do combustível diesel. Porém, a capacidade de produção é limitada, pois depende de áreas agricultáveis disponíveis (FOLQUENIN, 2008).

FARIAS (2014) analisou a lubricidade de diferentes combinações da mistura Óleo Diesel e Biodiesel, verificando a lubricidade do combustível através do ensaio High Frequency Reciprocating Test Rig (HFRR) em amostras do aço SAE 52100. Os biocombustíveis B100 e B20 apresentaram uma lubricidade similar entre eles, e superior ao diesel convencional. Porém, a análise das imagens gerada por este ensaio mostrou que a mistura B20 de éster de soja apresentou um valor menor. Outra conclusão obtida por este trabalho foi que o biodiesel tem uma maior capacidade de proteger as superfícies de peças se comparado ao combustível diesel (S1100), devido aos seus elevados teores de compostos oxigenados e ácidos graxos. O oxigênio presente no biodiesel pode acelerar a geração de película de Fe_3O_4 , que é um bom lubrificante.

VERDI, (2011) utilizou o método de ensaio pino-sobre-disco para analisar a variação de desgaste em amostras da liga Alumínio Cobre AA305, lubrificadas com biodiesel e óleo diesel B5. Em análises com cargas de 5N e 8N, obteve-se melhor lubricidade para o biodiesel. O ensaio com carga de 5N a variação volumétrica foi maior com o uso de B5. No ensaio a 8N não houve variação volumétrica. A análise microscópica mostrou que os efeitos tribológicos foram mais severos no ensaio lubrificado com óleo diesel B5.

NICOLAU, (2014) avaliou a relação entre lubricidade e impedância elétrica de amostras de diesel com baixo teor de enxofres e diferentes misturas de diesel/biodiesel determinada através de WSD (wear scar diameter). Foi encontrada uma correlação linear entre resistividade elétrica e a lubricidade. No entanto, a adição de 1-10% de biodiesel não alterou significativamente a lubricidade da mistura. A relação entre a lubricidade e a resistividade elétrica no biodiesel é quantitativamente descrito por uma função exponencial.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O método aplicado a este trabalho busca avaliar a resistência ao desgaste de diferentes materiais (aço carbono SAE 1045 e aço liga SAE 52100), em diferentes condições microestruturais (submetidas a tratamentos térmicos em condições diferentes) em ensaios com ausência de lubrificação. Juntamente, foi avaliada a resistência ao desgaste das mesmas amostras quando submetidas à lubrificação. Nos ensaios lubrificados foram utilizados: o biodiesel (B100), ou seja, 100% de biodiesel, óleo diesel comercial (B7) com 7% de biodiesel, e óleo diesel com 50% de biodiesel (B50).

O trabalho constituiu das seguintes etapas:

- Tratamentos térmicos nos materiais SAE 52100 e Aço SAE 1045;
- Preparação das amostras (usinagem e processo de lixamento);
- Ensaio de desgaste no tribômetro de desgaste do tipo pino-sobre-disco conforme a norma ASTM G99-04;
 - Ensaio a seco;
 - Ensaio lubrificado com biodiesel B100;
 - Ensaio lubrificado com óleo diesel B50.
 - Ensaio lubrificado com óleo diesel comercial B7;
- Obtenção dos perfis de desgaste ao longo do ensaio nas diferentes condições propostas;
- Determinação do coeficiente de desgaste das diferentes amostras;

- Determinação dos mecanismos de desgaste presentes no ensaio, através da análise das imagens da pista de desgaste, obtidas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

As etapas da metodologia deste trabalho são ilustradas na Figura 4.1:

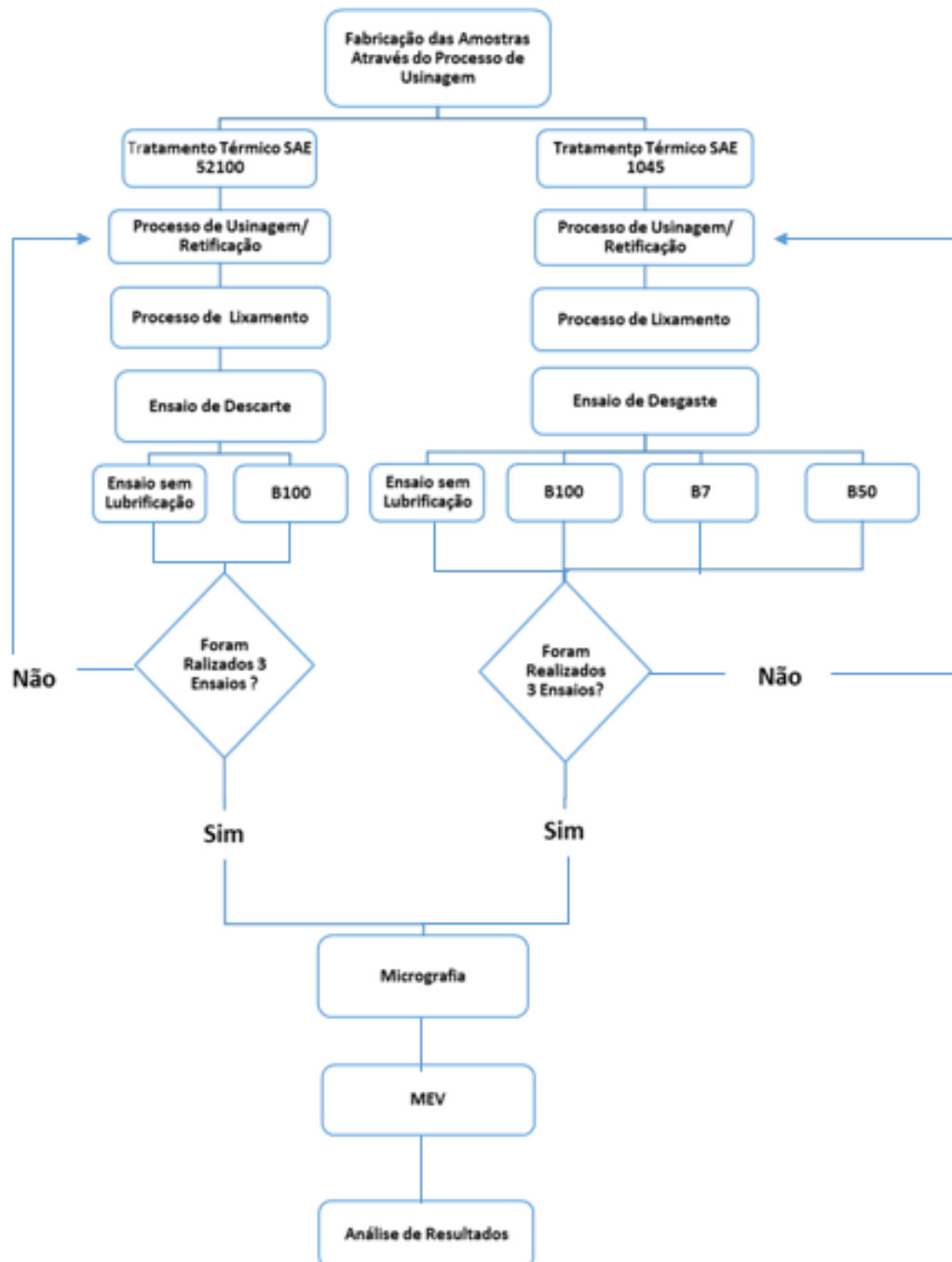


Figura 4.1. Fluxograma da metodologia empregada no estudo

4.1. Aço Carbono SAE 1045

O aço SAE 1045 é classificado como aço para construção mecânica, ao carbono, hipoeutetóide (0,45% de C). O aço SAE 1045 é um aço com temperabilidade baixa, não sendo recomendando seu uso para seções superiores a 60 mm. É utilizado em geral com durezas de 180 a 300 HB. Aplicado na fabricação de eixos em geral, pinos, cilindros, ferrolho, parafusos, grampos, pregos, colunas, entre outros. (AÇO CONSTRUÇÃO MECÂNICA, 2014).

4.1.1. Tratamento Térmico de Têmpera e Revenido

A Austenitização no tratamento de têmpera ocorre na temperatura entre 820°C a 850°C. Deve ser aquecido por 1 hora para cada 25 mm de espessura. Resfriar em água. O revenimento deverá ser realizado imediatamente após a têmpera, quando a temperatura atingir cerca de 70°C. A temperatura de revenimento, também será selecionada de acordo com a dureza especificada para o componente. Manter na temperatura por no mínimo 1 hora para cada 25 mm. Resfriar em ar calmo (AÇO CONSTRUÇÃO MECÂNICA, 2014). A Figura 4.2 indica a variação da dureza conforme temperatura de revenimento do aço SAE 1045.

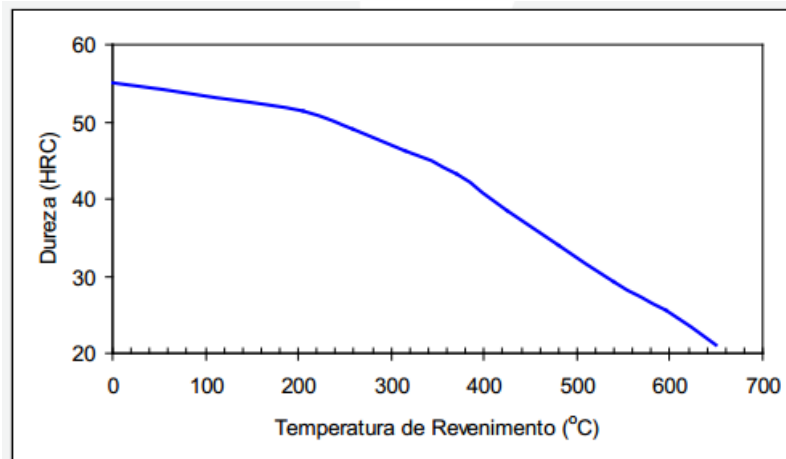


Figura 4.2. Curva de revenimento aço SAE 1045. Têmpera: 850°C.

Fonte: AÇO CONSTRUÇÃO MECÂNICA (2014).

4.2. Aço SAE 52100

O aço SAE 52100 é um aço de elevado teor de carbono, ligado ao cromo, utilizado para beneficiamento quando se pretende atingir elevada dureza após a têmpera, entre 62 – 66 HRC. É um aço temperável em óleo. A composição química apresentada pelo fabricante é descrita na Tabela 4.1.

O Aço SAE 52100 é utilizado em ferramentas para trabalho a frio (brocas, alargadores, machos, ferramentas para repuxo em tornos, punções, ferramentas para extrusão a frio, facas para papel, etc.) e como componentes de rolamentos na confecção de pistas internas e externas, esferas, roletes e agulhas (AÇOS ESPECIAIS; 2014).

Tabela 4.1. Composição química do aço SAE 52100 [% em Peso]

C	Si	Mn	Cr
0,98 – 1,10	0,15 – 0,35	0,25 – 0,45	1,30 – 1,60

Fonte: AÇOS ESPECIAIS, 2014.

Como indicado pela composição química apresentada na Tabela 4.1, o aço SAE 52100 é um aço hipereutetóide contendo cromo. Caracteriza-se pela boa usinabilidade, confiabilidade do produto final e, uma satisfatória resistência à fadiga superficial por contato.

Este aço apresenta carbeto finamente dispersos na matriz martensítica revenida. O cromo tem participação ativa na estabilização e tamanho dos carbeto no tratamento de esferoidização. Outra qualidade deste aço é a distribuição dos carbeto, com isso, obtém-se uma transformação de fase ferrita-austenita mais rápida e mais homogênea (SILVA, 2001).

O material para confecção dos corpos de prova foi fornecido na condição esferoidizado.

4.2.1. Tratamento Térmico de Têmpera e Revenido

No tratamento térmico de têmpera, o aquecimento deve estar entre 840°C a 870°C, deixando-se em temperatura por aproximadamente 30 minutos para cada 25 milímetros de espessura da peça. O resfriamento é realizado em óleo com agitação e aquecimento entre 40°C/70°C (AÇOS ESPECIAIS; 2014).

O revenimento é realizado em temperaturas entre 120 – 200°C. Nestas condições não há queda significativa da dureza. A cerca de 180°C a dureza pode cair de 1 a 2 pontos HRC. A variação da dureza em função da temperatura de revenimento é mostrada na Figura 4.3 (AÇOS ESPECIAIS; 2014).

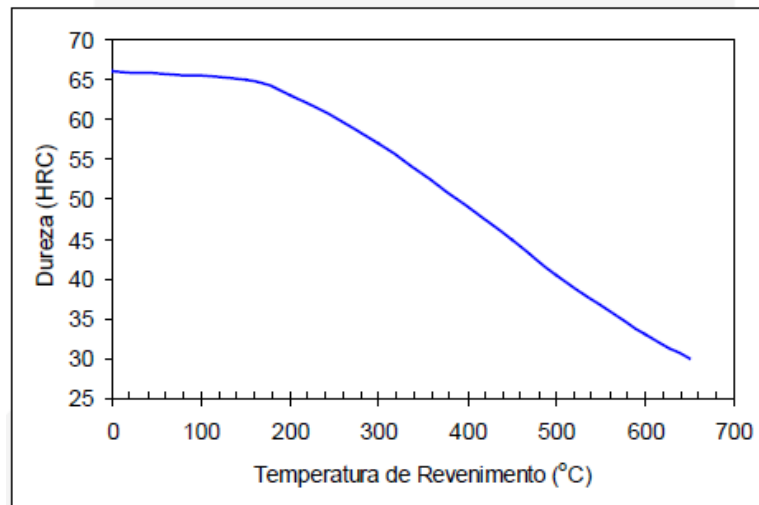


Figura 4.3. Curva de revenimento aço SAE 52100. Têmpera: 845°C.

Fonte: AÇOS ESPECIAIS (2014)

As condições de tratamento térmico aos quais as amostras utilizadas foram submetidas são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Tratamentos térmicos aplicados nas amostras ensaiadas.

	Amostra (n)	<i>Tratamento Térmico</i>
Aço SAE 1045	10A	Estado Bruto de Laminação
	10B	Tratamento Térmico de Têmpera em água (830°C) seguido de Revenimento: 100°C
	10C	Tratamento Térmico de Têmpera em água (830°C) seguido de Revenimento: 300°C
Aço SAE 52100	52A	Esferoidizado
	52B	Tratamento Térmico de Têmpera em óleo (850°C) seguido de Revenimento: 100°C
	52C	Tratamento Térmico de Têmpera em óleo (850°C) seguido de Revenimento: 200°

4.2.2. Confeção dos Corpos de Prova

As amostras, confeccionadas em Aço SAE 52100 e SAE 1045, bem como o pino de contato são apresentadas abaixo:

PINO:

Seguindo as recomendações da norma ASTM G99, o pino esférico com 10 mm de diâmetro é fabricado em Alumina (Al_2O_3). Dispensou-se a preparação superficial da superfície da esfera.

AMOSTRAS:

As amostras, confeccionadas em formato de discos, foram fabricadas pelos processos de torneamento seguido de retificação superficial no Laboratório de Processos de Fabricação da Faculdade de Engenharia da PUCRS. Os discos possuem um diâmetro de 112 mm, com 20 mm de espessura inicial.

Seguindo as recomendações da norma ASTM G99-04, as amostras foram submetidas ao processo de lixamento, sendo aplicadas as seguintes lixas respectivamente: #100, #220, #320, #400, #600, #1200, garantindo que a rugosidade superficial fique abaixo do limite superior especificado pela norma ($0,8\mu m$).

O processo foi executado nas duas faces das amostras (Lado A: ensaio a seco; Lado B: ensaio sob lubrificação de biodiesel, óleo diesel comercial B7 e óleo diesel B50 nas amostras 10A, 10B e 10C e biodiesel B100 nas amostras 52A, 52B, 52C). O Raio da Pista de Desgaste possui 49,5 mm.

A Figura 4.4 apresenta a imagem das dimensões nas quais as amostras foram confeccionadas.

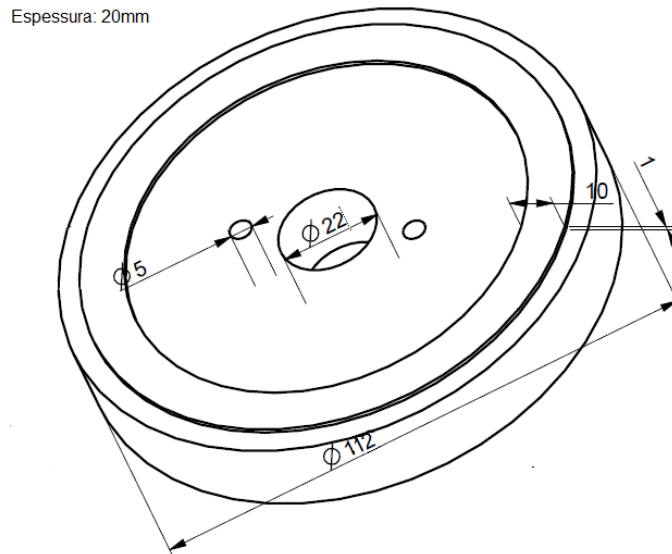


Figura 4.4. Desenho tridimensional das amostras utilizadas no estudo

A espessura das amostras foi determinada com o intuito de otimizar o processo de lixamento na preparação das amostras, que era realizado manualmente. O posicionamento e dimensões dos furos foram feitos em função do sistema de fixação da amostra no tribômetro, (realizado através de dois parafusos). Os ressaltos, com 10mm de largura e 1mm de altura, tinham por objetivo diminuir a área de contato com a lixa, e assim, facilitar o processo de lixamento.

Através de um espectrômetro ICP, modelo SPECTROMAXx, da marca AMETEK foi determinada a composição química das amostras nos dois materiais utilizados no estudo. Os resultados médios (foram realizados três ensaios) encontrados nas análises são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Composição química dos materiais utilizados no ensaio

Material	Fe (%)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)
SAE 1045	97,90	0,46	0,28	0,81	0,097	0,018	0,087
SAE 52100	96,30	1,01	0,27	0,39	1,59	0,025	0,074

4.2.3. Micrografia

As análises micrográficas foram realizadas no Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia da PUCRS. Após a realização de todas as análises tribológicas, os discos foram cortados para que fosse possível a visualização da estrutura cristalina da seção transversal do material. As amostras foram lixadas com as lixas #100, #220, #320, #400, #600, #1200, seguido de polimento. O ataque químico foi realizado com nital. As análises microscópicas foram realizadas com microscópio óptico da marca Olympus, ilustrada na Figura 4.5.



Figura 4.5. Microscópio óptico da marca Olympus utilizado neste estudo.

4.2.4. Ensaio Pino-Sobre-Disco

Os resultados de resistência ao desgaste dos aços SAE 52100 e SAE 1045 foram obtidos através da realização de ensaios de desgaste a seco, e com aplicação de lubrificação (biodiesel B100, diesel comercial B7 e biodiesel/óleo diesel B50) no tribômetro do tipo pino-sobre-disco desenvolvido pela Faculdade de Engenharia da PUCRS (ver Figura 4.6). Os principais componentes do tribômetro são descritos abaixo:

Controlador/Motor Elétrico: O controlador do motor elétrico bifásico é composto por um controlador eletrônico de velocidade, que permite a configuração dos parâmetros de ensaio desejados. Assim, foi possível configurar a velocidade de rotação da

amostra (configurada em RPM) e distância percorrida que será realizada no ensaio (em metros).

Massa/Pino: Foram confeccionados dois pesos com massa de 500g e o segundo com 425g. Como o pino e a porca de fixação possuem 75g, e o pino 500g, o conjunto pino/massa pesa 1500g ou 1,5kg.

Porta-Disco: Dispositivo onde as amostras são fixadas através de dois parafusos de 5mm. O porta-disco é acoplado a um rolamento no tribômetro fixado no fundo do recipiente de acrílico.

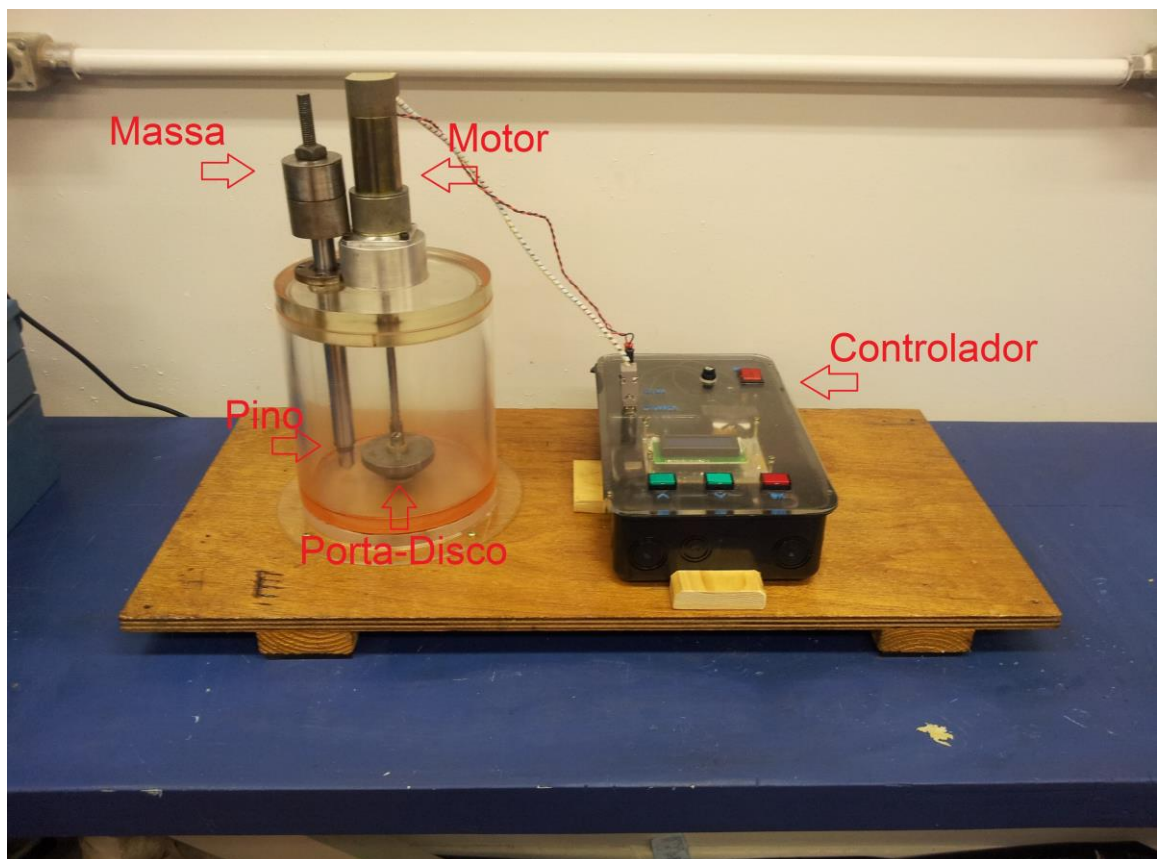


Figura 4.6. Dispositivo de desgaste do tipo pino-sobre-disco utilizado no estudo

Os parâmetros do ensaio como a distância total percorrida, carga normal aplicada sobre o pino e velocidade de deslizamento constante estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Parâmetros empregados no ensaio de desgaste

Velocidade de deslizamento (RPM)	Carga (N)	Distância total percorrida (m)
300	14,71	4400

A largura da pista de desgaste (w) e o volume desgastado (V) foram analisados a cada 400m de distância percorrida; sendo medidos a cada 90° da pista, totalizando quatro medições. As últimas medições da pista (4400m de distância percorrida) foram realizadas a cada 45°, totalizando oito medições. Nas amostras de alta dureza ocorreu uma dificuldade na medição da largura da pista de desgaste em 400m de distância percorrida. Portanto, nas amostras temperadas e revenidas dos aços SAE 52100 e SAE 1045 a primeira medição ocorreu em 800m de distância percorrida.

