

ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
DOUTORADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

ARLEI FRANZ VENZKE

**DESGASTE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 440BC NA PRESENÇA DE MISTURAS DIESEL-  
BIODIESEL UTILIZANDO DISPOSITIVO PINO-SOBRE-DISCO**

Porto Alegre  
2018

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica  
do Rio Grande do Sul



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

# **DESGASTE DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 440BC NA PRESENÇA DE MISTURAS DIESEL-BIODIESEL UTILIZANDO DISPOSITIVO PINO- SOBRE-DISCO**

**ARLEI FRANZ VENZKE**

ENGENHEIRO ELETRICISTA

MESTRE EM DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS

Tese 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 Doutor em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre  
Outubro, 2018**

## Ficha Catalográfica

V472d Venzke, Arlei Franz

Desgaste do aço inoxidável AISI 440BC na presença de misturas diesel-biodiesel utilizando dispositivo pino-sobre-disco / Arlei Franz Venzke . – 2018.

198 f.

Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos.

1. Aço Inoxidavel AISI 440BC. 2. Desgaste. 3. Biodiesel. 4. Pino-sobre-disco. 5. Tratamentos térmicos e Microestruturas. I. Santos, Carlos Alexandre dos. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecária responsável: Salete Maria Sartori CRB-10/1363



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

**DESGASTE DO AÇO INOXÍDAVEL AISI440BC NA PRESENÇA  
DE MISTURAS DIESEL-BIODIESEL UTILIZANDO  
DISPOSITIVO PINO-SOBRE-DISCO.**

**CANDIDATO: ARLEI FRANZ VENZKE**

Esta Tese de Doutorado foi julgada para obtenção do título de DOUTOR 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**

**BANCA EXAMINADORA**

\_\_\_\_\_  
**DR. ROBERTO MOREIRA SCHROEDER - DO PPGEMMM - UFRGS**

  
\_\_\_\_\_  
**DR. VINICIUS KARLINSKI DE BARCELLOS - DEPARTAMENTO DE METALURGIA -  
UFRGS**

  
\_\_\_\_\_  
**DRA. BERENICE A. DEDAUID - DO PGETEMA/ESCOLA POLITÉCNICA - PUCRS**

**PUCRS**

Campus Central  
Av. Itália, 6681 - Prédio 32 - Sala 505 - CEP: 90619-900  
Telefone: (51) 3353.4069 - Fax: (51) 3320.3625  
E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br  
www.pucrs.br/politecnica

"Um dos mais elevados deveres humanos é o  
dever do encorajamento...  
É fácil rir dos ideais dos homens;  
é fácil despejar água fria no seu entusiasmo;  
é fácil desencorajar os outros.  
O mundo está cheio de desencorajados.  
Temos o dever de encorajar-nos uns aos outros.  
Muitas vezes uma palavra de reconhecimento,  
ou de agradecimento ou de apreço, ou ânimo  
tem mantido um homem em pé."  
**William Barclay**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, ser o socorro sempre presente na hora da angústia, aos meus pais Arno Venzke e Arlinda Franz Venzke que sempre incentivaram o estudo, a minha esposa Rosemeri Schwartz Venzke que me acompanhou na jornada, e aos meus filhos Cristiane, João Luís e Juliano que tiveram que compreender meus momentos pessoais.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter permitido esta caminhada. Ao Professor Dr. Carlos Alexandre dos Santos, por ter confiado em mim, pela compreensão e paciência na orientação. Aos professores do Doutorado pela ajuda no crescimento do conhecimento.

Agradeço aos diversos colegas do programa, tanto de mestrado como doutorado, que sempre me ajudaram nas disciplinas, quer estudando juntos ou realizando algum trabalho.

Agradeço aos laboratoristas, representados pelo Téc. Sérgio Domingos Alegre, pela orientação no uso dos equipamentos dos laboratórios e ao colega Armindo Werlang Filho, pela ajuda em preparar as amostras. E ao Grupo de Estudos de Propriedades de Superfícies e Interfaces (GEPsi) da PUCRS.

Agradeço também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da PUCRS pela oportunidade.

Agradeço ao Instituto Federal Sul-Riograndense por sua ajuda na realização deste sonho.

Agradeço a HEWLETT-PACKARD (HP) pelo apoio a minha pesquisa.

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>VI</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>VII</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XIV</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS.....</b>	<b>XVIII</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XX</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XXI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
2.1. Objetivos Específicos .....	3
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
3.1. Considerações Gerais.....	4
3.2. Combustíveis .....	5
3.2.1. Diesel .....	5
3.2.2. Biodiesel .....	7
3.2.2.1. Principais Vantagens do Uso do Biodiesel .....	14
3.2.2.2. Principais Desvantagens do Uso do Biodiesel .....	19
3.3. Aço Inoxidável Martensítico.....	30
3.3.1. Considerações sobre os Aços Inoxidáveis Martensíticos.....	31
3.3.2. Observações.....	32
3.3.3. Composições e Aplicações Típicas do Aços.....	32
3.4. Lubrificação e Desgaste .....	33
3.4.1. Etapas de Desgaste .....	39
3.4.2. O Desgaste.....	41
3.4.3. Mecanismos de Simulação do Desgaste .....	47
3.4.4. Tribômetro Pino-sobre-Disco .....	54
3.4.5. Quantificação do Desgaste .....	57
3.4.6. Análises dos Mecanismos de Desgaste .....	58
3.4.7. Estudo de Casos .....	61

3.4.8 Estudo de Casos com Aço AISI 440B e AISI 440C.....	65
3.5. Desgaste do Par Tribológico Anel – Cilindro.....	68
<b>4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>72</b>
<b>4.1. Materiais e Equipamentos .....</b>	<b>74</b>
4.1.1. Aço Inoxidável Martensítico AISI 440BC.....	74
4.1.2. Combustíveis .....	74
<b>4.2. Métodos.....</b>	<b>76</b>
4.2.1. Confeção das Amostras .....	76
4.2.2. Tratamentos Térmicos .....	77
4.2.3. Ensaio de Desgaste .....	78
4.2.4. Análises de Dureza .....	80
4.2.5. Análises por Microscopia Óptica.....	81
4.2.6. Análises por Microscopia Eletrônica e Difração de Raios-X .....	81
4.2.7. Identificação das Amostras.....	81
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>83</b>
<b>5.1. Análises Microestruturais.....</b>	<b>83</b>
<b>5.2. Análises da Dureza .....</b>	<b>88</b>
<b>5.3. Análises Tribológicas .....</b>	<b>89</b>
5.3.1. Ensaio Sem Lubrificação - Seco .....	90
5.3.2. Ensaio Com Lubrificação - Diesel S10 (B7) .....	93
5.3.3. Ensaio Com Lubrificação - Biodiesel (B20) (S10B7+13%B100) .....	96
5.3.4. Ensaio Com Lubrificação - Biodiesel (B30) .....	100
5.3.5. Ensaio Com Lubrificação - Biodiesel (B50) .....	103
5.3.6. Ensaio Com Lubrificação - Biodiesel Puro (B100) .....	106
5.3.7. Comparação das Larguras das Pistas de Desgaste .....	109
5.3.8. Análise do Coeficiente de Desgaste (k) e Dureza.....	113
<b>5.4. Análises das Superfícies de Desgaste .....</b>	<b>120</b>
5.4.1. Microscopia do Aço AISI 440BC- Recozido.....	121
5.4.2. Microscopia do Aço AISI 440BC- Temperado e Revenido a 100°C...	128
5.4.3. Microscopia do Aço AISI 440BC- Temperado e Revenido a 300°C...	135
<b>5.5. Correlações entre as Características de Desgaste e as Condições dos Materiais e Lubrificação .....</b>	<b>142</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>146</b>

<b>7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>148</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>149</b>
<b>ANEXO A – LARGURA DA PISTA DE DESGASTE E MÉDIAS .....</b>	<b>161</b>
<b>ANEXO B – MEDIDAS DE DUREZA E MÉDIAS.....</b>	<b>174</b>
<b>ANEXO C – VOLUME DESGASTADO MÉDIO.....</b>	<b>175</b>
<b>ANEXO D – Características dos Combustíveis.....</b>	<b>177</b>
<b>ANEXO D – ARTIGO PUBLICADO .....</b>	<b>179</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Fluxograma esquemático do processo de transesterificação para produção do biodiesel (SILVA, 2013).....	9
Figura 3.2. Comparativo de emissões de gases de exaustão do diesel fóssil (gasóleo) e da mistura diesel – 20% biodiesel (B 20) (DUQUE, 2012). .	16
Figura 3.3 Comparativo de consumo específico de combustível utilizando diversas misturas de biodiesel (SILVA, 2013). .....	27
Figura 3.4. Imagem mostrando escoriações “scuffing” nos anéis (MAHLE, 2012)....	38
Figura 3.5. Mecanismo de desgaste.....	42
Figura 3.6. Representação esquemática de teste de desgaste do pino-sobre-disco (ASTM G99-04, 2004). .....	54
Figura 3.7. Esquema de funcionamento do conjunto pistão-segmentos da camisa do cilindro, Vatavuk in PÉREZ Y MORENO (2013).....	61
Figura 4.1. Fluxograma esquemático das principais etapas da metodologia experimental (Autor).....	73
Figura 4.2. Representação do disco para ensaio de desgaste e suas dimensões, com espessura: 10mm (Autor). .....	77
Figura 4.3. Tribômetro pino-sobre-disco usado no ensaio (Autor). .....	78
Figura 5.1. Micrografias do aço inoxidável AISI 440BC, na condição recozida. Microscopia óptica: a) 1000x; b) 4000x, Microscopia eletrônica: c) 1000x; d) 4000x. Ataque químico Marble.....	84
Figura 5.2. Micrografia do aço inoxidável AISI 440BC, na condição temperada e revenida a 100°C. Microscopia óptica: a) 1000x; b) 4000x, Microscopia eletrônica: c) 1000x; d) 4000x. Ataque químico Marble. ....	85
Figura 5.3. Micrografia do aço inoxidável AISI 440BC, na condição temperada e revenida a 300°C. Microscopia óptica: a) 1000x; b) 4000x, Microscopia eletrônica: c) 1000x; d) 4000x. Ataque químico Marble. ....	86
Figura 5.4. Imagens de MEV-FEG e resultados de EDS do aço inoxidável AISI 440BC, nas condições recozida e temperada e revenido à 300°C. ....	87

Figura 5.5. Difratoograma de raios-X para o aço inoxidável AISI 440BC nas condições recozido e temperado e revenido.....	88
Figura 5.6. Largura da pista de desgaste nos discos sem lubrificação (à seco). .....	91
Figura 5.7. Comportamento da taxa de volume desgastado para a condição sem lubrificação.....	93
Figura 5.8. Largura da pista de desgaste nos discos com lubrificação diesel comercial (B7). .....	95
Figura 5.9. Comportamento da taxa de volume desgastado para a condição lubrificado com B7.....	96
Figura 5.10. Largura da pista de desgaste nos discos com lubrificação biodiesel (B20). .....	98
Figura 5.11. Comportamento da taxa de volume desgastado para a condição lubrificado com B20.....	99
Figura 5.12. Largura da pista de desgaste nos discos com lubrificação biodiesel (B30). .....	101
Figura 5.13. Comportamento da taxa de volume desgastado para a condição lubrificado com B30.....	102
Figura 5.14. Largura da pista de desgaste nos discos com lubrificação biodiesel (B50). .....	104
Figura 5.15. Comportamento da taxa de volume desgastado para a condição lubrificado com B50.....	105
Figura 5.16. Largura da pista de desgaste nos discos com lubrificação biodiesel puro (B100). .....	107
Figura 5.17. Comportamento da taxa de volume desgastado para a condição lubrificado com B100.....	109
Figura 5.18. Comparação da largura da pista de desgaste no início e fim dos ensaios.....	112
Figura 5.19. Representação do coeficiente de desgaste . .....	116
Figura 5.20. Comparação entre dureza da peça e da pista de desgaste. ....	118
Figura 5.21. Dureza média da pista por condição de lubrificação empregada.....	119

Figura 5.22. Comparação percentual do aumento de dureza entre o fundo da pista e a dureza do disco.....	119
Figura 5.23. Comparação entre os coeficientes de desgastes (k).....	120
Figura 5.24. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 19 – recozida – sem lubrificação; b) Amostra 16 – recozida – B7.....	123
Figura 5.25. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 20 – recozida – B20; b) Amostra 15 – recozida – B30.....	125
Figura 5.26. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 18 – recozida – B50; b) Amostra 17 – recozida – B100.....	127
Figura 5.27. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 14 – 100°C – sem lubrificação; b) Amostra 9 – 100°C – B7.....	130
Figura 5.28. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 12 – 100°C – B20; b) Amostra 8 – 100°C – B30.....	132
Figura 5.29. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 13 – 100°C – B50; b) Amostra 11 – 100°C – B100.....	134
Figura 5.30. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 3 – 300°C – sem lubrificação; b) Amostra 4 – 300°C – B7.....	137
Figura 5.31. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 6 – 300°C – B20; b) Amostra1 – 300°C – B30.....	139
Figura 5.32. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 2 – 300°C – B50; b) Amostra 7 – 300°C – B100.....	141
Figura 5.33. Correlações entre os coeficientes de desgaste e condições de lubrificação para o aço AISI 440BC recozido e tratado termicamente, e comparações com os aços SAE 1045 e SAE 52100.....	143

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Vantagens e desvantagens do uso do biodiesel em relação ao diesel. .	13
Tabela 3.2. Composições químicas dos aços martensíticos.....	33
Tabela 4.1. Composição química do aço inoxidável AISI 440BC (% em massa).....	74
Tabela 4.2. Características dos combustíveis diesel S-10 (B7) e biodiesel B100.....	75
Tabela 4.3. Identificação dos discos ensaiados. ....	82
Tabela 5.1. Dureza média obtida nos discos.....	89
Tabela 5.2. Largura da pista de desgaste na condição sem lubrificação (à seco). ...	90
Tabela 5.3. Taxa de desgaste usando o volume desgastado, discos sem lubrificação.	92
Tabela 5.4. Largura da pista de desgaste com lubrificação de diesel comercial (B7).	94
Tabela 5.5. Taxa de desgaste usando o volume desgastado, discos lubrificados com diesel S10 (B7).....	95
Tabela 5.6. Largura da pista de desgaste com lubrificação de biodiesel (B20). ....	97
Tabela 5.7. Taxa de desgaste usando o volume desgastado, discos lubrificados com B20.....	99
Tabela 5.8. Largura da pista de desgaste com lubrificação de biodiesel (B30). ....	100
Tabela 5.9. Taxa de desgaste usando o volume desgastado, discos lubrificados com B30.....	102
Tabela 5.10. Largura da pista de desgaste com lubrificação de biodiesel (B50). ...	103
Tabela 5.11. Taxa de desgaste usando o volume desgastado, discos lubrificados com B50. ....	105
Tabela 5.12. Largura da pista de desgaste com lubrificação de biodiesel puro (B100).	107
Tabela 5.13. Taxa de desgaste usando o volume desgastado, discos lubrificados com B100. ....	108

Tabela 5.14. Variação percentual relativa de desgaste.....	110
Tabela 5.15. Coeficiente de desgaste (k) e microdureza (HV) nos discos. ....	114
Tabela 5.17. Valores médios dos coeficientes de desgaste.....	145
Tabela A.1. Largura da pista de desgaste no disco 19, lado A, sem lubrificação....	161
Tabela A.2. Largura da pista de desgaste no disco 19, lado B, sem lubrificação e média. ....	161
Tabela A.3. Largura da pista de desgaste no disco 14, lado A, sem lubrificação....	162
Tabela A.4. Largura da pista de desgaste no disco 14, lado B, sem lubrificação e média. ....	162
Tabela A.5. Largura da pista de desgaste no disco 3, lado A, sem lubrificação. ....	162
Tabela A.6. Largura da pista de desgaste no disco 3, lado B, sem lubrificação e média. ....	163
Tabela A.7. Largura da pista de desgaste no disco 16, lado A, lubrificação com Diesel S10.....	163
Tabela A.8. Largura da pista de desgaste no disco 16, lado B, lubrificação com Diesel S10 e média. ....	163
Tabela A.9. Largura da pista de desgaste no disco 9, lado A, lubrificação com Diesel S10.....	164
Tabela A.10. Largura da pista de desgaste no disco 9, lado B, lubrificação com Diesel S10 e média. ....	164
Tabela A.11. Largura da pista de desgaste no disco 4, lado A, lubrificação com Diesel S10.....	164
Tabela A.12. Largura da pista de desgaste no disco 4, lado B, lubrificação com Diesel S10 e média. ....	165
Tabela A.13. Largura da pista de desgaste no disco 20, lado A, lubrificação com B20.....	165
Tabela A.14. Largura da pista de desgaste no disco 20, lado B, lubrificação com B20 e média. ....	165

Tabela A.15. Largura da pista de desgaste no disco 12, lado A, lubrificação com B20.....	166
Tabela A.16. Largura da pista de desgaste no disco 12, lado B, lubrificação com B20 e média. ....	166
Tabela A.17. Largura da pista de desgaste no disco 6, lado A, lubrificação com B20.	166
Tabela A.18. Largura da pista de desgaste no disco 6, lado B, lubrificação com B20 e média. ....	167
Tabela A.19. Largura da pista de desgaste no disco 15, lado A, lubrificação com B30.....	167
Tabela A.20. Largura da pista de desgaste no disco 15, lado B, lubrificação com B30 e média. ....	167
Tabela A.21. Largura da pista de desgaste no disco 8, lado A, lubrificação com B30.	168
Tabela A.22. Largura da pista de desgaste no disco 8, lado B, lubrificação com B30 e média. ....	168
Tabela A.23. Largura da pista de desgaste no disco 1, lado A, lubrificação com B30.	168
Tabela A.24. Largura da pista de desgaste no disco 1, lado B, lubrificação com B30 e média. ....	169
Tabela A.25. Largura da pista de desgaste no disco 18, lado A, lubrificação com B50.....	169
Tabela A.26. Largura da pista de desgaste no disco 18, lado B, lubrificação com B50 e média. ....	169
Tabela A.27. Largura da pista de desgaste no disco 13, lado A, lubrificação com B50.....	170
Tabela A.28. Largura da pista de desgaste no disco 13, lado B, lubrificação com B50 e média. ....	170
Tabela A.29. Largura da pista de desgaste no disco 2, lado A, lubrificação com B50.	170
Tabela A.30. Largura da pista de desgaste no disco 2, lado B, lubrificação com B50 e média. ....	171
Tabela A.31. Largura da pista de desgaste no disco 17, lado A, lubrificação com B100.....	171

Tabela A.32. Largura da pista de desgaste no disco 17, lado B, lubrificação com B100 e média. ....	171
Tabela A.33. Largura da pista de desgaste no disco 11, lado A, lubrificação com B100. ....	172
Tabela A.34. Largura da pista de desgaste no disco 11, lado B, lubrificação com B100 e média. ....	172
Tabela A.35. Largura da pista de desgaste no disco 7, lado A, lubrificação com B100. ....	172
Tabela A.36. Largura da pista de desgaste no disco 7, lado B, lubrificação com B100 e média. ....	173
Tabela B.1. Medida da dureza e médias. ....	174
Tabela C.1. Volume desgastado médio nos discos de aço AISI 440BC. ....	175
Tabela C.2. Volume desgastado médio nos discos de aço AISI 440BC. ....	176
Tabela D.1. Caracterização do combustível diesel S10-B7. ....	177
Tabela D.2. Caracterização do combustível biodiesel B100. ....	178

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	
ABRACO	Associação Brasileira de Corrosão	
AFM	Microscopia de Força Atômica	
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>	
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis	
APROBIO	Associação Nacional de Produtores de Biodiesel do Brasil	
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>	
CEN	<i>Comité Européen de Normalisation</i>	
CFPP	Ponto de Entupimento de Filtro a Frio	
CH <sub>4</sub>	Metano	
CIB	Biodiesel de calophyllum inophyllum	
DOU	Diário Oficial da União	
EDS	Energia Dispersiva de Espectroscopia de Raios-X	
EGR	Recirculação dos Gases de Escape	
FIPE	Fundação Instituto Pesquisas Econômicas	
FTB	Parâmetro de Temperatura Flash	
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier	
GCMS	Espectroscopia de Massa por Cromatografia Gasosa	
HB	Dureza Brinell	[HB]
HC	Hidrocarbonetos	
HFC	Fluoro Carbonetos	
HFRR	<i>High Frequency Reciprocating Test Rig</i> (Equipamento Alternativo de Alta Frequência)	
HPA	Hidrocarboneto Poli aromático	
HRB	Dureza Rockwell B	[HRB]
HRC	Dureza Rockwell C	[HRC]
HV	Dureza Vickers	[HV]
IPEA	Instituto Pesquisa Econômica Aplicada	
ISO	<i>International Organization For Standardization</i>	
k	Coeficiente de desgaste	[ ]
L	Distância Percorrida	[m]

MDA	Ministério do Desenvolvimento Agrário	
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura	
MO	Microscópio Óptico	
MOA	Analisador de Óleo de Multi-elementos	
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação	
NC	Número de Cetanos	
OBG	Óleo Bruto de Girassol	
OGR	Óleo de Gordura Residual	
P	Carga Aplicada no Pino Durante o Ensaio	[N]
PB	Biodiesel de Palma	
PM	Particulados Metálicos	
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel	
R	Raio da Pista de Desgaste	[m]
r	Raio do Pino	[m]
RBTB	Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel	
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>	
TAN	Medição de Acidez Total	
V	Perda de Volume	[mm <sup>3</sup> ]
w	Largura da Pista de Desgaste	[mm]
WSD	<i>Wear Scar Diameter</i> (Diâmetro da Pista de Desgaste)	

## RESUMO

VENZKE, Arlei Franz. **Desgaste do Aço Inoxidável AISI 440BC na Presença de Misturas de Diesel-Biodiesel Utilizando Dispositivo Pino-Sobre-Disco**. Porto Alegre, RS. 2018. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Com o desenvolvimento do Programa Nacional para a Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), muitos grupos de pesquisa têm estudado a eficácia deste combustível, abordando aspectos econômicos, tecnológicos, ambientais e sociais. A carência de informações na literatura sobre o comportamento do aço inoxidável AISI 440BC na presença do biodiesel e suas misturas é o principal motivador da presente pesquisa. Assim, o objetivo foi analisar o desgaste do aço inoxidável AISI440BC nas condições recozido, temperado e revenido a 100°C e 300°C, sem lubrificação (seco) e com lubrificação de diesel comercial (B7 – diesel com 7% de biodiesel), biodiesel (B20), biodiesel (B30), biodiesel (B50) e biodiesel puro (B100). Os ensaios foram realizados em um tribômetro do tipo pino-sobre-disco, com rotação de 300 rpm, 15 N (1,5 kg) de carga e 4400m de distância percorrida, seguindo as recomendações da norma ASTM G99-04. As amostras foram caracterizadas por análises metalográficas em microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e difração de raios X (DRX), e ensaios mecânicos de dureza, microdureza e desgaste, antes e após os tratamentos térmicos. O material recozido e sem lubrificação apresentou o maior coeficiente de desgaste ( $k = 0,6667 \cdot 10^{-2}$ ) e a amostra recozida e lubrificada com B50 apresentou o menor coeficiente de desgaste ( $k = 0,0370 \cdot 10^{-2}$ ). As amostras temperadas e revenidas a 100°C apresentaram os seguintes valores: B20 ( $k = 0,0665 \cdot 10^{-2}$ ), B30 ( $k = 0,0624 \cdot 10^{-2}$ ), B50 ( $k = 0,0579 \cdot 10^{-2}$ ) e B100 ( $k = 0,1462 \cdot 10^{-2}$ ), enquanto as amostras temperadas e revenidas a 300°C apresentaram: B20 ( $k = 0,1077 \cdot 10^{-2}$ ), B30 ( $k = 0,0458 \cdot 10^{-2}$ ), B50 ( $k = 0,0576 \cdot 10^{-2}$ ), e B100 ( $k = 0,0678 \cdot 10^{-2}$ ). Os resultados indicaram uma tendência de diminuição de desgaste com o uso do biodiesel B100, e desgastes muito parecidos entre os biodieseis B7, B20, B30 e B50.

**Palavras-Chaves:** Aço Inoxidável AISI 440BC, Desgaste, Biodiesel, Pino-Sobre-Disco, Tratamentos Térmicos, Microestruturas.

## ABSTRACT

VENZKE, Arlei Franz. **AISI 440BC Stainless Steel Sliding Wear in the Presence of Diesel-Biodiesel Blends Using Pin-on-Disc Device**. Porto Alegre, RS, 2018. PhD Thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

With the development of the Brazilian Program of Biodiesel Production and Use (PNPB), many research groups have been studied the effectiveness of this fuel focuses on economical, technological, environmental and social aspects. The lack of information in the literature about the behavior of the AISI 440BC stainless steel in the presence of biodiesel and its blends is the main motivation of the present research. The aim of this work was to analyze the effect of biodiesel and diesel-biodiesel blends on the sliding wear behavior of the AISI 440BC martensitic stainless steel without lubrication (dry) and lubricated with the commercial diesel (B7 – diesel with 7% biodiesel), biodiesel (B20), biodiesel (B30), biodiesel (B50), and pure biodiesel (B100), in the following conditions: annealed, quenched and tempered at 100°C and at 300°C. The tests were performed on a pin-on-disc device, at a 1.8 m/s sliding speed, 14.7 N load, and 4400-m sliding distance, following the ASTM G99-04 Standard. The samples were characterized by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), dispersive energy spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD), and by mechanical tests to determining the hardness, microhardness and wear, before and after heat treatments. The annealed material without lubrication presented the highest wear coefficient ( $k = 0.6667 \times 10^{-2}$ ), while when lubricated with B50 presented the lower wear coefficient ( $k = 0.0370 \times 10^{-2}$ ). The tempered and quenched at 100°C material showed the following values: B20 ( $k = 0.0665 \times 10^{-2}$ ), B30 ( $k = 0.0624 \times 10^{-2}$ ), B50 ( $k = 0.0579 \times 10^{-2}$ ), and B100 ( $k = 0.1462 \times 10^{-2}$ ). The tempered and quenched at 300°C material presented: B20 ( $k = 0.1077 \times 10^{-2}$ ), B30 ( $k = 0.0458 \times 10^{-2}$ ), B50 ( $k = 0.0576 \times 10^{-2}$ ), and B100 ( $k = 0.0678 \times 10^{-2}$ ). The results indicated a tendency to decrease wear with the use of biodiesel B100, and wear behaviors very similar among B7, B20, B30 and B50.

**Keywords:** AISI 440BC Stainless Steel, Wear, Biodiesel, Pin-on-Disc, Heat Treatments, Microstructures.

## 1. INTRODUÇÃO

As questões ligadas ao meio ambiente, e a necessidade de limitações das emissões de gases de efeito estufa (GEE), vem movimentando a comunidade científica e os grandes fabricantes automotivos para a possibilidade de um modo de combustão interna que possa reduzir simultaneamente as emissões de escapamento. E, substancialmente melhorar a eficiência térmica, tem atraído cada vez mais a atenção global, e novas exigências surgem em relação aos motores e também ao uso dos combustíveis. Tais fatos fizeram surgir o uso de combustíveis de fontes renováveis para os motores. O Brasil, que já detém uma vasta experiência na produção de etanol para os veículos de ciclo Otto, agora conta com o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) para os motores ciclo Diesel (CRUZ et al., 2009).

O biodiesel, caracteriza-se por ser um produto renovável, produzido a partir de óleo vegetal ou gordura animal (ambos novos ou residuais) e álcool (FAZAL et al., 2011). Para produção é necessário organizar a cadeia produtiva, de modo a contemplar as dimensões econômicas, tecnológicas, ambientais, sociais e estabelecendo percentuais mínimos de mistura do biodiesel ao diesel (MDA, 2015).

O biodiesel tem-se adaptado de uma forma satisfatória aos motores convencionais, por isso despertou grande interesse econômico, a meta é aumentar a produtividade e reduzir os custos de produção. A preocupação da qualidade e a preservação do ambiente levaram a necessidade do desenvolvimento de novos motores, para a linha agrícola, veicular e transporte de carga.

As condições para que um combustível automotivo seja aceito como tal, deve ser energeticamente eficiente, garantir a durabilidade do motor e ser oferecido em quantidade maior ou igual a demanda. Para viabilizar a utilização do biodiesel para

àrea automotiva o governo brasileiro incentiva o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), lançado em 2004.

Este trabalho tem por objetivo contribuir para o entendimento do comportamento do desgaste e das causas da quebra de anéis, em pistões de veículos, problema citado em alguns dos estudos referenciais, utilizando métodos convencionais.

Para tal, o presente trabalho está dividido da seguinte forma: No Capítulo 1 é apresentado uma breve introdução ao tema e os objetivos são descritos no Capítulo 2. No Capítulo 3 é abordada a revisão bibliográfica, onde serão apresentados vários tópicos sobre o motor diesel para que se tenha uma visão geral de um todo. A pesquisa terá enfoque nos anéis mergulhados no biodiesel. No Capítulo 4 são descritos os equipamentos e a metodologia utilizada nos experimentos. No Capítulo 5 apresentam-se os resultados encontrados com suas respectivas análises, avaliações e correlações. No Capítulo 6 apresentam-se as conclusões identificadas a partir dos resultados obtidos, e no Capítulo 7 sugerem-se algumas propostas de trabalhos futuros pertinentes ao tema apresentado.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo geral do presente trabalho é analisar o desgaste do aço inoxidável AISI 440BC, nas condições recozido, temperado e revenido, por meio de ensaios em um tribômetro pino-sobre-disco, com a presença de diferentes misturas de diesel-biodiesel e sem lubrificação, e correlacionar as condições microestruturais, propriedades mecânicas e respostas ao desgaste.

### **2.1. Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos, foram:

- Utilizar o tribômetro pino-sobre-disco desenvolvido no laboratório em trabalhos anteriores para os ensaios tribológicos de resistência ao desgaste;
- Obter amostras do aço inoxidável AISI 440BC com diferentes microestruturas e durezas por meio de tratamentos térmicos de recozimento, têmpera e revenidos, sendo este último em temperaturas de 100°C e 300°C;
- Avaliar o desgaste do material na presença dos combustíveis B7, B20, B30, B50 e B100, utilizando o dispositivo pino-sobre-disco, caracterizando aspectos como pista de desgaste, volume desgastado e aspectos da superfície de desgaste;
- Estabelecer correlações existentes entre as misturas diesel-biodiesel e as características de desgaste para cada condição do material analisado.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1. Considerações Gerais**

O motor diesel ou motor de ignição por compressão é um motor de combustão interna inventado pelo engenheiro Rudolf Diesel (1858-1913), em que a combustão do combustível se faz pelo aumento da temperatura provocado pela compressão de ar. A patente foi concedida ao engenheiro em 23 de fevereiro de 1893 (TORRES, 2006; SOUZA, 2010). Em 1898, Diesel mostrou seu motor na *Feira de Exibição*, em Paris, na França, sendo que atualmente o motor diesel destaca-se pela economia de combustível e eficiência, porém é muito poluente quando utiliza combustível fóssil (óleo diesel).

Cabe mencionar que naquela ocasião foi utilizado um tipo de biocombustível resultante do processo de transesterificação do óleo de amendoim, o qual representava a visão do inventor a respeito dos combustíveis (SOUZA, 2010). Diesel acreditava que a utilização de um combustível de biomassa era o real futuro da máquina, porém, faltava-lhe tecnologia para tanto (YOKAYO, 2014).

Naquele tempo, em períodos de clima frio, o ar, ao ser comprimido, podia não atingir a temperatura suficiente para a primeira ignição, mas esse é um obstáculo que tem desaparecido, em virtude das injeções eletrônicas diretas e da maior rotação do motor de partida. Nos modelos antigos e nos lugares muito frios, para minimizar esse efeito, costumava-se aquecer o tubo de admissão o que ainda é um artifício para a partida em alguns motores estacionários.

Para um bom funcionamento do motor, o sistema de alimentação de combustível, que tem evoluído muito nos últimos anos, é um dos mais importantes componentes. Além disso, o sistema de combustível influencia diretamente os

principais parâmetros de avaliação de um determinado motor, como consumo de combustível, emissões do sistema de exaustão, bem como torque e potência. Os motores a ciclo diesel apresentam dois tipos de sistemas de alimentação: o mecânico e o de injeção eletrônica (SOUZA, 2010).

### **3.2. Combustíveis**

Segundo Conde (2007), para um combustível ter aceitação no ramo industrial ou de transporte, deve ser possuidor dos seguintes requisitos:

1. Oferta em abundância a preço competitivo;
2. Fácil combustão sem deixar excesso de cinzas;
3. Os produtos da combustão não podem ser nocivos às pessoas e as máquinas, e
4. Deve ter elevado poder calorífico.

#### **3.2.1. Diesel**

O óleo diesel é um combustível derivado do petróleo, obtido pelos processos de destilação atmosférica fracionada em temperaturas na faixa de 150°C a 400°C, ou craqueamento catalítico fluido, sendo constituído basicamente por grandes e complexas cadeias de hidrocarbonetos. É um composto formado principalmente por átomos de carbono e hidrogênio com baixas concentrações de enxofre, nitrogênio e oxigênio. Segundo Oliveira (2008), a cadeia de hidrocarboneto que forma o óleo diesel varia, podendo chegar a vinte e oito átomos de carbono. É um produto inflamável, medianamente tóxico, volátil, límpido, isento de material em suspensão e com odor forte e característico.

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

Devido ao baixo custo e à alta disponibilidade, o petróleo, óleo do qual provém o diesel, consagrou-se como a principal fonte energética mundial (OLIVEIRA, 2008; MEHER et al., 2006). No entanto, com o passar do tempo, tornou-se esgotável, além de emitir grande quantidade de gases poluentes e do fato de que

suas maiores jazidas se localizam em regiões politicamente conturbadas, o que provoca constantes variações de preço (OLIVEIRA, 2008). Todos esses motivos levaram a buscas por alternativas.

Durante a Segunda Guerra Mundial, o desabastecimento de petróleo no mercado mundial fez com que pesquisadores de diversos países procurassem por outras opções, surgindo, na Bélgica, a ideia de transesterificar óleos vegetais com etanol para produzir um biocombustível, conhecido hoje como *biodiesel* (Suarez e Meneghetti, 2007 in OLIVEIRA, 2008). Outros países, como a França e os Estados Unidos, também desenvolveram pesquisas com esse propósito. Outro processo estudado foi o craqueamento dos óleos e das gorduras para a produção de um biocombustível chamado de bio-óleo. O craqueamento chegou a ser usado em larga escala na China, sendo a principal fonte substitutiva para o petróleo (Chang e Wan, 1947 in OLIVEIRA, 2008). Com o final da Segunda Guerra Mundial e a normalização do mercado mundial de petróleo, o biodiesel e o bio-óleo foram temporariamente abandonados (OLIVEIRA, 2008). Existe ainda outro processo chamado esterificação para produção de biodiesel.

No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo e Biocombustíveis (ANP), através da Resolução de nº 65 de 09/12/2011, apresenta a seguinte nomenclatura para o óleo diesel rodoviário:

"Art. 3º Fica estabelecido, para feitos desta Resolução, que os óleos diesel A e B deverão apresentar as seguintes nomenclaturas, conforme o teor máximo de enxofre:

a) Óleo diesel A S10 e B S10: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 10 mg/kg.

b) Óleo diesel A S50 e B S50: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 50 mg/kg.

c) Óleo diesel A S500 e B S500: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 500 mg/kg.

d) Óleo diesel A S1800 e B S1800: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 1800 mg/kg."

O óleo diesel rodoviário é classificado como do tipo A (sem adição de biodiesel), portanto puro ou do tipo B (com adição de biodiesel) único permitido hoje no Brasil, com adição de 10% de biodiesel (ANP, 2011).

O chamado óleo diesel de referência é produzido especialmente para as companhias montadoras de veículos a diesel, que o utilizam como padrão para a homologação, ensaios de consumo, desempenho e teste de emissão (BR, 2014).

Os veículos automotores são responsáveis pelas emissões de gases como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido de nitrogênio (NO), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), hidrocarbonetos (HC), chumbo, fumaça e particulados, que são considerados prejudiciais à saúde humana e ao ambiente (CHRISTOFF, 2007). O óleo diesel apresenta a maior emissão de gases tóxicos.

### **3.2.2. Biodiesel**

O óleo de origem vegetal como combustível vem sendo cogitado desde o surgimento do próprio motor diesel, inclusive pelo seu inventor; cujo nome foi dado ao diesel do petróleo somente após sua morte (Pinto, 2005 in LIMA et al., 2012). O biodiesel pode ser produzido por meio de craqueamento, esterificação ou transesterificação de óleos vegetais, gorduras animais e gorduras residuais (FAZAL et al., 2011; MEHER et al., 2006).

Os primeiros processos de transesterificação de óleos vegetais datam de um período anterior ao desenvolvimento do motor a ciclo diesel. No ano de 1853, os cientistas E. Duffy e J. Patrick foram pioneiros na condução de tais experimentos. A primeira experiência utilizando craqueamento ou degradação data de 1920, realizada por Kobayaschi e Mailhe (in TORRES et al., 2006). No Brasil, com o advento do motor diesel, surgiram as primeiras pesquisas com biodiesel pelo Instituto Nacional de Tecnologia, na década de 1920 (CRUZ et al., 2009).

No período que antecedeu a Segunda Guerra Mundial, tal combustível foi bastante utilizado para a alimentação de veículos pesados na África do Sul. O

processo de transesterificação de óleos vegetais para obtenção de um combustível similar ao diesel chamou muito a atenção de pesquisadores norte-americanos na década de 1940 (CRUZ et al, 2009).

A partir da década de 1970, com sucessivas crises no mercado internacional do petróleo, o uso de óleos vegetais começou a despertar grande interesse como substituto dos combustíveis fósseis (MAZIERO et al., 2007). O biodiesel retornou à cena como principal alternativa ao diesel. Hoje, em países como Brasil, França, Alemanha, Argentina, Itália, Malásia, Índia, Áustria e Estados Unidos, a produção e o uso comercial do biodiesel é uma realidade (OLIVEIRA, 2008; SILVA, 2013; MEHER et al., 2006 e ATABANI et al., 2012). A Áustria foi o primeiro país a normalizar as propriedades do biodiesel (MEHER et al., 2006).

O biodiesel é uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos com monoalcoóis de cadeia curta, como o metanol ou o etanol (Suarez et al., 2007 in OLIVEIRA, 2008), que em presença de catalisadores usualmente básicos (MATTOS, 2012; MIRAGAYA, 2005; MEHER et al., 2006; RENEWABLES, 2014) e à temperatura adequada, produz ésteres de ácidos graxos que se compõem devido à substituição da glicerina pelo álcool. Neste processo, tem-se como subproduto a glicerina (TORRES et al., 2006). Esta mistura, obtida pelos processos de transesterificação (Figura 3.1) ou esterificação, resulta de uma reação entre ácidos graxos e um álcool, formando biodiesel e água (SILVA, 2013).

Diferentes tipos de catalisador (de natureza básica, ácida ou enzimática) e de álcool (somente álcoois simples, tais como metanol, etanol – que são os mais usados –, propanol, butanol e amil-álcool) podem ser usados na transesterificação. As condições reacionais (agitação da mistura, temperatura e tempo da reação) e a concentração de impurezas (água) numa reação de transesterificação determinam a cinética e a qualidade do produto final (CHRISTOFF, 2006; MEHER et al., 2006 e ATABANI et al., 2012). Na reação com etanol, o biodiesel se torna menos poluente, ainda é renovável e muito menos tóxico que o metanol, no entanto, para obtenção de biodiesel a partir de óleos residuais, o metanol apresenta um melhor rendimento (CHRISTOFF, 2006).

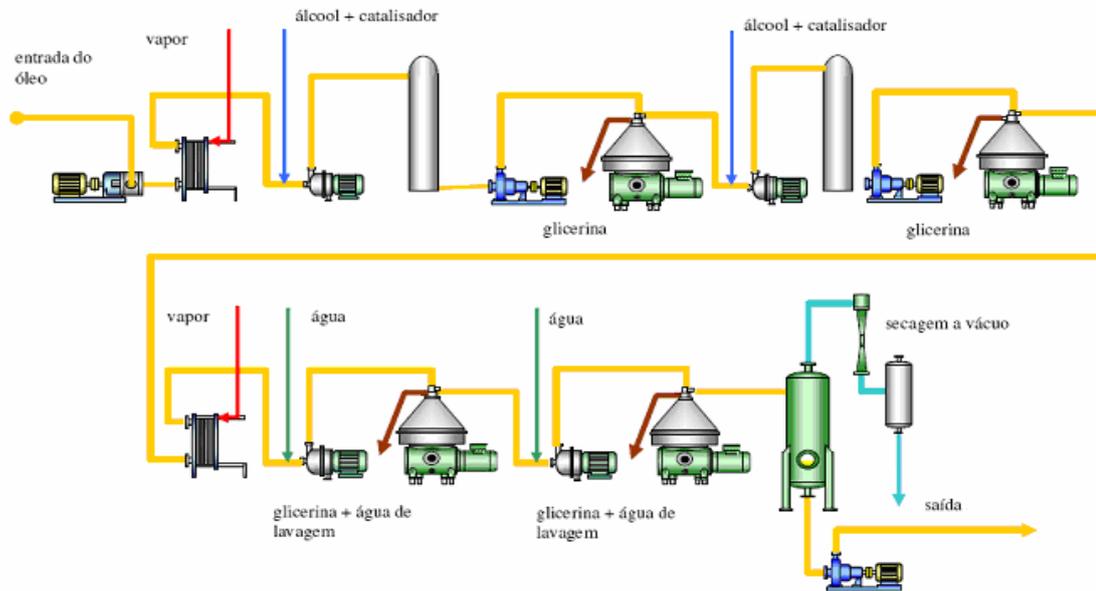


Figura 3.1. Fluxograma esquemático do processo de transesterificação para produção do biodiesel (SILVA, 2013).

De acordo com a ASTM D6751 (ASTM D6751, 2015), o biodiesel padrão deve ter um mínimo de 96,4% de ésteres e o resto pode ser água, sedimentos, glicerol, metanol, monoglicérido, diglicérido, triglicérides, metais alcalinos (Na<sub>2</sub>K), metais alcalino-terrosos (Ca<sub>2</sub>Mg) etc., componentes que podem influenciar nas propriedades do combustível (JAKERIA et al., 2014).

Ainda, sendo um combustível natural apto a substituir o diesel de petróleo (AGARWAL e DHAR, 2012; FAZAL et al., 2011b; MEHER et al., 2006 e ATABANI et al., 2012), pode ser produzido a partir de fontes renováveis, como óleos vegetais, gorduras animais e óleos e gorduras residuais oriundos de diferentes processos (FAZAL et al., 2011; JAKERIA et al., 2014 e MEHER et al., 2006).

São óleos vegetais comumente utilizados como biodiesel: dendê (palma), mamona, soja, girassol, amendoim, nabo-forrageiro, algodão, pinhão-manso (*Jatropha curcas L.*), babaçu, colza, gergelim, canola, karanja, dentre outros (MIRAGAYA, 2005; CHRISTOFF, 2006; SILVA, 2013; AGARWAL e DHAR, 2012; ATABANI et al., 2012; FAZAL et al., 2010 e RENEWABLES, 2014).

Também é possível preparar o biodiesel ou bio-óleo a partir de resíduos industriais ou domésticos, como sobras de frituras e sabões produzidos no refino do

óleo de soja (OLIVEIRA, 2008; CHRISTOFF, 2006), e de algas e esgoto. No caso do esgoto, o biodiesel é obtido a partir do lodo, usando ácidos triglicéricos extraídos da lama residual, contendo matéria fecal e resíduos domésticos associados à limpeza do corpo, como sabões, que formam uma camada de ácidos graxos livres que flutuam na água (MIRAGAYA, 2005). Por ter origem em fontes renováveis e ser menos poluente, esse tipo de biodiesel é ecologicamente correto e, portanto, pode ser usado puro ou em diferentes proporções de misturas com o diesel (SILVA, 2013) e é bastante semelhante, em suas principais características, ao óleo diesel convencional (MEHER et al., 2006).

A variedade de matéria-prima disponível para a produção de biodiesel é um dos fatores significativos do desenvolvimento deste combustível. Tanto quanto possível, as matérias-primas devem cumprir dois requisitos principais: baixo custo de produção e grande escala de produção. As matérias-primas do biodiesel encontram-se divididas em quatro categorias principais (ATABANI et al., 2012):

1. Óleos vegetais comestíveis: colza, soja, amendoim, girassol, palma e coco.
2. Óleos vegetais não comestíveis: jatropha, karanja, manga mar, algas e plantas halófitas.
3. Resíduos ou óleos reciclados.
4. Gorduras animais: sebo, graxa amarela, gordura de frango e subprodutos de óleo de peixe.

Cabe salientar que a qualidade do biodiesel obtido a partir da reação de transesterificação está relacionada com a qualidade da matéria-prima (composição e características físico-químicas) que lhe deu origem (CHRISTOFF, 2006; MEHER et al., 2006 e ATABANI et al., 2012).

No que diz respeito à regulamentação das características do biodiesel comercializado, no Brasil, elas são regulamentadas pela ANP (Agência Nacional do Petróleo) e encontram-se dispostas na Resolução ANP nº 7, de 19/03/2008 – DOU 20.03.2008. Esta regulamentação é parametrizada mediante o emprego das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), das normas internacionais da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), da *International Organization for*

*Standardization* (ISO) e do *Comité Européen de Normalisation* (CEN) (CONDE, 2007). Além disso, há uma nova normativa com as especificações de qualidade do biodiesel, a qual encontra-se na Resolução ANP nº 14/2012 (IPEA, 2013).

Considerando que os biocombustíveis apresentam características físico-químicas e de rendimento semelhantes às do óleo diesel, mas com comportamentos operacionais negativos nas partidas a frio, nas fases de aquecimento e desligamento do motor e quando operando a baixas potências (SILVA, 2013), é importante que estes parâmetros sejam avaliados em diferentes condições climáticas.

Atabani et al. (2012) e Meher et al. (2006) descrevem propriedades e qualidades do biodiesel produzido a partir de diferentes matérias-primas em comparação com o diesel, que devem ser consideradas para obtenção de melhores biocombustíveis, bem como os problemas que podem ser associados a elas. Essas propriedades e qualidades estão divididas em dois grupos: um de parâmetros gerais, que também são utilizados para combustíveis à base de óleo mineral, e outro específico de composição química e pureza de ésteres alquílicos de ácidos graxos.

Entre os parâmetros gerais para o biodiesel, a viscosidade controla as características da injeção de diesel, que pode chegar a níveis muito elevados. Assim, torna-se importante o controle, mantendo dentro de um nível aceitável, a fim de evitar impactos negativos sobre o desempenho do sistema injetor de combustível. As especificações de viscosidade são quase idênticas às do diesel.

O ponto de inflamação de um combustível é a temperatura a que se inflama quando exposto a uma chama ou faísca. O ponto de inflamação do biodiesel é maior do que o diesel de petróleo, sendo, portanto, seguro para fins de transporte.

Em baixa temperatura de funcionamento, o combustível pode engrossar e não fluir corretamente, afetando o desempenho das linhas, bombas e injetores de combustíveis. A temperatura do ponto de entupimento de filtro a frio (CFPP) define o limite de filtração de combustíveis, tendo uma correlação melhor do ponto de nuvem para o biodiesel. Normalmente, qualquer ponto de fluidez ou CFPP são especificados. O ponto de fluidez é a temperatura mais baixa à qual a amostra de

óleo pode ainda ser movida.

Basinger et al. (2010) e Atabani et al. (2012), destacam que o número de cetano (NC) tem implicações importantes na combustão e afeta parâmetros de desempenho do motor como: estabilidade, dirigibilidade, fumo branco, ruído e as emissões de CO e HC. O cetano mede a facilidade com que ocorre a ignição e a suavidade de combustão. Quanto maior o número de cetano em suas propriedades melhor a ignição. O biodiesel tem o índice de cetano mais elevado do que o combustível de diesel convencional, o que resulta em maior eficiência de combustão.

Já o número de neutralização é especificado para assegurar adequadas propriedades de envelhecimento do combustível e/ou um bom processo de fabrico. Ele reflete a presença de ácidos graxos livres ou os ácidos utilizados no fabrico de biodiesel, também a degradação do biodiesel devido a efeitos térmicos.

O resíduo de carbono do combustível, por sua vez, é indicativo de tendências de depósito de carbono do combustível e é mais importante para o biodiesel do que em diesel combustível, porque mostra uma correlação elevada com a presença de ácidos graxos livres, glicerídeos, sabões, polímeros, ácidos gordos insaturados mais elevados e impurezas inorgânicas.

Um dos principais critérios para considerar a qualidade do biodiesel é a estabilidade de armazenamento. Aqueles que são derivados de óleo vegetal tendem a deteriorar-se, devido a reações hidrolíticas e oxidativas. Seu grau de insaturação os torna suscetíveis às questões térmicas e/ou oxidativas a polimerização, o que pode levar à formação de produtos insolúveis, que causam problemas no sistema de combustível, especialmente na bomba de injeção.

Em comparação ao diesel do petróleo, o biodiesel apresenta uma série de vantagens e de desvantagens, as quais são apresentadas abaixo, na Tabela 3.1, e serão explicadas ao longo deste trabalho.

Tabela 3.1. Vantagens e desvantagens do uso do biodiesel em relação ao diesel (Autor).

VANTAGENS	DESVANTAGENS
É renovável	Maior formação de bactérias
Diminui a dependência externa	Maior emissão de NO <sub>x</sub>
Menor agressão ao ambiente	Maior degradação
É biodegradável	Menor rendimento
Isento de enxofre	Maior corrosividade
Energia limpa	Menor volatilidade
Tem propriedades próximas ao diesel	Maior viscosidade
Menor emissão de CO, CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O e HFC	Contaminação por metais
Permite reabsorção do CO <sub>2</sub>	Auto-oxidação
Aumenta lubrificidade do combustível	Mais higroscópico
Maior ponto de fulgor	Maior consumo de combustível
Melhora a viscosidade	Menor durabilidade do combustível
Melhora a distribuição de renda	Mais interação com metais
Maior número de cetanos	Redução da densidade do óleo lubrificante
Teor médio de oxigênio	Maior contaminação do óleo lubrificante
Menor emissão de particulados	Flutuação na viscosidade do lubrificante
Menor emissão de HC	Maior desgaste do motor
Não tóxico	Obstrução de galerias e circuito de combustível
Não é explosivo	Surgimento de depósito de carbono
Não é inflamável	Maior consumo
Reduz toxidade do ar	Glicerina na linha do combustível
Redução de Gases Efeito Estufa	Ponto de névoa superior
Reduz opacidade da fumaça	Maior desgaste abrasivo
É seguro para transporte e manuseio	
Menor volatilidade	
Menor desgaste adesivo	

A presença de alto nível de álcool no biodiesel causa acelerada deterioração das vedações de borracha natural e juntas, por isso, é necessário o controle do teor de álcool. A presença de mono, di e triglicerídeos causam problemas, como filtro de combustível entupido, no motor.

Ainda de acordo com Meher et al. (2006), várias propriedades não mostram nenhuma mudança significativa durante o armazenamento, enquanto outras, como viscosidade, índice de peróxidos e, mais dramaticamente, o tempo de indução (determinado pela medida da condutividade, a qual aumenta à medida que as reações de oxidação são intensificadas), demonstraram alterações relacionadas com a natureza do produto de partida, medindo a estabilidade oxidativa que ocasiona o envelhecimento prematuro de óleos e gorduras (ANDRADE et al., 2014).

### **3.2.2.1. Principais Vantagens do Uso do Biodiesel**

As grandes motivações para a produção de biodiesel são seus benefícios sociais e ambientais (FAZAL et al., 2011b; HABIBULLAH et al., 2015; MEHER et al., 2006). Há interesse em identificar combustíveis renováveis, fáceis de serem obtidos em grandes quantidades e cuja queima resulte em níveis aceitáveis de produtos e resíduos, tendo em vista a redução das reservas dos combustíveis fósseis e seus altos níveis de poluição, oriunda da combustão, que agride o meio ambiente e compromete a sobrevivência futura do planeta (SILVA, 2013; AGARWAL e DHAR, 2012; FAZAL et al., 2011; FAZAL et al., 2011b; RAHMAN et al., 2014 e ATABANI et al., 2012). A partir da produção de biodiesel, o mercado energético poderá sustentar um imenso programa de geração de emprego e renda, com inclusão da agricultura familiar na cadeia de produção (IPEA, 2013).

Para Farias et al. (2014), Fazal et al. (2011b), Rahman et al. (2014) e Habibullah et al. (2015), além de todos os benefícios supracitados, o biodiesel ainda é isento de enxofre e apresenta alta biodegradabilidade, sendo fonte de energia limpa e renovável.

Para Fazal et al. (2013), Meher et al. (2006) e Rahman et al. (2014), o biodiesel é um dos combustíveis alternativos mais promissores, para superar tanto as preocupações relacionadas à escassez de diesel de petróleo quanto a degradação ambiental. É produzido a partir de fontes renováveis (como óleos vegetais ou de gorduras animais) e tem propriedades muito próximas das do diesel de petróleo. Para Atabani et al. (2012), existem, mundialmente, mais de 350 oleaginosas identificadas como fontes potenciais para a produção de biodiesel.

Do total global das emissões de CO<sub>2</sub>, o setor de transporte foi responsável por 23% em 2007 e por 22% em 2008. De acordo com Atabani et al. (2012), a maioria (95%) das emissões de GEE (gás de efeito estufa) ocorrem no transporte e são compostas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O); e fluorocarbonetos (HFC) provenientes dos sistemas de ar condicionado de veículos.

A mudança climática é atualmente o problema ambiental global mais urgente. Com o aumento da temperatura média mundial em mais de 2°C, até um milhão de espécies podem ser extintas e centenas de milhões de pessoas poderão perecer (RAHMAN et al., 2014; ATABANI et al., 2012). Estima-se que cerca de 4 bilhões de toneladas de dióxido de carbono sejam liberados para a atmosfera entre 2007 e 2020, e que mais 8,6 bilhões de toneladas métricas de dióxido de carbono adicional devam ser liberados até 2035, agravando o problema ambiental.

Neste cenário, o uso de derivados de petróleo aumenta a concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera, sendo o principal responsável pelo “efeito estufa”, ou seja, pela elevação da temperatura média do planeta (SILVA, 2013; RAHMAN et al., 2014). Entretanto, o uso de biomassa permite a reabsorção do CO<sub>2</sub> liberado, possibilitando que um ciclo quase fechado do carbono seja estabelecido. Esse ciclo só não é fechado porque, em alguns casos, utiliza-se combustível fóssil em alguma etapa da produção, tal como no transporte do produto (OLIVEIRA, 2008), liberando ainda outros gases nocivos, como o monóxido de carbono (CO), que pode causar dificuldades respiratórias, asfixia, diminuição na percepção visual, podendo levar até mesmo à morte (SILVA, 2013).

Além dos problemas ambientais, os combustíveis fósseis são prejudiciais à

saúde humana. Eles possuem enxofre, que funciona como lubrificante do combustível e, quando queimados, ocorre a formação de óxido de enxofre ( $\text{SO}_x$ ), que reage na atmosfera com oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e água, formando o ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) e provocando a chuva ácida, e de dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), que irrita as mucosas dos olhos e vias respiratórias, causando problemas cardiovasculares, acidificação das águas, solo, plantas e corrosão em materiais, pela decomposição seca e úmida do  $\text{SO}_2$ . Além de tudo isso, os combustíveis fósseis são promotores cancerígenos (SILVA, 2013).

Por outro lado, o biodiesel não possui enxofre na sua composição, diminuindo, assim, o impacto ambiental do uso de motores a combustão interna (OLIVEIRA, 2008; FAZAL et al., 2010; RAHMAN et al., 2014 e HABIBULLAH et al., 2015). Entretanto, possui características que incorporam qualidades ao diesel, como aumento da lubricidade, ponto de fulgor e viscosidade (MATTOS, 2012; FAZAL et al., 2011 e HABIBULLAH et al., 2015). O uso do biodiesel propiciou a diminuição do teor de enxofre, atendendo a demandas ambientais.

Duque (2012), comparou diversas misturas de biodiesel, com matéria-prima a partir do óleo de cozinha usado e diesel, e constatou que a emissão de CO e  $\text{CO}_2$  eram menores naquelas com biodiesel, bem como emissões maiores de  $\text{NO}_x$ , conforme Figura 3.2.

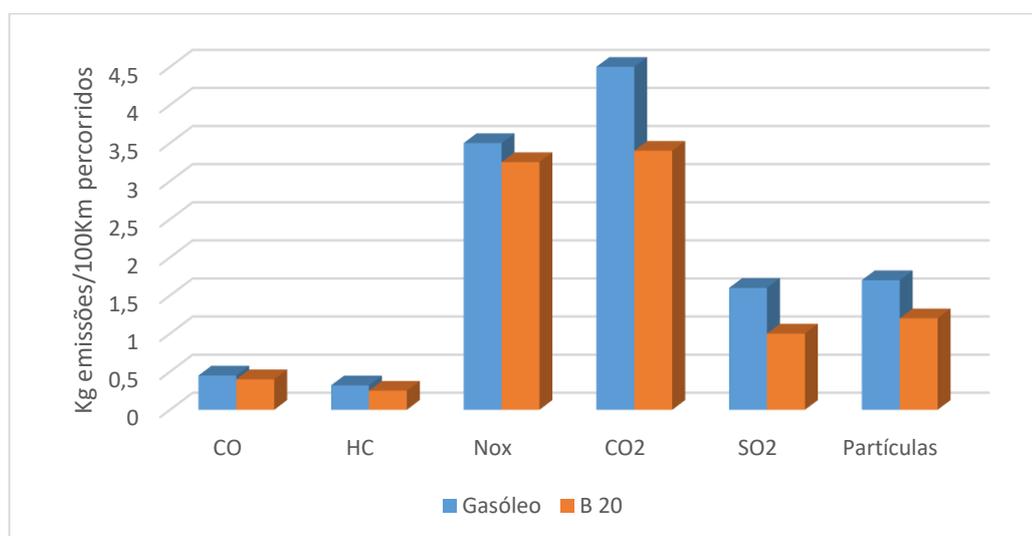


Figura 3.2. Comparativo de emissões de gases de exaustão do diesel fóssil (gasóleo) e da mistura diesel – 20% biodiesel (B 20) (DUQUE, 2012).

Para o Ministério do Meio Ambiente, o aumento do uso de biodiesel na proporção de 7%, implementado em novembro de 2014, reduzirá, até 2020, a emissão de 48 a 60 milhões de toneladas equivalentes de gás carbônico (APROBIO, 2014). Mas em 1º de março de 2018 a mistura passou para 10%.

Uma das principais características do biodiesel é diminuir a emissão de gases poluentes, graças à significativa massa de oxigênio em sua composição: cerca de 10-11% e, no diesel puro, 0% (ATABANI et al., 2012 e FAZAL et al., 2011). Isso confere menor poder energético, mas também contribui para o aumento do número de cetanos. Fazal et al. (2011), avaliando trabalhos de outros pesquisadores, concluíram, de modo geral, que o uso de biodiesel em motores diesel pode reduzir as emissões de HC, CO e PM, mas aumentar as emissões de NOx. A redução da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) com o uso do biodiesel puro (B100), é da ordem de 78%, quando comparado com o diesel convencional, sendo utilizado o metanol no processo de transesterificação. No entanto, quando utilizado o etanol oriundo da cana-de-açúcar, a redução das emissões pode chegar a um teor próximo de 100%, segundo Oliveira (2003) in Christoff (2006), Atabani et al. (2012) e Fazal et al. (2011). Ainda, isso reduz a fumaça devido à fuligem livre de enxofre e aromáticos (RAHMAN et al., 2014), o que o torna um combustível ideal para cidades altamente poluídas; também reduz o teor de matéria no ar ambiente e, portanto, a toxicidade do ar.

Outras vantagens do biodiesel são: tem potencial para a geração de emprego rural; serve como neutro climático em virtude da mudança climática, que é atualmente um elemento importante do uso de energia e desenvolvimento. Tem maior número de cetano (cerca de 60-65, dependendo do óleo vegetal), que o diesel de petróleo, o que reduz o atraso da ignição. Oferece algumas vantagens técnicas em relação ao diesel de petróleo convencional, como biodegradabilidade, maior ponto de fulgor, melhor número de cetano e emissões de escape reduzidas; além de fornecer maior lubrificidade do que o diesel de petróleo. Isso melhora a lubrificação em bombas de combustível e unidades injetores, o que diminui o desgaste do motor, aumentando a eficiência do mesmo. A produção pode ser aumentada facilmente e é menos morosa, não há necessidade de perfuração, transporte e refino, como o

diesel de petróleo, portanto, cada país tem a capacidade de produção de biodiesel como combustível produzido localmente. É seguro para transporte, manipulação, distribuição, utilização e armazenamento, devido ao seu ponto de inflamação mais alto (acima de 100-170°C) do que o diesel de petróleo (60-80°C). Reduz o efeito ambiental de produtos e resíduos e pode ser feito de óleos e banhas usados para cozinhar; não exige a modificação do motor até o B20. As misturas mais elevadas podem precisar de alguma pequena modificação (ATABANI et al., 2012; FAZAL et al., 2011).

Habibullah et al. (2015), após análise dos resultados encontrados por vários pesquisadores, consideraram que o uso do biodiesel como alternativa ao diesel aumentou consideravelmente no mundo, com características vantajosas do biodiesel sobre o diesel, conforme apresentado acima. Com a rápida modernização e o desenvolvimento tecnológico, o combustível não só é necessário para fornecer energia, mas também lubrificação. Ele deve emitir pouca poluição e ser quimicamente estável, sem afetar o ambiente. Portanto, aditivos lubrificantes devem ser incorporados para reduzir o enxofre do diesel através de hidrotreatamento. Assim, o uso atual de biodiesel é uma preocupação crescente.