Ao final do ensaio foi possível traçar o perfil da largura e a perda de massa do disco, bem como o coeficiente de desgaste médio k obtidos através das equações 3.1 e 3.3 (detalhadas no item 3.2.7.5). Como foram realizados três ensaios em cada uma das condições propostas, os valores médios apresentados no Capítulo 5 foram encontrados a partir de 12 medidas (nas medições ocorridas entre 800m e 4000m de distância percorrida). A média da última medição (4400m) foi encontrada a partir de vinte e quatro medições. Todas as medições são apresentadas no Anexo I.

$$V_{Disco} = 2\pi R \left[r^2 \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{w}{2r} \right) - \frac{w}{4} (4r^2 - w^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3.1)$$

$$k = \frac{HB \times V}{PL} \quad (3.3)$$

Assim, percebe-se que o coeficiente de desgaste k , depende do volume desgastado do disco, a dureza da amostra, a carga aplicada e distância percorrida.

A fim de evitar a ocorrência de desgaste abrasivo a três corpos, decorrente de partículas metálicas em suspensão originadas de ensaios anteriores, foi realizado o

processo de filtragem nos lubrificantes após a realização de cada ensaio. Todos os ensaios foram realizados a temperatura ambiente.

Através de um conjunto Termopar/Multímetro Minipa modelo ET-2042C, foi realizada a medição da temperatura dos lubrificantes durante os ensaios com lubrificação. A variação média de temperatura foi de aproximadamente 1°C, o que não acarreta variação da viscosidade dos lubrificantes e, portanto, na severidade do desgaste durante o ensaio.

Determinou-se a largura das pistas de desgaste através do sistema óptico do durômetro Brinell marca AWPMA, com precisão de 0,01mm, pertencente ao Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia da PUCRS. A Figura 4.7 ilustra o processo de medição da pista de desgaste das amostras.

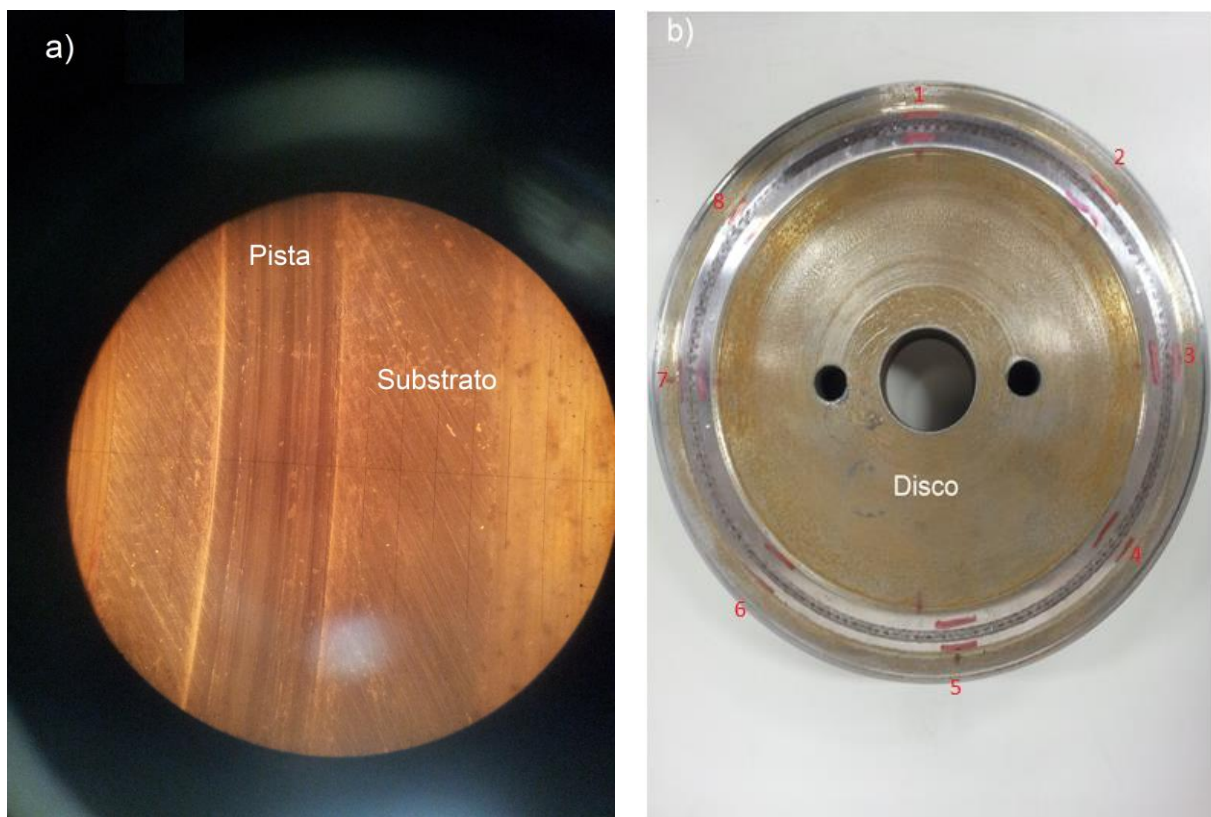


Figura 4.7. Medição da pista de desgaste. a) Medição da largura da pista de desgaste, gerada por ensaio a seco, na amostra 10B; b) Amostra desgastada da amostra 52A. Marcações vermelhas indicam os oito pontos de medição.

4.2.4.1. Lubrificantes

O biodiesel B100 a base de óleo de soja pela rota metálica foi fornecido pela Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC). O Óleo Diesel comercial S500 (93% de diesel e 7% de biodiesel), da refinaria Ipiranga, utilizado neste trabalho foi obtido do posto de combustíveis Caminho Verde localizado na Av. João Wallig, no bairro Passo D'Areia em Porto Alegre.

Os lubrificantes B50 e B100 foram caracterizados através do Espectrômetro InfraSpec TM VFA-IR, modelo EB. Os parâmetros dos ensaios são apresentados na Tabela 4.5. Para a curva de calibração 30-100% foi utilizada uma faixa do espectro entre 8.0 μ m - 8.85 μ m com correção de linha de base entre 7.5 μ m - 7.6 μ m e 9.6 μ m - 9.7 μ m.

Tabela 4.5. Parâmetros empregados no espectrômetro InfraSpec VFA-IR

Parâmetro	Especificação
<i>Demanda de Energia</i>	9V DC, 2,0
<i>Fonte de Energia</i>	Conversor Universal AC/DC
<i>Faixa de Operação</i>	15-60°C
<i>Detector</i>	Detector Piroelétrico Linear de 148 pixels
<i>Faixa Espectral</i>	5.5-11 μ m (1818 - 910 cm^{-1})
<i>Resolução Espectral Nominal</i>	14 cm^{-1}
<i>Cristal ATR</i>	ZnSe

4.2.5. Ensaio de Dureza / Microdureza

Os ensaios de Microdureza Vickers (mHV), com carga de 200g, foram realizados nos discos desgastados a fim de comparar a variação da dureza da pista de desgaste, antes e depois do ensaio. Os resultados obtidos na pista de desgaste

foram comparados com os valores encontrados na superfície não desgastada e aplicados na Equação 3.1, na determinação do coeficiente de desgaste k (convertidos em kgf/mm^2 – Dureza Brinell).

Devido à alta rugosidade na pista de desgaste encontrada nas amostras 10A e 52A (Desgaste sob condição severa), após o ensaio a seco, a qualidade da impressão dos ensaios de Microdureza Vickers não permitiram a correta medição dos valores nestas amostras. Por isso, nestes casos, foram realizados os ensaios de dureza Rockwell B.

Os ensaios de Microdureza Vickers e Rockwell B (realizados nas amostras de aço SAE 52100 Esferoidizado e SAE 1045 no estado bruto de laminação) foram realizados nos durômetros pertencentes ao Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia da PUCRS, dos fabricantes Shimadzu (Figura 4.8) e AWPMA respectivamente. Para que a geometria da superfície não interferisse nos resultados encontrados, as medições das durezas das pistas de desgaste foram realizadas exclusivamente no fundo do canal.

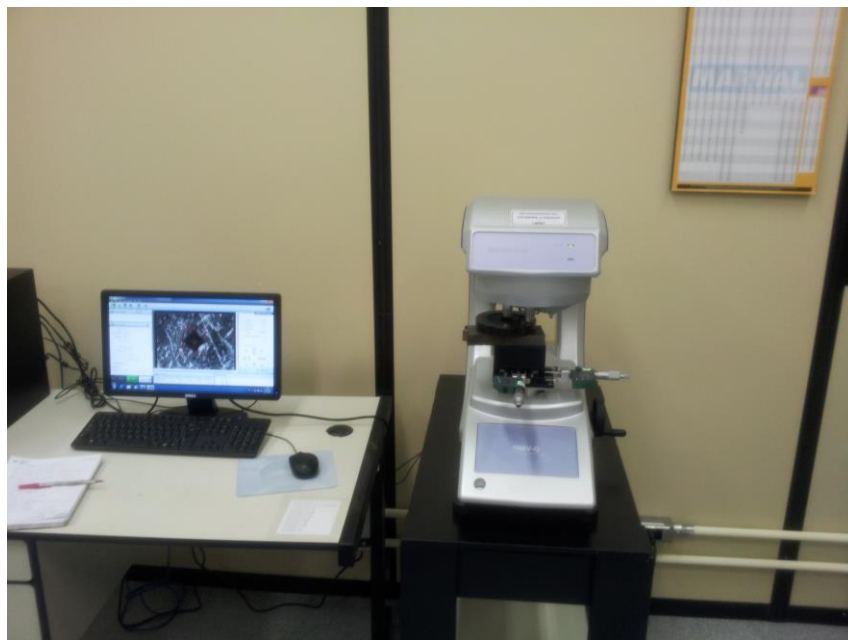


Figura 4.8. Microdurômetro marca Shimadzu utilizado neste trabalho.

4.2.6. Análise Superficial com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

A fim de determinar os mecanismos atuantes no desgaste das amostras nas diferentes condições propostas, foram realizadas análises da condição superficial

das pistas desgastadas utilizando microanálises através do MEV (modelo F50 da marca Inspect) pertencente ao Laboratório de Microscopia da PUCRS.

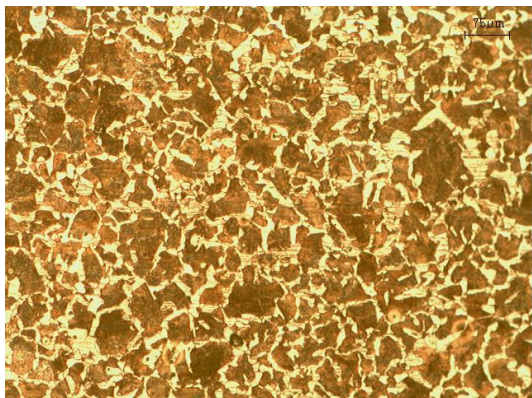
5. RESULTADOS

Os resultados encontrados ao aplicar a metodologia demonstrada no Capítulo 4 são apresentados a seguir:

5.1. Microestruturas Amostras de Aço SAE 1045

A Figura 5.1 apresenta as imagens obtidas na amostra do aço SAE 1045 no estado bruto de laminação (10A). A estrutura micrográfica da amostra apresenta o microconstituente perlita (grão em tom escuro), inseridos em uma matriz de ferrita (que podem ser observados nos contornos de grão em tom mais claro). Observa-se em detalhes na Figura 5.1 b um grão de perlita da amostra, onde é possível observar as lamelas de ferrita (α) e cementita (Fe_3C), na qual a perlita é constituída.

a)



b)

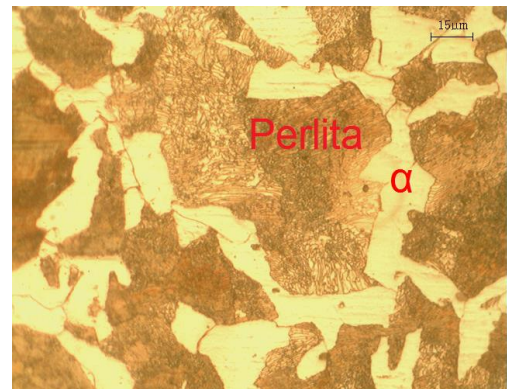


Figura 5.1. Análise micrográfica na amostra 10A, apresentando estrutura de um aço hipoeutetóide (Ferrita e Perlita). Ataque Químico: Nital: a) Aumento de 100x; b) Aumento de 500x

A Figura 5.2 apresenta a análise micrográfica da amostra de aço SAE 1045 temperado e revenido a 100°C (10B). Observa-se martensita revenida (fase metaestável) decorrente do processo de têmpera seguida de revenimento. Na

Figura 5.2b é possível visualizar a morfologia característica da martensita (em forma de agulhas). Os pontos escuros e esféricos são inclusões não metálicas.

a)



b)

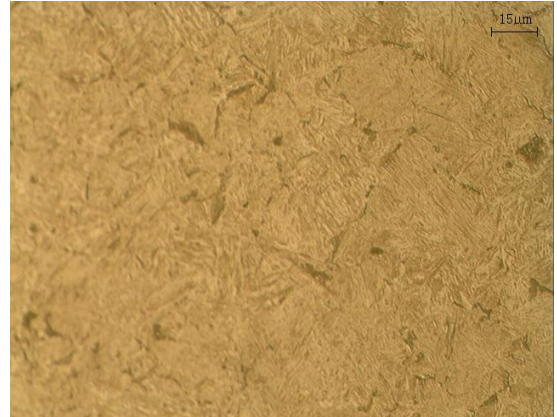


Figura 5.2. Análise micrográfica aço SAE 1045 temperado e revenido a 100°C, apresentando estrutura martensítica. Ataque Químico: Nital: a) Aumento de 100x; b) Aumento de 500x.

Conforme ilustrado na Figura 5.3, a fase predominante na amostra de aço SAE 1045 temperado e revenido a temperatura de 300°C é a martensita. Da mesma forma ao que apresentou a amostra de aço SAE 1045 revenido a 100°C a Figura 5.3b apresenta a morfologia na forma de agulhas da martensita.

a)



b)

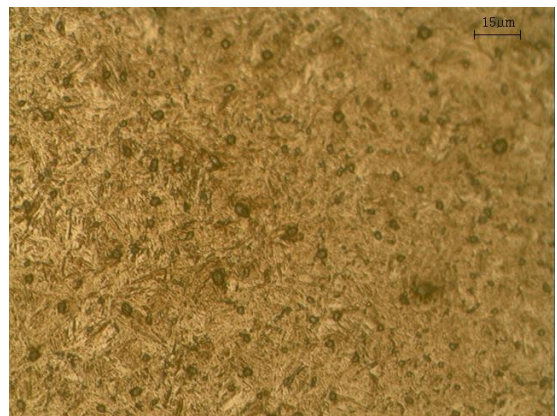


Figura 5.3. Análise micrográfica aço SAE 1045 temperado e revenido a 300°C apresentando estrutura martensítica. Ataque Químico: Nital: a) Aumento de 100x; b) Aumento de 500x.

5.2. Microestruturas Amostras de Aço SAE 52100

A Figura 5.4 apresenta a microestrutura do aço SAE 52100 esferoidizado (52A), condição microestrutural que concede a aços de alto percentual de carbono e alta liga uma alta ductilidade e usinabilidade. O material apresenta a fase esferoidita, com carbeto de cromo distribuídos pela matriz ferrítica. O material foi adquirido nesta condição.

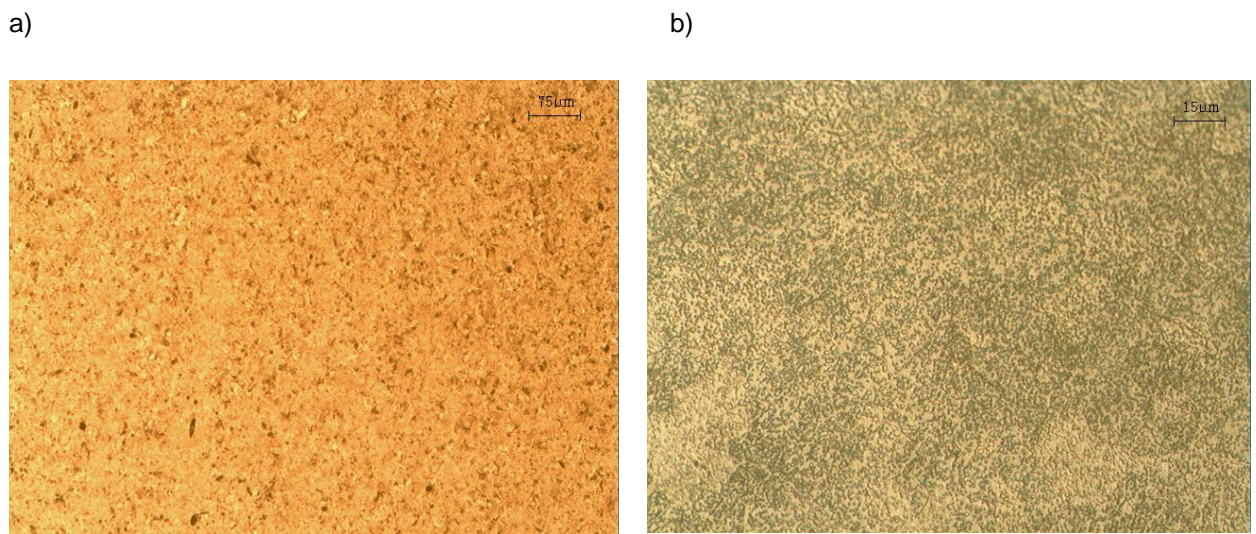


Figura 5.4. Análise micrográfica aço SAE 52100 esferoidizado, apresentando estrutura esferoidita com carbeto de cromo distribuídos ao longo da matriz metálica. Ataque Químico: Nital: a) Aumento de 100x; b) Aumento de 500x.

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam a microestrutura martensítica seguida de revenimento das amostras do aço SAE 52100. Devido ao alto percentual de carbono das amostras, as “agulhas” características da estrutura martensítica se tornam extremamente finas, portanto, não é possível visualizá-las nas análises realizadas em microscópio óptico.

Outro ponto importante nestas amostras são os carbeto de cromo distribuídos uniformemente ao longo do material, em forma de esferas (pontos claros e esféricos apresentados nas Figuras 5.5b e 5.6b). Estes carbeto de alta dureza contribuem significativamente para o aumento da resistência ao desgaste destas amostras.

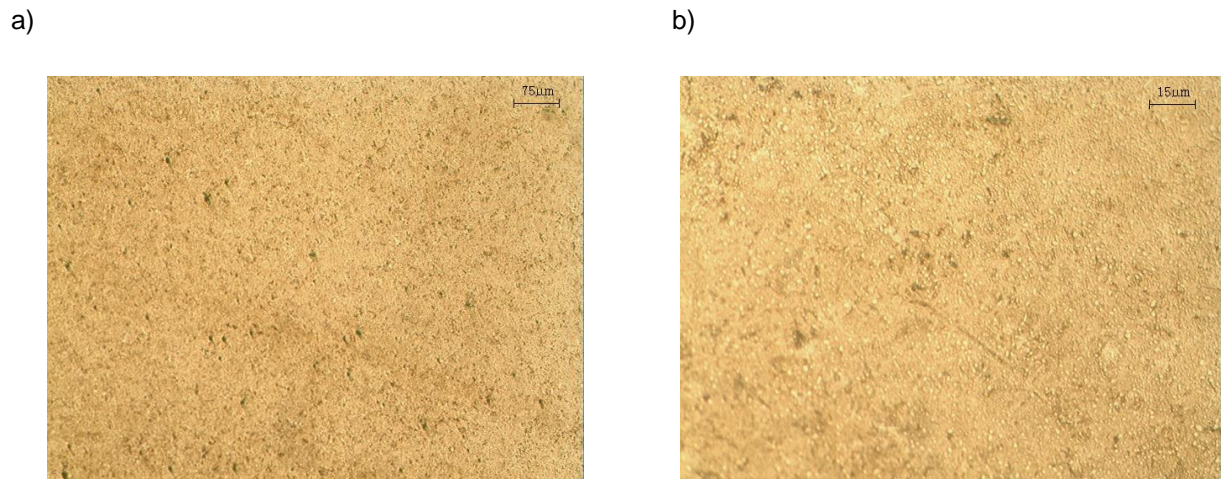


Figura 5.5. Análise micrográfica aço SAE 52100 temperado e revenido 100°C, apresentando estrutura martensítica com carbeto de cromo distribuídos pela matriz metálica. Ataque Químico: Nital: a) Aumento de 100x; b) Aumento de 500x.