Com o estudo das propriedades de lubrificação, o biodiesel poderá atender a demanda e as necessidades como aditivo ou combustível. A lubrificação do combustível do motor é um fator importante no prolongamento da vida útil do mesmo. O combustível também reduz o consumo de energia através da minimização do atrito entre as peças móveis. Em particular, o combustível do motor lubrifica os injetores e bombas de combustível de alta pressão em motores veiculares. Sua capacidade de lubrificação é influenciada pela temperatura de admissão de combustível, acima de 60°C. O biodiesel possui melhores propriedades de lubrificação do que o diesel. De fato, alguns pesquisadores investigados referem que dada a sua boa capacidade de lubrificação, o biodiesel pode ser utilizado como um aditivo para melhorar a lubrificação de combustíveis de petróleo. Para Masjuki et al. (2013), o biodiesel com 20% de biocombustível (BP20) parece proporcionar um melhor poder lubrificante, em comparação com diesel.

Numerosos estudos foram conduzidos sobre as características tribológicas de

diferentes tipos de biodieseis (MATTOS, 2012; FAZAL et al., 2011; HABIBULLAH et al., 2015; MASJUKI et al., 2013 e DUQUE, 2012), como combustíveis puros, misturados com combustível para motores diesel, ou como aditivos de combustível. Muitos resultados revelaram que o desgaste e atrito diminuíram com o aumento da concentração de biodiesel (AGARWAL e DHAR, 2012; FAZAL et al., 2011 e MASJUKI et al., 2013).

### **3.2.2.2. Principais Desvantagens do Uso do Biodiesel**

Os principais problemas encontrados estão relacionados às emissões, à degradação do biodiesel ou à oxidação por bactérias, à lubrificação, ao desempenho do motor e ao desgaste do mesmo. Esses problemas podem estar relacionados à formação de bactérias, corrosão do sistema de injeção e até à contaminação do óleo lubrificante (WAHNFRIED, 2007).

Após estudos realizados por Fazal et al. (2011b; 2013; 2013b), Meher et al. (2006), Jakeria et al. (2014), e Atabani et al. (2012), e análise de vários outros estudos recentes, considera-se que existem algumas desvantagens significativas limitante às aplicações comerciais do biodiesel. Algumas de suas propriedades poderiam ser deterioradas por vários fatores: a corrosividade; a instabilidade de propriedades do combustível; a reatividade de cadeias de hidrocarbonetos insaturados; a menor volatilidade e a maior viscosidade, que influencia os parâmetros lubrificantes; o desgaste de vários componentes do motor etc. Ainda, os autores citados acima consideram que as propriedades do biodiesel podem ser afetadas por sete principais fatores: (i) a auto-oxidação, (ii) decomposição térmica ou flutuações térmicas, (iii) a absorção de água, (iv) a biodegradação microbiana, (v) condições de armazenamento, (vi) a contaminação por metal, (vii) presença e/ou ausência de aditivos etc.

Porte (2011), atenta que o biodiesel derivado de óleos e gorduras residuais e o biodiesel proveniente de oleoginosas têm qualidades diferentes, sendo o primeiro de qualidade inferior, portanto, se a matéria-prima não for tratada de forma adequada, vai gerar um combustível de má qualidade, comprometendo o motor. A qualidade do combustível é influenciada pelo número de cetano, que mede a

qualidade de ignição de um combustível para motores diesel e tem influência direta na partida do motor e no seu funcionamento sob carga (SILVA, 2013).

A liberação de substâncias para a atmosfera gera certa preocupação dentro da comunidade científica, uma vez que muitos destes compostos, embora não regulamentados, podem exercer efeitos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente.

Em Masjuki et al. (2013), durante o teste de resistência do motor, o biodiesel mostrou resultados de maior consumo específico de combustível e maiores emissões de NO<sub>x</sub>, e mais baixas emissões de HC e CO, para a mistura em relação ao diesel. A maior concentração de oxigênio no biodiesel melhora a lubrificidade, a combustão e reduz as emissões, entretanto, aumenta ligeiramente a emissão de NO<sub>x</sub> (FAZAL et al., 2011). Já de acordo com Atabani et al. (2012), no biodiesel há maior ponto de nuvem, ou seja, a temperatura na qual uma nuvem de cristais de cera aparece primeiro em um combustível líquido quando é resfriada sob condições especiais de teste. O ponto de nuvem de qualquer combustível é um indicador de como o combustível funcionará sob condições climáticas frias. Por outro lado, o ponto de fluidez é exatamente o oposto do ponto da nuvem, pois refere-se à temperatura mais baixa em que o movimento do óleo é observado e em que o combustível pode ser bombeado facilmente, e as emissões de óxido de nitrogênio são superiores aos do diesel.

Em Rahman et al. (2014), na queima, os combustíveis melhoraram a emissão de CO e HC e pioraram NO e CO<sub>2</sub>, mas este último é absorvido pelas plantas, neutralizando, em parte, seu efeito. Murillo (2007) in Silva (2013), em ensaios com biodiesel, notou redução de 12% na emissão de CO e aumento na emissão de NO<sub>x</sub> em 20% e de CO<sub>2</sub> em 4%. Em Silva (2013), a opacidade da fumaça reduziu com o incremento das proporções de mistura de biodiesel no diesel, destacando que o tipo de biodiesel também influenciou esta medida, sendo a fumaça de menor opacidade em 11,58% para o Biodiesel 100B, o que também já havia sido observado por Lima et al. (2012). O biodiesel, quando adicionado ao diesel, promove a redução nas principais emissões relacionadas ao petróleo, com exceção das emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>). Seu aumento, varia de 2 a 4% para o B20, que deve ser levado

em conta, se considerada sua atuação como um dos principais precursores do ozônio, um dos mais graves problemas em relação à qualidade do ar nas grandes cidades (MAZIERO et al., 2007).

Outra classe de compostos com importância ambiental e de saúde pública são os hidrocarbonetos poliaromáticos (HPA). He et al. (2010) in Silva (2013) concluíram que o uso de biodiesel de soja nas proporções de 20% e 100% em motor diesel, com injeção indireta, reduziu as emissões de HPA em 13,1% e 19,4%, respectivamente, quando comparados com o diesel de petróleo. Para esses autores, houve uma redução significativa na emissão de HPA na fase particulada e na fase gasosa, predominando as emissões de naftaleno e fenantreno. Segundo Almeida (2013), a emissão de poluentes pode ser devido a defeitos de geometria nos anéis de segmentos.

Há problemas relacionados à formação de bactérias (ATABANI et al., 2012 e FAZAL et al., 2010). Como a durabilidade do biodiesel é menor, degrada em menos tempo que o combustível de origem fóssil (o tempo de vida estimado pela própria Petrobras é de 30 dias). A estabilidade é pobre, a oxidação pode resultar em problemas na armazenagem por longos períodos. A degradação oxidativa é maior devido à exposição ao cobre, porque provoca mudança na composição do biodiesel, levando a degradar as propriedades do combustível, fato confirmado por mais de um autor. O biodiesel está mais sujeito à degradação microbiana, quando comparado com o diesel de petróleo (JAKERIA et al., 2014; FAZAL et al., 2011b; ATABANI et al., 2012 e FAZAL et al. 2013).

O biodiesel oxida quando exposto ao ar e às altas temperaturas. Sofre a ação da radiação solar, da umidade do ar ambiente e de agentes que favorecem a decomposição de ácidos graxos e oxidação do biodiesel, formando ácidos orgânicos e hidroperóxidos, que promovem processos corrosivos com redução da qualidade do biodiesel e, conseqüente, danos aos motores, principalmente nas peças do sistema de alimentação e injeção (AMBROZIN et al., 2009; PORTE, 2011; e FAZAL et al., 2011). Além disso, o biodiesel é 30 vezes mais higroscópico do que o diesel (AMBROZIN et al., 2009; FAZAL et al., 2010).

Lutterbach et al. in Ambrozin et al. (2009) estudaram o crescimento microbiano em biodiesel, em condições similares às de estocagem do diesel. Os resultados mostraram que tal crescimento é semelhante em biodiesel, diesel e misturas B5. Dessa forma, assim como para o diesel, a corrosão microbiana pode ocorrer nos sistemas de armazenagem, transporte e nos veículos.

Em Jakeria et al. (2014), foram relatados o surgimento de alguns aditivos (Butil-hidroxi-anisol (BHA), o 2,6-di-ferc-Butil-4 metil-fenol (BHT), ferc-Butil-hidroquinona (TBHQ), 2-Metil-hidroquinona (MH), Pyrogallol (PY) e Propil gaiato (PG)) para melhorar a estabilidade de oxidação e poucos para reduzir a corrosividade, por exemplo ácido tiobarbitúrico (TBA), propilcarbinol (nBA) etc. Alguns podem contribuir para reforçar outras propriedades do combustível. Desta forma, mesmo uma pequena melhoria na compatibilidade e estabilidade do biodiesel, com os materiais automotivos pode contribuir para a utilização dele em escala comercial. Em seu trabalho, os autores salientam que ainda falta conhecimento científico sobre os possíveis mecanismos de interação de diferentes materiais automotivos com o biodiesel.

No entanto, o uso de biocombustíveis implica no seu contato com os diversos materiais metálicos constituintes dos sistemas veiculares, de transporte, armazenamento etc. (AMBROZIN et al., 2009). Esta interação pode ocasionar a corrosão metálica, já que o biodiesel é mais instável e mais susceptível às reações de oxidação, logo, mais corrosivo que o diesel, a menos que modificado ou tratado com antioxidantes sintéticos (AQUINO, 2013; FAZAL et al., 2011).

A natureza corrosiva do biodiesel pode ser agravada, se apresentar água livre e ácidos graxos livres (FAZAL et al., 2010), destacando que a água é o principal ingrediente para tornar o combustível mais agressivo. A corrosividade do biodiesel está diretamente ligada à composição química das matérias-primas, à sua origem e a outros fatores que favorecem as reações de oxidação e degradação do biodiesel (impurezas, temperatura e oxigênio), o que se reflete no entupimento e desgaste dos motores. Fazal et al. (2011) notaram que as propriedades do biocombustível incluem porções de oxigênio, ácidos graxos livres, grau de insaturação, natureza higroscópica etc. Esses fatores também são considerados para influenciar o desempenho, a emissão e a durabilidade do motor. Embora as propriedades do

biodiesel, quando recebido, satisfaçam a norma, muitas delas podem desviar-se do padrão, uma vez que o biodiesel se degrada. Estes resultados parecem sugerir que as propriedades de lubrificação de biodiesel podem variar dependendo da sua concentração na mistura, bem como a condição de teste. Ambrozin et al., (2009) cita, por exemplo, que a utilização de combustíveis com alto conteúdo de enxofre pode causar a corrosão do bronze utilizado em bombas de combustíveis.

Para Fazal et al. (2010), a maior degradação da superfície de metal ocorre quando em contato com o biodiesel e está provavelmente relacionada aos componentes de ácido graxos, teor de água, unidades de oxigênio etc. Para Habibullah et al. (2015), o combustível aumenta o desgaste corrosivo e afeta negativamente a capacidade de lubrificação, além disso, sua oxidação produz compostos intermédios.

Os resultados obtidos até o momento indicam que aços inoxidáveis e alumínio são materiais compatíveis com biodiesel, enquanto que bronze, latão, cobre, chumbo, estanho, zinco, ferro e níquel são incompatíveis, diminuindo a estabilidade do biodiesel e aumentando o seu poder corrosivo. Além disso, determinou-se que a corrosividade do biodiesel está associada ao seu grau de insaturação e à quantidade de metanol e água presentes, podendo também estar relacionada com sua degradação microbiana, analogamente ao diesel (AMBROZIN et al., 2009).

Atabani et al. (2012) e Fazal et al. (2010), apontam ainda outros problemas relacionados à lubrificação. Em Masjuki et al. (2013), a análise do óleo lubrificante apresentou uma redução da viscosidade e da densidade, e a quantidade de partículas metálicas foi maior no motor com biodiesel.

Para Silva (2013), na análise do óleo lubrificante, após o uso com biodiesel, este apresentou alterações aceitáveis, sendo a viscosidade, a presença de água e o teor de ferro os parâmetros mais expressivamente alterados.

O óleo lubrificante apresentou elevados índices de viscosidade, contaminação pelo combustível, precipitação, redução das reservas alcalinas e aumento do teor de minerais. Maziero et al. (2007) e Hu et al. (2013), comentam que o biodiesel

contamina o óleo lubrificante com fuligem e concluíram que o uso de óleo biodiesel provoca a redução do desempenho mecânico, aumenta o desgaste dos componentes mecânicos do motor e encurta a vida útil do lubrificante. Entretanto, para Basinger et al. (2010), a viscosidade do óleo de lubrificação foi o fator limitante na degradação, o que requer que o óleo seja trocado a cada 110 horas. Já na análise do óleo lubrificante feita por Agarwal e Dhar (2012), os teores de ferro, chumbo, cromo e detritos de zinco encontrados foram mais baixos no motor alimentado com B10 que no motor a diesel. No entanto, o teor de alumínio no óleo lubrificante do motor B10 foi ligeiramente superior ao do motor alimentado com diesel, estes metais são provenientes do desgaste das peças envolvidas no caminho do combustível na alimentação e uso do motor.

O lubrificante, no estudo de Agarwal e Dhar (2012), teve um desgaste maior pela adição de detritos, alterações químicas devido à diluição do combustível e adição de umidade no óleo lubrificante. A viscosidade do óleo lubrificante aumentou devido à formação de produtos resinosos, à base de estoque de oxidação do óleo, da evaporação de frações mais leves, esgotamento dos aditivos antidesgastes e de contaminação por insolúvel. Enquanto isso, a diluição de combustível e a adição de água diminuíram a viscosidade. A diferença no teor de cinzas deveu-se ao desgaste dos componentes do motor.

Ainda no mesmo trabalho, o desgaste maior foi no motor que usou óleo diesel mineral. O motor alimentado com o biodiesel a 10% mostrou maior resíduo de carbono no óleo de lubrificação, em comparação ao motor alimentado com diesel mineral. Na avaliação por espectroscopia de absorção atômica, o biodiesel não causa ataque no cobre e os resíduos de ferro, zinco, cromo e chumbo são comparativamente menores do que os encontrados no óleo lubrificante do diesel mineral e o alumínio é ligeiramente maior. Recomendam-se alterações adequadas na composição de óleo lubrificante, pois ainda não existe um óleo específico para motores que usem o biodiesel.

Para vários autores, a queima direta de biodiesel e de misturas maiores que 5% pode causar uma variedade de problemas referentes à performance do motor, ou apresentar alguns inconvenientes como a alta viscosidade, a qual provocará

excesso de depósitos de carbono no motor, formação de sedimentos, obstrução nos filtros de óleo e bicos injetores, diluição parcial do combustível no lubrificante, comprometendo a durabilidade do motor, desgaste nas agulhas dos injetores e entupimentos diversos. Ainda, a queima incompleta leva ao surgimento de incrustações ou formação de depósitos de carbono na cabeça dos pistões no motor, com acúmulo de carvão nos bicos injetores, válvulas, travamento, furo, quebra ou desgaste de anéis dos pistões, entupimento das galerias de lubrificação, ressecamento e ruptura dos selos (ATABANI et al., 2012; MEHER et al., 2006; FAZAL et al., 2011; MASJUKY et al., 2013; RAHMAN et al., 2014; TORRES, 2006; MAZIERO et al., 2007; AMBROZIN et al., 2009; SUDA, 1984; AGARWAL e DHAR, 2012; MARQUES, 2008; BASINGER et al., 2010 e Ramadhas e Peterson in WANDER et al., 2010). Além disso, há formação de “verniz” e de goma (polimerização) em motores, nos parafusos da bomba injetora, entre outras alterações, bem como um cheiro desagradável, devido à formação de acroleína (DHAR e AGARWAL, 2014; ATABANI et al., 2012).

Para Atabani et al. (2012), estes problemas também podem aparecer, mas podem ser minimizados com biodiesel de melhor qualidade. Kucek (2004, in CHRISTOFF, 2006) considera estes problemas, e o que eles causam, fatores para um subsequente aumento em seus custos de manutenção.

Em Masjuki et al. (2013), Maziero et al. (2007) e Dhar e Agarwal (2014), foi demonstrado que, com o funcionamento do motor em curto prazo, os combustíveis renováveis derivados de óleos vegetais são capazes de fornecer um bom desempenho. Porém, em operações mais prolongadas, alguns dos mesmos combustíveis podem causar a degradação do desempenho do motor, excesso de carbono e depósitos de laca. A inspeção visual após diferentes horas de operação revelou algum acúmulo de depósitos, sobre os furos dos injetores e nas suas superfícies de ponta, para ambas as amostras de combustível, diesel e biodiesel. No entanto, o injetor com o uso do B20, além de apresentar consumo maior, ficou mais entupido, mais sujo com depósitos de carbono e apresentou outros danos reais no motor.

Para Basinger et al. (2010), os principais problemas são a glicerina que se

deposita na linha do combustível e a viscosidade do óleo vegetal, que dificultam a alimentação do motor, proporcionando um aumento de consumo na ordem de 12%. Em Atabani et al. (2012), o biodiesel apresentou relativamente maior viscosidade e menor volatilidade do que o diesel e, portanto, precisou de maior pressão no injetor.

Quando exposto a baixas temperaturas, o biodiesel apresenta tendência à perda de fluidez, desencadeando problemas para o sistema de alimentação do motor, como entupimentos de linhas de alimentação de combustível e dificuldade de partida a frio (SOUZA, 2010; MARQUES, 2008). Então, se a temperatura ambiente for baixa, o biodiesel terá problema de fluidez, pois o combustível no tanque fica mais espesso, até o ponto em que não conseguirá escoar o suficiente para dar partida no veículo. Isso pode limitar sua utilização em certas áreas geográficas. A variação de viscosidade do biodiesel é muito maior que a do óleo diesel mineral. Segundo Conde (2007), a viscosidade do combustível constitui um mecanismo de suma importância para um bom funcionamento do sistema de injeção, sendo refletida também no processo de combustão do motor e na potência máxima por ele desenvolvida.

Souza (2010), comparou vários trabalhos, entre os quais o de Porte (2008), Santos (2005) e Castellanelli (2008), e constatou que o diesel fornece maior potência e torque, bem como menor consumo, em relação aos óleos vegetais. O autor também constatou que o Óleo de Gordura Residual (OGR) apresenta um consumo maior. Em adições até o percentual de cerca de 20% trouxeram aumento mínimo de consumo de combustível, de 2,67%. Com a utilização do biodiesel B100 de OGR, houve aumento de 19,30% no consumo de combustível. Maziero et al. (2007), usando B100, notaram uma redução média na potência do motor de 7,6%, enquanto que o aumento no consumo específico de combustível foi de 9,8%.

Para Bari et al. in Basinger et al. (2010), a perda de performance pode ser melhorada se houver pré-aquecimento do biocombustível. Já Murillo (2007) in Silva (2013), em ensaios com biodiesel notou aumento de 11,4% no consumo de combustível em relação ao óleo diesel. Todos os óleos vegetais até hoje estudados apresentam ponto de névoa superior ao diesel mineral e, portanto, necessitam de pré-aquecimento ou de aditivos para melhorar os parâmetros físico-químicos ao

biodiesel aplicado (CONDE, 2007).

Em Silva (2013), quando foi utilizado biodiesel B50 (50% biodiesel e 50% diesel), os resultados evidenciaram aumento no consumo específico (Figura 3.3), entretanto, o tipo de biodiesel não influenciou a referida variável. Na Figura 3.3, o B refere-se a biodiesel e o número associado determina a quantidade deste adicionada ao diesel puro.

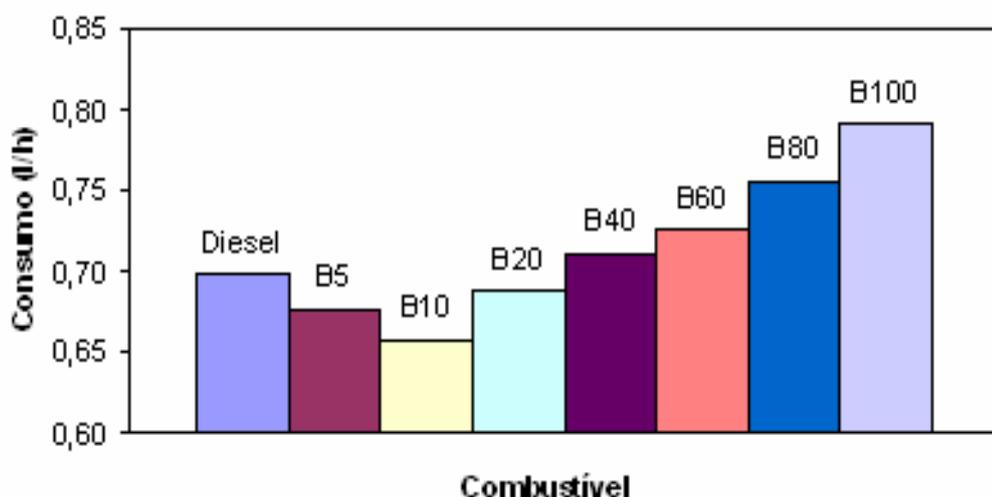


Figura 3.3 Comparativo de consumo específico de combustível utilizando diversas misturas de biodiesel (SILVA, 2013).

Em ensaios realizados por Pehan et al. (2009), utilizando o combustível biodiesel puro de sementes de colza, a atenção centrou-se na influência do biodiesel na rugosidade da superfície da bomba de êmbolo, sobre os depósitos de carbono na câmara de combustão, no injetor e no furo do bico injetor. Com os resultados obtidos, o uso do biodiesel pode até melhorar as condições de lubrificação da bomba de pistão. Os depósitos de carbono nas câmaras de combustão não variaram significativamente em quantidade mas estavam visivelmente redistribuídos. Além disso, o autor observou que a variação do coeficiente de descarga do injetor deve ser tomada em consideração quando se faz necessária uma elevada precisão dos resultados.

O comportamento de motores diesel varia de acordo com as condições ambientais e atmosféricas; ou seja, o consumo de combustíveis, emissões e

potência são afetados por fatores tais como a temperatura e a umidade do ambiente (DUQUE, 2012).

Para Almeida et al. (2013) e Pérez & Moreno (2013), no caso dos motores de combustão interna, as pressões de trabalho nos sistemas de bomba de injeção podem atingir valores de até 200MPa, o que permite uma melhor atomização de combustível, controlando o processo de combustão e contribuindo para a redução da emissão de poluentes para a atmosfera. Para atender a legislação antipoluição vigente, é preciso adotar novos materiais de menor peso, mais duros e mais resistentes ao desgaste e à corrosão, capazes de funcionar a temperaturas mais elevadas e compatíveis com o meio ambiente.

Para diversos autores (MASJUKY et al. (2013); AQUINO (2013); FAZAL et al. (2013b); MEHER et al. (2006); JAKERIA et al. (2014); FAZAL et al. (2011b); ATABANI et al. (2012); TORRES (2006); MAZIERO et al. (2007); AMBROZIN et al. (2009); BASINGER et al. (2010); FAZAL et al. (2010) e FAZAL et al. (2013)), muitos elementos de diversos materiais metálicos e poliméricos formam o motor ou o caminho do combustível. Os elementos metálicos mais comuns encontrados depositados são o alumínio (Al), cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), zinco (Zn), chumbo (Pb), latão, bronze, ferro fundido, aço carbono, aço inoxidável etc., o que pode ocorrer devido ao desgaste, à corrosão e à tribo-corrosão dos componentes do motor. Estas partículas são levadas pelo óleo de lubrificação e como parte do combustível, influenciando no atrito e desgaste dos diferentes componentes do motor em contato com o biodiesel, sendo importantíssimas quanto à durabilidade dos mesmos.

Para Souza (2010), a viscosidade fora do especificado pode acarretar um desgaste acentuado no conjunto, bem como a pressão excessiva no sistema de pressurização de combustível traz problemas nas propriedades lubrificantes do combustível, reduzindo, assim, sua vida útil. Os desgastes estão relacionados com a força aplicada, a oxidação a que está exposto o material, as cargas em sua composição e ao fenômeno de transferências de elétrons entre as superfícies metálicas (corrosão) (MATTOS, 2012).

Lutterbach et al. (in AMBROZIN et al., 2009) encontraram que geralmente a corrosão por desgaste, que se origina do contato metálico de qualquer sistema mecânico, é diminuída em motores ciclo diesel quando o biodiesel é adicionado ao diesel.

Em Habibullah et al. (2015), o biodiesel de *Calophyllum inophyllum* (CIB20) apresenta qualidades lubrificantes e desempenho auspicioso e maior possibilidade de formar película lubrificante sem quebrar. Em alguns estudos avaliados pelos autores, o óleo vegetal apresenta limitações ao seu uso como combustível e, para ultrapassá-las, os seus elementos químicos podem ser modificados, principalmente através de transesterificação. Este processo reduz o número de moléculas de hidrogênio na posição beta de carbono (C) do substrato de óleo e, assim, melhora a oxidatividade e a estabilidade térmica do biodiesel como uma propriedade importante para a lubricidade.

Embora o biodiesel exiba inerentemente maior lubricidade do que o combustível diesel, ele ainda apresenta desvantagens significativas, incluindo alta viscosidade e densidade, absorção de água, insaturação, natureza corrosiva, deposição de carbono, entupimento do filtro e injetor com coque. De acordo com os resultados de alguns desses estudos, muitos problemas afetam negativamente a lubricidade do biodiesel. Este efeito, por sua vez, resulta no desgaste de componentes de motores. Li et al. (2015) pesquisaram o desgaste em engrenagens e constataram que a dureza mais elevada é benéfica para a resistência ao desgaste. A microestrutura compactada também contribui para o menor coeficiente de desgaste da combinação de material, fato que pode ser transferido para o estudo dos anéis.

Nicolau et al. (2014), após estudo, chegaram às seguintes conclusões: a adição de 1 a 10% de biodiesel não altera significativamente a densidade e a viscosidade das misturas, e o efeito de melhoramento da lubricidade já é obtido com adição de cerca de apenas 1% de biodiesel.

Fazal et al. (2011b) utilizaram para sua investigação de desgaste a máquina de quatro bolas e os parâmetros de teste do estudo foram regulamentados pela

norma ASTM D4172. Tal estudo demonstrou que, para cada combustível, o maior desgaste ocorre nas velocidades mais altas, com tendências de aumentar o atrito, devido à maior geração de calor entre as superfícies de contato, como consequência da velocidade mais elevada. Verifica-se que o biodiesel puro ou as misturas de biodiesel mais elevadas causam menos desgaste do que as misturas com baixos volumes de biodiesel. Isto indica que a redução do desgaste parece acontecer devido à presença de biodiesel. Os autores concluíram que a deformação das superfícies desgastadas diminui com o aumento da concentração de biodiesel em misturas. A amostra com biodiesel puro foi submetida ao desgaste abrasivo, enquanto a com diesel foi submetida ao desgaste adesivo.

### **3.3. Aços Inoxidáveis Martensíticos**

Destaco que o capítulo 3.3 tem como base estudo realizado sobre os seguintes autores: Gerdau (2014); Garcia (2003); Silva e Mei (2006) e Norton (2004).

Aços inoxidáveis são aços ligas que contêm ao menos 10% de cromo em sua composição e de modo geral apresentam uma resistência à corrosão melhorada quando comparados aos aços comuns, mesmo assim sofrem oxidação e corrosão de forma mais lenta, quando em ambiente mais agressivo, como a água do mar. Alguns destes aços tem boa resistência contra altas temperaturas.

Existem quatro tipos de aço inoxidável, conhecidos como martensítico, ferrítico, austenítico e de endurecimento por precipitação.

O aço inoxidável martensítico, contém de 11,5 a 18% de Cr e 0,15 a 1,2% de C, é magnético, pode ser endurecido através de tratamento térmico e é utilizado para instrumentos cortantes. Incluem-se nesta família os aços AISI 403, 410, 414, 416, 420, 431, 440A, B e C, 501. Os aços inoxidáveis martensíticos foram desenvolvidos para suprir a necessidade de um material que apresentasse resistência à oxidação, elevada dureza, boa resistência mecânica e resistência ao desgaste.

O aço inoxidável ferrítico contém mais de 16% de Cr e baixo teor de carbono,

é magnético, mole e dúctil, não aceitando tratamento térmico, mas pode ter sua resistência modestamente melhorada por trabalho mecânico a frio. É utilizado em peças estampadas, como painéis, e tem melhor resistência a corrosão que o aço inoxidável martensítico. Nesta família os principais são: (AISI) 405, 430, 430F, 446, 502.

O aço inoxidável austenítico contém de 17 a 25% de Cr e 10 a 20% de Ni. Tem melhor resistência à corrosão por causa do níquel, é amagnético e tem excelente ductibilidade e tenacidade. Só pode ser endurecido a frio. Aqui temos: (AISI) 301, 302, 304, 304L, 308, 310, 316, 316L, 317, 321, 347. Outros aços aqui incluídos são os que tem o níquel substituído por manganês ou nitrogênio. (AISI) 201, 202, 204.

O aço inoxidável de endurecimento por precipitação liga de ferro, cromo (12-17%), níquel (4-8%), molibdênio (0-2%), é designado pelo seu percentual de liga seguido pelas letras PH, por exemplo 17-4 PH (17% de níquel e 4% de cobre). Apresenta alta resistência; mecânica, à temperatura e à corrosão.

### **3.3.1. Considerações sobre os Aços Inoxidáveis Martensíticos**

Os aços inoxidáveis martensíticos são austenizados com temperatura de 925 a 1070°C.

Temperaturas muito elevadas podem causar reaustenitização parcial e conduzir à presença de martensita não-revenida no resfriamento.

Apresenta elevada resistência ao amolecimento no revenimento, conferida pelo cromo.

Pode ocorrer endurecimento secundário, pela precipitação de carbonetos de cromo.

A dispersão de carbonetos na microestrutura aumenta a resistência ao

desgaste.

A soldabilidade destes aços é limitada pela elevadíssima temperabilidade.

O aço inoxidável martensítico considerado básico é o AISI 410, onde elemento de liga são adicionados.

### **3.3.2. Observações:**

Até cerca de 400°C a dureza cai pouco com o revenimento, pode ocorrer endurecimento secundário, um pouco acima desta temperatura.

Revenimento com temperaturas entre 450-500°C, pode ocorrer perda de tenacidade e deve ser evitado.

Acima de 500°C há uma rápida redução da dureza e na resistência mecânica, mas ocorre um aumento da ductibilidade e tenacidade. É necessário cuidado pois, temperaturas muito elevadas podem causar reaustenitização parcial e conduzir à presença de martensita não-revenida no resfriamento.

Dada as suas características os aços martensíticos, têm encontrado grandes aplicações, como uso em tubulações na produção de petróleo, em refinarias e indústria petroquímica, devido à resistência mecânica, resistência à corrosão e soldabilidade. É importante destacar que estes aços podem ser utilizados temperados, revenidos ou recozidos.

### **3.3.3. Composições e Aplicações Típicas**

A composição química dos aços AISI 440B e AISI440C é apresentada na Tabela 3.2, logo abaixo.

Tabela 3.2 Composição química dos aços martensíticos

	Composição química				
	% C	% Cr	% Mn máx.	%Si máx.	% Mo máx.
AISI 440B	0,75-0,95	16,0-18,0	1,00	1,00	0,75
AISI 440C	0,95-1,20	16,0-18,0	1,00	1,00	0,75

Fonte: Gerdau 2014

Apresentam dureza média de 56 a 58HC. Por ser aço com elevada resistência à corrosão, mecânica e ao desgaste, sem queda significativa de dureza até 500°C se prestam a:

AISI 440B: Execução de eixos, pinos, instrumentos cirúrgicos e dentários, cutelaria e anéis, etc.

AISI 440C: Rolamentos especiais, submetidos a ação de agentes corrosivos ou a altas temperaturas. Instrumentos cirúrgicos e dentários, artigos de cutelaria, peças para bombas de óleo, assentos de válvulas, etc. Rolos para conformação de embalagens, exemplos: latas de cerveja, óleo, produtos comestíveis, etc.

Diferença entre eles, o aço 440C é menos resistente a corrosão e tem mais alta resistência mecânica. Cabe destacar que a maior diferença está no percentual de carbono do AISI 440C ser maior.

### 3.4. Lubrificação e Desgaste

A lubrificação é uma das exigências mais importantes e de fundamental influência nos mecanismos de desgaste. Se um contínuo filme de óleo estiver presente, o desgaste por atrito será negligenciado. Contudo, se o filme for rompido, poderá ocorrer o desgaste crítico dos cilindros confinados no ponto morto superior, região de inversão da velocidade dos anéis do primeiro canaleta, formando uma depressão e, conseqüentemente, um polimento desta região, principalmente no caso dos motores do ciclo diesel.

Por definição, lubricidade é a característica de um lubrificante que causa uma diferença no atrito sob condições de lubrificação de camada limite quando os demais fatores do sistema, exceto o próprio lubrificante, são mantidos constantes. Quanto maior a lubricidade, menor o atrito (JOAQUIM, 2007; FELTER, 2007), ou seja, a lubricidade é a capacidade de um fluido ou sólido de evitar a fricção e o desgaste entre superfícies sob carga (MATTOS, 2012). Assim, concluiu-se que a lubricidade é fornecida por componentes do combustível, como, por exemplo, a quantidade de substâncias policíclicas aromáticas ou compostos poliaromáticos e cadeias orgânicas contendo compostos de enxofre, oxigênio e nitrogênio, que formam uma barreira protetora na superfície do metal e não está diretamente ligada à sua viscosidade (SOUZA, 2010; MATTOS, 2012).

A lubricidade do diesel tem se tornado uma grande preocupação para as indústrias desde o momento em que se iniciou o processo de diminuição do percentual de enxofre do combustível, o que causou uma diminuição na capacidade lubrificante, provocando desgastes excessivos no sistema da bomba injetora que é lubrificada pelo próprio combustível (MATTOS, 2012). O biodiesel apresenta propriedades lubrificantes bem superiores ao diesel convencional. A adição de 1% de biodiesel ao diesel já acarreta um aumento de 65% na lubricidade do combustível (NICOLAU et al., 2014). Esta característica traz ao biodiesel a possibilidade de incremento em sua utilização, visto que as atuais regulamentações, no Brasil e no mundo, apontam para a redução no nível de emissões, principalmente nos teores de enxofre, que é o terceiro elemento mais abundante presente em grande quantidade no diesel fóssil, responsável pela sua lubricidade (MATTOS, 2012).

À medida que o teor de enxofre no combustível vem sendo cada vez mais reduzido, o óleo lubrificante deve tornar-se uma importante fonte de SO<sub>2</sub> no gás de escape. Óleos lubrificantes possuem tipicamente de 4000 a 10000ppm de enxofre, basicamente como parte do pacote de aditivos. Aditivos antidesgaste tipicamente contêm zinco, enxofre e fósforo (CAPANA, 2008). O óleo diesel possui enxofre quimicamente ligado à sua estrutura. A quantidade de enxofre depende da qualidade do óleo cru. No Brasil, o tipo do petróleo extraído é chamado parafínico ou pesado, e tipicamente apresenta concentrações do produto superiores aos óleos do tipo leve ou naftênico, mais comuns na Europa e Estados Unidos, e aos componentes

utilizados no processo de mistura. As refinarias podem reduzir o teor de enxofre do óleo diesel por meio de tratamento com hidrogênio. O hidro-tratamento utilizado para remover o enxofre remove também componentes que melhoram a lubricidade do combustível, por exemplo, os poliaromáticos (CAPANA, 2008). Portanto, combustíveis de baixo teor de enxofre tipicamente requerem aditivos para recuperação da lubricidade, para assim evitar danos aos componentes do sistema de injeção de combustível.

Em testes realizados com vários percentuais de biodiesel ao diesel fóssil, verificou-se que essa adição trouxe aumentos significativos à lubricidade dos combustíveis. Foi constatado que esse acréscimo deve ser de 5 a 6%, para que seja atingida a lubricidade do diesel sem enxofre (S10) e, assim, um nível capaz de atender às recomendações de órgãos reguladores internacionais (Mourad, 2006 in SOUZA, 2010).

Na análise da lubrificação do motor, Masjuki et al. (2013) salientam que algumas propriedades são de extrema importância, como a viscosidade, a qual, quando mais elevada, indica que o lubrificante está deteriorando a partir de qualquer contaminação ou oxidação, ao passo que uma diminuição geralmente indica a diluição do óleo de lubrificação. Esses autores recomendam que se determine a viscosidade a 100°C, por ser próxima da temperatura média do óleo durante a operação do motor. A densidade, na medição de densidade do óleo do motor durante o ensaio de resistência, a longo prazo, fornece informações necessárias sobre a contaminação com metais de desgaste e de diluição do óleo do motor com combustível. A densidade do óleo de motor usado aumenta principalmente devido à adição de detritos de desgaste, à diluição do combustível e à elevação do teor de umidade. A densidade das amostras de óleo do motor apresenta uma tendência crescente com o uso. Primeiro, o desgaste das peças do motor é mais rápido e a diluição com combustível também é iniciada. Assim, o efeito combinado destes fatores influencia na taxa de aumento da densidade no óleo do motor.

Na análise da contaminação do óleo lubrificante, o óleo do motor é basicamente contaminado devido ao desgaste de diferentes componentes do motor. Nos motores diesel, os componentes de desgaste mais críticos são camisa do

cilindro, anéis de pistão, pistão e pinos de pistão, rolamento, casquilhos, tucho, excêntrico, casquilhos do virabrequim, eixo de contato do virabrequim, guias de válvulas, sistemas de válvulas etc. – o que foi verificado em Fazal et al. (2011). Em um sistema de lubrificação do motor, as partículas de desgaste sempre permanecem em suspensão no óleo do motor. Portanto, o desgaste é ocasionado por detritos, os quais são originários de diferentes componentes no motor e são lavados pelos lubrificantes e, finalmente, se acumulam no cárter de óleo. Por outro lado, sobre os combustíveis de biodiesel, tem sido relatado que o oxigênio disponível pode diminuir as emissões de escape, mas também levar a um maior desgaste, nos combustíveis com elevado teor de enxofre. Assim, a condição do motor pode ser avaliada pela amostra de diversas partículas de desgaste disponíveis no óleo de lubrificação do motor durante o seu uso. As partículas que surgem são em geral as seguintes: ferro, cromo, alumínio, cobre, chumbo, magnésio e molibdênio.

No estudo de Mattos (2012) sobre o estudo de cada propriedade físico-química, após análises multivariadas, foi apontado que existe correlação da lubricidade com a condutividade elétrica, a concentração ou teor de enxofre e o teor ou concentração de triaromáticos presentes em combustíveis. O estudo mostrou que a lubricidade não está correlacionada a propriedades físicas como viscosidade e densidade, e sim com a composição química e as propriedades elétricas do combustível, as quais estão ligadas há compostos com caráter polar permanente. A espectroscopia de impedância elétrica (EIE) foi a técnica investigadora utilizada. As conclusões foram as mesmas de Souza (2010), em relação aos aromáticos, enxofre e viscosidade. Concluiu-se ainda que o biodiesel melhora a lubricidade, ponto de fulgor e viscosidade. Acima de 3% de biodiesel (MATTOS, 2012), os acréscimos deixam de ser significativos, diferenciando um pouco do percentual apontado por Souza e mostrado anteriormente.

Para Fazal et al. (2013b), a qualidade dos combustíveis é consideravelmente afetada pelo seu nível de lubricidade, a qual é essencial para prolongar a vida da máquina-motor, pois fornece proteção para as superfícies em movimento contra o desgaste. Para alguns componentes do motor do veículo, tais como injetores de combustível e bombas, a lubricidade é muito importante porque eles são lubrificados pelo próprio combustível. No motor de automóvel, a temperatura da entrada de

combustível parece estar acima de 60°C, o que também pode influenciar a lubricidade. Os autores destacam ainda que a oxidação do biodiesel não depende só dos seus componentes insaturados, mas também da concentração de impurezas, antioxidantes naturais dos biocombustíveis e das condições de armazenagem (temperatura, luz e umidade). Eles acreditam que o efeito de oxidação na lubricidade é crucial e que a boa lubrificação também é importante para reduzir o consumo de energia e, conseqüentemente, o atrito das peças automotivas.

Em Habibullah et al. (2015) encontra-se que o biodiesel contém quantidades elevadas de oxigênio (O), com teor médio em torno de 11%, o que pode reduzir o desgaste e o atrito. Sendo um elemento polar, o oxigênio ajuda a formar maiores cadeias de ácidos carboxílicos, que, quando possuem mais ligações com mais carbonos, apresentam efeitos lubrificantes entre as superfícies de contato, auxiliados pela presença de ácidos graxos alifáticos em *Calophyllum inophyllum* (CIB). Este ácido graxo melhora a propriedade de lubrificação através do desenvolvimento de películas lubrificantes.

De acordo com outros pesquisadores investigados por Habibullah et al. (2015), o comprimento da cadeia do ácido graxo engrossa o filme e, assim, aumenta a área da superfície protegida. Estas películas protetoras podem reduzir a energia térmica em contato deslizante e melhorar a capacidade de lubrificação no processo. Também relataram que os vestígios de componentes combustíveis presentes no biodiesel, incluindo éster de metila, monoglicéridos, diglicéridos e ácidos graxos livres, podem também melhorar a lubricidade do biodiesel. Um valor alto de FTP (parâmetro de temperatura Flash) corresponde ao bom desempenho de lubrificação e a uma baixa possibilidade de desagregação da película lubrificante. O valor FTP para cada combustível aumenta com a diminuição da carga de desgaste. Além disso, o aumento gradual de FTP tem uma tendência semelhante com o aumento da concentração de biodiesel, exceto no caso de CIB20. O biodiesel CIB20 exibe FTP quase semelhante (96,48) ao do CIB100 (98,85) e maior do que todas as outras amostras de combustível; considerando que o valor mínimo FTP foi atribuído ao combustível diesel (48,61) (HABIBULLAH et al., 2015). O FTP é um número único, usado para expressar a temperatura de flash crítico na qual um lubrificante irá falhar sob condições dadas (em que uma carga  $W$  (kg) é aplicada e  $d$  é o diâmetro médio

da cicatriz de desgaste (mm)).

O óleo lubrificante tem várias funções, dentre elas auxiliar no resfriamento dos componentes internos do motor e diminuir o atrito entre as partes móveis. Quando ocorre a combustão no topo do pistão, o calor gerado é dissipado para os anéis (principalmente o anel da primeira canaleta) que, por sua vez, transferem este calor para a parede do cilindro e para o óleo lubrificante ali existente. A película de óleo existente entre os anéis e o cilindro, apesar de ser muito fina, reduz consideravelmente o atrito, evitando o contato direto do metal com metal. Se neste momento ocorrer a falta de lubrificação, um problema de superaquecimento se instala e os anéis apresentam sinais de escoriações “*scuffing*” na face de trabalho ver Figura 3.4 (MAHLE, 2012).



Figura 3.4. Imagem mostrando escoriações “*scuffing*” nos anéis (MAHLE, 2012).

Três são as principais causas da deficiência de lubrificação:

- Deficiência do sistema de injeção e/ou carburação

As principais causas da lavagem do cilindro são quando a bomba e os bicos injetores estão desregulados no que diz respeito à alteração do débito de óleo diesel, à rotação da bomba injetora, ao sincronismo entre o regulador e a bomba, ao sincronismo entre os elementos da bomba injetora, à projeção e pressão de abertura dos bicos injetores fora do recomendado e à alteração do topo do pistão no caso dos motores ciclo diesel. Antigamente, para os motores Ciclo Otto, o "grande vilão" era o carburador com aplicação errada e/ou desregulado. Com o advento da injeção eletrônica, este problema diminuiu bastante. Caso ocorra, isto provocará a retirada do óleo lubrificante da parede do cilindro. Tanto no motor diesel como no Otto, a insuficiência de óleo lubrificante no cilindro irá aumentar o atrito e o aquecimento dos

anéis, que podem chegar a soltar placas e iniciar o processo de engripamento (travamento do cilindro), ou mesmo desgastar excessivamente o cilindro (MAHLE, 2012).

- Deficiência do sistema de lubrificação

A bomba de óleo lubrificante desgastada reduzirá sua capacidade de bombeamento, tendo, como consequência, a diminuição da pressão em todo o circuito do óleo, comprometendo assim a lubrificação do motor, levando-o a sofrer os danos anteriormente citados (MATTOS, 2012; MAHLE, 2012).

- Deficiência da lubricidade do óleo combustível

A diminuição da lubricidade do lubrificante pode ocasionar um aumento no desgaste dos anéis, pistões e camisa (ALMEIDA et al., 2013 e MATTOS, 2012). Fazal et al. (2011) encontraram que o uso de álcool pode melhorar o desempenho para o biodiesel sempre que misturado com o diesel. No entanto, o uso de álcool (metanol/etanol) tem também algumas limitações, como menor capacidade de lubrificação, redução de inflamabilidade e número de cetano, maior volatilidade e menor miscibilidade, o que pode levar a um aumento das emissões de hidrocarbonetos não queimados. O etanol, por exemplo, tem um índice de cetano de 6, e o metanol, uma classificação de 35, enquanto que para o diesel e biodiesel varia de 40 a 52 e de 48 a 61, respectivamente. Além disso, o uso direto de álcoois como combustível pode provocar a corrosão de várias partes do motor, fato que ocorreu no Brasil com o advento do Proálcool.

### **3.4.1. Etapas de Desgaste**

Para Garcia (2003), os sistemas de desgaste geralmente compreendem duas fases: de assentamento ou amaciamento e o progressivo.

A primeira fase ocorre nas superfícies ainda não deformadas e o desgaste promove um alisamento com a diminuição da rugosidade inicial e acomodação entre as superfícies. Além disso, observa-se que no período de amaciamento são formadas as camadas encruadas, camadas protetoras de óxido ou filmes adsorvidos. Durante o período de amaciamento ou conformação entre as

superfícies, o carregamento não pode ser excessivo. Se a lubrificação for deficiente e os veios de grafita não estiverem expostos, no caso de ferro fundido, poderá ocorrer o contato metal-metal e o mecanismo de *scuffing* poderá se manifestar em uma eventual sobrecarga.

As mudanças que ocorrem na superfície e nas camadas subsuperficiais provocam deformações plásticas, mudando com isso a microestrutura e a textura cristalográfica. Essas mudanças ocorrem devido ao processo dissipativo de energia devido ao atrito e ao aumento decorrente da temperatura que afeta as propriedades mecânicas. O tempo de amaciamento para motores em dinamômetro e veículos de estrada tem duração de aproximadamente 12 horas. Após o período de amaciamento, ocorre o período de desgaste progressivo, com taxas menores e praticamente constantes.

Ainda em Garcia (2003), encontra-se que a predominância de um ou outro mecanismo de desgaste, bem como o comportamento do atrito, depende das condições de funcionamento (carga, velocidade e temperatura), das condições de interfaces (propriedade e/ou presença de contaminantes do meio lubrificante, presença de partículas duras), das propriedades mecânicas (dureza) e das condições estruturais (microestrutura do material, topografia, geometria), que definem o conjunto de parâmetros do tribossistema que afetam o desgaste.

O exemplo clássico, segundo o autor, é a influência da carga normal e da velocidade sobre os regimes de desgaste, pois os mesmos influem na taxa de deformação plástica e temperatura induzida por atrito nas superfícies, que podem vir a mudar a constituição microestrutural e alterar as propriedades mecânicas ou, ainda, modificar a taxa de oxidação superficial. Nesse caso, envolve também a temperatura às quais os materiais estariam submetidos. Dependendo das condições de operação e das modificações microgeométricas ocorridas na superfície, a área real de contato se altera, bem como o efeito hidrodinâmico parcial da lubrificação causado pelas asperezas. Também as forças que agem nos pontos de contato podem mudar, provocando modificações nas características do desgaste.

### 3.4.2. O Desgaste

Praticamente todos os ramos da engenharia enfrentam problemas de desgaste. As perdas econômicas consequentes de desgastes são muitas e não envolvem tão somente os custos de reposição, mas também de depreciação de equipamentos, perdas de produção, perda de competitividade e, finalmente, de oportunidades de negócios. Outro fator significativo está na perda de eficiência em um equipamento, decorrente de desgaste, pois este acarreta na diminuição de desempenho e aumento no consumo de energia (ESTEVES, 2011).

Segundo a Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development) da ONU, o desgaste pode ser definido como um dano progressivo que envolve a perda de material, a qual ocorre na superfície de um componente, como resultado de um movimento relativo a um componente adjacente.

Segundo vários autores, entre eles: Dwivedi, D.K. (2010) in (KRASZCZUK, 2017); Li et al. (2015); Esteves (2011); Rabinowicz (2013); Castro (2015); Mattos (2012); Pérez y Moreno (2013) e Garcia (2003), podem ser salientadas quatro ou cinco formas de desgaste mais importantes: por adesão; por abrasão; por fadiga superficial; por corrosão e por erosão. Mas outras formas de desgaste associadas podem aparecer, como; fadiga de contato, fadiga térmica, desgaste por fricção e desgaste por cavitação (RABINOWICZ, 2013), porém todos serão comentados a seguir.

Com o objetivo de descrever os desgastes, os seguintes autores foram analisados: Li et al. (2015); Esteves (2011); Rabinowicz (2013); Castro (2015); Mattos (2012); Pérez y Moreno (2013) e Garcia (2003) e servem de referência ao postulado abaixo.

A Figura 3.5, mostra alguns dos mecanismos de desgaste apresentados por Kraszczuk (2017) e retirados de Dwivedi (2010).

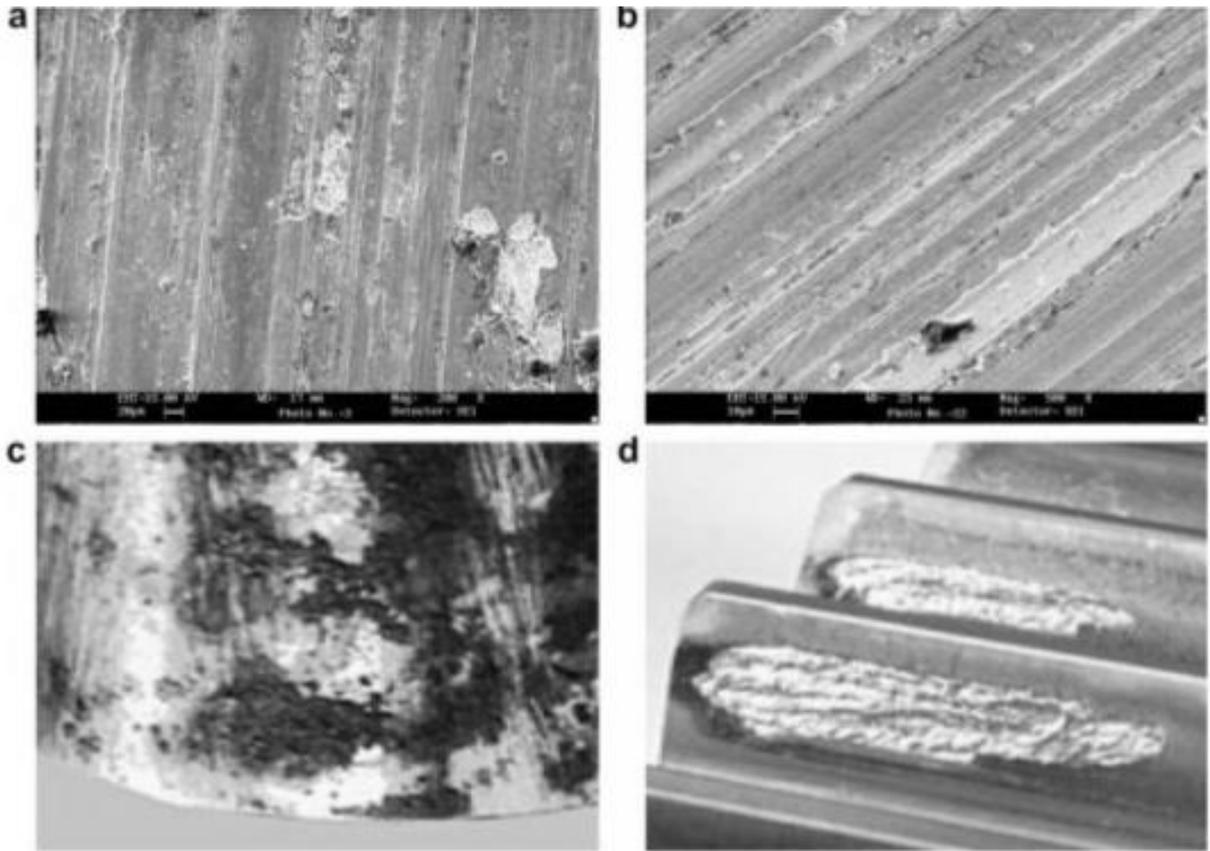


Figura 3.5. Mecanismo de Desgaste. (a) Desgaste Adesivo, (b) Desgaste Abrasivo, (c) Desgaste Corrosivo e (d) Desgaste por Fadiga de Contato (Dwivedi, D.K. 2010) in (KRASZCZUK, 2017).

### **Desgaste por Adesão**

O desgaste por adesão é a forma mais comumente encontrada, sendo que sua teoria tem as mesmas bases da teoria do atrito por adesão (ESTEVES, 2011). Esse tipo de desgaste se dá pela junção localizada no meio de superfícies sólidas em contato, o que causa transferência de partículas sólidas de um ponto da peça à outra parte, ou perda de uma dessas partículas. Materiais sólidos tendem a se unir com esse tipo de desgaste.

Na prática, qualquer superfície possui asperezas, até mesmo aquelas extremamente limpas ou polidas possuem sinuosidades, que tendem a junção à medida que entram em contato, a adesão ocorre nos contatos destas asperezas. A área de contato real entre duas superfícies é muito inferior à área aparente entre duas superfícies, de tal forma que a pressão entre essas asperezas pode ser extremamente alta, o que pode levar à deformação plástica em algumas asperezas em contato muito íntimo e, assim, a uma condição em que estas sinuosidades se

ligam e provocam a ligação entre essas superfícies.

Tal desgaste em geral ocorre em cooperação com algum outro tipo de desgaste, pois a adesão ocorre em função da perda de partículas e realojamento.

### **Desgaste Abrasivo**

O desgaste abrasivo é o tipo de desgaste ocasionado por partículas e protuberâncias localizadas nas superfícies dos materiais, que são forçadas umas contra as outras ao longo da superfície de contato. Logo, a perda de material ocorre devido ao roçamento das partículas com os materiais atritados, desgastando as superfícies dos mesmos.

O desgaste abrasivo pode ser de dois tipos: O desgaste abrasivo entre dois corpos: Ocorre quando as partículas responsáveis pelo desgaste dos materiais se encontram aderidas à superfície dos mesmos. Ou seja, as protuberâncias ainda se encontram junto aos materiais atritados. Já o desgaste abrasivo entre três corpos: ocorre quando as partículas responsáveis pelo desgaste dos materiais não se encontram aderidas a superfície dos mesmos, ou seja, elas estão soltas entre as duas superfícies atritadas, fazendo com que o atrito ocorra entre três corpos distintos.

O desgaste abrasivo pode ocasionar uma série de problemas no material, principalmente em sua superfície, tais como:

**Corte:** Ocorre quando o roçamento das partículas abrasivas ocasiona a remoção de uma pequena lasca de material, criando um pequeno sulco na superfície do material.

**Fratura:** Devido ao desgaste constante, podem ocorrer fraturas na superfície do material. Geralmente, este tipo de problema ocorre em materiais frágeis, como cerâmica.

**Destacamento de grão:** Ocorre quando o atrito entre os materiais faz com que

percam partículas de sua superfície, as quais, por sua vez, se tornam partículas de desgaste soltas entre os materiais, ocasionando desgaste entre três corpos.

Para Hutchings (PINTAUDE, 1998) os mecanismos de desgaste abrasivos podem ser classificados em dois tipos: aqueles que são controlados por deformação plástica e os que são controlados por fratura frágil.

O desgaste abrasivo é um dos principais problemas da mecânica atual, ocasionado pela má utilização de lubrificantes. Uma das melhores maneiras de evitar e reduzir o desgaste abrasivo é a utilização de lubrificantes, que são fluídos que tendem a reduzir o atrito entre os materiais. Contudo, é importante que a espessura do filme lubrificante seja maior que as partículas abrasivas, pois caso contrário o desgaste não será completamente evitado.

### **Desgaste por Fadiga**

Definição de fadiga apresentada pela norma ASTM E1823-96 (1996): “É o processo de mudança localizada, permanente e progressiva na estrutura, que ocorre no material sujeito a flutuações de tensões e deformações que pode culminar em trincas ou completa fratura depois de um número suficiente de flutuações”. De forma mais simples, pode-se dizer que a fadiga é um tipo de desgaste atribuído a carregamentos cíclicos de duas superfícies em contato mútuo e usualmente ocorre sem perdas progressivas de material. Este tipo de desgaste pode ocorrer de duas formas:

### **Fadiga de Contato**

O mecanismo de falha chamado de fadiga de contato ou fadiga na superfície é bastante comum em alguns componentes mecânicos como rolamentos, engrenagens, rodas de trem e cilindros de laminação. O desgaste devido à fadiga na superfície pode ser caracterizado pela formação de trinca e descamação causada pelo repetitivo e alternado carregamento rolante e deslizante das asperezas na superfície dos sólidos em movimento relativo.

As propriedades dos materiais têm um importante papel no contato de fadiga. Um dos requerimentos básicos do material para rolamentos é ter suficiente dureza para resistir às tensões do contato e, para isso, é necessária manufatura de rolamentos, rolos e anéis com alta precisão. Aços com alta porcentagem de carbono são os materiais mais amplamente utilizados em contatos rolantes e são relativamente baratos, tendo uma dureza alta quando comparados a outros metais.

### **Fadiga Térmica**

É um modo de falha importante que ocorre em materiais e equipamentos submetidos a mudanças bruscas e cíclicas de temperatura, como em usinas termoelétricas e termonucleares, cilindros de laminação, turbinas a gás, motores a diesel, turbinas de aeronaves, entre outros. A fadiga térmica provoca tensões e deformações em componentes metálicos, causando danos semelhantes a choques térmicos repetitivos.

### **Desgaste por Corrosão**

A corrosão é um processo de transformação da superfície, que ocorre quando a peça interage química ou eletroquimicamente no meio em que está exposta.

### **Desgaste por Erosão**

O desgaste por erosão é caracterizado pela remoção de material por impacto na superfície de partículas sólidas presentes em determinado fluido. Esse tipo de desgaste é encontrado em peças de máquinas, tais como pás de ventiladores, exaustores industriais, pás de turbinas de hidrelétricas, distribuidores de adubos, tubulações, entre outros.

É importante observar tal fator de impacto porque as ligas aplicadas vão ser diferentes de acordo com o tipo de ambiente. No desgaste por erosão, em algumas situações, a peça chega a furar e perder a eficiência no processo, e finalmente a parar o equipamento.

O desgaste por erosão em baixa temperatura requer uma liga de carboneto de tungstênio, muito aplicado em temperaturas de até 450°C. Acima dessa temperatura, o aço carbono começa a ter corrosão e, a partir daí, torna-se necessária outra liga, por exemplo, de carboneto de cromo.

O carboneto de cromo suporta temperaturas de até 900°C sem corroer e tem elevadíssima resistência à erosão nesta temperatura. As principais situações de aplicação desse revestimento são peças de equipamento de jateamento, nas quais as partículas passam em altíssima velocidade em ângulos baixos e geram muito desgaste por erosão e em tubos de caldeira por exemplo.

### **Desgaste por Fricção**

Quando um corpo se desloca em contato com outro, existe uma força, chamada atrito ou fricção, em direção oposta à do movimento.

Esta força é proporcional à força de contato entre os corpos; a constante de proporcionalidade é chamada de coeficiente de atrito entre os corpos específicos, o qual varia de acordo com cada superfície e corpo.

Tal força existe porque as superfícies em contato não são perfeitas; há saliências e reentrâncias que se opõem ao movimento.

Se as superfícies forem lixadas e/ou se um lubrificante for usado, o coeficiente diminui muito porque estas saliências e reentrâncias desaparecem (pela lixa) ou ficam separadas umas das outras (lubrificante).

### **Desgaste por Cavitação**

O mecanismo de desgaste por cavitação ou corrosão por cavitação é uma forma de desgaste através de qualquer líquido que contenha bolhas gasosas ou vaporosas, que servem como núcleos de cavitação. Quando a pressão é reduzida a um determinado nível, as bolhas se tornam o repositório de vapor ou de gases

dissolvidos e, como resultado imediato, aumentam rapidamente de tamanho. Posteriormente, quando entram em uma zona de pressão reduzida, as bolhas tomam um tamanho reduzido, devido à condensação de vapores que contêm.

Este processo de condensação surge de modo rápido, acompanhado por choques hidráulicos, emissão de som, destruição dos laços materiais e outros fenômenos indesejáveis. Um aspecto crítico do processo de desgaste da cavitação é a destruição da superfície e o deslocamento de material causado pelo alto movimento relativo entre uma superfície e o fluido exposto. Como resultado de tais movimentos, a pressão local do líquido é reduzida, o que permite à temperatura do fluido chegar ao ponto de ebulição, formando pequenas cavidades de vapor. Quando a pressão retorna ao normal (sendo maior do que a pressão de vapor do fluido), implosões ocorrem, gerando as bolhas de vapor ou cavidades em colapso. Este colapso de bolhas provoca ondas de choque que produzem forças de alto impacto em superfícies metálicas adjacentes. Este encruamento causa fadiga e cavitação.