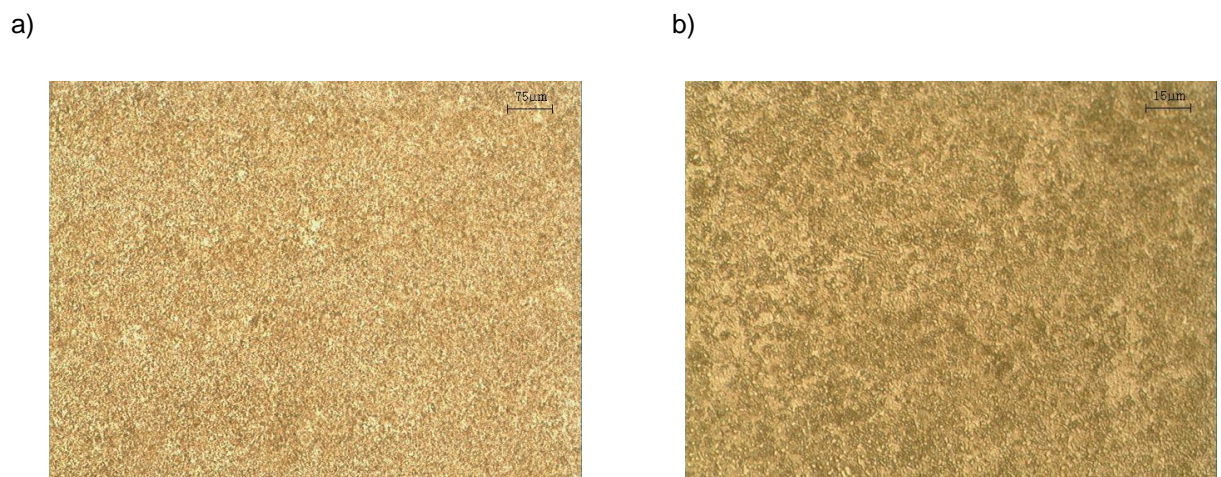


Figura 5.6. Análise micrográfica aço SAE 52100 temperado e revenido 200°C, apresentando estrutura martensítica com carbeto de cromo distribuídos pela matriz metálica. Ataque Químico: Nital: a) Aumento de 100x; b) Aumento de 500x.

5.3. Análise de Dureza

As durezas iniciais das amostras analisadas, após os tratamentos térmicos impostos a cada uma das condições propostas neste estudo, são apresentadas na Tabela 5.1. Devido ao alto percentual de carbono, elementos de liga e alta temperabilidade, a amostra de aço 52B apresentou a maior dureza entre os materiais estudados.

Entre as amostras revenidas submetidas à temperatura mais elevada (amostras 10C e 52C), a amostra 52C apresentou dureza 22,66% maior na escala Rockwell C. As menores durezas foram encontradas nas amostras 10A e 52A, o que é justificado pela microestrutura destes materiais.

Tabela 5.1. Dureza inicial das amostras analisadas

Amostra		Dureza inicial média (HV)	Dureza Rockwell C
10A	SAE 1045 Bruto de Laminação	198	11*
10B	SAE 1045 Temp/Reven. 100°C	672	61
10C	SAE 1045 Temp/Reven. 300°C	537	52
52A	SAE 52100 Esferoidizado	208,50	12,80*
52B	SAE 52100 Temp/Reven. 100°C	726,21	64,40
52C	SAE 52100 Temp/Reven. 200°C	551,66	54,20

*Medição Realizada em Rockwell B e convertida para Rockwell C

5.4. Caracterização dos Lubrificantes B100 e B50

Os resultados obtidos quanto ao percentual de ésteres metílicos, determinados por espectroscopia de infravermelho, são apresentados na Tabela 5.2. Foi encontrada uma variação entre o percentual de ésteres planejados e os valores obtidos, obtendo-se uma variação de aproximadamente 3% no B50 e 3,50% no B100. O percentual médio de ésteres foi determinado a partir de três medições realizadas em cada um dos lubrificantes.

Tabela 5.2. Percentual de ésteres metílicos nas misturas

Lubrificante	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Percentual Médio
B50	48,6	48,5	48,7	48,63
B100	96,8	96,5	96,5	96,60

5.5. Análise Tribológica Aço SAE 1045

As amostras confeccionadas em aço SAE 1045 em três condições microestruturais foram ensaiadas em quatro condições de lubrificação diferentes:

- Com ausência de lubrificação;
- Lubrificado com biodiesel B100;
- Lubrificado com biodiesel/óleo diesel B50;
- Lubrificado com diesel comercial B7.

5.5.1. Aço SAE 1045 sem Lubrificação

A Tabela 5.3 apresenta os resultados médios obtidos, bem como, o desvio padrão das amostras de aço SAE 1045 nas três condições microestruturais propostas. Os valores máximos da largura da pista de desgaste nas análises após 4400m de distância percorrida ocorreram na amostra na condição microestrutural Bruto de Laminação (amostra 10A), com valor igual a 2,15mm e com um desvio padrão de 0,21mm.

Tabela 5.3. Resultados obtidos sem lubrificação nas amostras de aço SAE 1045

Distância Percorrida (m)	SAE 1045 Bruto de Laminação (10A)		SAE 1045 Temp./Reve. A 100°C (10B)		SAE 1045 Temp./Reve. A 300°C (10C)	
	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)
800	1,04	0,15	0,81	0,07	0,96	0,28
1200	1,31	0,33	1,05	0,06	1,11	0,38
1600	1,69	0,37	1,18	0,08	1,27	0,18
2000	1,90	0,39	1,31	0,20	1,33	0,17
2400	2,01	0,29	1,32	0,21	1,40	0,16
2800	2,03	0,31	1,45	0,20	1,44	0,12
3200	2,10	0,31	1,47	0,20	1,50	0,13
3600	2,13	0,29	1,44	0,17	1,53	0,17
4000	2,14	0,28	1,44	0,10	1,54	0,12
4400	2,15	0,21	1,48	0,09	1,63	0,09

A Figura 5.7 ilustra o comportamento das diferentes amostras do aço SAE 1045 durante o ensaio tribológico. As análises realizadas com as amostras

temperadas e revenidas (amostras 10B e 10C) apresentaram um comportamento muito semelhante durante todo o ensaio. Após 4400m de distância percorrida, a diferença na largura da pista de desgaste média ficou em aproximadamente 10% maior na amostra 10C.

Comparando os resultados encontrados nas amostras no estado bruto de laminação com as amostras temperadas, obteve-se uma variação de aproximadamente 45% na amostra 10B e 32% na amostra 10C.

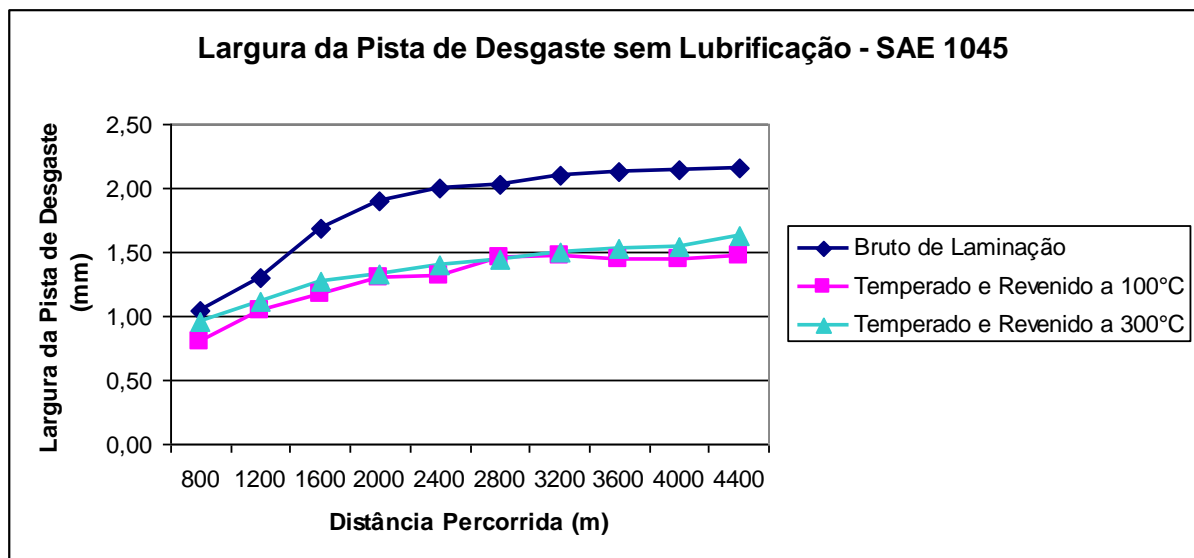


Figura 5.7. Largura da pista de desgaste nas amostras de SAE 1045 (sem lubrificação)

5.5.2. Ensaio Lubrificado Aço SAE 1045

Os ensaios tribológicos lubrificadas com B100, nas três condições microestruturais estudadas, são apresentadas a seguir:

5.5.2.1. SAE 1045 Bruto de Laminação

Os resultados encontrados nos ensaios lubrificadas na amostra bruta de laminação (10A) são apresentados na Tabela 5.4. Os valores médios máximos de desgaste nas análises após 4400m de distância percorrida ocorreram no ensaio lubrificado com biodiesel B100, encontrando-se uma largura da pista de desgaste igual a 1,18mm, com um desvio padrão de 0,12mm.

A Figura 5.8 ilustra o comportamento dos ensaios na amostra bruta de laminação. Após 4400m de distância percorrida, a diferença na largura da pista de

desgaste média entre os ensaios lubrificados com B50 e B7 ficou em aproximadamente 4% no ensaio lubrificado com B50. Os desvios padrão encontrados não permitem apontar o ensaio lubrificado com B50 como a condição com maior desgaste se comparado com B7, porém, indicam uma tendência que o lubrificante B7 tenha apresentado a menor largura da pista de desgaste.

Tabela 5.4. Largura da pista de desgaste nos ensaios lubrificados na amostra 10A

Distância Percorrida (m)	B100		B50		B7	
	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)
800	0,59	0,13	0,44	0,02	0,50	0,03
1200	0,65	0,17	0,51	0,04	0,70	0,18
1600	0,87	0,10	0,69	0,09	0,75	0,14
2000	0,93	0,12	0,76	0,13	0,78	0,11
2400	0,99	0,14	0,80	0,12	0,84	0,11
2800	1,06	0,15	0,81	0,11	0,87	0,10
3200	1,11	0,12	0,82	0,13	0,91	0,11
3600	1,16	0,11	0,92	0,07	0,92	0,08
4000	1,18	0,11	0,94	0,08	0,94	0,09
4400	1,18	0,12	0,99	0,05	0,93	0,09

Comparando os resultados encontrados no ensaio lubrificado com B100 e os resultados obtidos com os demais lubrificantes (Figura 5.8), encontra-se uma variação de aproximadamente 24% maior na análise lubrificada com B100.

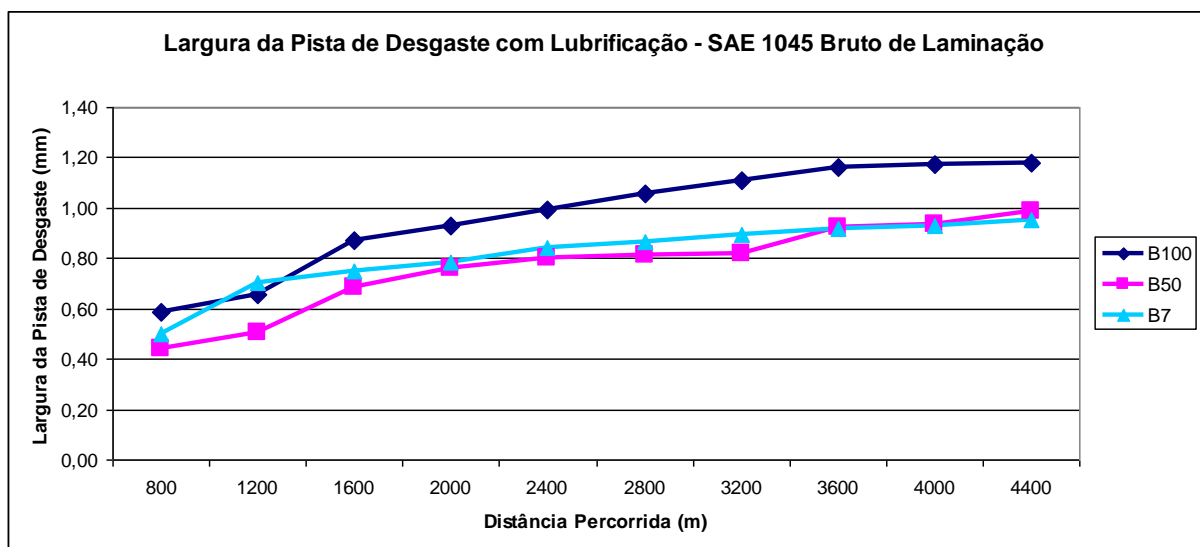


Figura 5.8. Largura da pista de desgaste na amostra 10A nos ensaios lubrificados

5.5.2.2. SAE 1045 Temperado e Revenido a 100°C

Os resultados obtidos nos ensaios lubrificados na amostra temperada e revenida a 100°C (10B) são apresentados na Tabela 5.5.

Os valores máximos de desgaste nas análises, após 4400m de distância percorrida, ocorreram nos ensaios lubrificados com diesel/biodiesel B50 e diesel B7, que apresentaram resultados idênticos, obtendo-se uma largura da pista de desgaste igual a 0,79mm, com um desvio padrão de 0,05mm nos ensaios lubrificados com B50 e 0,06mm nos ensaios com B7, ou seja, obtiveram resultados idênticos em ambos os lubrificantes.

Tabela 5.5. Largura da pista de desgaste nos ensaios lubrificados na amostra 10B

Distância Percorrida (m)	B100		B50		B7	
	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)
800	0,27	0,06	0,37	0,06	0,32	0,09
1200	0,38	0,11	0,49	0,06	0,41	0,09
1600	0,52	0,07	0,51	0,04	0,51	0,06
2000	0,53	0,04	0,50	0,04	0,55	0,06
2400	0,55	0,04	0,57	0,08	0,62	0,05
2800	0,61	0,07	0,62	0,04	0,65	0,07
3200	0,60	0,07	0,63	0,07	0,71	0,03
3600	0,63	0,06	0,72	0,04	0,74	0,06
4000	0,68	0,04	0,76	0,03	0,77	0,05
4400	0,70	0,06	0,79	0,05	0,79	0,06

A Figura 5.9 apresenta o comportamento dos ensaios na amostra 10B. Após 4400m de distância percorrida, a diferença entre a largura da pista de desgaste média nos ensaios lubrificados com B50 e B7 e a menor largura da pista, encontrada nos ensaios lubrificados com B100, ficou em aproximadamente 13%.

Se compararmos os resultados encontrados nas amostras 10A e 10B nos ensaios lubrificados com B100 obtém-se uma variação de aproximadamente 69%. Os demais lubrificantes apresentaram uma variação de 25% no caso do B50 e 18% nos ensaios com B7 na comparação entre as duas amostras.

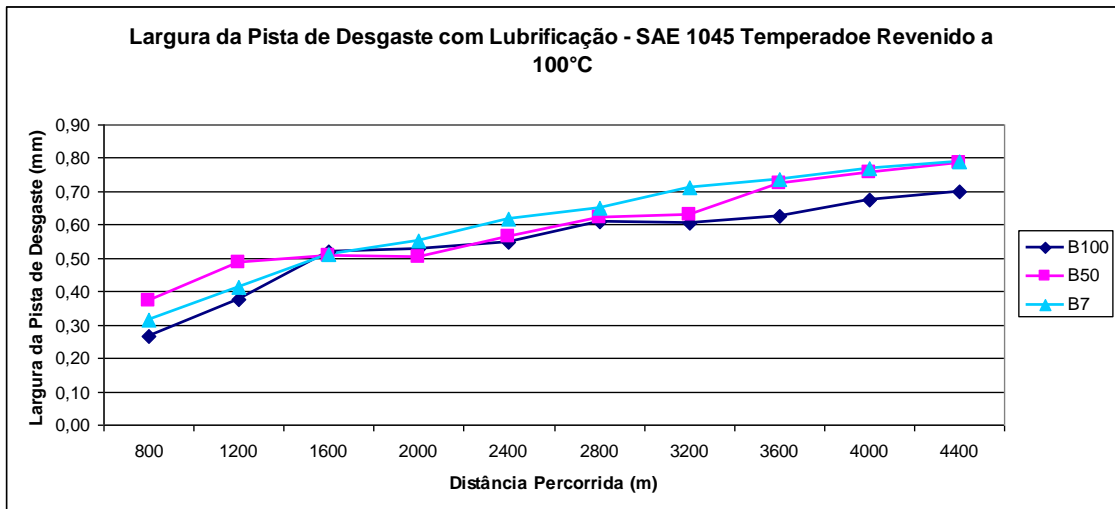


Figura 5.9. Largura da pista de desgaste na amostra 10B nos ensaios lubrificadas

5.5.2.3. SAE 1045 Temperado e Revenido a 300°C

Os valores encontrados nos ensaios lubrificadas na amostra 10C são apresentados na Tabela 5.6. Os valores máximos de desgaste nas análises, após 4400m de distância percorrida, ocorreram nos ensaios lubrificadas com biodiesel B50 e B7, que apresentaram resultados idênticos, obtendo-se uma largura da pista de desgaste igual a 0,80mm, com um desvio padrão de 0,03mm nos ensaios lubrificadas com B50 e 0,06 nos ensaios com B7.

Tabela 5.6. Largura da pista de desgaste nos ensaios lubrificadas na amostra 10C

Distância Percorrida (m)	B100		B50		B7	
	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)
800	0,27	0,03	0,30	0,01	0,27	0,04
1200	0,34	0,03	0,42	0,10	0,36	0,06
1600	0,43	0,07	0,51	0,05	0,44	0,05
2000	0,46	0,08	0,67	0,03	0,54	0,04
2400	0,51	0,06	0,74	0,02	0,57	0,05
2800	0,59	0,04	0,79	0,04	0,67	0,09
3200	0,63	0,06	0,78	0,02	0,74	0,05
3600	0,72	0,04	0,80	0,03	0,75	0,05
4000	0,73	0,04	0,83	0,03	0,81	0,08
4400	0,73	0,04	0,80	0,03	0,80	0,06

A Figura 5.10 apresenta o comportamento dos ensaios na amostra temperada e revenida a 300°C. Após 4400m de distância percorrida, a diferença na largura da pista de desgaste média nos ensaios lubrificadas com B50 e B7 comparado à menor

largura da pista de desgaste média (ensaios lubrificado com B100) ficou em aproximadamente 10%.

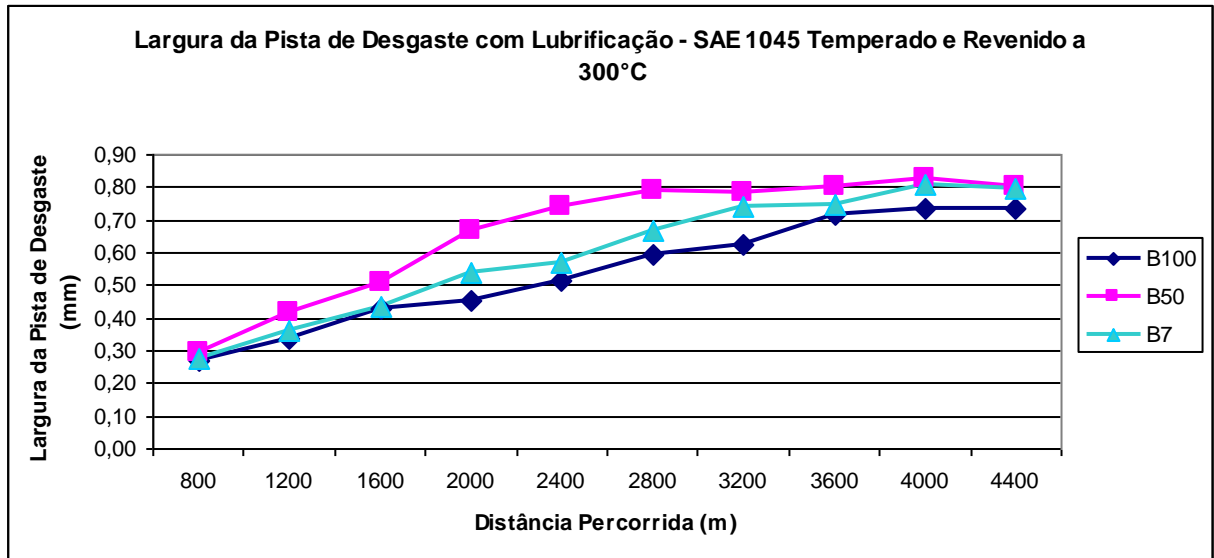


Figura 5.10. Largura da pista de desgaste na amostra 10C nos ensaios lubrificado

Se compararmos os resultados encontrados na amostra 10C nos ensaios lubrificado com B100 com a amostra 10B obtém-se uma variação de aproximadamente 4% maior na amostra revenido a 300°C. No entanto, devido ao desvio padrão obtido nas medições, não é possível confirmar a amostra 10B com uma largura da pista de desgaste superior a amostra 10C.

5.5.3. Ensaios Lubrificado Aço SAE 52100

As amostras confeccionado em aço SAE 52100 em três diferentes condições microestruturais foram ensaiado em duas condições diferentes:

- Com ausência de lubrificação;
- Lubrificado com biodiesel B100.

5.5.3.1. SAE 52100 sem Lubrificação

A Tabela 5.7 apresenta os resultados médios obtidos, bem como, o desvio padrão das amostras de aço SAE 52100 nas três condições microestruturais propostas. Os valores médios máximos de desgaste nas análises após 4400m de distância percorrida ocorreram na amostra esferoidizado (52A), onde a largura da pista de desgaste apresentou um valor de 2,47mm e desvio padrão igual a 0,17mm.

Tabela 5.7. Largura da pista de desgaste nas amostras de aço SAE 52100 sem lubrificação.

Distância Percorrida (m)	SAE 52100 Esferoidizado (52A)		SAE 52100 Temp./Reve. A 100°C (52B)		SAE 52100 Temp./Reve. A 200°C (52C)	
	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)
800	1,53	0,16	0,35	0,06	0,59	0,10
1200	1,90	0,12	0,60	0,07	0,70	0,11
1600	2,04	0,10	0,71	0,04	0,77	0,07
2000	2,16	0,11	0,76	0,03	0,84	0,14
2400	2,24	0,09	0,82	0,02	0,94	0,13
2800	2,35	0,10	0,93	0,04	1,04	0,16
3200	2,38	0,08	1,05	0,03	1,14	0,01
3600	2,48	0,14	1,07	0,05	1,15	0,10
4000	2,49	0,08	1,10	0,03	1,19	0,08
4400	2,47	0,17	1,09	0,05	1,19	0,10

A Figura 5.11 ilustra o comportamento das diferentes amostras do aço SAE 52100 durante o ensaio. As análises realizadas com as amostras temperadas e revenidas apresentaram um comportamento muito semelhante durante todo o ensaio, apresentando uma variação de aproximadamente 9% maior na amostra 52C. Após 4400m de distância percorrida, a diferença entre a maior e menor largura da pista de desgaste média (amostra 52A e 52B) ficou em aproximadamente 127% maior na amostra esferoidizada. A largura da pista de desgaste encontrada na análise da amostra 52A com ausência de lubrificação apresentou um resultado 15% maior ao obtido na amostra 10A. Comparando as amostras 10B-52B e 10C-52C, obteve-se respectivamente uma variação de aproximadamente 36% e 37% maiores nas amostras de aço SAE 1045.

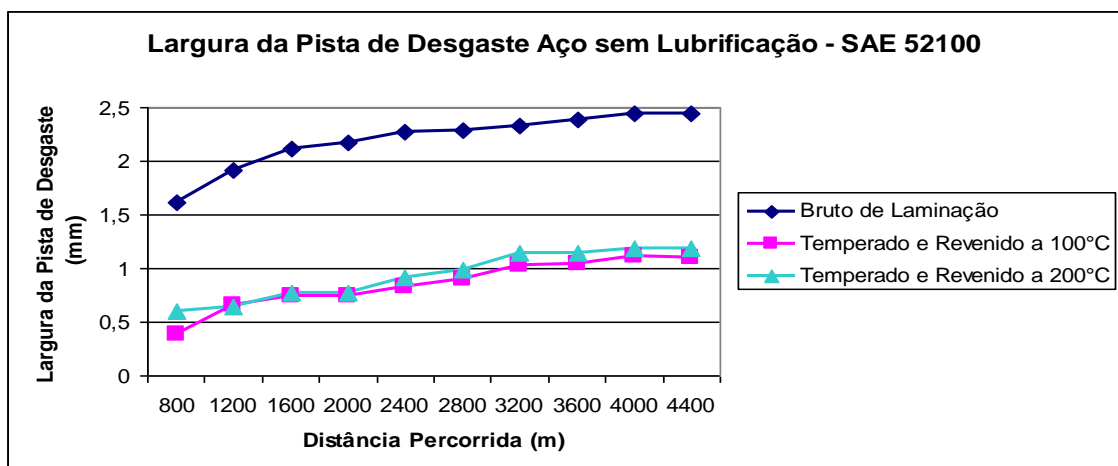


Figura 5.11. Largura da pista de desgaste na amostra de SAE 52100 nos ensaios sem lubrificação.

5.5.3.2. SAE 52100 com Lubrificação

A largura da pista de desgaste e o desvio padrão das amostras de aço SAE 52100 nas três condições microestruturais propostas são apresentados na Tabela 5.8. O valor médio máximo das análises após 4400m de distância percorrida ocorreu na amostra esferoidizada (52A), onde a largura da pista de desgaste apresentou um valor de 1,10mm e desvio padrão igual a 0,09mm.

Tabela 5.8. Largura da pista de desgaste no aço SAE 52100 com lubrificação de B100.

Distância Percorrida (m)	SAE 52100 Esferoidizado (52A)		SAE 52100 Temp./Reve. A 100°C (52B)		SAE 52100 Temp./Reve. A 200°C (52C)	
	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)	Largura da Pista (mm)	Desvio Padrão (mm)
800	0,50	0,10	0,33	0,09	0,23	0,05
1200	0,61	0,12	0,40	0,09	0,34	0,09
1600	0,75	0,08	0,47	0,05	0,45	0,03
2000	0,80	0,08	0,51	0,03	0,55	0,07
2400	0,88	0,11	0,52	0,02	0,65	0,03
2800	0,92	0,12	0,56	0,04	0,68	0,02
3200	0,98	0,10	0,57	0,04	0,71	0,03
3600	1,03	0,09	0,59	0,04	0,73	0,02
4000	1,05	0,07	0,62	0,02	0,74	0,02
4400	1,10	0,09	0,63	0,03	0,73	0,02

A Figura 5.12 ilustra o comportamento das diferentes amostras do aço SAE 52100 durante o ensaio com lubrificação de B100. As análises realizadas com as amostras temperadas e revenidas (52B e 52C), após 4400m de distância percorrida, apresentaram uma variação de aproximadamente 16% maior na amostra 52C. A diferença entre a maior e menor largura da pista de desgaste média (amostra 52A e 52B) ficou em aproximadamente 75% maior na amostra esferoidizada.

A comparação entre as amostras de aço SAE 1045 e SAE 52100 são apresentadas abaixo:

- 10A – 52A: 7% maior na amostra 10A;
- 10B – 52B: 11% maior na amostra 10B;
- 10C – 52C: apresentaram resultados idênticos.

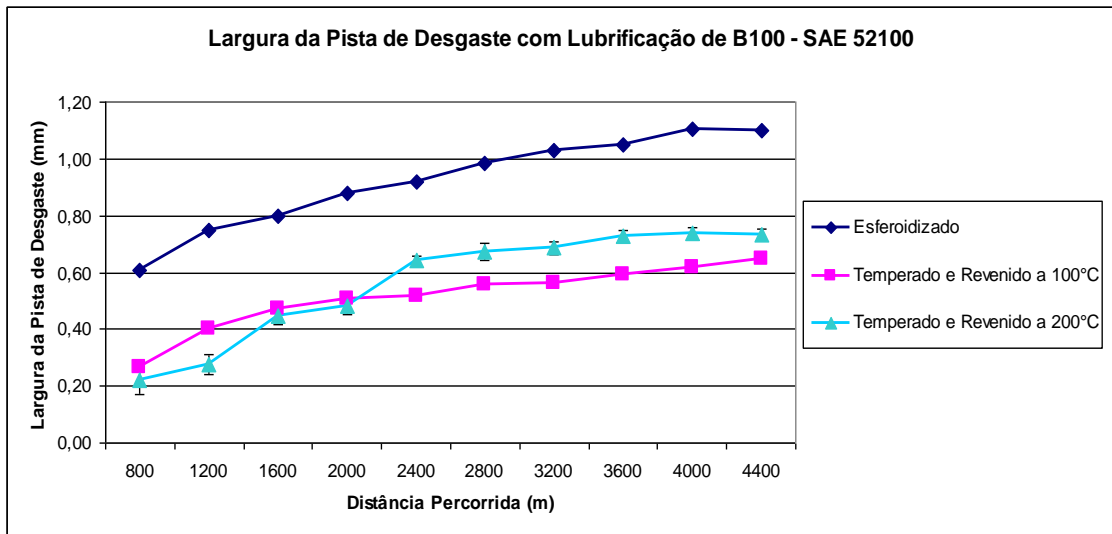


Figura 5.12. Largura da pista de desgaste nas amostras de SAE 52100 nos ensaios lubrificadas com B100.

5.6. Análise do Coeficiente de Desgaste (k) e Dureza Aço SAE 1045

A Tabela 5.9 apresenta os resultados obtidos no coeficiente de desgaste e microdureza superficial nas análises do aço SAE 1045. A Microdureza Vickers das amostras deste material, apresentaram um aumento significativo na pista de desgaste após o ensaio, devido ao encruamento gerado por deformação plástica, tanto no ensaio com ausência de lubrificação, quanto no ensaio lubrificado com biodiesel B100, B50 e B7.

Comparando os resultados de aumento percentual de dureza ocorrido nas amostras com diferentes microestruturas no ensaio com ausência de lubrificação, o aumento mais destacado ocorreu no ensaio de aço SAE 1045 temperado e revenido a 300°C (10C), com aumento de 9,50%.

Os ensaios lubrificadas nas amostras 10B e 10C (que receberam tratamento térmico) tiveram uma tendência de estabilidade no percentual de aumento de dureza. As análises nestas amostras apresentaram um aumento percentual médio de aproximadamente 9% e 7% respectivamente. No entanto, as análises lubrificadas apresentaram um aumento percentual significativo se comparados ao ensaio sem lubrificação, indicando um alto grau de encruamento. O aumento percentual mais significativo (25,50%) ocorreu no ensaio lubrificado com Diesel B7.

Tabela 5.9. Coeficiente de desgaste e microdureza superficial das amostras de aço SAE 1045.

		10A		10B		10C			
		Fora da pista	Pista	Fora da pista	Pista	Fora da pista	Pista		
SAE 1045	Sem Lubrificação	Microdureza Vickers (HV)		196	207	640	696	633	693
		Aumento de Dureza Percentual (%)		5,50		9,00		9,50	
		Coeficiente de Desgaste Médio (k_m) – $[10^{-2}]$		0,16		0,15		0,21	
	Biodiesel B100	Microdureza Vickers (HV)		221	263	604	657	604	650
		Aumento de Dureza Percentual (%)		19,00		9,00		8,00	
		Coeficiente de Desgaste Médio (k_m) – $[10^{-2}]$		0,028		0,015		0,018	
	Biodiesel B50	Microdureza Vickers (HV)		223	251	629	684	584	616
		Aumento de Dureza Percentual (%)		12,50		9,00		5,50	
		Coeficiente de Desgaste Médio (k_m) – $[10^{-2}]$		0,016		0,021		0,022	
	Biodiesel B7	Microdureza Vickers (HV)		210	263	658	713	607	623
		Aumento de Dureza Percentual (%)		25,50		8,50		4,00	
		Coeficiente de Desgaste Médio (k_m) – $[10^{-2}]$		0,013		0,025		0,025	

A Figura 5.13 apresenta o comportamento das amostras antes e após os ensaios tribológicos, relacionando a variação percentual de dureza ao lubrificante usado no ensaio pino-sobre-disco.

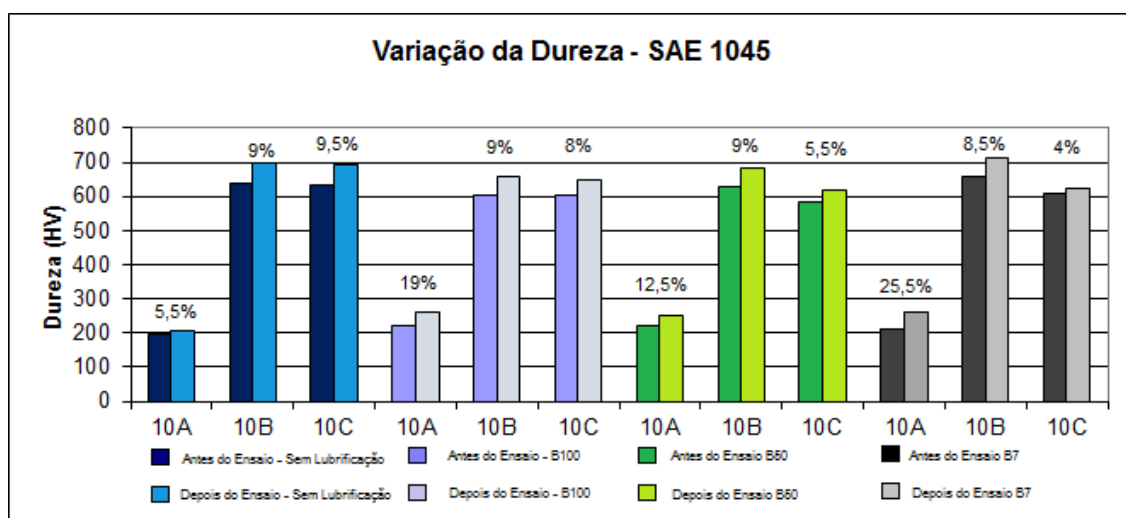


Figura 5.13. Variação percentual de dureza dos ensaios tribológicos nas amostras de aço SAE 1045

Os coeficientes de desgaste dos ensaios a seco, ao contrário do que se esperava, indicaram que a condição mais severa de desgaste foi encontrada no

ensaio do material temperado e revenido a 300°C (amostra 10C), apresentando um coeficiente de desgaste médio igual a $0,21 \times 10^{-2}$. O comportamento dos coeficientes de desgaste é ilustrado na Figura 5.14.

Nos ensaios lubrificados, o coeficiente de desgaste médio obtido na análise da amostra de aço 10A, lubrificado com biodiesel B100, apresentou o maior valor ($0,028 \times 10^{-2}$), enquanto o menor coeficiente de desgaste encontrado nesta amostra foi obtido no ensaio realizado com diesel comercial B7 ($0,013 \times 10^{-2}$). Porém, nas amostras temperadas e revenidas de alta dureza, os coeficientes de desgaste médio encontrados nas análises com biodiesel B100 ($0,015 \times 10^{-2}$ na amostra 10B e $0,018 \times 10^{-2}$ na amostra 10C) obtiveram um valor substancialmente inferior aos coeficientes encontrados nos ensaios com os demais lubrificantes B50 e B7

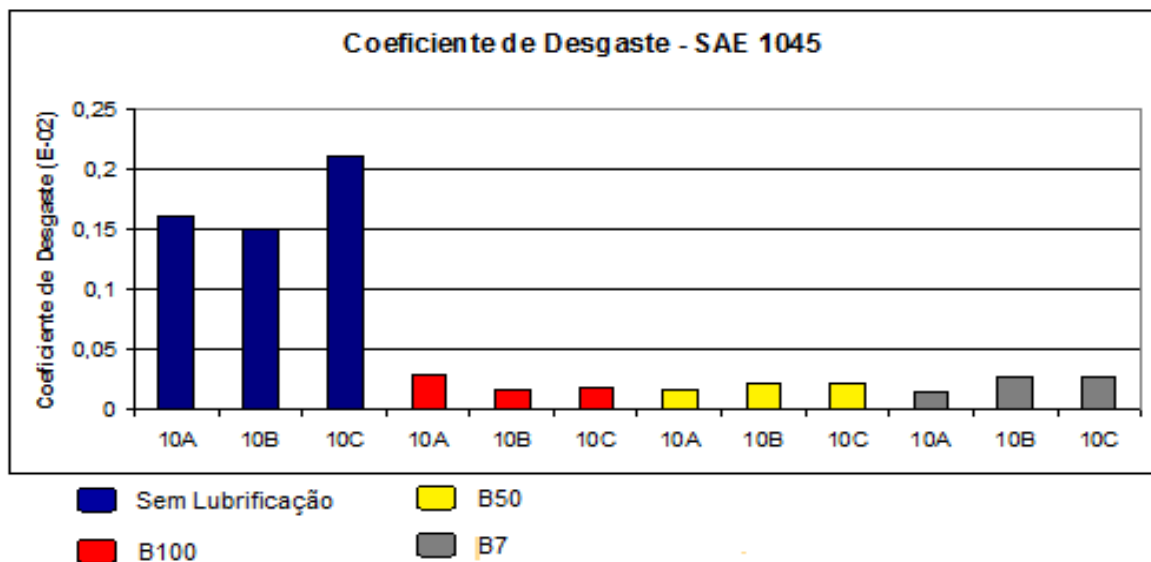


Figura 5.14. Coeficientes de desgaste (k) - Aço SAE 1045

A variação encontrada entre as análises de biodiesel B100 em relação aos demais lubrificantes nas amostras 10B ficou 40% menor ao obtido com lubrificante B50, e 67% menor ao lubrificante B7. Na amostra 10C, a diferença ficou 22% menor nas análises com B100 na comparação com B50 e 39% menor para o B100 na comparação com o B7. Da mesma forma, as análises realizadas com lubrificação de B50 e B7 realizadas nas amostras temperadas e revenidas demonstraram que o diesel/biodiesel B50 apresentou um coeficiente de desgaste médio 19% inferior ao diesel comercial na amostra 10B e 14% na amostra 10C, ou seja, o aumento do percentual do biodiesel reduziu a severidade do desgaste.

5.7. Análise do Coeficiente de Desgaste (k) e Dureza Aço SAE 52100

Os resultados obtidos na análise da microdureza superficial nas amostras estudadas, bem como, os valores obtidos no coeficiente de desgaste das diferentes condições de análise propostas nas amostras do aço 52100 são apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10. Coeficiente de desgaste e microdureza superficial das amostras de aço SAE 52100.

			52A		52B		52C	
			Fora da pista	Pista	Fora da pista	Pista	Fora da pista	Pista
SAE 52100	Sem Lubrificação	Microdureza Vickers (HV)	222	240	774	788	718	720
		Aumento de Dureza Percentual (%)	8		2		0,3	
		Coeficiente de Desgaste Médio (k_m) – $[10^{-2}]$	0,25		0,074		0,089	
	Biodiesel B100	Microdureza Vickers (HV)	217	248	719	760	737	767
		Aumento de Dureza Percentual (%)	14		6		4	
		Coeficiente de Desgaste Médio (k_m) – $[10^{-2}]$	0,021		0,013		0,021	

Devido ao encruamento gerado pelo ensaio de desgaste, a Microdureza Vickers apresentou um aumento significativo na pista de desgaste após a análise, tanto no ensaio com ausência de lubrificação, quanto no ensaio lubrificado com biodiesel B100. Comparando os resultados de aumento percentual de dureza ocorrido nas amostras nos ensaios a seco, a maior variação encontrada foi na amostra esferoidizada (52A) com 8% de aumento de dureza.

As amostras temperadas e revenidas obtiveram um aumento de dureza máxima de 2% na amostra 52B e 0,3% na amostra 52C. Na relação de ensaios sem lubrificação e lubrificados com biodiesel B100, ocorreu uma tendência de maior aumento percentual de dureza nos ensaios lubrificados.

O comportamento da dureza das amostras de aço SAE 52100 antes e após os ensaios tribológicos são ilustrados na Figura 5.15, onde é relacionado à variação percentual de dureza nas duas condições de lubrificação aplicada nestas amostras.

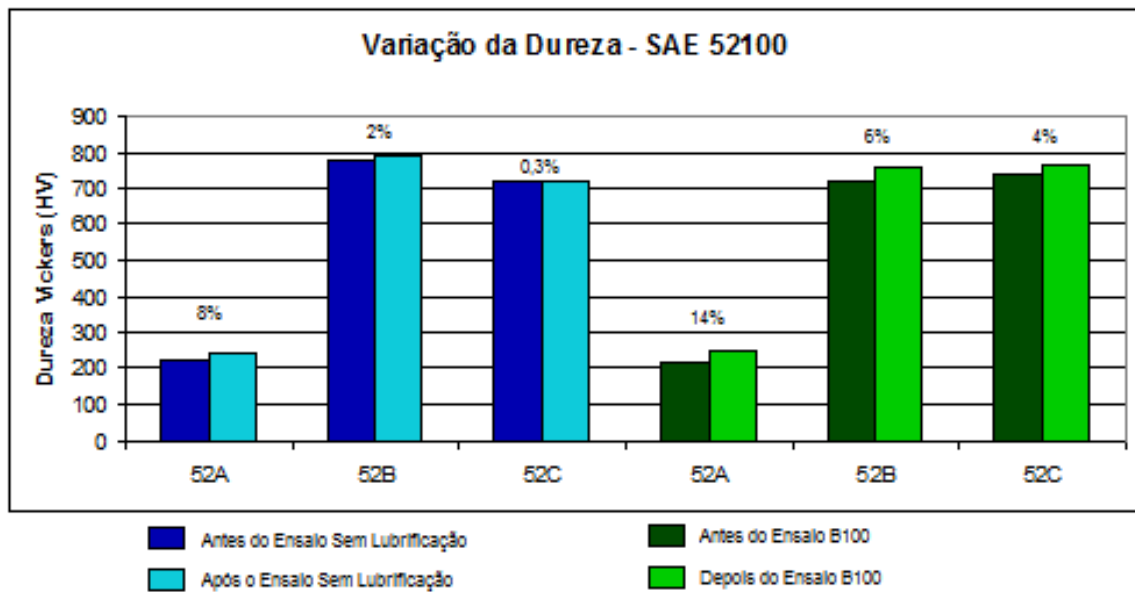


Figura 5.15. Variação percentual de dureza dos ensaios tribológicos realizados nas amostras de aço SAE 52100

O coeficiente de desgaste, que é o principal critério de comparação entre diferentes condições de ensaio, indicou um aumento significativo da resistência ao desgaste nas análises realizadas com lubrificação de biodiesel B100. O aumento percentual da resistência mais significativa ocorreu na amostra com microestrutura esferoidizada, apresentando um aumento de aproximadamente 1090% na resistência ao desgaste.

As amostras do aço 52B e 52C apresentaram um aumento na resistência ao desgaste de 469% e 324% respectivamente. Outro ponto importante na análise dos resultados foram os valores idênticos do coeficiente de desgaste médio nas amostras 52A e 52C nos ensaios lubrificados.