As causas do desgaste por cavitação estão relacionadas ao material empregado na construção da peça, ao acabamento e ao perfil hidráulico da superfície.

### **3.4.3. Mecanismos de Simulação do Desgaste**

Entende-se por testes tribológicos aqueles que envolvem o estudo de atrito, lubrificação e desgaste de materiais ou componentes. De acordo com a norma DIN 50322 (GARCIA, 2003), os testes ou simulação de desgaste podem ser divididos em seis categorias diferentes em componentes de motor:

- 1) Ensaio de campo;
- 2) Ensaio de bancada;
- 3) Ensaio de subsistemas;
- 4) Ensaio de componentes;
- 5) Ensaio de componentes modificados;
- 6) Ensaio modelo para sistemas deslizantes.

Ensaio de campo ou dinamométricos para a avaliação do comportamento quanto ao desgaste e atrito de componentes de motores têm altos custos e consomem muito tempo. Assim, o uso de simuladores em laboratório é uma alternativa que deve ser buscada, porque demanda menor tempo e custo de operação, sendo as simulações realizadas sob cargas ou velocidades mais elevadas, a fim de avaliar os materiais ou lubrificantes em condições extremas. Contudo, muitos cuidados devem ser tomados para que se possa utilizar os resultados obtidos nos testes, para que a transferência dos resultados para o caso real não se torne incerta. Nos testes padronizados, não ocorrem somente grandes taxas de desgaste, mas tem-se a atuação de diferentes mecanismos de desgaste. A possibilidade de transferir os resultados para o caso real só pode se concretizar se as mesmas condições de carregamento, a mesma estrutura do sistema tribológico e os mesmos mecanismos de desgaste predominarem (GARCIA, 2003). Vários esforços têm ocorrido para simular o comportamento tribológico de anéis e camisas, tentando-se chegar às condições reais de um motor. Para Garcia (2003), a maior dificuldade em se escolher um procedimento para testes de simulação está em como avaliar as condições impostas que representam a realidade.

Diversas configurações de corpos de prova dotados de movimento de escorregamento são utilizadas nos testes, entre eles o pino-sobre-disco, bloco-anel, anel-anel, esfera no plano, quatro esferas e arruelas que giram sob determinada pressão.

Fazal et al. (2011b), escolheram trabalhar com mecanismo de quatro esferas para testar o óleo de palma em uma análise de desgaste e atrito. Os autores (2013b) escolheram realizar a pesquisa usando máquina de desgaste de quatro bolas, com níveis de concentrações diferentes de biodiesel de palma. Os combustíveis investigados foram biodiesel (B100), diesel (B0) e três diferentes misturas de biodiesel, como B10 (10% de biodiesel no diesel), B20, B50. Os testes foram realizados a 75°C, sob uma carga normal de 40 quilos, durante 1 hora, a quatro velocidades diferentes, a saber 600, 900, 1200 e 1500 rpm. As superfícies desgastadas das bolas foram examinadas por SEM e os resultados mostraram que o desgaste e o atrito diminuíram com o aumento da concentração de biodiesel.

Fazal et al. (2013b), observaram que pesquisadores têm usado diferentes técnicas, tais como o equipamento tribômetro alternativo de alta frequência (HFRR) e a máquina de teste de quatro bolas, ainda que as propriedades de lubrificação de biodiesel sejam influenciadas pela temperatura, a oxidação e a absorção de umidade.

Fontalvo et al. (2006), utilizaram o dispositivo bola-em-disco nas experiências levadas a cabo em ar e temperatura ambiente, utilizando aço inoxidável austenítico e bolas de alumínio como contrafaces. As faixas de desgaste nos discos foram caracterizadas usando tanto o microscópio eletrônico de varredura como um perfilador ou profilômetro óptico.

Habibullah et al. (2015), com o objetivo de estudar as características tribológicas do biodiesel de *Calophyllum inophyllum* (CI) como potenciador de lubricidade, usaram o tribômetro de quatro bolas. O CI biodiesel foi produzido utilizando o processo de transesterificação e os combustíveis investigados foram: biodiesel puro (CIB100), 10% (CIB10), 20% (CIB20), 30% (CIB30) e 50% (CIB50) de biodiesel misturado com diesel e diesel puro. O experimento foi conduzido durante 300 segundos com temperatura constante de 27°C e velocidade de deslizamento constante de 1800 rpm em diferentes cargas de 40, 50, 63 e 80 kilos para todos os combustíveis testados. A análise elementar para o combustível testado foi realizada usando multianalisador de óleo (MOA) e as superfícies desgastadas da bola foram examinadas por SEM/EDX.

Li et al. (2015), usando uma máquina de pino-sobre-disco, simularam a parte deslizante de contato dos dentes da engrenagem lubrificadas na fronteira e regiões, comparando as características tribológicas de dois materiais: engrenagem sinterizada e engrenagem padrão. A comparação considerou mecanismos de danos, desgaste e atrito entre estes materiais em diferentes configurações.

Lyu et al. (2015), utilizaram o mecanismo de pino-sobre-disco no estudo de desgaste da roda sobre trilho em uma ferrovia, e constataram que a temperatura, a umidade e a oxidação são fatores ambientais não controláveis, mas contaminantes,

tais como areia, pedras de lastro, folhas mortas e partículas autoproduzidas, as quais são inevitavelmente introduzidas e afetam significativamente o desempenho de desgaste durante a operação ferroviária, interferindo no tipo de desgaste produzido.

Em Yang (2005), no estudo do desgaste de pastilhas de metal duro de tungstênio como ferramenta em contra trabalho a quente, foi utilizado o mecanismo de pino-sobre-disco, considerando que o teste de desgaste pino-sobre-disco tem a vantagem de uma configuração simples e, conseqüentemente, custo inferior a outros testes para determinar a vida útil de um material. Os parâmetros experimentais selecionados neste trabalho de pesquisa foram: (i) as cargas de 40 e 50 kgf aplicada; (ii) as velocidades de 100 e 130 m / min; (iii) a temperaturas de 25, 200, 400 e 600°C; (iv) distâncias de 1000 a 16.000 metros. Foram utilizados dois tipos de configurações de inserção (PIN). Em um segundo caso, a carga aplicada foi ajustada para 500N para todos os experimentos. Durante a experiência do pino em movimento, o torno mecânico CNC foi programado com uma velocidade de deslizamento constante de 100 m/min e a alimentação do pino era 0,030 mm/revolução com um tempo total de ensaio de 38 minutos, dando uma distância de deslizamento de 3800 metros. Para Yang (2005), o ensaio de desgaste pino-sobre-disco pode ser usado para simular o processo de desgaste adesivo em qualquer tipo de metal. Durante o procedimento experimental, cada situação ocorreu com três repetições. Cada inserto foi usado para quatro testes de desgaste, uma vez que tinham quatro lados de flanco idênticos. A inserção foi pesada no início e no final de cada teste, para determinar a sua perda de peso, com uma precisão de 0,0001 gramas. A perda de peso foi depois transformada em perda de volume, dividindo-o com a densidade medida. Salienta-se que a taxa de desgaste pode aumentar se aplicada uma pressão mais elevada durante o teste, uma vez que o número total de asperezas pode também aumentar. Entende-se que o coeficiente de desgaste medidos devam ser determinados com a equação do coeficiente de desgaste padrão de Archard (Equação 3.1). Também se entende que os valores do coeficiente de desgaste medido são afetados pela temperatura de ensaio; quanto mais alta for a temperatura de ensaio, mais alto será o coeficiente de desgaste.

A Equação de Archard, tanto para Esteves (2011) quanto para Castro (2015),

baseado em trabalhos de Hutchings (1992) e Norton (2004), representa o ponto de partida para os estudos sobre desgaste. Ela 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  $k$ , sendo usada para modelar o desgaste por adesão e abrasão conforme apresentado a seguir:

$$V = \frac{k.F.L}{H} \quad (3.1)$$

em que:  $V$  = Volume desgastado do material analisado ( $\text{mm}^3$ );  
 $F$  = Força normal (kgf);  
 $L$  = Comprimento ou distância de deslizamento (mm);  
 $H$  = Dureza a penetração em  $\text{kg}/\text{mm}^2$  ou psi;  
 $k$  = Coeficiente de desgaste.

O coeficiente de desgaste ( $k$ ) é uma propriedade adimensional, sendo um importante meio de comparação do rigor dos processos de desgaste em sistemas tribológicos (CASTRO, 2015).

-  $k$  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 para cada sistema analisado.

- O desgaste aumenta com a carga. No entanto, a linearidade da equação vale para intervalos pequenos.

- Geralmente, o desgaste é inversamente proporcional à dureza do corpo mole. Por isso, o aumento da dureza superficial para redução do desgaste é uma prática comum em projetos.

Ainda em Castro (2015), encontramos informações trazidas de diversos autores, por exemplo:

- Para Norton (2004), valores de  $k$  para os mesmos materiais, sendo testados nas mesmas condições, variam em um fator aproximado de dois (2) de ensaio para ensaio, por razões desconhecidas, acreditando-se ser devido à dificuldade de reproduzir precisamente as mesmas condições de ensaio. Assim ele sugeriu que, ao

se realizar o teste de desgaste em duas amostras de um mesmo material e calculado o coeficiente de desgaste, possa ter diferença entre os valores encontrados, e mesmo assim são considerados para efeitos de análises, esta diferença pode ser o valor encontrado em uma das amostras, multiplicado por dois como sendo um coeficiente de segurança.

- Para Tomanik (2000), apesar das limitações, provavelmente seja a única forma de análise de desgaste que tenha ampla aceitação, sendo válida, desde que os regimes envolvidos não se alterem.

- Para 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).

Li et al. (2015), salientam ser necessário extremo cuidado ao variar a velocidade de deslizamento, porque pode ser necessário ter diferentes espessuras de película mínima para lubrificação. Recomenda-se que cada teste compreenda três distâncias de deslizamento: de 600 metros no primeiro passo, 1.800 metros no segundo, e 3600 metros no terceiro. A topografia da superfície do disco de teste foi medida entre cada passo utilizando um instrumento caneta. A velocidade escolhida foi de 0,5 m/s e 4,0 m/s.

Nas análises de desgaste do disco, é considerado o raio da pista de desgaste obtido no ensaio, sendo o desgaste do pino desconsiderado (material muito mais duro que o material do disco), segundo a norma ASTM G99-04 (2004).

Com a Equação 3.2, determina-se a perda de volume do disco ensaiado:

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

em que: V= Perda de volume (mm<sup>3</sup>);

R= Raio da pista de desgaste (mm);  
w = Largura da pista de desgaste (mm); e  
r = Raio do pino (mm).

O parâmetro adimensional obtido através da perda de volume é o coeficiente de desgaste (k), obtido pela Equação 3.3:

$$k = \frac{HB.V}{F.L} \quad (3.3)$$

em que: k= Coeficiente de desgaste;  
V= Perda de volume (mm<sup>3</sup>);  
HB= Dureza Brinell;  
F= Carga aplicada no pino durante o ensaio (kg); e  
L= Distância percorrida (mm).

Desta maneira, o coeficiente de desgaste (K) depende diretamente do volume desgastado do disco, da dureza da amostra, da carga aplicada e da distância percorrida.

Syahrullail et al. (2013), também utilizaram o método pino-sobre-disco, girando a uma carga normal (10 N), de acordo com a Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM) G99, para análise da oleína de palma, principal lubrificante usado no teste. Os testes foram realizados usando um fluxo de lubrificante direto de oleína de palma e óleo hidráulico, em um disco liso em duas velocidades diferentes (0,4 m/s a 4 m/s). Foram realizados três testes para cada um dos parâmetros e condições e o pino utilizado foi de 8mm de diâmetro, 30mm de comprimento, e raio do hemisfério de 4mm, sobre um disco liso de aço inoxidável. A densidade do aço inoxidável é de 7,48 g/cm<sup>3</sup>. No final de cada teste, uma lixa com um tamanho de grão do material abrasivo (1000 µm) foi usada para o acabamento da superfície de medição. As superfícies dos pinos e do disco foram posicionadas em paralelo para assegurar o máximo contato. O princípio de deslizamento consistiu de um pino carregado, pressionado contra um disco rotativo horizontal num simples banho de óleo lubrificante. Nesta experiência, a carga foi constante (10 N). A

superfície acabada da amostra e o desgaste do disco foram medidos antes e depois da experiência. A duração da experiência foi de uma hora, tal como recomendado pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM). Todos os dados relacionados com as forças de atrito foram recolhidos e convertidos no coeficiente de atrito. Também foi avaliada a taxa de desgaste. Os resultados encontrados sob condições experimentais são que a oleína de palma RBD apresentou melhor desempenho antifricção e antidesgaste, quando comparada ao óleo mineral hidráulico. Os coeficientes de atrito e de desgaste, para ambos óleos usados como lubrificantes, aumentaram com o aumento da velocidade de deslizamento, e o ácido graxo livre insaturado desempenhou um papel importante na redução do coeficiente de atrito e desgaste.

Habibullah et al. (2015) e Yang (2005) recomendam que depois de cada teste os discos sejam coletados para medir o diâmetro da marca de desgaste e seja realizada análise com MEV., ou em microscópio óptico com uma boa resolução, por exemplo, de 0,01mm (segundo ASTM D4172), que poderia ser usado para calcular o diâmetro da marca de desgaste da bola. Deve-se ter o cuidado de realizar os testes com temperatura ambiente e umidade do ar controladas e, se não for possível, deve-se pelo menos considerar os valores.

#### 3.4.4. Tribômetro Pino-sobre-Disco

O tribômetro é baseado na norma ASTM G99-04 com uso de um aparelho pino-sobre-disco (Figura 3.6), utilizado em testes de desgaste simulando um contato deslizante.

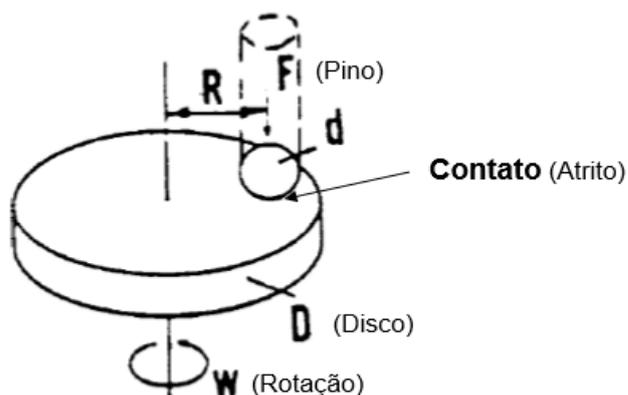


Figura 3.6. Representação esquemática de teste de desgaste do pino-sobre-disco (ASTM G99-04).

Na Figura 3.6,  $F$  é a força normal sobre o pino (14,7N),  $d$  é o diâmetro do pino ou esfera (10mm),  $D$  é o diâmetro do disco (114mm), o símbolo  $R$  representa o raio da pista de desgaste (49,5mm) e  $W$  é a velocidade de rotação do disco (300rpm).

Para o teste de desgaste pino-sobre-disco, dois elementos são obrigatórios. Um deles, um pino com uma ponta arredondada, é posicionado perpendicular ao outro, geralmente um disco circular plano. Uma esfera, mantida rigidamente, é frequentemente utilizada como a amostra de pino. O pino cilíndrico ou pino típico de esfera tem diâmetros que variam de 2 a 10mm. A máquina de teste faz com que tanto o modelo de disco horizontal rotativo ou o pino girem sobre o centro do disco. Em ambos os casos, o caminho de deslizamento é um círculo na superfície do disco. O plano do disco pode ser orientado horizontal ou verticalmente. O elemento pino é pressionado contra o disco a uma carga especificada normalmente por meio de um braço ou alavanca com pesos unidos para fornecer a carga, ou um pino de peso morto carregado (calibrado).

Este método de teste pode ser aplicado a uma variedade de materiais. A única exigência é a de que as amostras com as dimensões especificadas sejam preparadas e suportem as tensões impostas durante o teste, sem falha ou flexão excessiva. Os materiais ensaiados devem ser descritos por dimensões, acabamento da superfície, tipo de material, forma, composição, microestrutura, tratamentos de processamento e de dureza (se for o caso).

Os diâmetros dos discos de amostra típica podem variar de 30 a 100mm e ter uma espessura na faixa de 2 a 10mm. O acabamento de superfície deve ter baixa rugosidade, pois superfícies ásperas fazem a medição da pista de desgaste difícil. É importante que seja indicado o tipo de preparação da superfície no relatório do ensaio.

Os resultados de desgaste são relatados como perda de volume em milímetros cúbicos para o pino e o disco separadamente. Quando dois materiais diferentes são testados, recomenda-se que cada material seja testado em ambas as posições do pino e do disco.

A quantidade de desgaste é determinada por medição das dimensões lineares apropriadas de ambas as amostras, antes e depois do teste, ou por meio da pesagem de ambas as amostras, antes e depois do ensaio. Se forem utilizadas as medidas lineares do desgaste, a mudança de comprimento ou de alteração da forma da cavidade, e a profundidade ou a forma na mudança da pista de desgaste do disco (em milímetros) são determinados por meio de qualquer técnica metrológica adequada, tal como medidor de distância eletrônico ou a caneta de perfis. As medidas lineares de desgaste são convertidas para o volume (em milímetros cúbicos), usando as relações geométricas adequadas. As medidas lineares de desgaste são usadas com frequência na prática, uma vez que a perda de massa é muitas vezes demasiadamente pequena para ser medida com precisão.

Os resultados de desgaste são usualmente obtidos através da realização de um teste para uma distância de deslizamento selecionado e para os valores selecionados de carga e velocidade. Os resultados de desgaste podem, em alguns casos, ser classificados como parcelas de volume de desgaste contra o deslizamento em distância, utilizando diferentes amostras para diferentes distâncias. Tais parcelas podem exibir relações não lineares entre volume de desgaste e distância sobre certas porções da distância de deslizamento total e relações lineares sobre outras porções. As causas para tais relações diferentes incluem processos iniciais de ligação, transições entre regiões de diferentes mecanismos de desgaste dominantes, e assim por diante. A extensão de tais períodos não lineares depende dos detalhes do sistema de teste, dos materiais e das condições de teste.

Não é recomendado que dados de profundidade de desgaste contínuo obtidos a partir de medidores de sensoriamento de posição sejam usados, por causa dos complicados efeitos dos resíduos de desgaste e de transferência de filmes presentes no espaço de contato, além de interferências de expansão térmica ou da contração dos materiais.

A faixa de desgaste no disco é um círculo, que envolve várias passagens do pino de desgaste na mesma faixa, devido à posição do disco ser pré-estabelecida, com uma carga estipulada.

O motor deve ser montado de tal maneira que a sua vibração não venha a afetar o ensaio. Velocidades rotativas estão tipicamente na faixa de 0,3 a 3,0rad/s (60 a 600 rpm).

A máquina é equipada com um dispositivo contador de rotações, que irá gravar o número de rotações do disco e, preferencialmente, ter a capacidade de desligar a máquina depois de um número pré-selecionado de revoluções.

Em um sistema típico, o suporte de amostra estacionária está ligado a um braço de alavanca que tem um eixo de rotação. A adição de pesos, como uma opção de carregamento, produz uma força de teste proporcional à massa dos pesos aplicados. Idealmente, o pivô do braço deve estar localizado no plano do contato de desgaste, para evitar forças de carga estranhas, devido ao atrito de deslizamento. O suporte do pino e do braço deve ser de construção sólida para reduzir o movimento de vibração durante o teste.

Os instrumentos para obter medidas lineares de desgaste devem ter uma sensibilidade de 2,5  $\mu\text{m}$  ou melhores. Qualquer modo usado para medir a perda de massa da amostra de ensaio deve ter uma sensibilidade de 0,1 mg ou melhor; e em situações de desgaste baixo pode ser necessária maior sensibilidade (ASTM G99-04, 2004).

### **3.4.5. Quantificação do Desgaste**

A quantificação do desgaste em geral é feita por medição da taxa de desgaste, usando-se a massa desgastada pela distância percorrida (g/m) ou a largura da pista desgastada pela distância percorrida (mm/m) ou a massa desgastada pelo tempo de duração do ensaio (g/h) ou a largura da pista desgastada pelo tempo de duração do ensaio (mm/h). Um procedimento comum para a obtenção de taxas de desgaste de anéis em motores é a medição de variações lineares e de massa, por determinado tempo de ensaio. Em laboratório, a medição mais comum é a perda de dimensão linear ou de massa, por determinada distância percorrida.

### *Perfilometria*

Outra forma de quantificação do desgaste é através de perfilometria da face de contato dos anéis e da medição da forma geométrica do furo dos cilindros. Com este método, é possível observar as regiões que sofreram maior perda de dimensão linear e que, portanto, tiveram maior contato durante o ensaio. Para cilindros (GARCIA, 2003), um inconveniente na realização da perfilometria da parede interna está relacionado com a deformação geométrica que essas paredes podem apresentar, por estarem sujeitas a cargas térmicas diferenciadas ao longo da parede durante o ensaio, mascarando a real perda de material.

### *Fragmentos*

Conhecido também por *weardebris*, no caso de sistemas lubrificados efetua-se análises das partículas presentes no óleo lubrificante por ferrografia. Essa é uma análise difícil, como observado por Hutchings (1992) (in GARCIA, 2003), uma vez que sempre surgem dúvidas quanto à origem dos fragmentos, ou seja, não se tem certeza de que o fragmento encontrado seja uma partícula arrancada de determinado componente do sistema, ou um contaminante (GARCIA, 2003). No caso de fragmentos oxidados, torna-se ainda mais complicado, uma vez que este pode ser metálico quando arrancado da superfície. Em sistemas lubrificados, o lubrificante pode adsorver a partícula, tornando as informações distorcidas. Para Wright (1973) (in GARCIA, 2003), o desgaste da superfície leva à produção de partículas através de uma série de eventos característicos por adesão e mecanismos de transferência de partículas, ou por um processo mais direto de produção de partículas, semelhante à usinagem ou, em certos casos, falha em forma de fadiga superficial.

### **3.4.6. Análises dos Mecanismos de Desgaste**

Segundo Castro (2015), o desgaste é um termo amplo que engloba vários tipos de falhas, devido às quais ocorrem alterações na superfície da peça. Assim, o desgaste é um dano progressivo a uma superfície, causado pelo movimento relativo com outra substância.

Para Li et al. (2015), dependendo do mecanismo de desgaste específico, o desgaste é de um dos quatro tipos: desgaste abrasivo, desgaste adesivo, fadiga superficial e desgaste por corrosão, todos apresentados acima.

Hutchings (1992) (in CASTRO, 2015) propõe que o desgaste pode ser considerado leve quando resulta em superfícies suaves, sendo muitas vezes mais suaves que o desgaste original, ou severo, que resulta em superfícies ásperas, com ranhuras profundas, geralmente mais rugosas que a original.

Conforme Garcia (2003), o desgaste moderado é resultado de reações triboquímicas entre a superfície de contato e o ambiente do sistema, formando substâncias corrosivas (resíduos ácidos de combustão) que, quando ultrapassam determinado volume, fazem com que a alcalinidade do óleo não consiga a neutralização. Nestas condições, os valores médios de desgaste podem ser de 2 a 5 vezes acima do normal, com picos a 10% do curso do pistão partindo do ponto morto superior (PMS) dos anéis de primeiro canaleta.

O desgaste severo, no entanto, remove a camada de óxido, propiciando um contato metal-metal, e engloba todos os mecanismos em que haja grande deformação plástica (como o *scuffing*) e, conseqüentemente, maior desgaste.

Segundo Garcia (2003), o método mais comum de análise dos mecanismos de desgaste é a microscopia das superfícies de desgaste, na qual as determinadas regiões são submetidas a análise por microscopia óptica e de varredura eletrônica, conhecida como MEV. Utiliza-se também o microscópio eletrônico de transmissão MET para observar detalhes da estrutura cristalina das superfícies. A microscopia óptica possibilita a visualização genérica de mecanismos de desgaste predominante, como riscamento, trincamento, formação de *PITS* ou alterações térmicas na superfície. A microscopia eletrônica de varredura tem o recurso de profundidade de foco, que permite uma visão mais detalhada da superfície de desgaste, podendo-se observar as regiões de aderência de material, deformações plásticas, riscamento por partículas duras ou indicações sobre eventuais fenômenos de superfície. A microscopia de transmissão eletrônica é utilizada para estudar as estruturas dos materiais próximos às superfícies de desgaste e também observar possíveis

deformações.

Outras técnicas analíticas utilizadas são, por exemplo, a Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) e Espectroscopia por Comprimento de Onda Dispersivo (WDS), para a obtenção da composição química qualitativa dos materiais identificados durante as análises microscópicas.

Os desgastes devido à ação química ou triboquímica, não são particularmente considerados por Wright (1973) (in GARCIA, 2003) como mecanismo de desgaste, pois as reações químicas superficiais, de modo geral, ocorrem em todos os mecanismos de desgaste e sempre deverão ser acompanhadas de ação mecânica que remova os produtos formados, para que se caracterize o desgaste. Ainda, efeitos químicos podem agir de dupla maneira em um processo de desgaste: podem acelerar, através de corrosão, ou ao contrário, reduzir o desgaste, através de formação de filmes protetores que permanecem adsorvidos nas superfícies. Porém, sob esse ponto de vista, a adesão também não seria um mecanismo de desgaste, uma vez que não há destacamento de material em um processo de adesão. A adesão, bem como as ações triboquímicas, pode ser interpretada como mecanismo que não promove, mas sim que causa o desgaste.

Para Pérez e Moreno (2013) o desgaste verificado em anéis de segmentos é descrito como: adesivo, adesão durante o assentamento seguido de abrasão e corrosão durante o uso, micro-polimentos e desgaste por deslizamento. Outros desgastes ainda aparecem, como o desgaste adesivo associado a transferência de material entre o seguimento e o cilindro e o desgaste mais severo, denominado de engripamento ou “*scuffing*”, que arranca partículas do cilindro, camisa ou anéis.

No caso do tribossistema anel de pistão – camisa de cilindro (Figura 3.7), pesquisadores como Eyre, Barber e Ludema (in GARCIA, 2003) consideram que o mecanismo principal atuante no desgaste seja a abrasão, devido à característica de riscamento apresentada na superfície de contato.

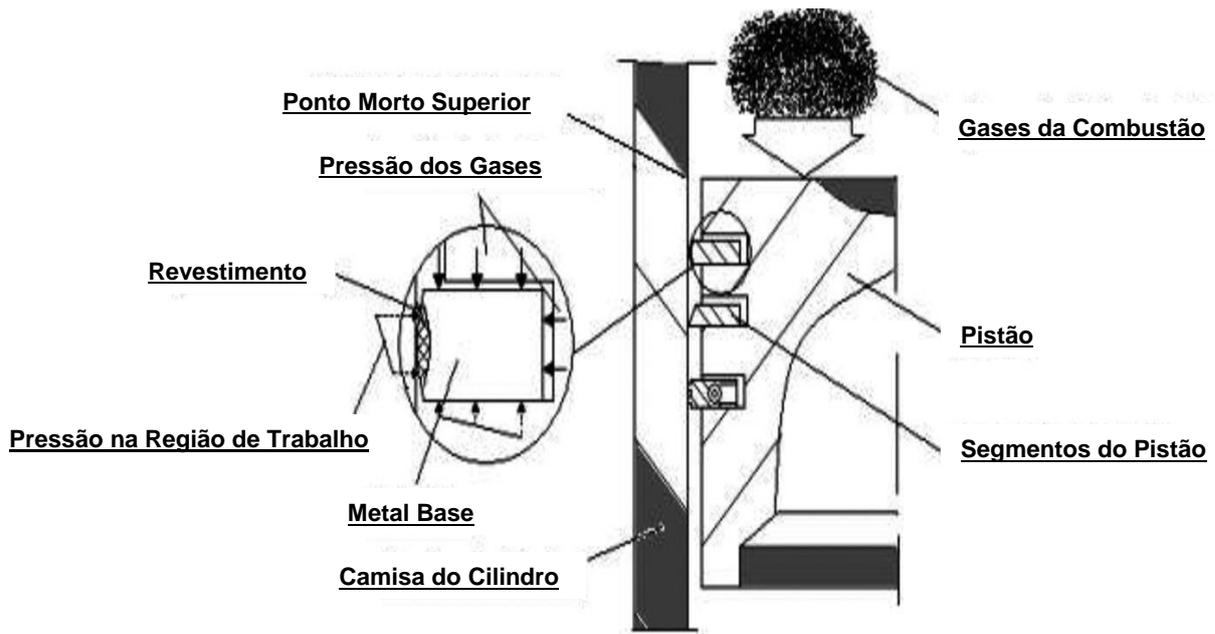


Figura 3.7. Esquema de funcionamento do conjunto pistão-segmentos da camisa do cilindro, Vatavuk in PÉREZ Y MORENO (2013).

Como visto, a classificação do desgaste é considerada difícil, não sendo relacionada a valores numéricos específicos. Porém, em termos gerais, considera-se essa classificação em desgaste leve, médio e severo.

O desgaste pode então ser em função de uma combinação de efeitos elásticos e plásticos, como no desgaste por delaminação. Se a superfície é fabricada áspera, a abrasão é iniciada; o que sempre envolve deformações plásticas severas, que modificam muito a topografia da superfície, com somente uma pequena porção de material sendo efetivamente removida da superfície e microssinagem, na qual uma proporção muito maior de material deformado plasticamente é perdida sob a forma de detritos.

### 3.4.7. Estudo de Casos

A seguir, apresentaremos casos que tratam de desgastes em motores e provocados em laboratórios, analisados por diversos pesquisadores.

Masjuki et al. (2013), Maziero et al. (2007), Porte (2011), Basinger, et al.

(2010), Nogueira (2011), Patel e Aswath (2015) estudaram o desgaste em motores diesel e analisaram o óleo lubrificante, para detectarem aumento de concentrações de metais, entre outras técnicas, como veremos a seguir.

Para Masjuki et al. (2013), o MEV permite a observação de materiais nas medições macro e submicrônicas. Quando usado em conjunto com a EDS, pode executar uma análise elementar em seções microscópicas do material. As viscosidades das amostras de óleo do motor foram determinadas utilizando um viscosímetro Paar Anton (SVM 3000), ao passo que um analisador de óleo de multielementos (MOA) foi usado para a análise quantitativa e qualitativa de qualquer aumento das concentrações de metal de desgaste durante o ensaio de resistência do motor.

Para Maziero et al. (2007), um procedimento muito usado para verificar os desgastes e avarias em um motor é a análise da amostra de óleo lubrificante. Na verificação de possíveis alterações nas características do óleo lubrificante decorrentes do uso prolongado do óleo bruto de girassol (OBG), foram determinadas as suas características físico-químicas, teor de metais e feito exame morfológico das partículas contaminantes.

Para a verificação das avarias tribológicas do uso de biodiesel em motores, Porte (2011) propõe um monitoramento das variáveis físico-químicas do lubrificante, além de espectroscopia no infravermelho e por emissão ótica. Para a correlação entre o combustível, o desgaste e a contaminação do óleo lubrificante, o autor sugere a aplicação de uma matriz de correlação de resultados, sendo esta metodologia aplicada para o estudo de um motor de ciclo diesel estacionário trabalhando em intervalos de tempos superiores a 250 horas.

Na perda de massa do anel do pistão foi encontrada uma correlação muito estreita com o acúmulo de cromo no óleo de lubrificação e um modelo matemático desenvolvido foi utilizado para estimar que a inspeção de anéis de pistão e de substituição deve ocorrer após 1000 horas de uso do motor com óleo vegetal puro (BASINGER et al., 2010), enquanto que utilizando diesel este tempo pode chegar a 50.000 horas (NOGUEIRA, 2011).

Patel e Aswath (2015), constataram fuligem no cárter, na parede do pistão e nos anéis, o que indica a presença de produto termo-oxidativo e de decomposição tribológica do óleo. Assim, os autores concluíram que ocorre interação entre os anéis do pistão e a camisa, surgindo o desgaste das peças por processo abrasivo.

Em Pehan et al. (2009), Almeida et al. (2013), Hu et al. (2013), Farias et al. (2014), Fazal et al. (2010), Fontalvo et al. (2006), Li et al. (2015) e Syahrullail et al. (2013), com o objetivo de medir e analisar a lubricidade do biodiesel e suas misturas ao diesel, foi analisado o desgaste provocado através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), acompanhada de outras técnicas de análise, como será visto abaixo.

Em Pehan et al. (2009), o desgaste da superfície do êmbolo da bomba de combustível foi analisado por meio de parâmetros de rugosidade determinados experimentalmente e por um microscópio.

Em Almeida et al. (2013), para análise da fricção e desgaste, foram confeccionadas amostras em forma de disco de cerâmica a base de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , pelo processo de sinterização e, posteriormente, retificadas e polidas. As esferas de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (5mm de diâmetro) foram compradas de uma empresa, os testes tribológicos foram realizados em um tribômetro CETR UMT3 (bola-sobre-disco). A análise dos mecanismos de desgaste foi feita a partir de observações por microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A lubricidade do combustível foi determinada pelo método de ensaio de equipamento alternativo de alta frequência (HFRR) de acordo com a norma ASTM D 6079.

Já Hu et al. (2013) realizaram o trabalho utilizando um tribômetro de quatro esferas, um microscópio de varredura eletrônica, espectroscopia dispersiva de energia, espectroscopia de fotoelétrons de raios X, rugosímetro de superfície e análises termogravimétricas para investigação de fricção e desgaste quanto à qualidade do lubrificante.

No estudo realizado por Farias et al. (2014), com o objetivo de medir e

analisar a lubricidade do biodiesel e suas misturas (B5, B20) ao diesel, observando a cicatriz marcada por bola em disco usaram a microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia de força atômica (AFM) e técnicas de microrrugosidade. O desempenho dos combustíveis foi avaliado utilizando tribômetro HFRR. As condições de testes foram baseadas no padrão descrito pela Norma ADTM D-6079-04, por ser considerado o método mais recomendado para avaliar a capacidade de lubrificação do combustível. O coeficiente de atrito foi medido durante o ensaio. Após o ensaio, a bola desgastada e o disco foram analisados por SEM, AFM e perfilômetro. No teste HFRR, para medir a WSD (diâmetro da marca de desgaste), o conjunto tribológico é composto por bola e disco, ambos feitos de aço AISI 52100 (e temperados), e a composição química é analisada por técnica de fluorescência em Raio-X. O resultado aponta que o B0-diesel apresenta maior desgaste, seguido do B100, e que o B5 e o B20 apresentam as taxas de menor desgaste, indicando serem os de melhor lubricidade. A abrasão foi o principal mecanismo observado.

Fazal et al. (2010) utilizaram, para avaliar as alterações na morfologia da superfície dos metais cobre, alumínio e aço inoxidável, caracterização por microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura com análise de energia dispersiva de raios X (MEV/EDS). Os combustíveis foram analisados utilizando-se espectroscopia de massa por cromatografia gasosa (GCMS), transformada de Fourier espectroscopia de infravermelho (FTIR), e plasma indutivamente-par (ICP), a fim de investigar as mudanças na composição do combustível, o nível de oxidação com o conteúdo de água e a presença de espécies metálicas, respectivamente. A degradação de propriedades do combustível foi investigada por medição de acidez total (TAN), densidade e viscosidade. Encontraram que a taxa de corrosão de cobre e de alumínio em biodiesel é muito maior do que em diesel combustível. O aço inoxidável não apresenta corrosão significativa mesmo em biodiesel. A presença de ácidos graxos livres, mais porções de oxigênio e o teor de água são impurezas remanescentes após o processamento, e parecem aumentar a corrosividade do biodiesel. Eles também relataram que o aumento do número TAN depois do teste indica oxidação do biodiesel, devido ao contato com amostras de metal. Ao aumentar a temperatura do biodiesel para o ensaio, surge uma série de ácidos, provocando mudanças de composição que, além de aumentar a corrosividade do biodiesel, também podem degradar as propriedades

do combustível.

Fontalvo et al. (2006), para determinar o desgaste, usaram nos experimentos o processo de bola-em-disco, conduzido em temperatura ambiente e utilizando bolas de aço inoxidável austenítico e alumínio. Em ambos os casos, a carga foi mantida constante a 10N. Para esferas de aço inoxidável austenítico, a distância de deslizamento era maior que a usada para as de alumínio, por serem materiais diferentes. Três discos de cada aço foram usados para os testes. As faixas de desgaste das amostras foram caracterizadas utilizando microscopia eletrônica de varredura (SEM/MEV) e interferometria de luz branca. Salientam que, para uma melhor visualização, o alumínio apresenta melhor contraste no SEM/MEV.

Em Li et al. (2015), que usaram o mecanismo de pino sobre disco, o coeficiente de atrito foi calculado a partir da força de atrito medido, dividida pela carga normal exercida sobre o pino por peso morto da máquina de teste. O diâmetro da marca de desgaste foi medido utilizando microscopia óptica no eixo das ordenadas e abscissas no final de cada teste. O volume removido da superfície do pino pode, em seguida, ser calculado por uma fórmula que determina a perda de volume.

Do mesmo modo, Syahrullail et al. (2013) também utilizaram o mecanismo de pino sobre disco, para testar o desgaste provocado pela oleína de palma sendo usada como lubrificante.

#### **3.4.8. Estudos de Casos de Desgaste com o Aço AISI 440B e 440C**

As perdas por desgaste representam prejuízos aos países, assim o estudo dele se faz importante e tem-se utilizado os tratamentos; térmico e termoquímicos, bem como o revestimento e deposição de revestimento para amenizar o desgaste. A seguir são mostrados quatro estudos, para demonstrar a relevância deste estudo.

Em Kraszczuk (2017), que comparou o aço inoxidável AISI 440B na forma temperado e nitretado com uso do ensaio tribológico SRV (bola-sobre-disco) observou a formação de duas trilhas de desgaste para os materiais, a trilha primária

primeira a se formar sempre é mais estreita e aparece a deformação plástica e com o decorrer do tempo a deformação diminui. No material temperado a trilha é 11 vezes mais larga que no material nitretado.

No disco temperado apareceram desgaste severo com forte deformação plástica, abrasão de 3 corpos nas extremidades das trilhas, desgaste oxidativo e leve delaminação. No disco nitretado tiveram desgaste suave com a presença de pouca deformação plástica, desgaste oxidativo e delaminação. A perda de massa do disco temperado foi 5,2 vezes superior a perda de massa do disco nitretado. Assim a nitretação foi eficaz em melhorar a resistência ao desgaste do disco. A profundidade de desgaste no disco temperado foi superior ao disco nitretado, logo com desgaste mais severo.

Shen et al. (2016), usaram uma camada modificada de Zr / ZrC foi depositada na superfície de um aço inoxidável AISI 440B por plasma. Constataram que a espessura da camada modificada aumenta com a temperatura e o tempo de liga, o mecanismo de formação da camada modificada depende da difusão mútua de Zr e elementos de substrato e a superfície modificada mostra uma resistência ao desgaste melhorada. A camada superficial de ligas Zr / ZrC foi preparada pela técnica de dupla superfície de plasma para melhorar a dureza da superfície e a resistência ao desgaste do aço inoxidável AISI 440B. A microestrutura da camada de liga Zr / ZrC formada em diferentes temperaturas e tempos de liga, bem como o seu mecanismo de formação foram discutidos usando microscopia eletrônica de varredura, espectro de emissão ótica de descarga de fulgor, difração de raios X e espectroscopia de fotoelétrons de raios-X. A resistência adesiva, a dureza e a propriedade tribológica da camada de liga Zr / ZrC também foram avaliadas. A superfície de liga consiste nas camadas de Zr-top e ZrC que adere fortemente ao substrato de aço AISI 440B. A espessura da camada de liga Zr / ZrC aumenta gradualmente de 16  $\mu\text{m}$  para 23  $\mu\text{m}$  com a temperatura de liga elevada de 900° C a 1000° C. Com o tempo de liga de 0,5h a 4h, a profundidade da liga aumenta de 3 $\mu\text{m}$  para 30 $\mu\text{m}$ , e a espessura da liga rica em ZrC versus tempo é basicamente parábola a uma temperatura de 1000 ° C. Tanto a dureza, quanto a resistência ao desgaste da camada de liga Zr / ZrC obviamente aumentam em comparação com o aço AISI 440B não tratado. O valor do coeficiente de atrito do aço Zr-ligado é constante em

torno de 0,4, menor que o do aço AISI 440B não tratado, e o volume de desgaste é um sexto se comparado ao aço AISI 440B não tratado.

Em Muller et al. (2017), temos um ensaio de desgaste usando  $Al_2O_3$  e o 440C como contra face para um conjunto de pinos que foram dopados com W-Mo. Constataram que o coeficiente de atrito estava entre 0,15 e 0,25. Onde o revestimento dopado com o W-Mo apresentou alta resistência ao desgaste com taxas de desgaste entre  $3,79.10^{-8}$  mm e  $2,65.10^{-7}$ .

Cui et al. (2017), utilizaram um disco de aço inoxidável martensítico 440C, como disco de prova no ensaio tribológico com pino-sobre-disco, para determinar o comportamento do tântalo, que tem sido amplamente utilizado em implantes ortopédicos e dentais. A partir daí criaram uma liga de Ta-5Cu a granel por uma combinação de liga mecânica e sinterização por plasma de faísca, na tentativa de resolver o problema da atividade bacteriana, que se aderi a superfície do implante. O efeito da adição de Cu na dureza, atividade antibacteriana, citocompatibilidade, resistência à corrosão e desempenho ao desgaste foi sistematicamente investigado. A liga sinterizada Ta-5Cu apresenta atividade antibacteriana aumentada. No entanto, a adição de Cu produziria uma ligeira citotoxicidade e diminuiria a resistência à corrosão de Ta. Além disso, os testes de desgaste do pino no disco mostram que a liga Ta-5Cu possui um coeficiente de atrito muito menor, mas uma taxa de desgaste mais alta e mostra um modo de desgaste diferente do Ta ao deslizar contra o aço inoxidável 440C. A deformação plástica induzida pelo desgaste leva ao alongamento dos grãos de Ta e Cu ao longo da direção de deslizamento e as estruturas observadas ao se aproximar da superfície de deslizamento.

Kim e Kim (2015), usando a lubrificação de sistemas mecânicos com água em vez de lubrificantes convencionais consideram extremamente atraente do ponto de vista da conservação de recursos e proteção ambiental. No entanto, a espessura insuficiente da película de água devido à baixa viscosidade e a reação química da água com materiais metálicos têm sido um grande obstáculo na utilização da água como um lubrificante eficaz. A fricção entre uma esfera de aço inoxidável de 440 C e uma placa de aço inoxidável 440 com lubrificação com água poderia ser reduzida em até 6 vezes revestindo-se a esfera com óxido de grafeno reduzido (rGO). O

coeficiente de atrito com a bola revestida com rGO na lubrificação com água foi comparável ao valor obtido com a bola não revestida na lubrificação com óleo. Além disso, a taxa de desgaste da placa deslizada contra a esfera revestida de rGO com lubrificação com água foi 3 vezes menor que a da placa deslizada contra a esfera não revestida na lubrificação com óleo. Estes resultados demonstraram claramente que a água pode ser efetivamente utilizada como lubrificante em vez de óleo para diminuir o atrito e o desgaste dos componentes com 440 basta usar revestindo com rGO.

### **3.5. Desgaste do Par Tribológico Anel – Cilindro**

O anel é um elemento circular elástico com elevada força de expansão e finalidade de promover a vedação dos gases da câmara de combustão, fazer o controle do filme de óleo lubrificante na parede do cilindro e servir como elemento de transmissão de calor do pistão para o cilindro.

O projeto dos anéis de pistão deve atender as seguintes exigências:

- melhor vedação;
- redução do consumo de óleo;
- maior resistência ao desgaste;
- redução do tempo de assentamento (amacramento do motor);
- redução de atrito.

Mais recentemente, com as legislações sobre emissões de poluentes, surgiram novos desafios em relação à performance e à durabilidade dos anéis, os quais vêm sendo superados através do aprimoramento tecnológico dos processos de fabricação e o desenvolvimento de novas alternativas de material base, coberturas e perfis dos anéis.

Os anéis fabricados em ferro fundido possuem propriedades mecânicas melhoradas devido aos elementos de liga acrescentados em sua composição, que lhes conferem elevada resistência ao desgaste e à fadiga, assim como excelentes condições de trabalho, mesmo em situações severas como temperaturas elevadas e pouca lubrificação. Por exemplo, o motor monocilíndrico, marca Tramontini, modelo

TR 22, com injeção direta por bomba mecânica, potência nominal de 22 cv a 1800 rpm, resfriado a água com partida elétrica, usa ferro fundido lamelar (é um ferro fundido cinzento – caracterizado por apresentar como elementos de liga fundamentais o carbono e o silício e estrutura com uma parcela relativamente grande do carbono no estado livre (grafita lamelar)), com revestimento de cromo em seus anéis (PORTE, 2011).

Os anéis fabricados em aço têm como principal característica seu alto módulo de elasticidade. Isso permite projetar anéis com alturas reduzidas, sem risco de quebra quando forem montados no canaleta do pistão ou em funcionamento dentro do motor.

Pode-se classificar os materiais utilizados em 3 grandes grupos:

- Ferro Fundido Cinzento;

- Ferro Fundido Nodular, caracterizado por apresentar, devido a um tratamento realizado ainda no estado líquido, carbono livre na forma de grafita esferoidal, o que confere ao material característica de boa ductilidade, donde a denominação frequente de ferro fundido dúctil.

- Aço.

Com o objetivo de minimizar os desgastes e aumentar a vida útil dos anéis, utilizam-se na face de trabalho coberturas/revestimentos com materiais mais duros e resistentes que o material dos anéis. Dentre os materiais mais usados para revestimentos dos anéis, podemos citar o cromo, o molibdênio e o enchimento de ferrox (mistura de óxido de ferro e silicato de sódio). Nos seguintes processos: cromo, cromo channel, cromo multilayer, cromo cerâmico, PVD (Physical Vapor Deposition), HVOF (High Velocity Oxygen Fuel). No tratamento superficial encontramos fosfatização, ferroxidação e estanhagem.

O cilindro tem diferenciado desgaste para distintas partes do seu diâmetro, sendo maior no ponto morto superior (PMS) no contato com o primeiro segmento (Barber & Ludema in PEREZ & MORENO, 2013), uma vez que a região sofre com as condições tribológicas mais graves, repercutindo tais situações no primeiro anel do segmento.

Os anéis podem ser divididos em: anel de compressão, anel raspador ou napier e anel de óleo.

Anéis de pistão, especialmente os do primeiro canal, estão sujeitos a condições tribológicas complexas e graves (PÉREZ & MORENO, 2013):

- As velocidades médias de até 20 m/s. Como o movimento é alternativo, a velocidade é variável, sendo zero nos pontos de reversão e máxima aproximadamente a meio caminho ou trajetória.

- Pressões de até 20 MPa (200 bar) na pressão dos gases de combustão em alguns motores diesel de última geração. Esta pressão varia durante os quatro tempos do motor.

- A parede do cilindro é geralmente de ferro fundido, com um acabamento de superfície típico polido (brunido).

- A rugosidade da superfície Rz é aproximadamente = 6  $\mu\text{m}$  (cerca de 1,0 Ra) quando nova.

- A temperatura na parede do cilindro é de cerca de 100°C, enquanto que o primeiro segmento é da ordem de 250°C.

- Por conseguinte, a película de óleo lubrificante é na ordem de poucos microns no meio do curso e de apenas décimos de micrômetros, nos pontos de inversão, que é a mesma ordem que a altura das asperezas e, portanto, o regime de lubrificação de limite.

- O primeiro segmento, para motores a diesel, é de aço ou ferro fundido nodular, com um revestimento antidesgaste. Este revestimento é geralmente molibdênio, mais especificamente uma mistura de molibdênio, níquel e cromo aplicada por plasma ou é eletroliticamente depositado cromo duro.

O desgaste do par tribológico anel-cilindro pode ser classificado como

desgaste por deslizamento, podendo ser considerado de moderado a severo (GARCIA, 2003; FAZAL et al., 2011b).

Os desgastes verificados em anéis de segmentos são descritos como: adesivo, adesão durante o assentamento, seguido de abrasão e corrosão durante o uso e micro-polimentos (PÉREZ & MORENO, 2013). Desgaste por deslizamento é o termo proposto pelos autores Pérez e Moreno (2013) para representar o desgaste que o anel de segmento sofre. O desgaste adesivo é associado à transformação de material entre o segmento e o cilindro. O desgaste mais severo é denominado de engripamento ou “*scuffing*”. Quando ocorre um desgaste suave, a superfície desgastada geralmente apresenta um aspecto polido. Se o desgaste for severo, produz partículas maiores e a superfície tem um aspecto rugoso.

É importante destacar que no estudo realizado por Felter (2007) sobre a lubrificação de anéis, utilizando simulação numérica, os resultados mostraram que, na verdade, o grau de lubrificação para um anel do pistão pode variar de totalmente inundado para uma condição de privação total desta, o que acarreta uma grande dependência da lubricidade do combustível, bem como uma acentuada exigência do anel.

Para Pérez & Moreno (2013), a pressão dos gases de combustão pode chegar a 200 bares e grande parte dessa pressão é transferida aos anéis de segmentos, sendo o primeiro o mais exigido, quer pela pressão da combustão, quer pela temperatura e, por vezes, por não receber a lubrificação de forma adequada, devido à atual legislação sobre emissões, dependendo da lubricidade do combustível para seu funcionamento. Para estes autores, o desgaste corrosivo é dominante quando o motor opera muito frio ou muito quente.

## 4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O método aplicado a este trabalho avaliou a resistência ao desgaste do aço inoxidável martensítico AISI 440BC em diferentes condições microestruturais e durezas (submetido à tratamentos térmicos de recozimento, têmpera e revenido) e em ensaios com ausência de lubrificação e com lubrificação, utilizando-se diferentes percentuais de misturas diesel-biodiesel.

O trabalho constituiu das seguintes etapas:

- Preparação dos discos (corte, usinagem e lixamento), em aço inoxidável martensítico AISI 440BC para a confecção dos discos, 18 discos com diâmetro de 114 mm e espessura de 10 mm;
- Tratamentos térmicos das amostras;
- Caracterização das amostras em termos de microestruturas e durezas;
- Ensaio de desgaste no tribômetro do tipo pino-sobre-disco conforme norma ASTM G99-04;
  - Com ausência de lubrificação, à seco;
  - Lubrificado com diesel comercial S10 (B7) (93% diesel + 7% biodiesel);
  - Lubrificado com mistura diesel-20% biodiesel (B20) (80% diesel + 20% biodiesel);
  - Lubrificado com mistura diesel-30% biodiesel (B30) (70% diesel + 30% biodiesel);
  - Lubrificado com mistura diesel-50% biodiesel (B50) (50% diesel + 50% biodiesel);
  - Lubrificado com biodiesel puro (B100) (100% biodiesel).
- Obtenção dos perfis de desgaste ao longo dos ensaios nas diferentes condições;
- Determinação do coeficiente de desgaste “k” das diferentes amostras;
- Determinação dos mecanismos de desgaste presentes no ensaio, através da análise das imagens da pista de desgaste, obtidas em Microscópio Eletrônico de

Varredura (MEV).

A Figura 4.1 apresenta um fluxograma resumido das principais etapas empregadas na metodologia experimental deste trabalho.

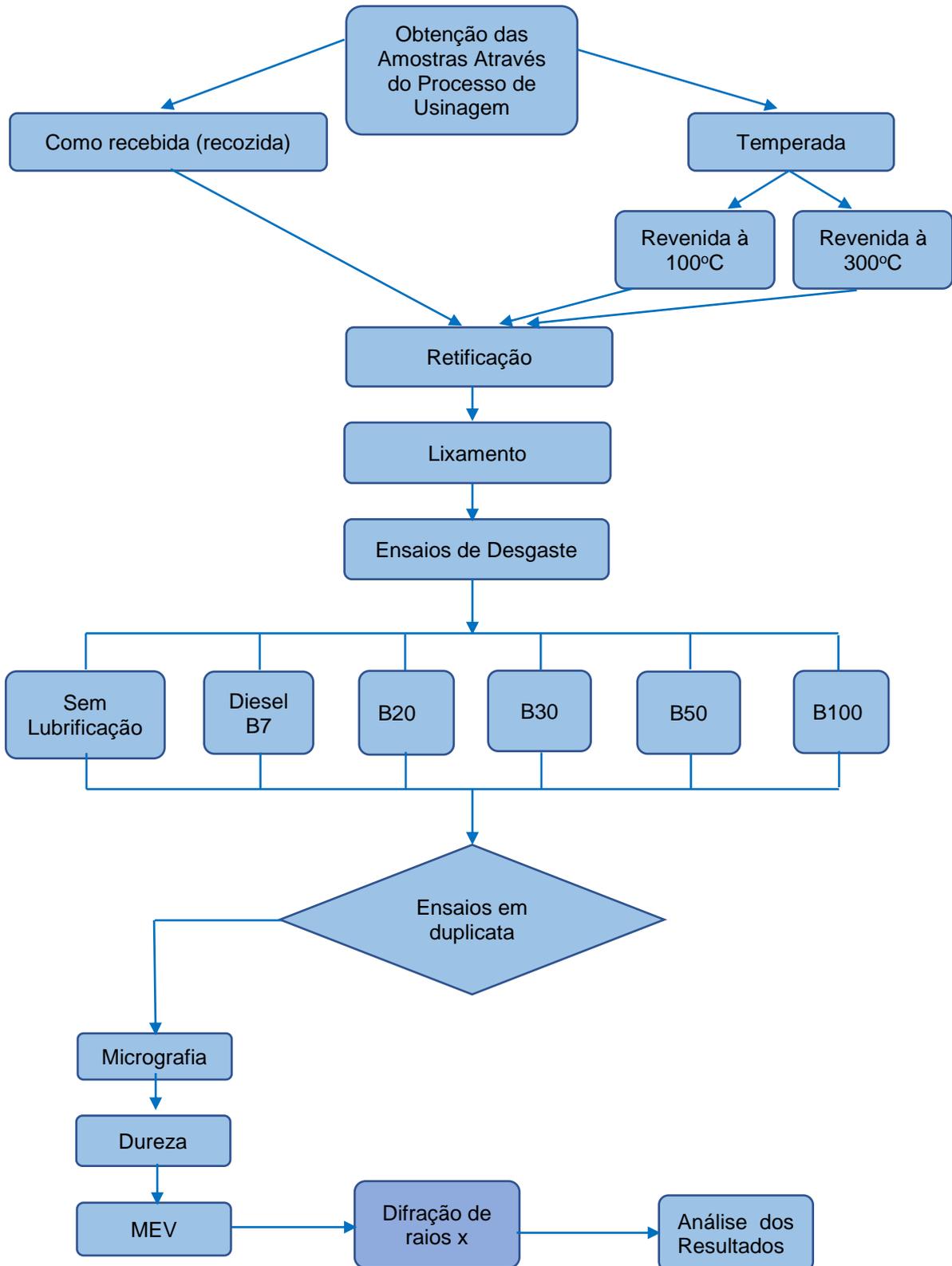


Figura 4.1. Fluxograma esquemático das principais etapas da metodologia experimental. Fonte: o Autor.

## 4.1. Materiais e Equipamentos

### 4.1.1. Aço Inoxidável Martensítico AISI 440BC

O material utilizado no trabalho foi o aço inoxidável martensítico AISI 440BC, que possui boa resistência ao desgaste, alto teor de carbono, exibindo excelente resistência mecânica e resistência à corrosão, e possuir carbonetos que proporcionam boa resistência ao desgaste. O aço escolhido possui diversas aplicações, como instrumentos cirúrgicos, ferramentas de corte, armamentos, palhetas de turbinas à vapor, cutelaria, entre outros. O material foi fornecido pela empresa Metalinox Cogne Aços Inoxidáveis Especiais Ltda., sendo fabricado pela Siderúrgica Villares Metals S.A., na corrida de produção número 0804226 e certificado número 694773, de 30 de agosto de 2016, com composição química fornecida conforme Tabela 4.1, e apresentando a dureza inicial de 251 HBW (penetrador de esfera de tungstênio de 10mm de diâmetro e carga de 3000kgf).

Tabela 4.1. Composição química fornecida do aço inoxidável AISI 440B e obtido do AISI 440BC (% em massa).

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
AISI 440BC	0,85-1,00	Máx 1,0	<= 1,0	Máx 0,04	Máx 0,03	16-18	-	Máx 0,75
AISI 440BC	0,960	0,560	0,420	0,024	0,001	16,560	0,000	0,030
Obtido	0,707	0,652	0,358	0,0119	0,001	18,710	0,247	0,0241

Fonte: Villares Metals e Fonte: Laboratório de Materiais – PUCRS.

Para confirmar a composição química do material, aço martensítico AISI 440BC, foi utilizado um espectrômetro ICP, modelo SPECTROMAXx ®, da marca Ametek Ltda. (Materials Analysis Division), pertencente à Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (LAMAT-PUCRS). Foram realizados três ensaios, sendo os valores médios apresentados na Tabela 4.1, onde mostram-se os elementos de maior relevância.

### 4.1.2. Combustíveis

Os combustíveis utilizados como lubrificante nos ensaios de tribologia foram:

biodiesel (B100) a base de óleo de soja pela rota metílica, produzido por transesterificação clássica, e matéria-prima com composição: 74,5% de óleo de soja, 25% de gordura animal, 0,5% de óleo recuperado e metanol, fornecido pela Oleoplan S/A - Óleos Planalto de Veranópolis RS. O óleo diesel comercial S10 (93% de diesel e 7% de biodiesel) utilizado foi obtido no posto de combustíveis Comercial Três Figueiras Ltda., situado na Av. Prof. Cristiano Fischer, 1950, Jardim do Salso em Porto Alegre, na data de 27 de abril de 2017. As propriedades dos combustíveis diesel S10 (B7) e biodiesel (B100) estão apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Características dos combustíveis diesel S-10 (B7) e biodiesel B100.

	Unidade	Limite/tipo Diesel A e B	Biodiesel B100
Aspecto		Límpido e isento de impurezas	Límpido e isento de impurezas
Cor		Incolor a amarelo	
Teor de Biodiesel	%Vol	7	100
Enxofre, máx.	Mg/kg	10,0	6,7
Destilação 10%Vol	°C	180	
50	°C	245 a 295	
95	°C	370	
Massa específica a 20°C	Kg/cm <sup>3</sup>	815,0 a 850,0	878,2
Ponto de fulgor, mín.	°C	38,0	172
Viscosidade cinemática a 40°C	Mm <sup>2</sup> /s	2,0 a 4,5	4,3
CFPP	°C	0 a 12*	
Número de cetano		48	
Resíduo de carbono	% massa	0,25	
Cinzas, máx.	% massa	0,010	
Corrosividade ao cobre 3h a 50°C, máx.	-	1	
Teor de água, máx.	Mg/kg	200	146,7
Contaminação total, máx.	Mg/kg	24	21
Água e sedimentos, máx.	%Vol	0,05	
Hidrocarbonetos policíclicosaromáticos, máx.	% massa	11	
Estabilidade a oxidação	Mg/100ml	2,5	
Lubricidade	um	460	
Condutividade Elétrica, mín.		25	
Ponto de entupimento de filtro a frio	°C		2

(\*) Depende da época do ano e do Estado. Fontes: HABIBULLAH et al. (2015) para o Diesel e Oleoplan S/A para o Biodiesel.

As características do combustível seguem as analisadas por HABIBULLAH et al. (2015): tipos de combustível; densidade (g/m<sup>3</sup>); viscosidade cinemática (mm<sup>2</sup>/s); índice de viscosidade; estabilidade à oxidação (H) e índice de acidez (mg de

KOH/g), aspectos que foram considerados mais relevantes. As propriedades do B100 que se encontram na Tabela 4.2, foram fornecidas pelo Laboratório de Controle de Qualidade da Oleoplan S/A.

## **4.2. Métodos**

### **4.2.1. Confeção das Amostras**

As amostras, confeccionadas em aço inoxidável martensítico AISI 440BC, bem como o pino de contato são apresentados a seguir:

**PINO:** Segundo as recomendações da norma ASTM G99-04, o pino esférico com 10 mm de diâmetro é fabricado em Alumina ( $Al_2O_3$ ). Dispensou-se a preparação superficial da esfera.

**AMOSTRAS/DISCOS:** As amostras, confeccionadas em formato de discos, foram adquiridas em forma de barras redondas e posteriormente usinadas pelo processo de corte, seguido de torneamento e retificação no Laboratório de Processos de Fabricação Mecânica do Instituto Federal Sul-Riograndense/Campos Pelotas-RS (IFSUL/Pelotas). Os discos possuem um diâmetro de 114 mm, com 10mm de espessura inicial, furo central de 22 mm e dois furos de 5 mm com a distância entre centros de 40 mm, para fixação no tribômetro, e raio da pista de desgaste de 49,5 mm, contabilizando um total de dezoito peças. A geometria dos discos é representada na Figura 4.2.

As peças foram divididas em três grupos com seis peças cada, sendo que as primeiras não receberam tratamento térmico, e as outras foram tratadas por têmpera e revenidos à 100°C e 300°C.

Seguindo as recomendações da norma ASTM G99-04, as amostras foram submetidas ao processo de lixamento, sendo aplicadas as seguintes lixas sucessivamente: #100, #150, #220, #320, #400, #600 e #1200, garantindo que a rugosidade superficial estivesse abaixo do limite superior especificado pela norma

(0,8 $\mu$ m). Este processo foi executado nas duas faces das amostras.