A comparação entre os coeficientes de desgaste obtidos nos ensaios sem lubrificação revela a influência microestrutural das amostras na resistência ao desgaste. Assim, o material com a maior resistência ao desgaste foi o aço SAE 52100 temperado e revenido a 100°C (amostra 52B), com um coeficiente de resistência ao desgaste igual a $0,074 \times 10^{-2}$. O comportamento dos coeficientes de desgaste obtidos nas análises das amostras de aço SAE 52100 é ilustrado na Figura 5.16.

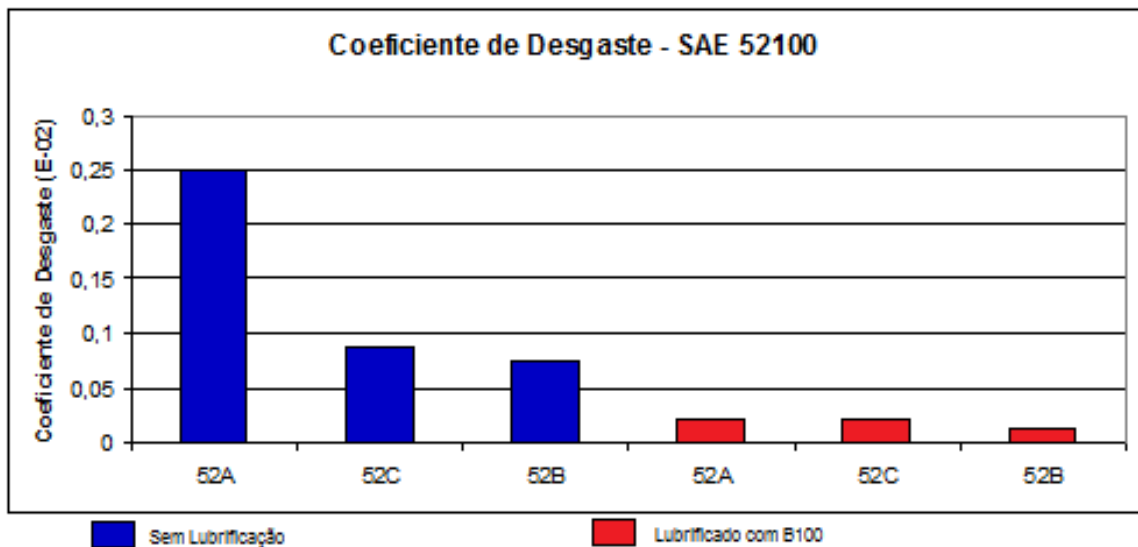


Figura 5.16. Variação percentual de dureza dos ensaios tribológicos realizados nas amostras de aço SAE 52100

A comparação entre os coeficientes de desgaste nos ensaios sem lubrificação das amostras 10A e 52A apresentou uma variação de aproximadamente 56% maior na amostra 52A. Isto se deve a estrutura esferoidizada, que possui a mais baixa dureza e resistência mecânica entre todas as amostras avaliadas, portanto, baixa resistência ao desgaste. No entanto, as amostras que sofreram tratamento térmico de têmpera seguida de revenimento demonstraram a resistência ao desgaste superior do aço SAE 52100, pois, a comparação entre as amostras 10B-52B e 10C-52C apresentaram respectivamente variações de 157% e 136% menores nas amostras de aço SAE 1045, portanto, possuindo resistência ao desgaste superior. Porém, os ensaios realizados com lubrificação de B100 apresentaram valores maiores nos aços SAE 1045 com diferenças menos significativas, na ordem de 33% e 15% nas comparações 10A-52A e 10B-52B respectivamente. A comparação 10C-52C apresentou variação 17% maior no aço SAE 52100.

5.8. Análise Superficial com MEV

A análise microscópica da pista de desgaste das amostras foi realizada através do microscópio eletrônico de varredura (MEV).

5.8.1. Microscopia do Aço SAE 1045 Bruto de Laminação

A Figura 5.17 indica que o ensaio sem lubrificação, quanto o ensaio lubrificado com B100 apresentaram quase que exclusivamente o defeito superficial do tipo

Microcorte decorrente de desgaste abrasivo a dois corpos, conforme descrito por (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014). Comparando as imagens obtidas na mesma escala, percebe-se a maior severidade encontrada no ensaio sem lubrificação.

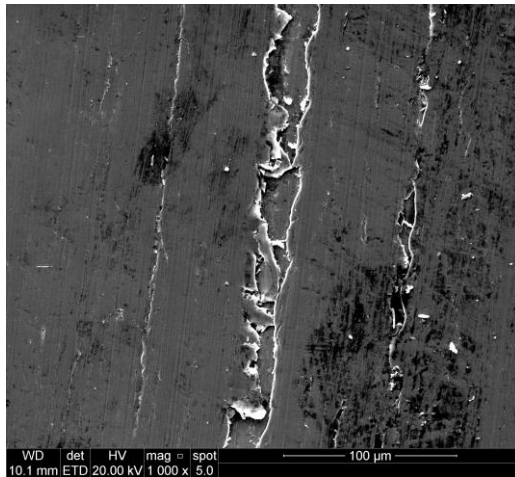


Figura A –Amostra 10A sem lubrificação, apresentando microcorte – aumento de 1000x

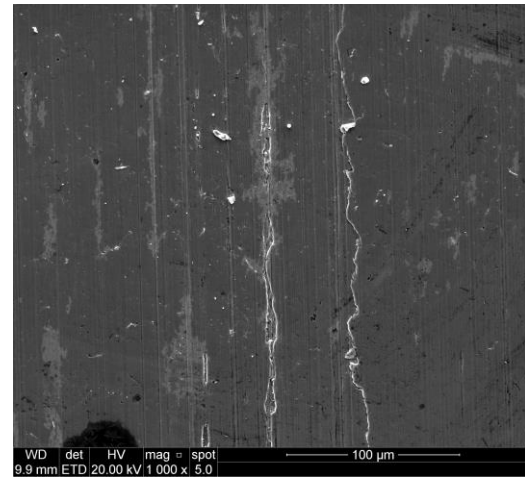


Figura B - Amostra 10A, lubrificado com B100, apresentando microcorte – aumento de 1000x

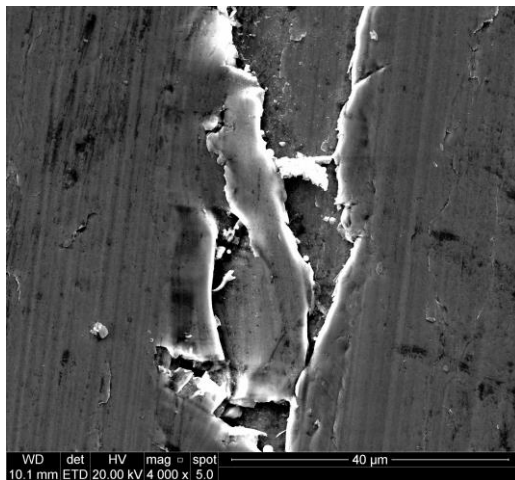


Figura C - Amostra 10A sem lubrificação, apresentando microcorte – aumento de 4000x

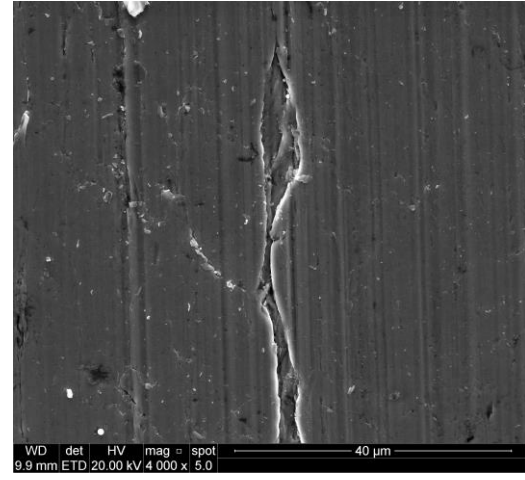


Figura D - Amostra 10A lubrificado com B100, apresentando microcorte – aumento de 4000x

Figura 5.17. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura do aço SAE 1045 bruto de laminação (amostra 10A). Ensaio sem lubrificação e lubrificado com biodiesel B100.

A análise microscópica da pista de desgaste da amostra 10A, lubrificado com óleo diesel B7 (Figuras 5.18B e 5.18D), confirmou a tendência das análises anteriormente apresentadas, onde o principal defeito superficial encontrado foi o Microcorte decorrente de desgaste abrasivo, muito similar aos apresentados por (LYU, 2015).

A região analisada da amostra submetida ao ensaio lubrificado com B50 (Figuras 5.18 A e 5.18C) apresentou o defeito superficial do tipo microcrateração, que poderia ser gerada a partir do mecanismo de desgaste Fadiga Superficial. No entanto, segundo (NORTON, 2004) a Fadiga Superficial não atua na geração de defeitos superficiais entre duas superfícies em contato sob deslizamento. Assim, as craterações são fraturas geradas por Desgaste abrasivo, conforme descrito por (MOORE; KING, 1980) e ilustrado por (TEIXEIRA, 2011).

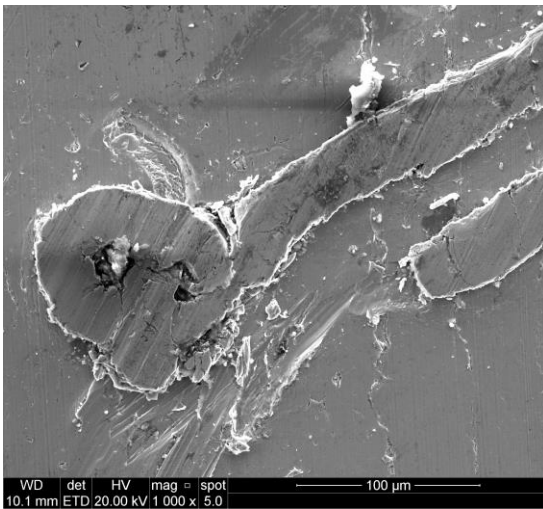


Figura A – Amostra 10A lubrificado com B50, apresentando defeitos do tipo crateração – aumento de 1000x



Figura B – Amostra 10A lubrificado com B7, apresentando microcorte – aumento de 1000x

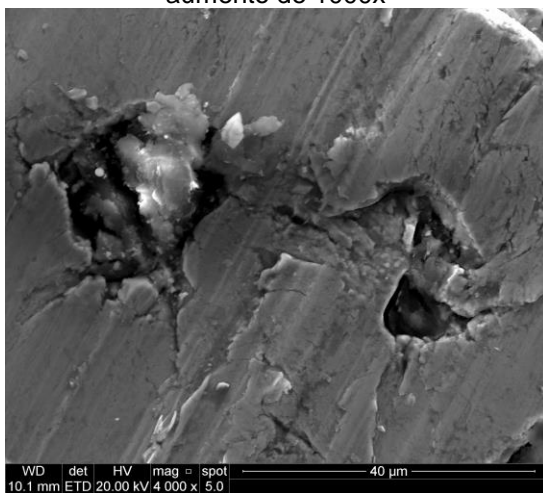


Figura C - Amostra 10A, lubrificado com B50, apresentando defeitos do tipo crateração – aumento de 4000x

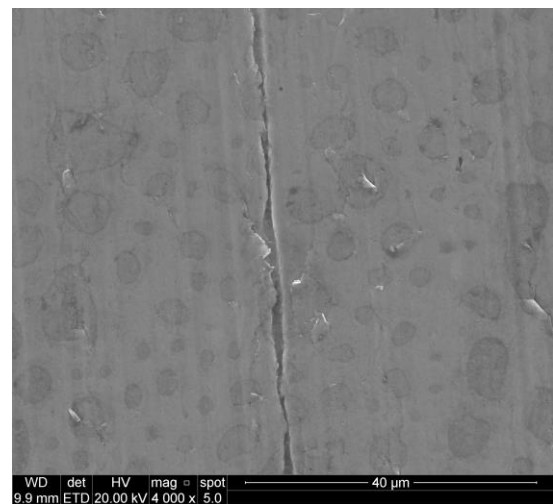


Figura D - Amostra 10A lubrificado com B7, apresentando microcorte – aumento de 4000x

Figura 5.18. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura aço SAE 1045 no estado bruto de laminação (amostra 10A). Ensaio lubrificado com biodiesel B50 e com diesel B7.

5.8.2. Microscopia Aço SAE 1045 Temperado e Revenido a 100°C

A análise obtida com microscópio eletrônico de varredura da amostra 10B (Aço SAE 1045 Temperado e Revenido a 100°C) é apresentada na Figura 5.19. A região analisada da amostra além de apresentar indícios de microcorte abrasivo, encontrou regiões com craterações geradas por fraturas, originadas por desgaste abrasivo. A Figura 5.19C apresenta uma região fraturada, prestes a tornar-se uma crateração. No ensaio lubrificado com biodiesel B100, foi encontrado predominantemente o defeito superficial do tipo microcorte e craterações em menor proporção.

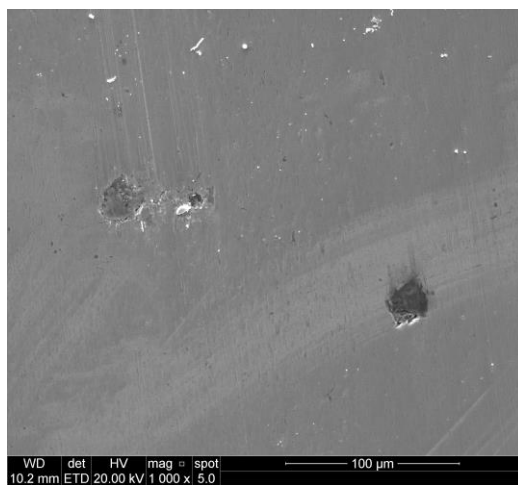


Figura A – Amostra 10B, sem lubrificação, apresentando defeitos do tipo crateração – aumento: 1000x

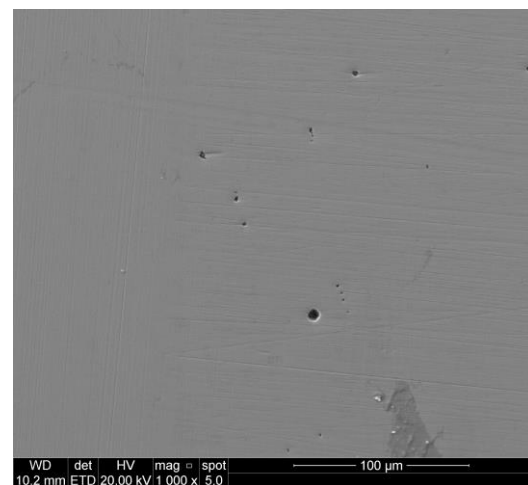


Figura B – Amostra 10B, lubrificado com B100, apresentando defeitos do tipo crateração – aumento: 1000x

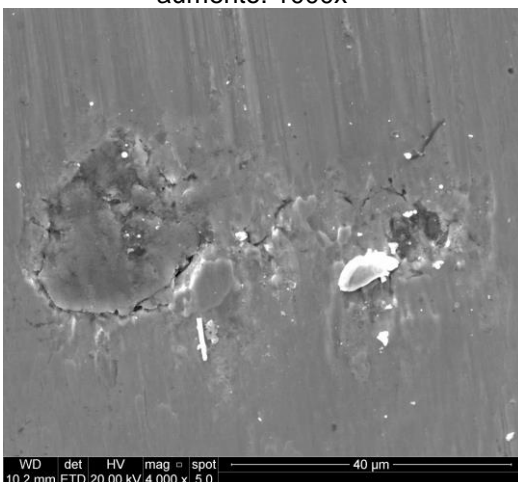


Figura C – Amostra 10B, sem lubrificação, apresentando defeitos do tipo crateração – aumento: 4000x

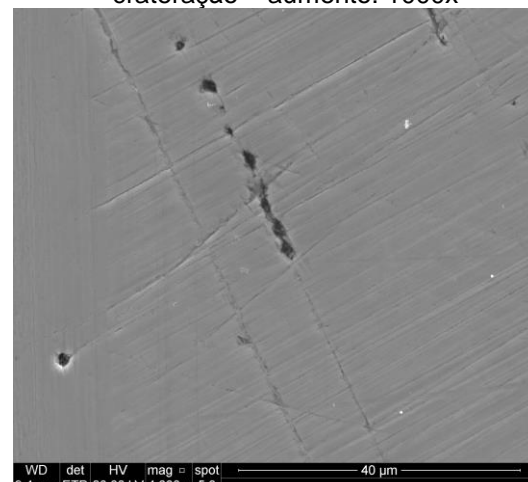


Figura D – Amostra 10B, lubrificado com B100, apresentando defeitos do Tipo crateração e microcorte – aumento: 4000x

Figura 5.19. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura do aço SAE 1045, temperado e revenido a 100°C. Ensaio sem lubrificação e lubrificado com biodiesel B100.

De maneira muito similar as análises apresentadas na Figura 5.19, a região analisada na Figura 5.20 apresentou Microcortes gerado por desgaste abrasivo. A análise com biodiesel/diesel B50 apresentou regiões com crateração típicas de arrancamento de inclusões não metálicas da matriz martensítica.

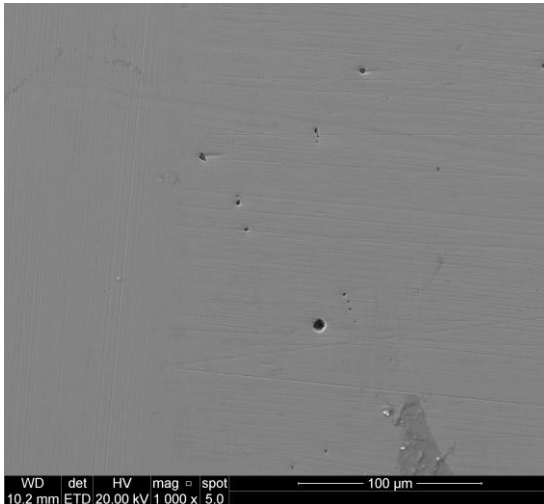


Figura A – Amostra 10B, lubrificado com B50, apresentando defeitos do tipo crateração – aumento: 1000x

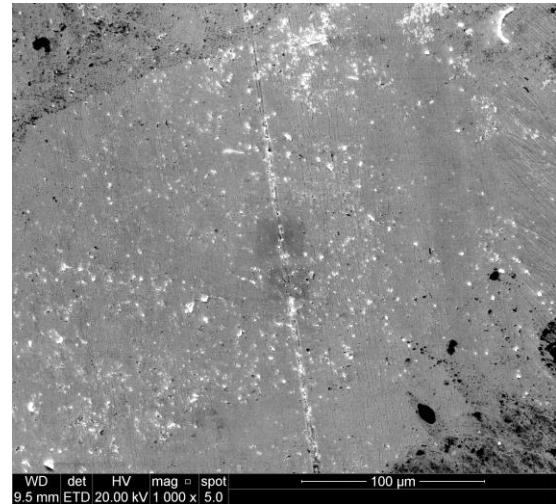


Figura B – Amostra 10B, lubrificado com B7, apresentando defeito do tipo microcorte – aumento: 1000x

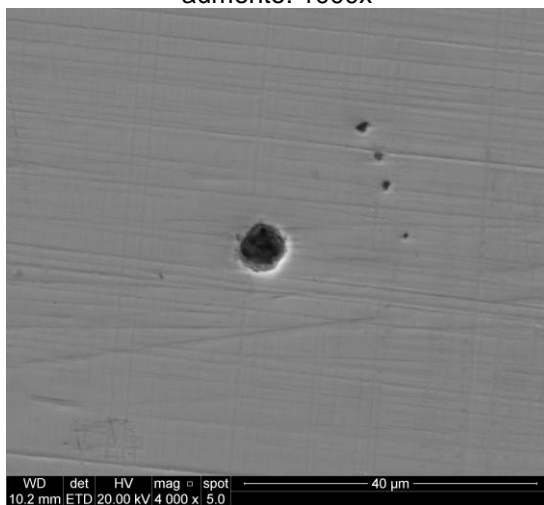


Figura C – Amostra 10B lubrificado com B50, apresentando defeitos do tipo crateração – aumento: 4000x

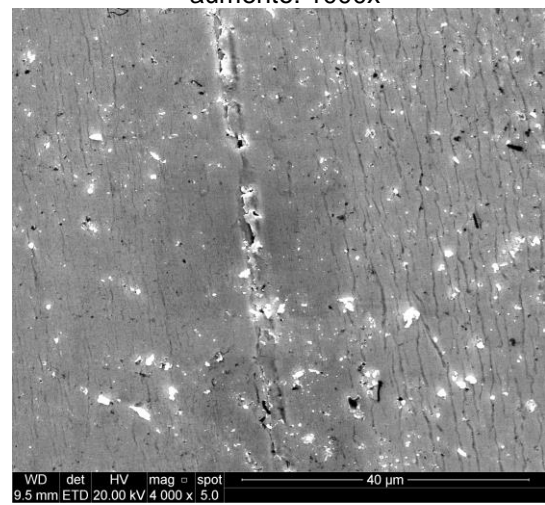


Figura D – Amostra 10B, lubrificado com B7, apresentando defeitos do tipo microcorte – aumento: 4000x

Figura 5.20. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura aço SAE 1045 temperado e revenido a 100°C (amostra 10B). Ensaio lubrificado com biodiesel/diesel B50 e com diesel B7

5.8.3. Microscopia Aço SAE 1045 Temperado e Revenido a 300°C

Seguindo a tendência dos resultados obtidos no aço SAE 1045, as Figuras 5.21 e 5.22 demonstraram que os principais defeitos encontrados nas amostras foram microcortes e microcraterações geradas por fratura, ou seja, o mecanismo de

desgaste atuante nas análises realizadas na amostra 10C (aço SAE 1045 temperado e revenido a 300°C) foi o desgaste abrasivo.

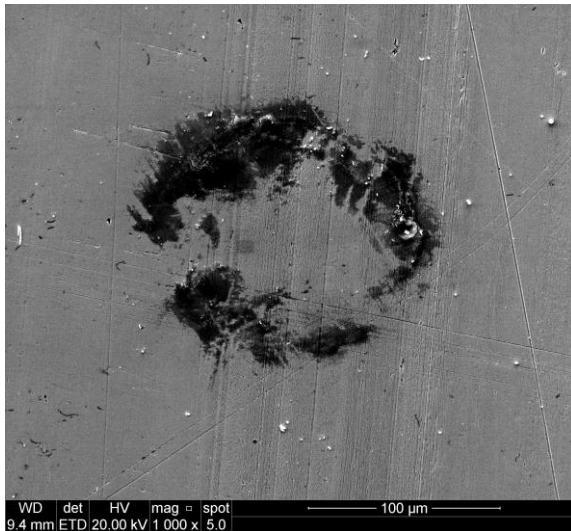


Figura A – Amostra 10C, sem lubrificação, apresentando processo de crateração em fase inicial – aumento: 1000x

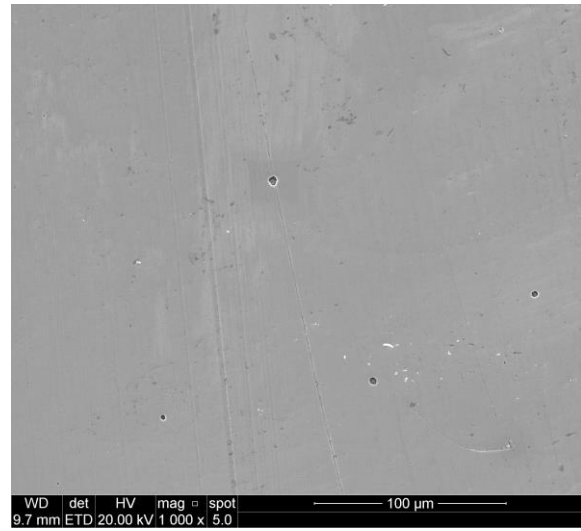


Figura B – Amostra 10C, lubrificado com B100, apresentando defeitos do tipo crateração e escorreamento – aumento: 1000x

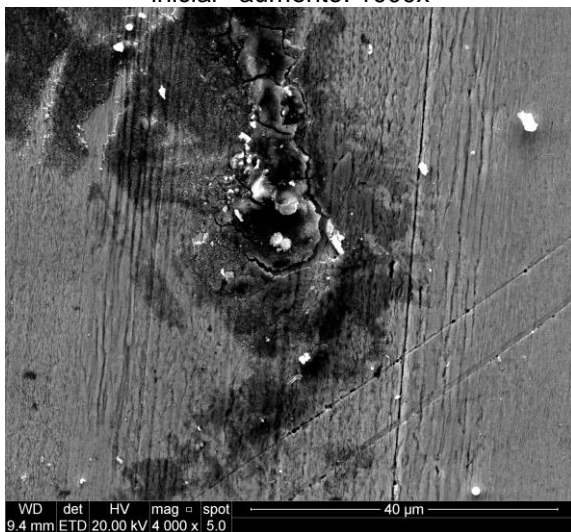


Figura C – Amostra 10C sem lubrificação, apresentando processo de crateração em fase inicial – aumento: 4000x

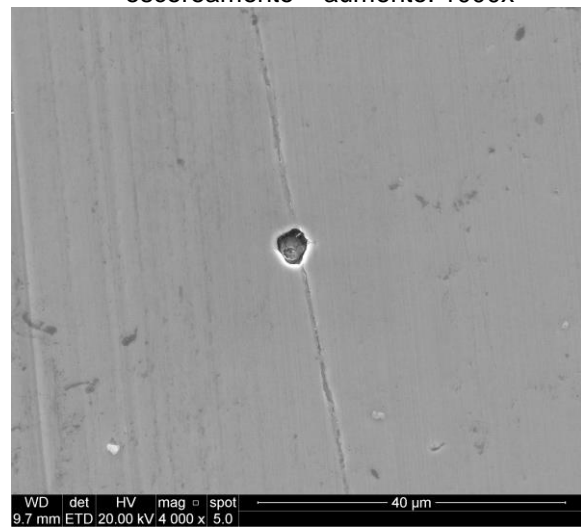


Figura D – Amostra 10C lubrificado com B100, apresentando defeitos do tipo crateração e escorreamento – aumento: 4000x

Figura 5.21. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura da amostra 10C (aço SAE 1045 temperado e revenido a 300°C). Ensaio sem lubrificação e lubrificado com biodiesel B100

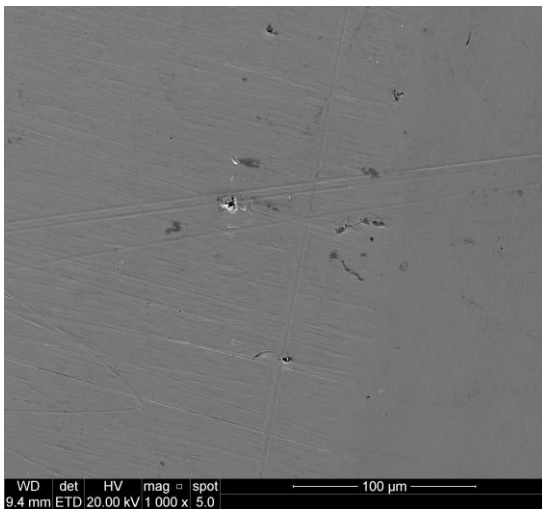


Figura A – SAE 1045 temperado e revenido a 300°C, lubrificado com B50, apresentando defeito do tipo crateração – aumento: 1000x

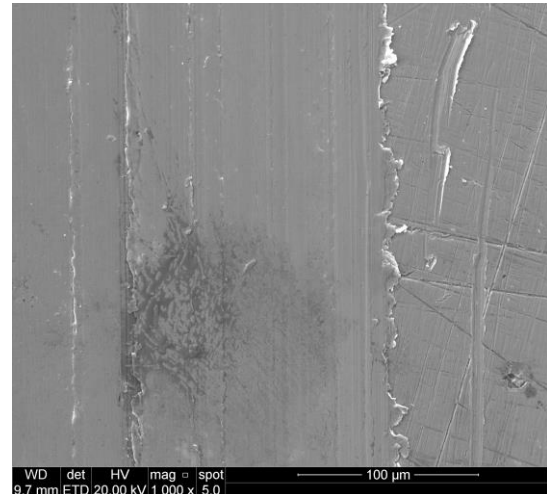


Figura B – SAE 1045 temperado e revenido a 300°C, lubrificado com B7, defeito do tipo escorreamento – aumento: 1000x

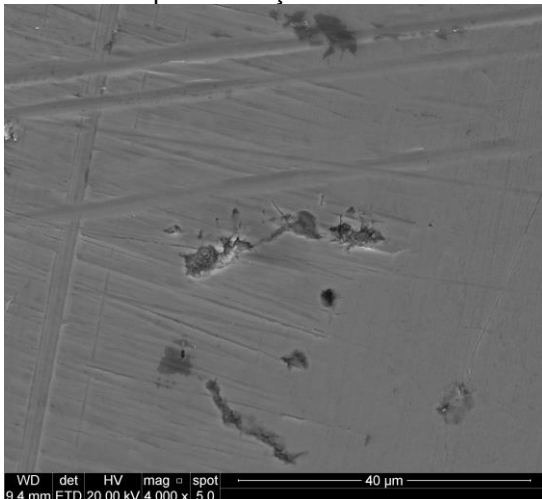


Figura C – SAE 1045 temperado e revenido a 300°C lubrificado com B50, apresentando escorreamento e crateração – aumento: 4000x



Figura D – SAE 1045 temperado e revenido a 300°C lubrificado com B7, apresentando escorreamento – aumento: 4000x

Figura 5.22. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura aço SAE 1045 temperado e revenido a 300°C. Ensaio lubrificado com B50 e lubrificado com diesel B7.

5.8.4. Microscopia Aço SAE 52100 Esferoidizado

A Figura 5.23 apresenta a análise superficial realizada com microscópio eletrônico de varredura. Analisando as Figuras 5.23A e 5.23C percebe-se a remoção contínua e severa de material, o que é justificada pela baixa dureza da amostra. Comparando as imagens obtidas nas amostras lubrificadas com B100 (Figuras 5.23B e 5.23D), constata-se a significativa redução da severidade do desgaste gerada pela lubrificação do B100.

A morfologia do defeito superficial apresentado na Figura 5.23D ilustra a alta resistência ao desgaste dos carbeto de cromo presentes na estrutura do aço SAE 52100. Percebe-se a remoção da matriz metálica do material com a preservação dos carbeto distribuídos ao longo do material. Assim, as análises microscópicas confirmaram o regime de desgaste severo nos ensaios realizados na amostra 52A (aço SAE 52100 esferoidizada) com ausência de lubrificação.

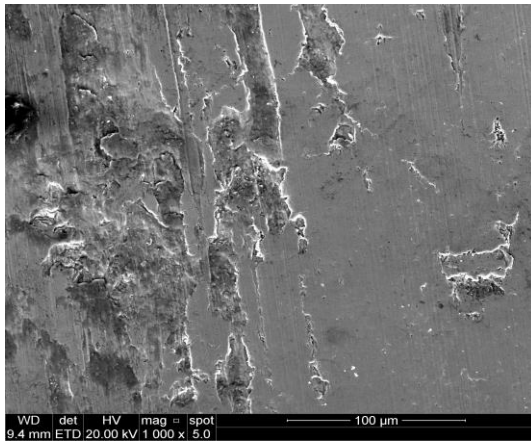


Figura A – Amostra 52A, sem lubrificação, apresentando desgaste severo - aumento de 1000x

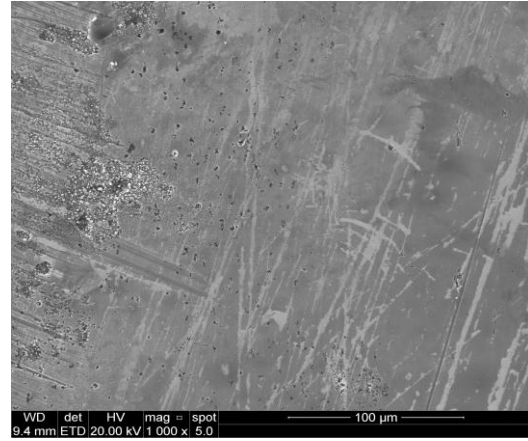


Figura B – Amostra 52A, lubrificado com B100 - aumento de 1000x

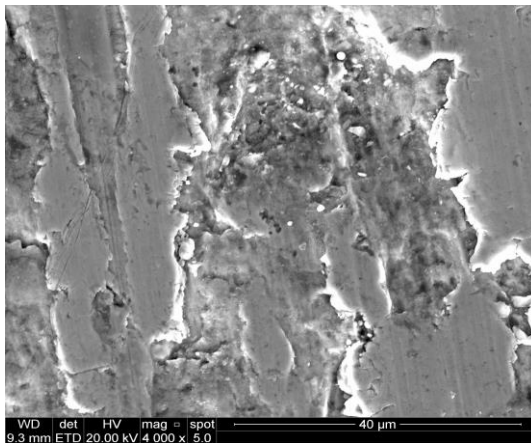


Figura C - Amostra 52A, sem lubrificação, apresentando desgaste severo – aumento de 4000x

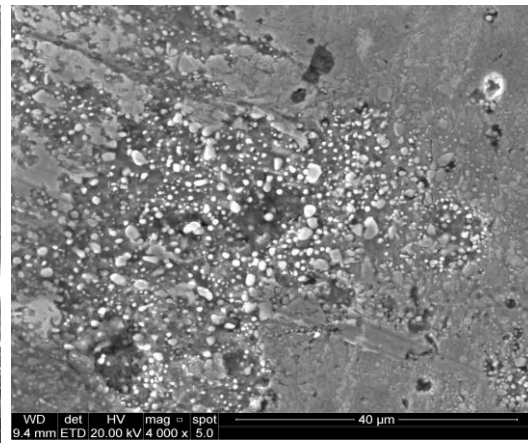


Figura D – Amostra 52A, lubrificado com B100. Defeito gerado pelo arrancamento da matriz metálica ao redor dos carbeto de cromo – aumento de 4000x

Figura 5.23. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura da amostra 52A (aço SAE 52100 esferoidizado). Ensaio sem lubrificação e lubrificado com biodiesel B100.

5.8.5. Microscopia aço SAE 52100 Temperado e Revenido a 100°C

A Figura 5.24 apresenta a pista de desgaste da amostra 52B (aço SAE 52100 temperada e revenida a 100°C). Devido ao alto percentual de carbono, a presença de carbeto de alta dureza e resistência ao desgaste na microestrutura do aço SAE

52100, percebe-se a significativa redução da severidade do desgaste ocorrido nestes ensaios, se comparados aos da amostra esferoidizada. Quanto à morfologia dos defeitos encontrados na pista de desgaste, percebe-se a presença do defeito superficial do tipo microcorte, gerado pelo mecanismo de desgaste abrasivo (defeitos contínuos no sentido do deslizamento), principalmente no ensaio sem lubrificação. Também, esteve presente microcraterações isoladas decorrentes da remoção da matriz metálica e preservação dos carbeto de cromo presentes na estrutura (Figura 5.24A e Figura 5.24D).

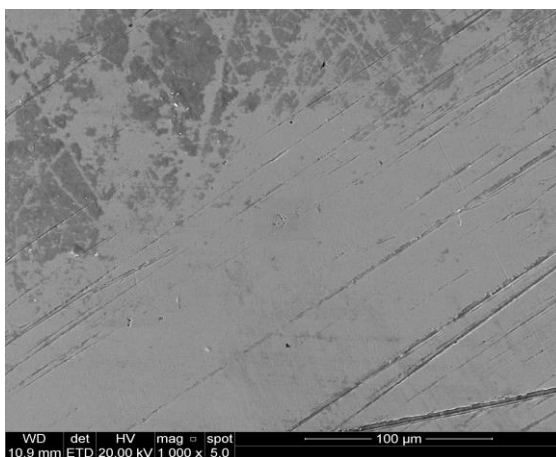


Figura A – Amostra 52B, sem lubrificação, apresentando escorreamento – aumento de 1000x

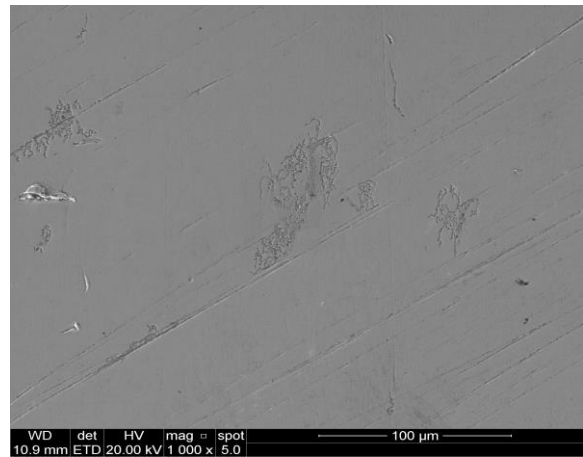


Figura B - Amostra 52B, lubrificado com B100, apresentando escorreamento – aumento de 1000x



Figura C - Amostra 52B, sem lubrificação, apresentando escorreamento – aumento de 4000x

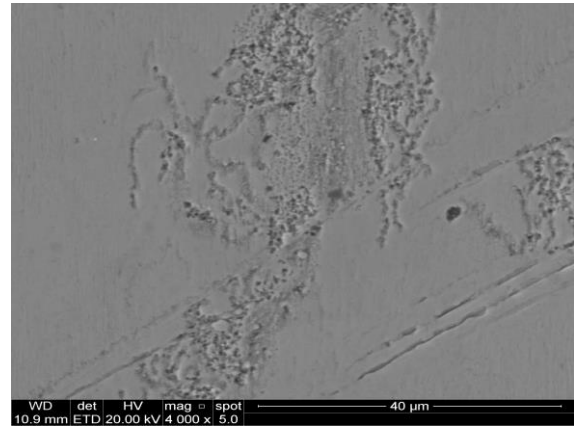


Figura D - Amostra 52B, defeito gerado pelo arrancamento da matriz metálica ao redor dos carbeto de cromo - aumento de 4000x

Figura 5.24. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura da amostra 52B. Ensaio sem lubrificação e lubrificado com biodiesel B100.

5.8.6. Microscopia Aço SAE 52100 Temperado e Revenido a 200°C

A análise das amostras do aço SAE 52100 revenido a 200°C (52C) é apresentado na Figura 5.25. Os mecanismos de desgaste presentes nos ensaios sem lubrificação (Figuras 5.25A e 5.25C) são os mesmos aos encontrados nos ensaios da amostra 52B, porém com uma severidade maior (principalmente microcorte gerado por desgaste abrasivo).

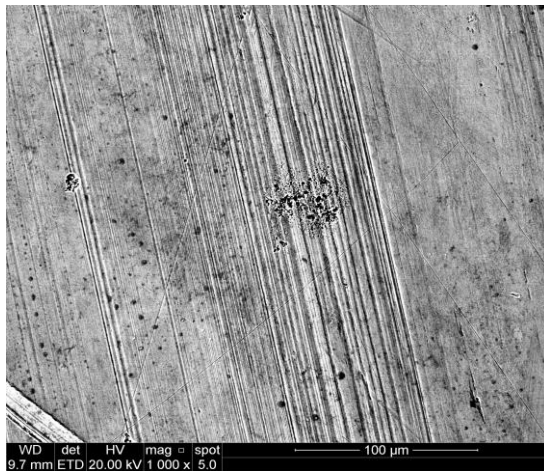


Figura A –Amostra 52C, sem lubrificação, apresentando desgaste adesivo e regiões com arrancamento da matriz metálica – aumento de 1000x

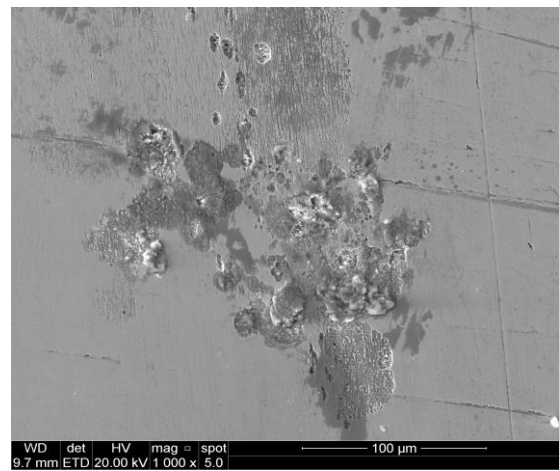


Figura B - Amostra 52C, lubrificado com B100, apresentando desgaste adesivo de baixa severidade – aumento de 1000x

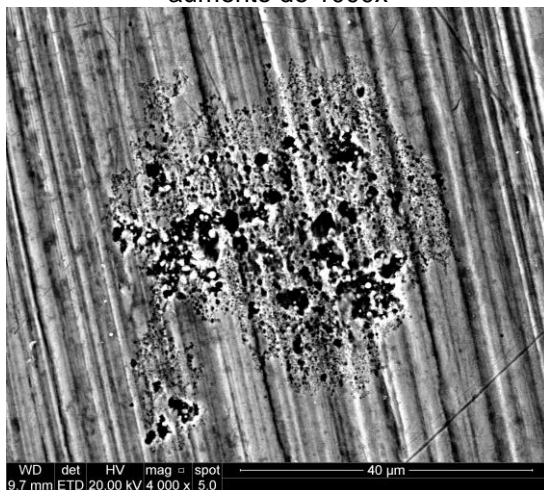


Figura C - Amostra 52C, sem lubrificação, apresentando desgaste adesivo e regiões com arrancamento da matriz metálica– aumento de 4000x

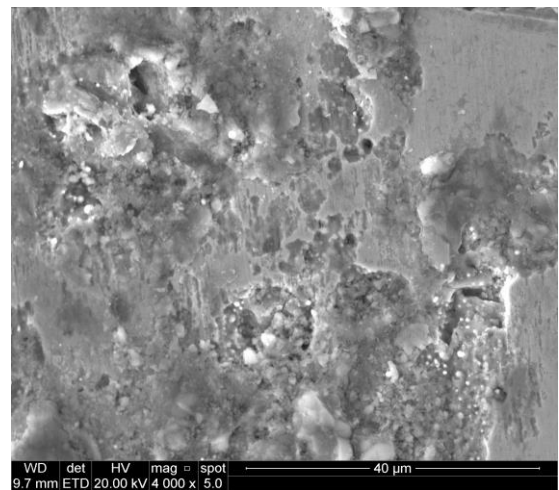


Figura D - Amostra 52C, lubrificado com B100, região apresentando arrancamento da matriz metálica – aumento de 4000x

Figura 5.25. Análise superficial com microscópio eletrônico de varredura da amostra 52C. Ensaio sem lubrificação e lubrificado com biodiesel B100.