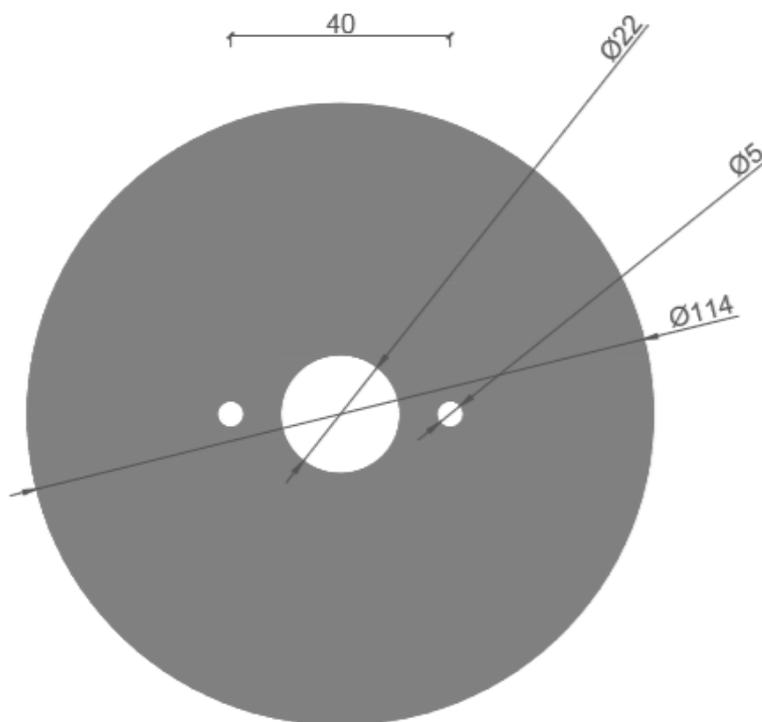


Figura 4.2. Representação do disco para ensaio de desgaste e suas dimensões, com espessura: 10mm. Medidas em milímetros. Fonte: o Autor.

#### 4.2.2. Tratamentos Térmicos

A condição de recozido se refere a forma de como o aço foi recebido, não tendo neste ensaio recebido nenhum tratamento térmico. Os tratamentos térmicos de têmpera foram realizados em forno resistivo tipo mufla, marca Jung, modelo 7012, com soleira interna de grafite para minimizar a descarbonetação, temperatura de aquecimento até 1200°C e potência de 8 kW, e consistiram de tratamentos de têmpera com pré-aquecimento de 850°C por 30 minutos e austenitização a 1100°C por 20 minutos. O tempo de elevação de temperatura foi de 2 horas para aquecer de 850°C à 1100°C (GERDAU, 2014). O resfriamento dos discos após a têmpera se deu em óleo aquecido entre as temperaturas de 55°C e 65°C, com agitação. Após as têmperas, foram realizados revenimento à 100°C, com variação controlada entre 95°C a 105°C, permanecendo no forno no tempo de 20 minutos (GERDAU, 2014) para os discos 8 a 14, e revenimento a 300°C, com variação controlada entre 295°C a 305°C, permanecendo no forno no tempo de 20 minutos (GERDAU, 2014) para os discos de 1 a 7. Foram desenvolvidos dois diferentes esquemas de tratamento

térmico, têmpera e revenido a 100°C e têmpera e revenido a 300°C, para produzir diferentes microestruturas para análise do estudo das interrelações de dureza e desgaste, se um disco mais duro apresenta menor desgaste ou se apenas a lubrificação é suficiente para a diminuição do desgaste.

O tratamento recozido são como as peças foram fornecidas pelo fabricante.

#### 4.2.3. Ensaio de Desgaste

Os principais parâmetros monitorados durante os ensaios foram:

- Carga: valores da força em Newtons no contato de desgaste;
- Velocidade: velocidade de deslizamento relativo entre as superfícies de contato em metros por segundo;
- Distância: distância de deslizamento acumulado, em metros;
- Temperatura: temperatura dos discos em locais próximos ao contato desgastado, em °C;

Os resultados dos ensaios de resistência ao desgaste foram obtidos através da realização de ensaios de desgaste sem lubrificação e com lubrificação (diesel comercial B7, diesel-biodiesel B20, diesel-biodiesel B30, diesel-biodiesel B50 e com biodiesel puro B100) no tribômetro do tipo pino-sobre-disco desenvolvido pela Faculdade de Engenharia da PUCRS, representado na figura esquemática (Figura 4.3).

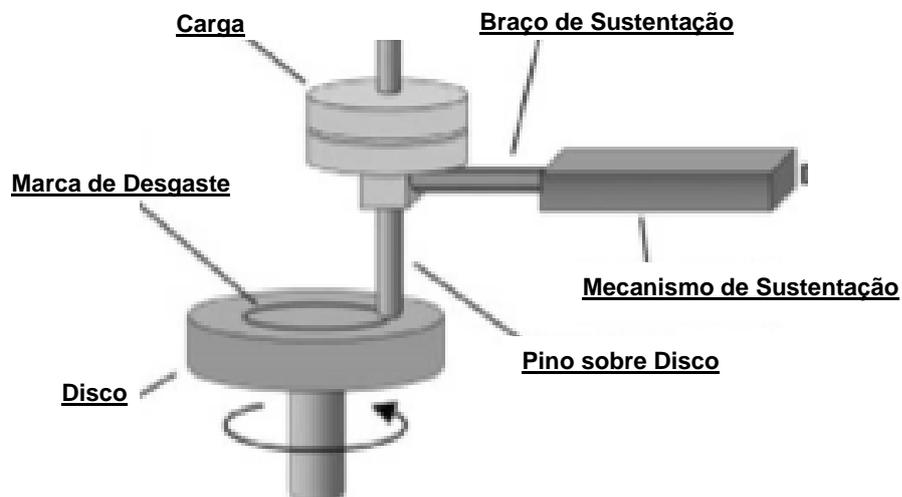


Figura 4.3. Representação esquemática do dispositivo Pino-Disco (ASTM G99, 2004).

Os principais componentes do tribômetro são descritos a seguir:

*Controlador/Motor Elétrico:* O controlador do motor elétrico bifásico é composto por um controlador eletrônico de velocidade, que permite a configuração dos parâmetros de ensaios desejados. Assim, foi possível configurar a velocidade de rotação da amostra (configurada em rpm) em 300 rpm e a distância percorrida que foi realizada no ensaio (em metros) a cada 400 m para leitura da largura da pista de desgaste, até uma distância total de 4400 m.

*Massa/Pino:* Foram usados dois pesos, com massas de 500g e 425g. Como o pino e a porca de fixação possuem 75g, e a haste/pino 500g, o conjunto pino/massa pesa 14,7N (1500g ou 1,5kg). O pino é constituído de uma esfera fixa de Alumina  $Al_2O_3$  com diâmetro de 10 mm.

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

### **Procedimento do ensaio**

O disco é fixado ao porta disco por dois parafusos e o pino é posto em contato com este, logo se estipula a distância a ser percorrida (400 m) e a velocidade que o disco deve operar (300 rpm), procedimento feito através do controlador do dispositivo e será repetido até que se complete a distância de 4400 metros.

A largura da pista de desgaste ( $w$ ) e o volume desgastado ( $V$ ) foram analisados a cada 400 m de distância percorrida; sendo medidos a cada 45° da pista, totalizando oito medições ao longo da circunferência da pista de desgaste. Ao final do ensaio foi possível traçar o perfil da largura da pista e a perda de massa do disco, bem como o coeficiente de desgaste médio ( $k$ ) obtido através das Equações 3.2 e 3.3. Como foram realizados dois ensaios em cada uma das condições propostas, os valores médios que serão apresentados no Capítulo 5 foram encontrados a partir de dezesseis medições. Todas as medições dos ensaios são

apresentadas no Anexo A.

A fim de evitar a ocorrência de desgaste abrasivo nos dois corpos, decorrentes de partículas em suspensão originadas de ensaios anteriores, é realizado o processo de filtragem nos lubrificantes após a realização de cada ensaio. Todos os ensaios foram realizados a temperatura ambiente.

As larguras das pistas de desgaste foram medidas utilizando sistema óptico do durômetro Brinell marca AWPMA, com precisão de 0,01 mm, pertencente ao Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia da PUCRS.

#### **4.2.4. Análises de Dureza**

Os ensaios de dureza para os discos recozidos de números 15 ao 20, que são identificados na Tabela 4.3, foram realizados no durômetro de marca AWPM, para ensaios Rockwell B. Nos ensaios das peças tratadas termicamente (têmpera e revenido) utilizou-se o durômetro de marca Heckert, ensaio Rockwell C, sendo realizadas quatro medições em cada lado da peça, a cada 90°.

Nos ensaios de microdureza Vickers (mHV), realizados no fundo da pista de desgaste, em todos os discos, o equipamento utilizado foi o microdurômetro de marca Shimadzu HMV-G, para ensaios Vickers, com carga de 3,0 N (0,3 kg) e ampliação de 40x. Todos os aparelhos pertencentes ao Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia da PUCRS. Os ensaios foram realizados nos discos após serem desgastados para se comparar a variação da dureza da pista de desgaste antes e após o ensaio. Os valores obtidos na pista de desgaste foram comparados com os valores médios encontrados na superfície da peça em locais não desgastados, sendo realizadas 12 medições por peça. Os valores médios de dureza encontrados fora da pista, serviram para o cálculo do coeficiente de desgaste (k), tendo sido convertidos para Dureza Brinell, como especificado pela Equação 3.3.

#### **4.2.5. Análises por Microscopia Óptica**

As análises micrográficas foram realizadas no Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia da PUCRS, com microscópio de marca Olympus. Após a realização de todas as análises tribológicas, os discos foram cortados para que fosse possível a observação das microestruturas. As amostras foram lixadas com lixas #100, #150, #220, #320, #400, #600, #1200, seguido de polimento com alumina em suspensão de 3 $\mu$ m e 1 $\mu$ m. O ataque químico foi realizado com o Reagente Marble.

#### **4.2.6. Análises por Microscopia Eletrônica e Difração de Raios-X**

Para análises metalográficas complementares, análises qualitativas das composições químicas elementares das fases, e para determinar os mecanismos atuantes no desgaste das amostras foram realizadas análises da condição superficial das pistas desgastadas, utilizando-se para tanto o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e o Microscópio Eletrônico por Emissão de Campo (FEG), ambos com microsonda EDS, pertencente ao Laboratório de Microscopia e Microanálises (LABCEMM) da PUCRS.

Análises de difração de raios-X foram realizadas em um equipamento Shimadzu, com alvo de Cu, voltagem de 40,0 kV, e corrente de 30 mA, com ângulo 2 $\theta$  de varredura entre 20° e 120°. O equipamento está alocado no Laboratório do Grupo de Estudos de Propriedades de Superfícies e Interfaces (GEPsi) da PUCRS.

#### **4.2.7. Identificação das amostras**

Para melhor entendimento cada disco recebeu uma numeração, com a qual se identifica o tipo de tratamento térmico pelo qual passou e o lubrificante usado durante o ensaio, ver Tabela 4.3 a seguir.

Tabela 4.3. Identificação dos discos amostras

Tratamento Térmico	Disco	Lubrificante
Recozido, como recebido	19	Sem Lubrificação
	16	S10-B7
	20	S10-B20
	15	S10-B30
	18	S10-B50
	17	B100
Têmpera e Revenido a 100°C	14	Sem Lubrificação
	9	S10-B7
	12	S10-B20
	8	S10-B30
	13	S10-B50
	11	B100
Têmpera e Revenido a 300°C	3	Sem Lubrificação
	4	S10-B7
	6	S10-B20
	1	S10-B30
	2	S10-B50
	7	B100

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados apresentados a seguir são provenientes da metodologia descrita no Capítulo 4 para o aço inoxidável martensítico AISI 440BC, nas condições recozido, temperado e revenido à 100°C, e temperado e revenido à 300°C.

### **5.1. Análises Microestruturais**

A Figura 5.1 apresenta as imagens obtidas por microscopia óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV) na amostra do aço inoxidável AISI 440BC no estado como recebido na condição recozida. A estrutura micrográfica do material apresenta uma matriz ferrítica (regiões claras) com carbonetos esferoidizados dispersos na matriz (regiões com contornos escuros).

A dispersão apresenta uma matriz bastante irregular, apresentando regiões onde existem uma aglomeração de carbonetos, bem como carbonetos na forma de bastonetes, o que significa que não houve uma completa esferoidização dos mesmos durante o tratamento térmico de recozimento. As partes mais escuras, na cor cinza mais escuro representam carbonetos de cromo. Os pontos pretos são porosidades. Na Figura 5.1.b e d temos as setas marcando (1) para ferrita, (2) carbonetos esferoidizados e (3) porosidades.

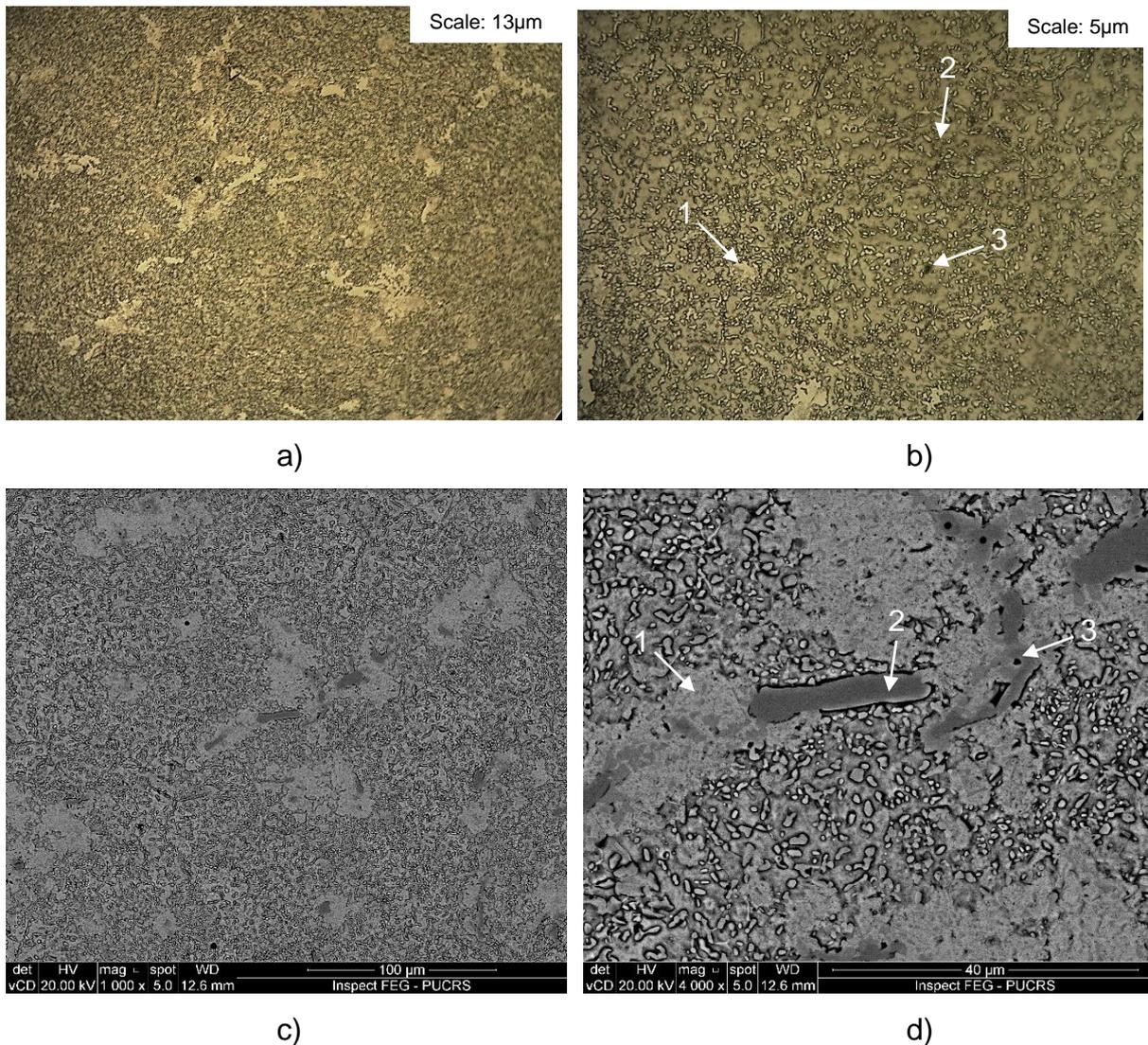


Figura 5.1. Micrografias do aço inoxidável AISI 440BC, na condição recozida. Microscopia óptica: a) 500x; b) 1000x. Microscopia eletrônica: c) 1000x; d) 4000x. Ataque químico Marble.

A Figura 5.2 apresenta a análise micrográfica da amostra temperada e revenida a 100°C. Na Figura 5.2, considerando o teor de cromo superior a 13% e inferior a 18%, associado a temperatura da austenitização empregada de 1100°C e o percentual de carbono, é possível afirmar que após a têmpera obteve-se uma estrutura de matriz martensítica (SILVA e MEI, 2006), com carbonetos não dissolvidos (regiões cinza escuro), e alguns pontos pretos que são poros. Nota-se a presença de alguma austenita retida dispersa na matriz. Quando comparada à amostra na condição recozida, nota-se que os carbonetos são mais finos, em função do aquecimento à temperatura de austenitização, que pode ocasionar uma leve dissolução dos mesmos. Na Figura 5.2.b e d temos as setas marcando (1) para martensita, (2) carbonetos esferoidizados não dissolvidos, (3) porosidades e (4)

austenita retida.

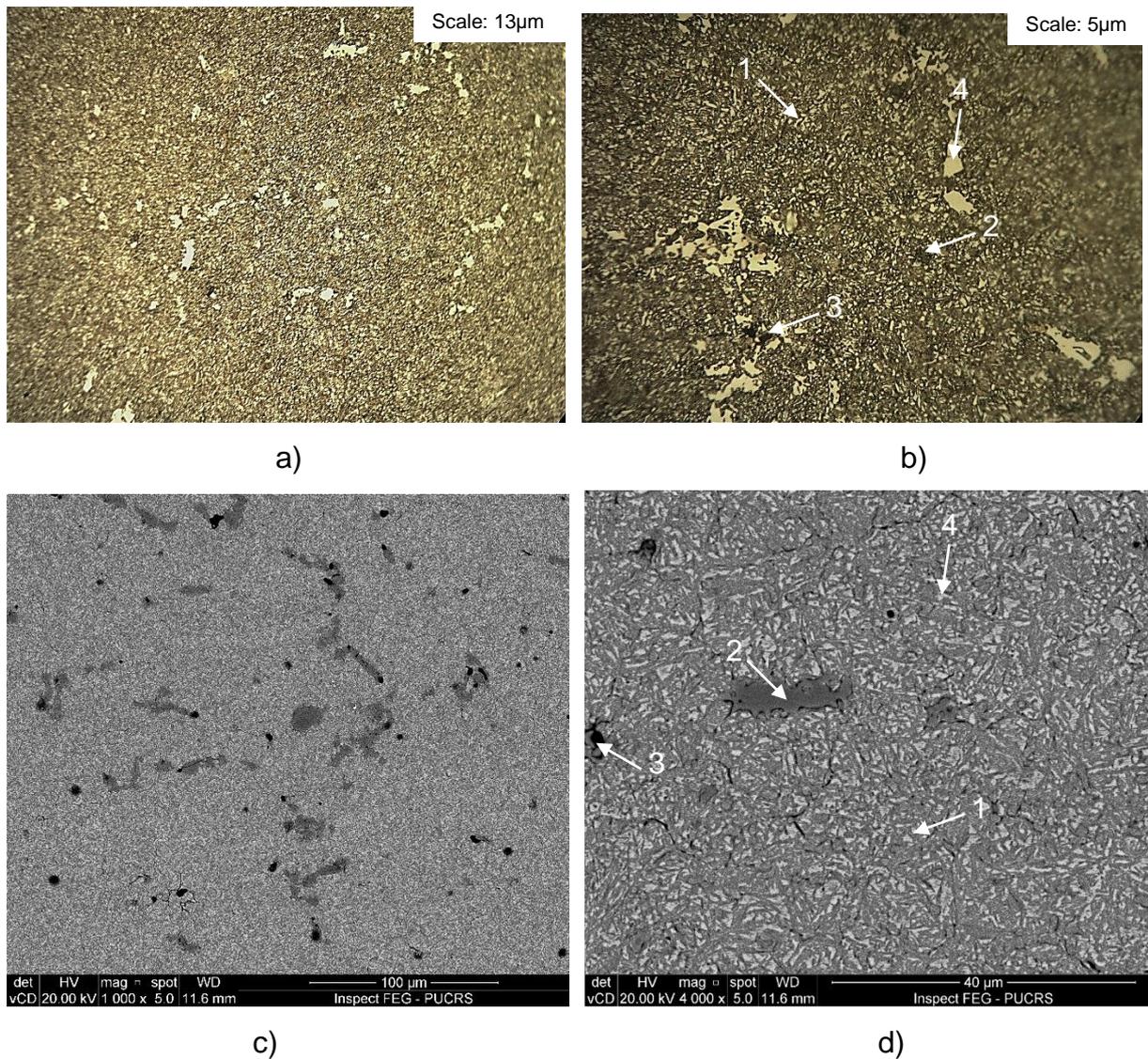


Figura 5.2. Micrografia do aço inoxidável AISI 440BC, na condição temperada e revenida a 100°C. Microscopia óptica: a) 500x; b) 1000x. Microscopia eletrônica: c) 1000x; d) 4000x. Ataque químico Marble.

A Figura 5.3 apresenta a análise micrográfica da amostra temperada e revenida a 300°C. Observa-se uma matriz martensítica e carbonetos não totalmente dissolvidos (cinza escuro), com pequenos pontos pretos que mostram a presença de poros. Neste caso, os carbonetos são de cromo, que vão dar a dureza ao material. Também como na condição temperada e revenida à 100°C, os carbonetos são mais refinados em comparação à condição recozida, pelos mesmos motivos mencionados anteriormente. Na Figura 5.3.b e d temos as setas marcando (1) para martensita, (2) carbonetos esferoidizados não dissolvidos, (3) porosidades e (4) austenita retida.

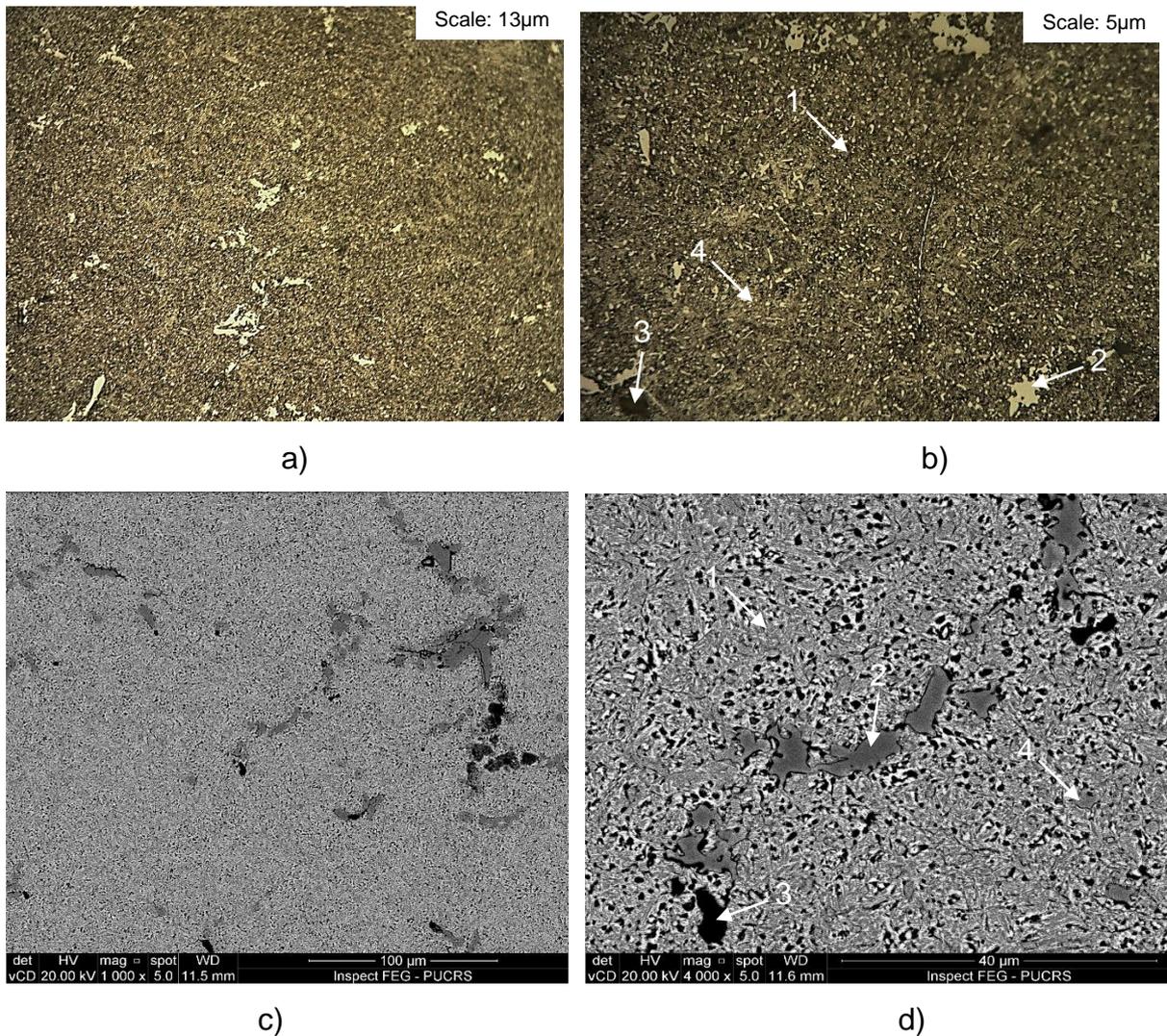


Figura 5.3. Micrografia do aço inoxidável AISI 440BC, na condição temperada e revenida a 300°C. Microscopia óptica: a) 500x; b) 1000x. Microscopia eletrônica: c) 1000x; d) 4000x. Ataque químico Marble.

As amostras foram também analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV-FEG) e espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS), nas condições recozida e temperadas e revenidas. A Figura 5.4 apresenta imagens das microestruturas em modo BSE (*Electron Backscattering Mode*), bem como os resultados de EDS para os pontos especificados nas micrografias. Em ambas as condições, é possível observar que as amostras com matrizes ferrítica (na condição recozida) e martensítica (na condição temperada e revenida) apresentam composições químicas similares, e que os carbonetos identificados apresentam composições químicas diferentes, sendo que os carbonetos mais grosseiros (cinza escuro) têm um teor de cromo mais elevado quando comparados aos carbonetos mais finos (cinza claro). Observa-se também que os carbonetos da condição

recozida são maiores e mais irregulares e possuem composição química diferentes, que na condição após tempera e revenido.

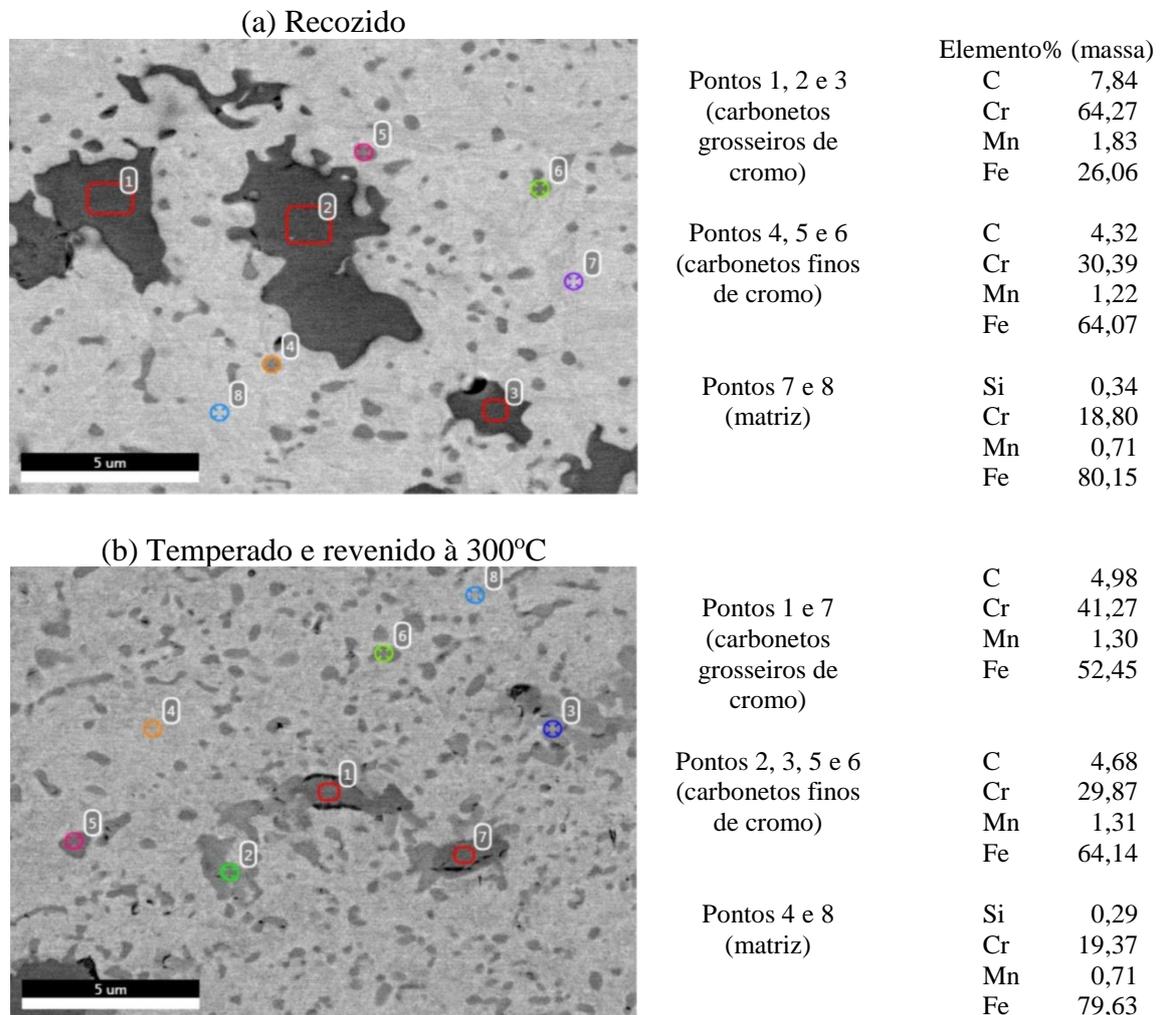


Figura 5.4. Imagens de MEV-FEG e resultados de EDS do aço inoxidável AISI 440BC, nas condições recozida e temperada e revenido à 300°C.