6. CONCLUSÕES

Analisando os resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir:

- Os ensaios sem lubrificação em ambos os materiais indicaram a superioridade à resistência ao desgaste do aço SAE 52100, confirmando a previsão teórica da resistência ao desgaste superior deste material. A amostra de aço SAE 52100 esferoidizado foi exceção a esta tendência, demonstrando a grande influência que a microestrutura do material tem nesta propriedade em questão, conforme previsto por BRESSAN (2011). A variação entre os coeficientes de desgaste médios entre as amostras 10A e 52A foi de aproximadamente 56%.
- Os Coeficientes de Desgaste Médio confirmaram que o biodiesel a base de soja produzido através da rota metálica diminuiu significativamente a severidade do desgaste do material, trabalhando nas mesmas condições de velocidade e distância percorrida. A diminuição mais significativa (SAE 52100 Esferoidizado) reduziu em aproximadamente 1090%.
- Apesar do resultado encontrado no coeficiente médio de desgaste da amostra de SAE 1045 Bruto de Laminação (10A), lubrificado com biodiesel B100, as demais amostras deste material, nas análises com B100, apresentaram coeficientes de desgaste médio inferiores aos obtidos nos demais lubrificantes aplicados no estudo. (40% B50 e 67% no B7 maiores na amostra 10B e 22% no B50 e 39% no B7 na amostra 10C). Esta tendência também foi encontrada por VERDI (2011), onde as análises com B100 apresentaram menor severidade de desgaste nos ensaios utilizando o tribômetro pino-sobre-disco. Da mesma forma, FARIAS (2014) obteve valores de lubricidade superiores nas análises envolvendo B100, se comparadas a diferentes misturas de Biodiesel/Diesel. No entanto, as análises com B50 ficaram

muito próximas as obtidas com o diesel comercial B7. Esta tendência não foi encontrada por FARIAS, onde o B20 apresentou lubricidade similar ao B100.

- As análises microscópicas realizadas nas pistas de desgaste em todos os ensaios indicaram o defeito superficial do tipo Microcorte, típicas do mecanismo de desgaste abrasivo, como o principal mecanismo de desgaste atuante em todas as amostras. O aumento da dureza nas pistas de desgaste decorrente de deformações plásticas atuantes durante o desgaste abrasivo confirma o diagnóstico deste mecanismo de desgaste predominante em todos os ensaios (MOORE, KING, 1980). Nas amostras de aço SAE 1045, estiveram presentes fraturas decorrentes de trincas geradas por desgaste abrasivo, que ao avançarem acabam liberando uma porção do material. (MOORE; KING, 1980). As amostras de aço SAE 52100 não apresentaram craterações, o que comprova a resistência ao desgaste superior deste material. A morfologia dos defeitos superficiais encontrados nas amostras deste aço ilustrou o papel fundamental que os carbeto de cromo têm no aumento da resistência ao desgaste deste material.

7. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar a modelagem matemática do fenômeno tribológico envolvido;
- Implementar melhorias no tribômetro, para que seja possível a medição de diferentes propriedades do sistema, como por exemplo, a obtenção do coeficiente de atrito do sistema ao longo do ensaio;
- Correlacionar diferentes valores de velocidade e distância percorrida com diferentes misturas de biodiesel, avaliando a influência dos mesmos no coeficiente de desgaste;
- Investigar a resistência ao desgaste de diferentes materiais;
- Avaliar a influência da temperatura no coeficiente de desgaste.
- Realizar a análise de lubricidade com dispositivo High Frequency Reciprocating Test Rig (HFRR).

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, F., et. al.. Avaliação da Viscosidade Dinâmica de Biodiesel – Rota Etílica – e Outros Óleos Utilizando duas Abordagens. CONGRESSO INTERNACIONAL DE METROLOGIA MECÂNICA. 2011. Natal.

AÇO CONSTRUÇÃO MECÂNICA. In: GERDAU. Disponível em: <www.ggdmetals.com.br/aco-construcao-mecanica>. Acesso em: 22 set. 2014.

AÇOS ESPECIAIS. In: GERDAU. Disponível em: <www.ggdmetals.com.br/aco-especiais>. Acesso em: 22 set. 2014.

ANDRADE P, et. Al. Influência da Carga Normal no Desgaste por Deslizamento de Aços. 68° CONGRESSO ANUAL DA ABM. 2013. Belo Horizonte. p. 2899-2906.

ARRUDA, F. V. F. **Degradação de óleo diesel por *Aspergillus tereus*, *Cunninghamella echinulata* e *Penicillium commune***. 2011. 56p. Dissertação (Mestrado em Biologia de Fungos), Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

ASM Internacional Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. ASM Internacional. ASM Society: 2001.

ASM Internacional. ASM Metals Handbook – Friction, Lubrification and Wear Technology (Vol. 18). Estados Unidos. 1994.

ASTM D4172, Standard Test Method for Wear Preventive Characteristics of Lubrification Fluid. Estados Unidos, 2010.

ASTM G105, Standard Test Method for Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests. ASM Society: Estados Unidos. 2010.

ASTM G32, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus. American Society for Testing and Materials. ASM Society: Estados Unidos. 2010.

ASTM G65, Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. ASM Society: Estados Unidos. 2010.

ASTM G76, Standard Test Method for Measuring Abrasion Dry Sand/ Rubber Wheel Apparatus. American Society for Testing and Materials. ASM Society: United States, 2010.

ASTM G99-04, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. American Society for Testing and Materials. ASM Society: Estados Unidos, 5 p. 2004.

BAYER, Raymond G; **Mechanical Wear: Fundamentals and Testing**. Marcel Dekker: New York, 2004. 395 p.

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

BRESSAN, J, COMELI, F.; Estudo da Resistência ao Desgaste de Aço AISI 422 Tratado Termicamente, Nitretado e com Revestimentos Aspergidos de Carbonetos de Cromo-Níquel. 4º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. Estância de São Pedro, 2007.

BRESSAN, J, SHOPF, R. A.; Resistência ao Desgaste Abrasivo de Aços Ferramenta Avaliada por Meio do Ensaio Pino-Disco. 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. Caxias do Sul. 2011.

BRU, R.. **Avaliação Mecânica de Superfícies do Aço SAE 4144**. 2006. 29p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Paraná, Brasil.

BUCKLEY, Donald H; **Surface Effects in Adhesion, Friction and Lubrification**. Elsevier: Amsterdam, 1981, 623 p.

BUDINSKI, K.G **Surface Engineering for Wear Resistance**. Prentice Hall, New Jersey, 1988. 220p.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª ed.: ABM. São Paulo, 2005.53-77p.

ENCARNAÇÃO, A.P. **Geração de Biodiesel pelos Processos de Transesterificação e Hidroesterificação, uma Avaliação Econômica**. 2008. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 27-32p.

FARIAS, A.C, et. al.; Lubricidade do Combustível Diesel e dos Biocombustíveis de Soja B20 e B100. VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA (CONEM). 2010. Campina Grande.

FARIAS, A.C., MEDEIROS, J. T. N., ALVES, S. M.; Micro and Nanometric Wear Evaluation of Metal Discs Used on Determination of Biodiesel Fuel Lubricity. **Materials Research**, Vol. 17, 89-99p, 2014.

FOLQUENIN, E.K.F., **Validação das Análises Físico-Químicas Exigidas pela ANP para Misturas Diesel – Biodiesel, 2008**. Dissertação (Mestrado em Química Aplicada). Universidade Estadual de Ponta Grossa, Paraná, Brasil. 12-16p.

GAHR, K.H.Z. **Microstructure and Wear of Materials**. Amsterdam, Elsevier, 1987. 560p.

GAVRILJUK, V.G.; BERNS, H., **High Nitrogen Steels**, Springer-Verlag, Berlin. 1999. p. 378.

GOVERNO AUMENTA PERCENTUAL DE BIODIESEL NO ÓLEO DIESEL, In. PORTAL BRASIL, Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2014/05/governo-aumenta-porcentagem-de-biodiesel-no-diesel>>, Acesso em: 29 nov. 2014.

HASEEB, A.S.M.A; FAZAL, M.A; MASJUKI, H.H. An Evolution of Material Compatibility; Performance; Emission and Engine Durability. **Renewable and Suitable Energy Reviews**, v.15, p.1314-1324, 2010.

HUTCHINGS, I.M., **Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials**. 1a edição, Edward Arnold, Londres, 1992. 273p.

JOAQUIM, C.R.O. **Verificação do Comportamento da Lubricidade do Óleo Diesel Veicular com Adição de Etanol**, 2007, Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. 38-42p.

JULIATO, A. **Análise da Influência de Diferentes Misturas de Biodiesel no Desempenho e Emissão de Poluentes de um Motor Diesel Agrícola**. Piracicaba: USP, 146p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Brasil, 2006.

KATO, K. A, ADACHI, K., **Wear Mechanism: Modern Tribology Handbook**. vol. 1, s.l. Boca Raton. CRC Press, 2001. 291-301p.

KAYABA, T. The Latest Investigations of Wear by the Microscopic Observations, **JSLE Transactions**, v.29, p. 9-14, 1984.

KNOTHE, G.; GERPEN, J. V.; KRAHL, J.; RAMOS, L. P. **Manual de Biodiesel**. São Paulo: Edgard Blücher, v 16, 2006. p 340.

KUNIOSHI, C. **Estudo do Comportamento de Erosão- Oxidação de Materiais Compósitos de NiCr com WC e CrC**. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear). Instituto de Pesquisas Energética e Nucleares (IPEN). 2004

LI, X; A pin-on-disc study of the tribology characteristics of sintered versus standard steel gear materials; **Wear**, 2015. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/wear>. Acesso em: 10 jan. 2015.

LYU, Y., Wear between Wheel and Rail: A Pin-on-Disc Study of Environmental Conditions and Iron Oxides; **Wear**, 2015. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/wear>. Acesso em: 10 jan. 2015.

MACHADO, J. **Análise de Falhas em Martelos Oscilantes dos Desfibradores da Indústria Sucroalcooleira da Região Norte-Nordeste**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2008. 13-25p.

MARIANO, A.P.; KATAOKA, A.P.A.G.; ANGELIS, D.F. & BONOTTO, D.M. Laboratory study on the bioremediation of diesel oil contaminated soil from a petrol station. **Brazilian Journal of Microbiology**. v.38, p.346-353, 2007.

MEHER, L. C.; SAGAR, D. V.; NAIK, S. N.; Technical Aspects of Biodiesel Production by Transesterification. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** – V. 10, 2004. p 248-268.

METALLURGICAL ENGINEERING; MECHANICAL ENGINEERING. **Wear of some single-phase copper-base alloys**. v. 197, 1996. 17-37p.

MOORE, M.A.; KING, F.S. Abrasive Wear of Brittle Solids. **Wear**, v.60, p.123-140,1980.

NETO, G., et. al, Estimativa da Viscosidade de Misturas de Biodiesel por Métodos de Contribuição de Grupo. **Exacta (On-line)**, volume 10, número 1, 101-107, junho, 2012. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/pdf/810/81023342010.pdf>> Acesso em: 02. nov. 2014. 101-107p.

NICOLAU, Al; et. al.; The Relation Between Lubricity and Electrical Properties of Low Sulfur Diesel and Diesel/Biodiesel Blends. **Fuel**. v. 117. 2014. 26–32p.

NORTON, R. **Projeto de Máquinas**. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.409 - 428p.

O QUE É BIODIESEL? In: Biodieselbr. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/biodiesel/definicao/o-que-e-biodiesel.htm>>. Acesso em: 22 nov. 2014

ÓLEO DIESEL. In: PETROBRAS. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/automotivos/oleo-diesel/>>. Acesso em: 22 nov. 2014.

PURQUÉRIO, B. M.; GAMBINL, J. R. **Elementos de Tribologia**. Escola de Engenharia -UPS São Carlos,1978.

SCHEMMEL, I, et. al.. Microstrutural aspects determinig the adhesive wear of tool steels. **Wear**, v. 260, 2006. p.1028-1034.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE C.R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7ª. ed. Porto Alegre. Bookman, 2005. 960p.

SHUMALTZ, G. **Technische Oberfläche**. Beuth Verlag, Berlin, 1985.

SILVA, P. **Análise do Comportamento em Fadiga do Aço SAE 52100 sob Diferentes Condições Microestruturais**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – (UFRGS). 2001.

STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W. **Engineering tribology**: Tribologia. 2ªed. Butterworth Heinemann, Boston, p. 504-570; 872, 2014.

STLE. **Handbook of Lubrication and Tribology** 2ª Ed. Boca Raton. CRC Press. 2012. 1160p.

SWAIN, M.V. Microscopic Observations of Abrasive Wear of Polycrystalline Alumina, **Wear**, v.35, p.185-189, 1975.

TEDESCO, N. **Caracterização do Comportamento de Desgaste de Cerâmicas de Alumina Densa: Efeitos de Parâmetros do Ensaio do Tipo Pino no Disco**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de São Carlos, 2010. 18-74p.

TEIXEIRA, K., **Influência da Velocidade de Deslizamento no Desgaste do Par Tribológico Ferro Fundido Cinzento (MC 12 e MC 13) – Ferro Fundido Cinzento Centrifugado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista (UNESP). 2011. 33-53p.

TOMANIK, E., **Modelamento do Desgaste por Deslizamento em Anéis de Pistão de Motores de Combustão Interna**. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica de São Paulo, 2000. 3-21p.

VATAVUK, J. **Mecanismos de Desgaste em Anéis de Pistão e Cilindros de Motores de Combustão Interna**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Escola Politécnica, USP, São Paulo, 1994. 10-31p.

VERDI, J. **Dispositivo Pino-Sobre-Disco para Análise de Desgaste na Presença de Diesel e Biodiesel**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia dos Materiais). Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2011. 64-73p.

VINGSBO, O.; HOGMARK, S. Wear of Steels. **ASM Materials Science Seminar on Fundamentals of Friction and Wear of Materials**. 1980, Pittsburg, Pennsylvania, , Metals Park, 1981. 373-408p.

WANTANG, F. Resistance of high nitrogen austenitic steel to cavitation erosion. **Wear**, v. 249, 788-791p. 2001.

XU, L.; KENNON, N.F. A Study of the Abrasive Wear of Carbon Steels. **Wear**,v.148, 1991, 101-112p.

YANG, L. J., A Test Methodology for the Determination of Wear Coefficient. **Wear**, v.259, pp. 1453 -1461, 2005.

YANG, L. J., Wear coefficient of tungsten carbide against hot-work tool steel disc with two different pin settings, **Wear**, v. 257, 481-231p. 2004.

ZANATTA, A. **Influência do Tratamento Térmico e do Tipo de Reforço nas Propriedades de Compósitos a Base de Ligas de Alumínio Obtidos Via Metalurgia do Pó**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). 2007. 60-84p.

ANEXO I – LARGURA DA PISTA DE DESGASTE

Os resultados obtidos na medição da largura da pista de desgaste das amostras, em cada uma das condições de lubrificação propostas são apresentados abaixo:

Aço SAE 1045 Bruto de Laminação (Amostra 10A)

Tabela 9.1. Largura da pista de desgaste na amostra 10A, sem lubrificação

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	1,39	1,49	1,56	1,54	1,26	1,24	1,19	1,12	1,15	1,23	1,30	1,20
1200	1,76	1,70	1,71	1,74	1,35	1,26	1,23	1,34	1,96	2,03	2,10	2,11
1600	2,20	2,16	2,14	2,16	1,38	1,36	1,47	1,41	2,15	2,17	2,09	2,11
2000	2,27	2,22	2,39	2,50	1,54	1,52	1,47	1,43	2,25	2,17	2,12	2,19
2400	2,50	2,16	2,14	2,27	1,63	1,59	1,63	1,77	2,20	2,14	2,11	2,16
2800	2,25	2,35	2,44	2,50	1,72	1,66	1,64	1,79	2,15	2,20	2,23	2,29
3200	2,51	2,45	2,25	2,35	1,80	1,73	1,71	1,68	2,28	2,22	2,23	2,29
3600	2,25	2,35	2,51	2,44	1,69	1,89	1,75	1,75	2,24	2,30	2,23	2,23
4000	2,42	2,52	2,25	2,30	1,86	1,71	1,69	1,90	2,26	2,27	2,30	2,33
4400	2,30	2,37	2,47	2,53	2,00	1,99	1,95	1,93	2,35	2,31	2,30	2,21
	2,31	2,15	2,28	2,49	1,96	1,90	1,85	1,88	2,17	2,27	2,25	2,23

Tabela 9.2. Largura da pista de desgaste na amostra 10A, lubrificado com B100

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	0,71	0,66	0,75	0,86	0,49	0,53	0,50	0,47	0,54	0,57	0,52	0,44
1200	0,94	0,70	0,89	0,94	0,54	0,52	0,51	0,58	0,61	0,54	0,52	0,56
1600	0,99	0,83	0,95	0,95	0,87	0,75	0,70	0,76	0,84	0,92	0,91	0,99
2000	1,11	1,02	0,92	0,95	0,80	0,81	0,78	0,78	1,06	1,06	0,90	0,99
2400	1,13	1,10	1,15	1,12	0,81	0,86	0,84	0,76	1,06	1,09	0,97	1,01
2800	1,11	1,17	1,15	1,20	0,83	0,89	0,93	0,94	1,01	1,34	1,11	0,98
3200	1,20	1,16	1,12	1,17	1,00	1,01	0,98	0,97	1,13	1,35	1,25	0,99
3600	1,17	1,18	1,21	1,19	1,00	1,04	1,02	1,04	1,27	1,28	1,25	1,31
4000	1,19	1,20	1,23	1,25	1,01	1,03	1,05	1,02	1,27	1,28	1,30	1,29
4400	1,20	1,23	1,26	1,24	1,03	1,01	1,05	1,08	1,31	1,27	1,18	1,27
	1,29	1,30	1,31	1,22	0,99	0,97	1,02	1,01	1,31	1,35	1,25	1,15

Tabela 9.3. Largura da pista de desgaste na amostra 10A, lubrificado com B50

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	0,42	0,46	0,46	0,48	0,44	0,41	0,44	0,41	1,38	1,36	1,31	1,34
1200	0,49	0,47	0,47	0,50	0,54	0,52	0,48	0,59	1,55	1,55	1,52	1,59
1600	0,56	0,60	0,57	0,59	0,75	0,80	0,81	0,80	1,63	1,60	1,51	1,58
2000	0,63	0,62	0,59	0,62	0,90	0,89	0,91	0,93	1,61	1,65	1,60	1,65
2400	0,67	0,63	0,65	0,71	0,95	0,92	0,91	0,97	1,65	1,78	1,67	1,64
2800	0,68	0,71	0,67	0,69	0,91	0,98	0,95	0,91	1,69	1,83	1,74	1,61
3200	0,66	0,65	0,67	0,70	0,96	0,95	1,02	0,94	1,77	1,78	1,78	1,82
3600	0,82	0,84	0,88	0,83	1,00	0,96	0,99	1,05	1,81	1,80	1,80	1,75
4000	0,80	0,86	0,82	0,89	1,05	1,01	1,04	1,01	1,74	1,77	1,72	1,75
4400	0,92	0,94	1,00	0,93	1,01	1,05	1,06	1,00	0,66	0,68	0,63	0,58
	0,94	0,96	0,94	0,90	1,05	1,03	1,01	1,08	1,00	1,00	0,98	0,99

Tabela 9.4. Largura da pista de desgaste na amostra 10A, lubrificado com B7

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	0,55	0,56	0,53	0,51	0,45	0,48	0,49	0,46	0,52	0,49	0,47	0,49
1200	0,87	0,85	0,93	0,91	0,47	0,48	0,46	0,49	0,76	0,73	0,73	0,75
1600	0,89	0,89	0,95	0,90	0,55	0,61	0,59	0,56	0,76	0,79	0,77	0,76
2000	0,93	0,94	0,94	0,92	0,60	0,62	0,64	0,57	0,81	0,79	0,80	0,85
2400	0,95	0,98	0,99	0,92	0,69	0,72	0,70	0,71	0,87	0,84	0,84	0,88
2800	0,93	0,95	0,97	0,93	0,73	0,70	0,71	0,77	0,93	0,91	0,96	0,92
3200	0,98	1,02	1,06	0,94	0,75	0,74	0,75	0,79	0,91	0,92	0,95	0,95
3600	1,02	0,97	0,99	0,97	0,82	0,81	0,83	0,79	0,96	0,94	0,98	0,96
4000	1,00	1,02	1,05	0,97	0,82	0,84	0,80	0,81	0,93	0,94	0,99	0,95
4400	1,03	1,10	1,02	1,00	0,80	0,82	0,88	0,80	0,98	0,96	0,99	1,02
	0,96	0,94	0,93	0,97	0,80	0,80	0,83	0,85	0,98	0,99	1,02	0,96

Aço SAE 1045 Temperado e Revenido a 100°C (Amostra 10B)

Tabela 9.5. Largura da pista de desgaste na amostra 10B, sem lubrificação.

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	0,40	0,43	0,35	0,38	0,52	0,40	0,44	0,49	0,33	0,31	0,37	0,29
1200	0,85	0,70	0,77	0,82	0,90	0,83	0,80	0,77	0,90	0,80	0,71	0,81
1600	1,01	1,02	0,98	0,97	1,05	1,03	1,08	1,00	1,20	1,17	0,95	1,10
2000	1,37	1,00	1,38	1,58	1,24	1,01	1,22	1,13	0,95	1,15	0,92	1,19
2400	1,69	1,65	1,26	1,49	1,29	1,23	1,24	1,34	1,09	1,09	1,05	1,24
2800	1,70	1,27	1,43	1,46	1,40	1,33	1,37	1,46	1,21	0,96	1,08	1,11
3200	1,71	1,30	1,76	1,74	1,41	1,57	1,30	1,43	1,40	1,42	1,21	1,16
3600	1,71	1,56	1,50	1,76	1,43	1,31	1,38	1,49	1,14	1,30	1,51	1,49
4000	1,60	1,50	1,48	1,50	1,32	1,27	1,36	1,53	1,44	1,30	1,50	1,47
4400	1,60	1,58	1,53	1,68	1,61	1,45	1,43	1,41	1,46	1,46	1,49	1,41
	1,50	1,48	1,55	1,49	1,39	1,37	1,39	1,40	1,47	1,47	1,39	1,43

Tabela 9.6. Largura da pista de desgaste na amostra 10B, lubrificado com B100.

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	0,31	0,37	0,32	0,35	0,22	0,24	0,20	0,18	0,28	0,24	0,23	0,24
1200	0,39	0,50	0,53	0,58	0,27	0,32	0,39	0,33	0,26	0,28	0,31	0,34
1600	0,63	0,61	0,52	0,57	0,52	0,47	0,50	0,52	0,42	0,43	0,58	0,46
2000	0,58	0,51	0,52	0,48	0,57	0,59	0,55	0,50	0,5	0,51	0,54	0,48
2400	0,54	0,56	0,54	0,57	0,53	0,58	0,61	0,63	0,54	0,53	0,47	0,5
2800	0,62	0,63	0,59	0,60	0,67	0,69	0,71	0,68	0,56	0,57	0,47	0,52
3200	0,58	0,65	0,61	0,59	0,65	0,69	0,71	0,68	0,51	0,6	0,5	0,49
3600	0,58	0,62	0,65	0,67	0,65	0,67	0,70	0,72	0,5	0,56	0,6	0,62
4000	0,67	0,66	0,69	0,70	0,74	0,68	0,71	0,71	0,59	0,63	0,66	0,68
4400	0,73	0,69	0,71	0,63	0,75	0,73	0,77	0,79	0,62	0,6	0,67	0,74
	0,73	0,69	0,71	0,63	0,73	0,68	0,67	0,61	0,72	0,7	0,75	0,65

Tabela 9.7. Largura da pista de desgaste na amostra 10B, lubrificado com B50.

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	0,42	0,31	0,28	0,28	0,38	0,37	0,38	0,40	0,42	0,40	0,46	0,38
1200	0,46	0,50	0,50	0,32	0,49	0,48	0,52	0,55	0,52	0,49	0,49	0,51
1600	0,51	0,46	0,42	0,49	0,56	0,52	0,51	0,55	0,52	0,52	0,54	0,51
2000	0,52	0,44	0,42	0,45	0,53	0,54	0,50	0,54	0,55	0,51	0,53	0,51
2400	0,56	0,44	0,51	0,42	0,65	0,64	0,66	0,65	0,60	0,75	0,58	0,81
2800	0,56	0,57	0,60	0,57	0,64	0,63	0,66	0,65	0,64	0,64	0,84	0,65
3200	0,59	0,56	0,59	0,46	0,66	0,65	0,68	0,66	0,66	0,68	0,70	0,67
3600	0,64	0,72	0,70	0,74	0,71	0,70	0,75	0,78	0,71	0,73	0,75	0,75
4000	0,70	0,75	0,73	0,83	0,76	0,77	0,76	0,78	0,72	0,78	0,74	0,74
4400	0,80	0,78	0,81	0,87	0,80	0,77	0,68	0,71	1,05	0,77	0,74	1,09
	0,83	0,82	0,70	0,87	0,78	0,79	0,78	0,79	0,80	0,81	0,74	0,83

Tabela 9.8. Largura da pista de desgaste na amostra 10B, lubrificado com B7.

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	0,31	0,37	0,32	0,35	0,22	0,24	0,20	0,18	0,37	0,39	0,42	0,43
1200	0,39	0,50	0,53	0,58	0,27	0,32	0,39	0,33	0,38	0,40	0,42	0,44
1600	0,63	0,61	0,52	0,57	0,52	0,47	0,49	0,52	0,43	0,44	0,46	0,48
2000	0,58	0,61	0,64	0,61	0,57	0,39	0,55	0,50	0,53	0,56	0,55	0,54
2400	0,72	0,66	0,61	0,64	0,57	0,61	0,56	0,61	0,55	0,59	0,62	0,66
2800	0,67	0,57	0,65	0,73	0,53	0,58	0,61	0,63	0,67	0,72	0,75	0,70
3200	0,75	0,68	0,74	0,76	0,67	0,69	0,71	0,68	0,71	0,69	0,71	0,73
3600	0,78	0,74	0,79	0,84	0,65	0,67	0,70	0,72	0,65	0,75	0,79	0,77
4000	0,74	0,80	0,83	0,88	0,74	0,74	0,76	0,78	0,68	0,77	0,78	0,75
4400	0,85	0,92	0,87	0,86	0,75	0,73	0,77	0,79	0,75	0,80	0,85	0,79
	0,77	0,65	0,68	0,82	0,82	0,84	0,78	0,84	0,84	0,71	0,76	0,73

Aço SAE 1045 Temperado e Revenido a 300°C (Amostra 10C)

Tabela 9.9. Largura da pista de desgaste na amostra 10C, sem lubrificação.

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	1,20	0,91	0,85	0,98	1,26	1,36	1,34	0,91	0,45	0,64	0,75	0,90
1200	1,03	1,26	0,93	1,28	1,38	1,95	1,25	1,41	0,61	0,82	0,77	0,68
1600	1,35	1,10	1,64	1,05	1,36	1,34	1,36	1,41	1,18	1,02	1,25	1,19
2000	1,27	1,40	1,23	1,76	1,17	1,32	1,39	1,48	1,23	1,17	1,21	1,31
2400	1,47	1,36	1,32	1,78	1,27	1,39	1,18	1,49	1,22	1,29	1,36	1,20
2800	1,46	1,31	1,36	1,36	1,52	1,60	1,58	1,64	1,30	1,32	1,48	1,40
3200	1,47	1,51	1,52	1,49	1,66	1,62	1,67	1,65	1,39	1,33	1,31	1,34
3600	1,21	1,63	1,69	1,40	1,63	1,64	1,72	1,74	1,36	1,41	1,50	1,43
4000	1,59	1,62	1,56	1,58	1,59	1,70	1,65	1,60	1,54	1,31	1,39	1,36
4400	1,61	1,64	1,73	1,53	1,60	1,70	1,79	1,74	1,54	1,62	1,57	1,54
	1,71	1,44	1,66	1,51	1,63	1,65	1,60	1,67	1,70	1,51	1,73	1,64

Tabela 9.10. Largura da pista de desgaste na amostra 10C, lubrificado com B100.

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	0,24	0,28	0,27	0,30	0,20	0,26	0,26	0,30	0,27	0,30	0,27	0,30
1200	0,34	0,32	0,32	0,37	0,34	0,30	0,28	0,36	0,34	0,34	0,36	0,38
1600	0,35	0,33	0,31	0,45	0,41	0,49	0,41	0,38	0,51	0,49	0,47	0,51
2000	0,41	0,40	0,41	0,46	0,38	0,40	0,42	0,36	0,55	0,62	0,49	0,57
2400	0,49	0,57	0,46	0,52	0,37	0,54	0,46	0,50	0,56	0,62	0,50	0,55
2800	0,60	0,61	0,57	0,61	0,57	0,55	0,51	0,57	0,62	0,67	0,62	0,64
3200	0,64	0,63	0,60	0,64	0,58	0,56	0,53	0,57	0,69	0,69	0,67	0,71
3600	0,69	0,74	0,74	0,70	0,65	0,75	0,80	0,70	0,72	0,73	0,68	0,70
4000	0,69	0,76	0,75	0,74	0,65	0,78	0,79	0,78	0,73	0,73	0,70	0,70
4400	0,73	0,72	0,73	0,76	0,72	0,68	0,75	0,81	0,73	0,75	0,71	0,71
	0,74	0,74	0,76	0,70	0,78	0,79	0,79	0,66	0,69	0,68	0,72	0,74

Tabela 9.11. Largura da pista de desgaste na amostra 10C, lubrificado com B50.

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	0,31	0,31	0,28	0,30	0,29	0,28	0,31	0,29	0,76	0,68	0,81	0,79
1200	0,29	0,28	0,31	0,34	0,54	0,50	0,55	0,52	0,87	0,83	0,84	0,91
1600	0,45	0,45	0,44	0,48	0,52	0,59	0,58	0,56	0,89	0,96	0,93	0,89
2000	0,65	0,63	0,68	0,72	0,67	0,67	0,71	0,60	0,93	0,97	0,99	0,98
2400	0,75	0,73	0,71	0,74	0,77	0,74	0,72	0,76	1,01	1,00	0,97	0,99
2800	0,77	0,79	0,77	0,71	0,77	0,84	0,85	0,82	1,03	1,05	1,09	1,07
3200	0,74	0,78	0,83	0,80	0,79	0,78	0,76	0,79	1,13	1,02	1,04	1,03
3600	0,79	0,78	0,86	0,83	0,78	0,80	0,79	0,80	1,14	1,18	1,14	1,12
4000	0,82	0,81	0,86	0,88	0,78	0,79	0,83	0,84	1,22	1,13	1,22	1,18
4400	0,75	0,77	0,77	0,75	0,80	0,78	0,79	0,83	0,35	0,34	0,36	0,37
	0,80	0,83	0,82	0,85	0,79	0,81	0,84	0,82	0,80	0,82	0,83	0,84

Tabela 9.12. Largura da pista de desgaste na amostra 10C, lubrificado com B7.

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	0,26	0,20	0,23	0,24	0,30	0,30	0,25	0,26	0,33	0,31	0,30	0,31
1200	0,28	0,36	0,35	0,34	0,35	0,30	0,31	0,33	0,36	0,42	0,49	0,46
1600	0,48	0,49	0,46	0,46	0,37	0,32	0,43	0,40	0,45	0,47	0,49	0,43
2000	0,60	0,56	0,54	0,57	0,46	0,60	0,51	0,55	0,47	0,55	0,55	0,51
2400	0,51	0,55	0,50	0,56	0,67	0,62	0,65	0,57	0,53	0,57	0,55	0,56
2800	0,74	0,73	0,75	0,72	0,51	0,64	0,66	0,83	0,58	0,56	0,62	0,65
3200	0,77	0,78	0,81	0,76	0,78	0,77	0,78	0,72	0,69	0,71	0,69	0,62
3600	0,78	0,75	0,82	0,80	0,78	0,73	0,74	0,81	0,64	0,69	0,75	0,70
4000	0,83	0,89	0,87	0,85	0,89	0,80	0,86	0,88	0,68	0,71	0,67	0,77
4400	0,86	0,82	0,87	0,91	0,81	0,72	0,83	0,76	0,71	0,76	0,80	0,73
	0,83	0,82	0,80	0,78	0,85	0,89	0,82	0,86	0,67	0,74	0,68	0,77

Aço SAE 52100 Esferoidizado (Amostra 52A)

Tabela 9.13. Largura da pista de desgaste na amostra 52A, sem lubrificação.

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	1,66	1,54	1,77	1,61	1,27	1,21	1,41	1,37	1,61	1,65	1,63	1,60
1200	2,02	1,63	1,95	1,91	1,71	1,51	1,49	1,82	2,02	1,86	1,80	1,97
1600	2,04	2,00	1,84	2,04	1,83	1,64	1,73	1,69	2,25	2,13	2,04	2,06
2000	2,24	2,00	2,33	2,03	1,76	1,85	1,67	1,69	2,15	2,31	2,19	2,03
2400	2,23	2,07	2,39	2,10	1,99	1,69	1,78	1,73	2,32	2,29	2,20	2,28
2800	2,29	2,37	2,60	2,42	1,75	1,81	1,70	1,82	2,34	2,35	2,17	2,24
3200	2,48	2,39	2,57	2,31	1,78	1,94	1,92	1,92	2,32	2,27	2,32	2,40
3600	2,65	2,31	2,52	2,79	1,87	1,88	1,84	1,96	2,33	2,41	2,39	2,43
4000	2,58	2,46	2,66	2,45	1,90	1,88	1,95	1,85	2,58	2,42	2,36	2,43
4400	2,56	2,51	2,69	2,42	1,90	1,89	1,98	1,88	2,46	2,44	2,43	2,47
	2,63	2,49	2,69	1,90	1,94	1,91	1,81	1,87	2,50	2,43	2,46	2,41

Tabela 9.14. Largura da pista de desgaste na amostra 52A, lubrificado com B100.

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	0,64	0,60	0,58	0,70	0,44	0,44	0,47	0,45	0,40	0,44	0,42	0,42
1200	0,69	0,72	0,82	0,71	0,69	0,56	0,54	0,70	0,47	0,44	0,47	0,49
1600	0,70	0,65	0,69	0,79	0,75	0,75	0,69	0,64	0,93	0,81	0,78	0,78
2000	0,74	0,75	0,84	0,88	0,73	0,69	0,77	0,71	0,87	0,81	0,82	0,99
2400	0,73	0,80	1,01	0,92	0,69	0,75	0,86	0,86	1,05	0,97	0,99	0,92
2800	0,84	0,81	0,87	1,00	0,86	0,74	0,79	0,91	1,11	1,07	1,08	1,05
3200	1,03	0,94	1,03	0,81	0,83	0,87	0,98	0,95	1,04	1,07	1,12	1,13
3600	1,05	0,98	0,93	0,86	0,95	0,99	1,04	1,02	1,15	1,11	1,18	1,08
4000	1,05	0,95	0,96	0,91	1,01	1,14	1,12	1,01	1,10	1,11	1,10	1,12
4400	1,01	1,11	0,94	0,93	1,05	1,22	0,92	1,08	1,23	1,13	1,17	1,12
	1,02	1,04	0,95	0,99	1,16	1,21	1,18	1,17	1,14	1,07	1,15	1,16

Aço SAE 52100 Temperado e Revenido a 100°C (Amostra 52B)

Tabela 9.15. Largura da pista de desgaste na amostra 52B, sem lubrificação.

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	0,50	0,35	0,32	0,40	0,22	0,34	0,68	0,35	1,54	1,56	0,33	1,41
1200	0,59	0,62	0,73	0,70	0,62	0,58	0,70	0,54	1,60	1,55	0,44	1,64
1600	0,79	0,79	0,68	0,75	0,67	0,65	0,63	0,68	1,70	1,66	0,68	1,58
2000	0,76	0,70	0,78	0,77	0,77	0,74	0,73	0,79	1,72	1,67	0,76	2,40
2400	0,82	0,85	0,78	0,87	0,79	0,82	0,77	0,81	1,69	1,74	0,83	1,78
2800	0,87	0,92	0,96	0,85	0,99	0,92	0,86	0,96	1,87	1,77	0,96	1,76
3200	1,02	1,04	1,08	0,99	1,08	1,04	0,77	1,03	1,78	1,78	1,08	1,80
3600	1,13	0,93	1,06	1,06	1,06	1,10	0,93	1,06	1,87	1,78	1,12	1,77
4000	1,10	1,06	1,08	1,18	1,06	1,10	1,09	1,07	1,14	1,07	1,12	1,16
4400	1,08	1,07	1,02	1,09	1,07	1,12	1,10	1,06	1,00	1,01	1,14	1,07
	1,24	1,14	1,05	1,07	1,08	1,07	1,02	1,09	1,16	1,10	1,03	1,08

Tabela 9.16. Largura da pista de desgaste na amostra 52B, lubrificado com B100.

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	0,30	0,32	0,24	0,30	0,28	0,24	0,23	0,24	0,31	0,24	0,33	0,18
1200	0,42	0,47	0,57	0,41	0,26	0,28	0,31	0,34	0,46	0,45	0,46	0,38
1600	0,54	0,47	0,51	0,42	0,42	0,43	0,58	0,46	0,41	0,48	0,49	0,47
2000	0,52	0,50	0,54	0,48	0,50	0,51	0,54	0,48	0,54	0,49	0,53	0,47
2400	0,55	0,52	0,50	0,50	0,54	0,52	0,47	0,50	0,55	0,52	0,53	0,49
2800	0,58	0,57	0,53	0,55	0,56	0,57	0,47	0,52	0,60	0,56	0,59	0,57
3200	0,56	0,59	0,56	0,54	0,51	0,60	0,50	0,49	0,61	0,58	0,61	0,59
3600	0,56	0,57	0,62	0,62	0,50	0,56	0,60	0,62	0,62	0,58	0,64	0,62
4000	0,63	0,64	0,60	0,61	0,59	0,63	0,61	0,58	0,67	0,64	0,58	0,63
4400	0,66	0,66	0,64	0,65	0,68	0,69	0,67	0,66	0,64	0,63	0,60	0,63
	0,91	0,90	0,88	0,91	0,58	0,64	0,66	0,63	0,55	0,64	0,63	0,61

Aço SAE 52100 Temperado e Revenido a 200°C (Amostra 52C)

Tabela 9.17. Largura da pista de desgaste na amostra 52C, sem lubrificação.

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	0,50	0,52	0,61	0,51	0,58	0,56	0,69	0,60	0,65	0,59	0,77	0,68
1200	0,59	0,62	0,73	0,70	0,51	0,66	0,69	0,75	0,43	0,69	0,65	0,79
1600	0,79	0,79	0,68	0,75	0,80	0,75	0,70	0,85	0,81	0,70	0,72	0,95
2000	0,76	0,70	0,78	0,77	0,79	0,70	0,75	0,86	0,81	0,70	0,72	0,95
2400	0,82	0,85	0,78	0,87	0,86	1,00	0,83	1,00	0,89	1,14	0,88	1,12
2800	0,87	0,92	0,96	0,85	0,97	0,94	1,02	1,04	1,07	0,95	1,07	1,22
3200	1,02	1,04	1,08	0,99	1,19	1,08	1,15	1,13	1,36	1,11	1,21	1,27
3600	1,13	0,93	1,06	1,06	1,18	1,09	1,17	1,16	1,22	1,25	1,27	1,25
4000	1,10	1,06	1,08	1,18	1,19	1,12	1,21	1,21	1,27	1,17	1,34	1,24
4400	1,08	1,07	1,02	1,09	1,18	1,16	1,14	1,20	1,27	1,25	1,26	1,31
	1,24	1,14	1,05	1,07	1,30	1,19	1,15	1,19	1,35	1,24	1,25	1,30

Tabela 9.18. Largura da pista de desgaste na amostra 52C, lubrificado com B100.

	Ensaio 1				Ensaio 2				Ensaio 3			
800	0,26	0,21	0,14	0,12	0,30	0,21	0,28	0,24	0,25	0,23	0,22	0,21
1200	0,30	0,26	0,30	0,27	0,27	0,26	0,33	0,28	0,23	0,25	0,26	0,28
1600	0,45	0,46	0,43	0,44	0,44	0,47	0,42	0,47	0,42	0,47	0,44	0,49
2000	0,52	0,51	0,50	0,49	0,49	0,48	0,53	0,48	0,46	0,45	0,48	0,46
2400	0,66	0,65	0,64	0,62	0,67	0,64	0,64	0,63	0,67	0,63	0,64	0,63
2800	0,69	0,68	0,69	0,68	0,70	0,66	0,66	0,66	0,70	0,64	0,71	0,64
3200	0,72	0,70	0,68	0,69	0,70	0,67	0,69	0,68	0,67	0,72	0,70	0,66
3600	0,73	0,73	0,74	0,71	0,73	0,70	0,74	0,72	0,72	0,76	0,74	0,73
4000	0,74	0,73	0,73	0,71	0,73	0,74	0,70	0,72	0,72	0,74	0,76	0,73
4400	0,74	0,73	0,73	0,72	0,74	0,71	0,75	0,72	0,73	0,75	0,76	0,72
	0,77	0,70	0,71	0,70	0,77	0,71	0,72	0,70	0,77	0,71	0,73	0,70

ANEXO II – VOLUME DESGASTADO MÉDIO

Tabela 10.1 Volume desgastado médio das amostras de aço SAE 1045 obtido com a Equação 3.2.

Distância Percorrida (m)	Amostra 10A				Amostra 10B				Amostra 10C			
	Volume Desgastado Médio (m ³)				Volume Desgastado Médio (m ³)				Volume Desgastado Médio (m ³)			
	Seco (10 ⁻⁸)	B100 (10 ⁻⁸)	B50 (10 ⁻⁸)	B7 (10 ⁻⁸)	Seco (10 ⁻⁸)	B100 (10 ⁻⁸)	B50 (10 ⁻⁸)	B7 (10 ⁻⁸)	Seco (10 ⁻⁸)	B100 (10 ⁻⁸)	B50 (10 ⁻⁸)	B7 (10 ⁻⁸)
800	0,61	0,12	0,13	0,07	0,01	0,01	0,03	0,02	0,20	0,01	0,01	0,01
1200	1,20	0,17	0,20	0,21	0,03	0,03	0,06	0,04	0,53	0,02	0,04	0,03
1600	2,78	0,35	0,52	0,24	0,27	0,07	0,07	0,07	0,69	0,04	0,07	0,04
2000	3,95	0,43	0,74	0,27	0,60	0,08	0,07	0,09	1,05	0,05	0,15	0,08
2400	4,66	0,53	0,85	0,32	0,88	0,09	0,10	0,12	1,23	0,07	0,21	0,10
2800	4,58	0,63	0,88	0,35	1,22	0,12	0,12	0,14	1,33	0,11	0,26	0,16
3200	5,16	0,73	0,91	0,39	1,24	0,12	0,13	0,19	1,59	0,13	0,25	0,21
3600	5,32	0,84	1,24	0,41	1,64	0,13	0,20	0,21	1,79	0,19	0,27	0,22
4000	5,36	0,87	1,30	0,42	1,67	0,16	0,22	0,24	1,85	0,20	0,29	0,28
4400	5,46	0,88	1,52	0,43	1,56	0,18	0,24	0,26	1,93	0,20	0,26	0,27

Tabela 10.2. Volume desgastado das amostras de aço SAE 52100 obtido com a Equação 3.2.

<i>Distância Percorrida (m)</i>	<i>Amostra 52A</i>		<i>Amostra 52B</i>		<i>Amostra 52C</i>	
	<i>Volume Desgastado Médio (m³)</i>		<i>Volume Desgastado Médio (m³)</i>		<i>Volume Desgastado Médio (m³)</i>	
	<i>Seco (10-8)</i>	<i>B100 (10-8)</i>	<i>Seco (10-8)</i>	<i>B100 (10-8)</i>	<i>Seco (10-8)</i>	<i>B100 (10-8)</i>
800	2,33	0,12	0,02	0,01	0,12	0,01
1200	3,47	0,22	0,12	0,04	0,14	0,01
1600	4,07	0,27	0,19	0,06	0,24	0,05
2000	5,22	0,35	0,23	0,07	0,24	0,06
2400	5,58	0,40	0,29	0,07	0,41	0,14
2800	7,48	0,49	0,42	0,09	0,51	0,16
3200	7,65	0,57	0,59	0,09	0,77	0,17
3600	8,95	0,60	0,63	0,11	0,80	0,20
4000	8,64	0,70	0,69	0,12	0,86	0,20
4400	8,12	0,69	0,67	0,12	0,88	0,20