A Figura 5.5 mostra os resultados obtidos para as amostras após análises de difração de raios-X. Na condição recozido, o material consiste de uma matriz ferrítica ( $\alpha$  - CCC) com carbonetos de cromo ( $M_{23}C_6$ ), enquanto que na condição temperado e revenido é constituído de matriz martensítica ( $\alpha'$  - TCC), com carbonetos de cromo ( $M_{23}C_6$ ) e alguma austenita retida ( $\gamma$  - CFC). Em ambas condições foram observados os mesmos carbonetos de cromo ( $M_{23}C_6$ ), conforme é visto no difratograma. Os resultados concordam com informações relatadas na literatura por SILVA e MEI (2006) e também por SHENG et al. (2016) e MENG et al. (2018), que investigaram o aço inoxidável AISI 440B com e sem tratamentos térmicos.

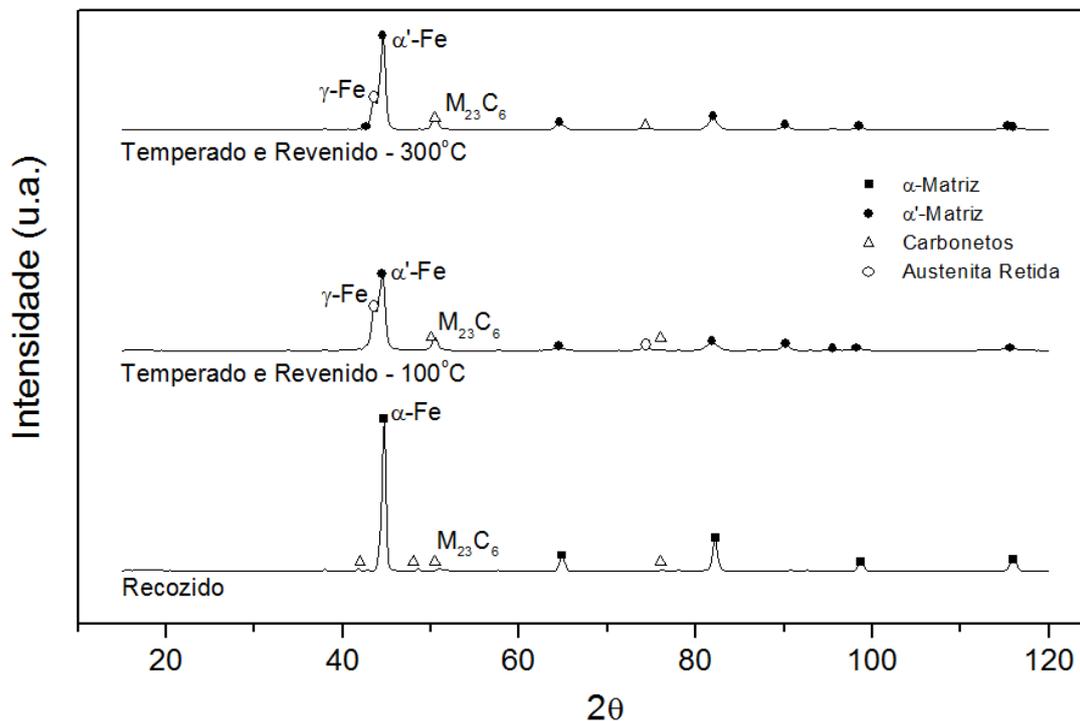


Figura 5.5. Difratoograma de raios-X para o aço inoxidável AISI 440BC nas condições recozido e temperado e revenido.

## 5.2. Análises da Dureza

O valor médio de dureza obtida para os discos na condição recozida foi de 264 HV ou 100 HRB, valor muito próximo de 251 HBW apresentado pelo fornecedor do aço inoxidável AISI 440BC. As durezas iniciais dos discos analisados, após os tratamentos térmicos impostos a cada uma das condições propostas são apresentadas na Tabela 5.1. As durezas médias apresentadas na Tabela 5.1 foram obtidas após medições em quatro pontos, em cada lado do disco, sempre a cada 90°. Nota-se que os materiais submetidos aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento são os que apresentam maior dureza, fato já esperado, e quando comparados entre eles, observa-se que o revenido a 100°C apresentam dureza média um pouco superior aos revenidos a 300°C. A dureza média maior é apresentada no disco de número 8 (temperado e revenido a 100°C), com 60 HRC ou 697HV.

Tabela 5.1. Dureza média obtida nos discos.

Recozidos	Dureza Vickers (HV)	Dureza Rockwell B (HRB)
19 sem lubrificação	322	107
16 lubrificado com diesel S10-B7	260	100
20 lubrificado com B20	243	98
15 lubrificado com B30	238	97
18 lubrificado com B50	248	98
17 lubrificado com B100	272	102
<b>Média e desvio padrão</b>	<b>263,8 (31,0)</b>	<b>100,3 (3,7)</b>
Temperados e Revenidos à 100°C	Dureza Vickers (HV)	Dureza Rockwell C (HRC)
14 sem lubrificação	653	57
9 lubrificado com diesel S10-B7	674	58
12 lubrificado com B20	613	55
8 lubrificado com B30	697	60
13 lubrificado com B50	613	55
11 lubrificado com B100	674	59
<b>Média e desvio padrão</b>	<b>654,0 (34,7)</b>	<b>57,3 (2,0)</b>
Temperados e Revenidos à 300°C	Dureza Vickers (HV)	Dureza Rockwell C (HRC)
3 sem lubrificação	633	57
4 lubrificado com diesel S10-B7	613	56
6 lubrificado com B20	614	56
1 lubrificado com B30	633	56
2 lubrificado com B50	577	53
7 lubrificado com B100	613	56
<b>Média e desvio padrão</b>	<b>613,8 (20,5)</b>	<b>56,0 (1,5)</b>

A elevada resistência no revenimento, conferida pelo cromo, e a boa resistência à corrosão/oxidação fazem que estes aços encontrem muitas aplicações para uso em altas temperaturas. Conforme literatura (SILVA e MEI, 2006), na faixa de revenimento até cerca de 400°C, a dureza cai pouco com o revenimento, o que foi observado neste trabalho, usando revenimento de 100°C ou com 300°C, a variação da dureza entre eles foi pequena (menor que 2 HRC).

### 5.3. Análises Tribológicas

Os discos confeccionados foram separados em três conjuntos, conforme o tratamento térmico sugerido e foram ensaiadas em seis condições distintas de lubrificação:

- Ensaio sem lubrificação (à seco);
- Ensaio lubrificado com diesel comercial (B7);
- Ensaio lubrificado com diesel e 20% de biodiesel (B20);
- Ensaio lubrificado com diesel e 30% de biodiesel (B30);
- Ensaio lubrificado com diesel e 50% de biodiesel (B50);
- Ensaio lubrificado com biodiesel puro (B100).

### 5.3.1. Ensaio Sem Lubrificação - Seco

A Tabela 5.2 apresenta os resultados das larguras das pistas de desgaste médias, e o desvio padrão correspondente a cada distância percorrida, considerando as três propostas de condições do material, e as duas faces analisadas em cada disco (superior e inferior). Nesta etapa foram utilizados os discos: 19 (recozido), 14 (temperado e revenido a 100°C) e 3 (temperado e revenido a 300°C). Nota-se que o valor máximo da largura da pista de desgaste se dá no disco recozido, com 2,999 mm e com desvio padrão de 0,128 mm, e o valor mínimo para o disco temperado e revenido à 300°C, com valor médio de 1,372 mm e desvio padrão de 0,074 mm. A diferença entre revenido a 100°C e revenido a 300°C está dentro do desvio padrão.

Tabela 5.2. Largura da pista de desgaste na condição sem lubrificação (à seco).

Sem lubrificação	Recozido (Disco 19)		Temperado e Revenido à 100°C (Disco 14)		Temperado e Revenido à 300°C (Disco 3)	
	Média(mm)	Desvio Padrão	Média (mm)	Desvio Padrão	Média (mm)	Desvio Padrão
Distância Percorrida (m)						
400	2,211	0,102	0,821	0,183	1,060	0,116
800	2,633	0,208	0,959	0,262	1,147	0,194
1200	2,916	0,040	1,109	0,325	1,155	0,095
1600	2,934	0,036	1,110	0,171	1,177	0,134
2000	2,934	0,037	1,254	0,129	1,164	0,087
2400	2,921	0,064	1,388	0,117	1,233	0,099
2800	2,959	0,103	1,385	0,151	1,312	0,143
3200	2,955	0,114	1,371	0,097	1,294	0,110
3600	2,986	0,131	1,369	0,117	1,324	0,115
4000	2,995	0,141	1,426	0,142	1,363	0,096
4400	2,999	0,128	1,434	0,076	1,372	0,074

A Figura 5.6, mostra graficamente o comportamento dos diferentes discos durante o ensaio tribológico. Nota-se que o material recozido, em todas as distâncias, foi o que apresentou maior desgaste, e o material tratado termicamente, nas duas temperaturas de revenido, apresentou um desgaste similar ao longo de todo o ensaio, onde após os 4400 m percorridos, a diferença entre as larguras das pistas, ficou maior em 4,5% no material temperado e revenido à 100°C, dentro do desvio padrão para discos temperados e revenidos.

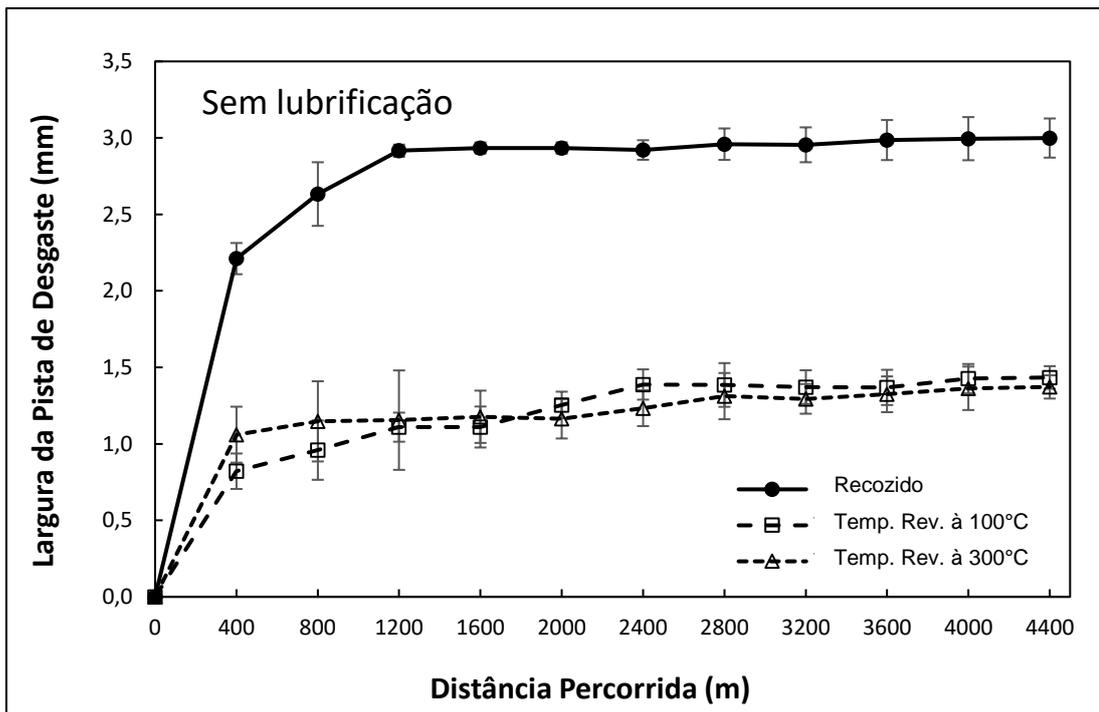


Figura 5.6. Largura da pista de desgaste nos discos sem lubrificação (à seco).

Em todos os ensaios observou-se dois regimes: regime transiente que pode ser devido a dois fatores, remoção de heterogeneidades superficiais, resultantes dos processos de fabricação, tratamento térmico ou retificação e ao endurecimento do disco próximo a superfície, e um posterior encruamento que vai endurecer a superfície da pista e favorecer o surgimento do regime estacionário, que é quando o desgaste age de forma mais constante (PINTAÚDE, 1998).

Para a condição recozida, observa-se um regime inicial transiente de desgaste até aproximadamente 1200 m, e posterior regime estacionário até os 4400 m de distância percorrida, indicando uma taxa constante de desgaste. Para os discos temperados e revenidos, o estado transiente inicial permanece até 400 m, e depois atinge-se o estado estacionário até o final dos ensaios.

Comparando os resultados encontrados nos discos recozidos com os temperados e revenidos sem lubrificação na distância percorrida de 4400 m como referência, obteve-se uma variação de aproximadamente 109% na amostra revenida a 100°C e 118% na amostra revenida a 300°C na largura das pistas de desgaste. Em relação aos discos temperados e revenidos, não foram observadas diferenças

significativas entre eles, provavelmente em função das durezas muito próximas para os dois revenimentos realizados. A Tabela 5.3 apresenta a taxa de desgaste considerando a distância percorrida para os três discos ensaiados na condição sem lubrificação.

Tabela 5.3. Taxa de desgaste usando o volume desgastado, discos sem lubrificação.

Sem lubrificação	Recozido (Disco19)		Temperado e Revenido à 100°C (Disco 14)		Temperado e Revenido à 300°C (Disco 3)	
	Volume Desgastado Médio $\times 10^{-8}$ (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste $\times 10^{-5}$ (m <sup>3</sup> /m)	Volume Desgastado Médio $\times 10^{-8}$ (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste $\times 10^{-5}$ (m <sup>3</sup> /m)	Volume Desgastado Médio $\times 10^{-8}$ (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste $\times 10^{-5}$ (m <sup>3</sup> /m)
400	56,87	142,175	2,87	7,175	6,19	15,475
800	96,67	99,5	4,58	4,275	7,85	4,15
1200	131,96	88,225	7,09	6,275	8,02	0,425
1600	134,47	6,275	7,11	0,05	8,49	1,175
2000	134,47	0	10,27	7,9	8,21	0,7
2400	132,66	4,525	13,94	9,175	9,76	3,875
2800	138,01	13,375	13,85	0,225	11,77	5,025
3200	137,43	1,45	13,43	1,05	11,29	1,2
3600	141,89	11,15	13,38	0,125	12,09	2
4000	143,19	3,25	15,12	4,35	13,19	2,75
4400	143,78	1,475	15,38	0,65	13,46	0,675

Na Figura 5.7 encontra-se a representação da tendência da taxa de desgaste. Observando-se esta tendência, tem-se que o disco recozido apresenta a mais elevada taxa de desgaste, ao atingir os 400 m e vai decrescendo até os 2.000 m e volta a crescer até os 2.800 m e depois oscila novamente em 3.600 m, quando cai novamente. O disco temperado e revenido a 100°C tem em 400 m uma taxa bastante elevada e no ponto de 2.400 m seu pico máximo, depois decrescendo e volta a apresentar uma taxa de desgaste considerável em 4.000 m. O disco temperado e revenido a 300°C apresenta as taxas de desgaste mais altas em 400 m e 2.800 m. As maiores taxas de desgaste ocorrem no disco recozido e as menores taxas de desgaste ocorrem no disco temperado e revenido a 100°C. Em todos os discos é observado o encruamento inicial bem acentuado.

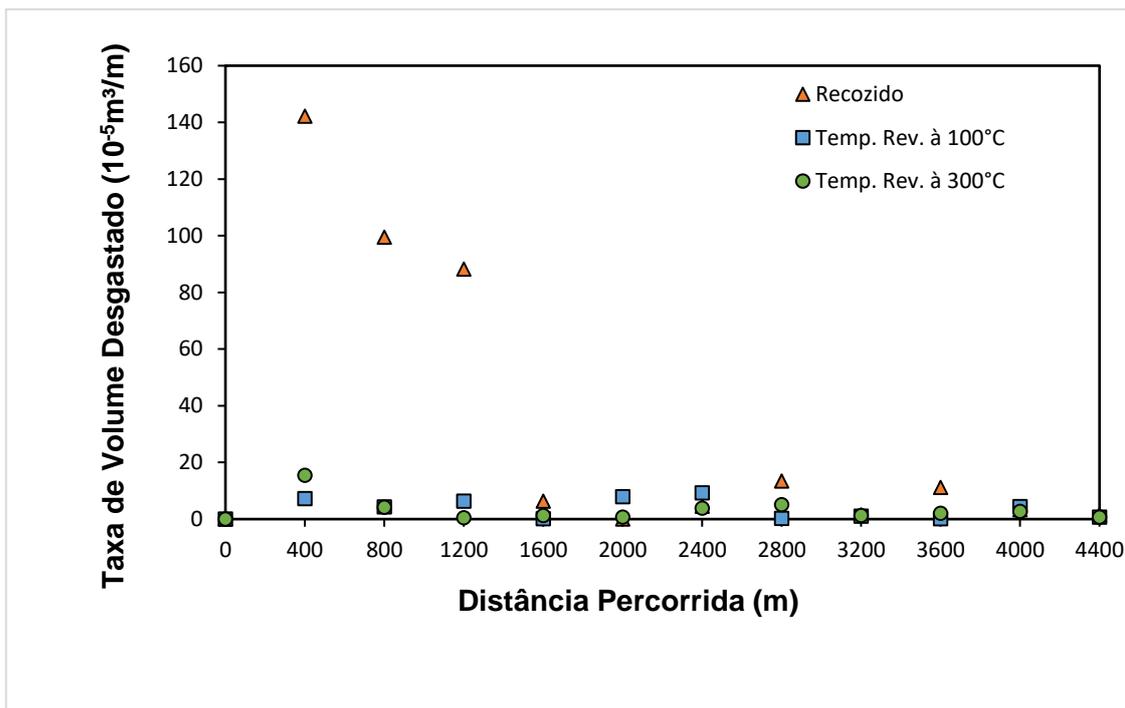


Figura 5.7. Comportamento da taxa de volume desgastado para a condição sem lubrificação.

### 5.3.2. Ensaio Com Lubrificação - Diesel S10 (B7)

Para estes ensaios foram utilizados os discos: 16 (recozido), 9 (temperado e revenido a 100°C) e 4 (temperado e revenido a 300°C). Os resultados para o ensaio do material usando-se lubrificação com diesel S10 (B7), ou seja, o diesel comercial, encontram-se na Tabela 5.4. Os valores máximos de desgaste ocorrem após percorrida a distância de 4400 m, para todos os materiais, assim tem-se a largura de desgaste de 1,959 mm, com desvio padrão de 0,52 mm, como máxima para o material recozido, 1,591 mm com desvio padrão de 0,039 mm para o material temperado e revenido a 100°C, e 1,629 mm com desvio padrão de 0,092 mm para o material revenido a 300°C. Novamente o material recozido apresentou a maior largura de desgaste.

Comparando-se os resultados encontrados dos discos obtém-se que o desgaste no disco 16 recozido é 23% maior do que no disco 9 revenido a 100°C, e 20% maior no disco 4 revenido a 300°C na largura das pistas de desgaste.

Tabela 5.4. Largura da pista de desgaste com lubrificação de diesel comercial (B7).

B7	Recozido (Disco 16)		Temperado e Revenido à 100°C (Disco 9)		Temperado e Revenido à 300°C (Disco 4)	
	Média (mm)	Desvio Padrão	Média (mm)	Desvio Padrão	Média (mm)	Desvio Padrão
400	0,838	0,406	0,556	0,072	0,477	0,118
800	1,006	0,571	0,816	0,081	0,898	0,047
1200	1,186	0,438	1,073	0,100	0,970	0,050
1600	1,477	0,217	1,174	0,059	1,186	0,236
2000	1,703	0,095	1,234	0,042	1,238	0,275
2400	1,738	0,079	1,324	0,032	1,281	0,274
2800	1,801	0,060	1,365	0,034	1,296	0,261
3200	1,811	0,059	1,388	0,029	1,35	0,235
3600	1,814	0,062	1,439	0,027	1,489	0,15
4000	1,831	0,058	1,518	0,042	1,558	0,095
4400	1,959	0,052	1,591	0,039	1,629	0,092

A Figura 5.8 apresenta o comportamento dos ensaios para os três discos utilizando-se o diesel S10 (B7) comercial como lubrificante, e tem-se que o disco recozido apresenta o maior desgaste, enquanto que os outros dois tratados por têmpera e revenido tem um comportamento muito parecido, ao longo de todo o ensaio, mas com uma variação na distância final de desgaste próximo de 3% entre eles, o que permite dizer que está dentro do desvio padrão. Nesta condição de ensaio, não foram observados regime em estado estacionário com a distância percorrida de 4400 m, somente estados transientes iniciais para todas as amostras de discos.

A Tabela 5.5 apresenta a taxa de desgaste considerando a distância percorrida para os três discos ensaiados na condição lubrificadas com diesel comercial.

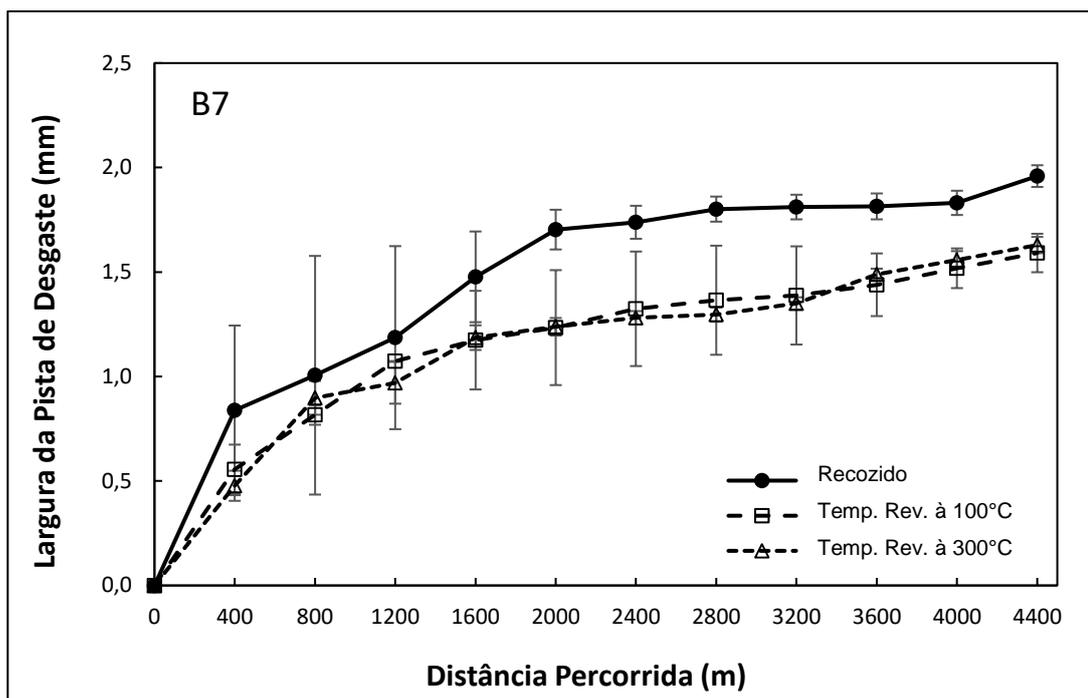


Figura 5.8. Largura da pista de desgaste nos discos com lubrificação diesel comercial (B7).

Tabela 5.5. Taxa de desgaste usando o volume desgastado, discos lubrificados com diesel S10 (B7).

B7	Recozido (Disco 16)		Temperado e Revenido à 100°C (Disco 9)		Temperado e Revenido à 300°C (Disco 4)	
	Volume Desgastado Médio $\times 10^{-8}$ (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste $\times 10^{-5}$ (m <sup>3</sup> /m)	Volume Desgastado Médio $\times 10^{-8}$ (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste $\times 10^{-5}$ (m <sup>3</sup> /m)	Volume Desgastado Médio $\times 10^{-8}$ (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste $\times 10^{-5}$ (m <sup>3</sup> /m)
400	3,057	7,6425	0,892	2,23	0,563	1,4075
800	5,294	5,5925	2,822	4,825	3,763	8
1200	8,684	8,475	6,426	9,01	4,744	2,4525
1600	16,813	20,3225	8,423	4,9925	8,684	9,85
2000	25,829	22,54	9,785	3,405	9,881	2,9925
2400	27,464	4,0875	12,095	5,775	10,951	2,675
2800	30,581	7,7925	13,258	2,9075	11,341	0,975
3200	31,097	1,29	13,942	1,71	12,824	3,7075
3600	31,253	0,39	15,543	4,0025	17,228	11,01
4000	32,146	2,2325	18,259	6,79	19,948	6,8
4400	39,429	18,2075	21,037	6,945	22,589	6,6025

Na Figura 5.9 encontra-se a representação da tendência da taxa de desgaste, quando se utiliza o diesel comercial S10(B7). Observando-se esta tendência, tem-se que o disco recozido apresenta taxa de desgaste mais elevada, ao atingir os 2.000

m e volta a crescer em 2.800 m e depois em 4.400 m volta a apresentar uma taxa de desgaste bem elevada. O disco temperado e revenido a 100°C tem no ponto de 2.400 m um pico elevado e apresenta uma taxa de desgaste mais alta em 4.400 m. Tendo em 2.400 m como no caso anterior um ponto onde a taxa de desgaste foi bem elevada. No disco temperado e revenido a 300°C as taxas de desgaste mais altas se deram em 3.600 m e 4.400 m. As maiores taxas de desgaste ocorrem no disco recozido. Observando-se os discos temperados as taxas no disco revenido a 100°C foram mais constantes e no revenido a 300°C ocorrem bastante oscilações.

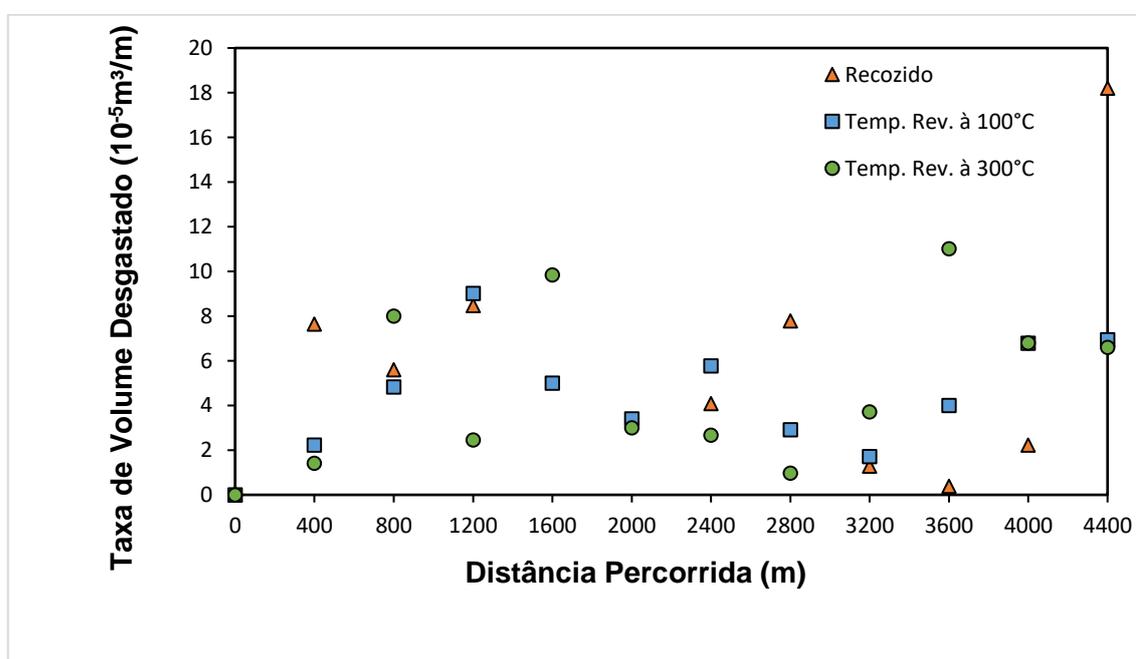


Figura 5.9. Comportamento da taxa de volume desgastado para a condição lubrificado com B7.

### 5.3.3. Ensaios Com Lubrificação - Biodiesel (B20) (S10B7+13%B100)

Os resultados para o ensaio de desgaste do material utilizando-se para a lubrificação o biodiesel B20, encontram-se na Tabela 5.6. Os discos que foram utilizados no ensaio são: 20 (recozido, bruto), 12 (temperado e revenido a 100°C) e 6 (temperado e revenido a 300°C).

Os valores máximos de desgaste ocorrem depois de percorrida a distância de 4400 m, para todos os materiais, assim tem-se a largura de desgaste máxima de 1,769 mm, com desvio padrão de 0,079 mm, para o disco recozido, agora no disco temperado e revenido a 100°C, 1,135 mm, com desvio padrão de 0,147 mm, e 1,332

mm, com desvio padrão de 0,252 mm, para o disco revenido a 300°C, desta forma a comparação entre os discos revenidos ficam dentro do desvio padrão, apresentando resultados já esperados, porque ocorre uma relação entre a dureza maior do disco revenido a 100°C e o desgaste menor, do mesmo material.

Comparando-se os resultados encontrados dos discos obtém-se que o desgaste no disco recozido é de 56% maior do que na amostra revenida a 100°C e 33% maior na amostra de disco revenida a 300°C na largura das pistas de desgaste.

Tabela 5.6. Largura da pista de desgaste com lubrificação de biodiesel (B20).

B20	Recozido (Disco 20)		Temperado e Revenido à 100°C (Disco 12)		Temperado e Revenido à 300°C (Disco 6)	
	Média (mm)	Desvio Padrão	Média (mm)	Desvio Padrão	Média (mm)	Desvio Padrão
400	0,426	0,036	0,619	0,076	0,472	0,219
800	0,559	0,084	0,873	0,123	0,783	0,060
1200	1,090	0,077	0,931	0,088	1,008	0,051
1600	1,326	0,060	0,934	0,091	1,009	0,057
2000	1,383	0,053	0,980	0,092	1,102	0,039
2400	1,461	0,031	1,100	0,144	1,148	0,066
2800	1,551	0,060	1,077	0,150	1,164	0,061
3200	1,579	0,095	1,096	0,138	1,174	0,055
3600	1,637	0,064	1,076	0,163	1,219	0,029
4000	1,640	0,058	1,116	0,154	1,230	0,038
4400	1,769	0,079	1,135	0,147	1,332	0,252

A Figura 5.10 apresenta o comportamento dos ensaios para os três discos utilizando-se como lubrificante o biodiesel B20 e tem-se que o disco recozido, em bruto, apresenta o maior desgaste percentual se comparado com a primeira medida, e com um desempenho bastante irregular, enquanto que os outros dois tem um comportamento bastante parecidos, ao longo de todo o ensaio, mas com uma variação final de desgaste bem acentuada, para o material temperado e revenido a 300°C. Ficando próxima a 17% a diferença de desgaste na distância final percorrida entre os materiais temperados. Então após as comparações quem sofreu o menor desgaste real foi o material temperado e revenido a 100°C.

Com o uso do B20, observa-se que os discos temperados e revenidos

apresentam uma transição entre o regime transiente inicial e o regime estacionário, para uma distância percorrida de aproximadamente 1200 m, fato que não ocorreu para as lubrificações S10 (B7) e B100.

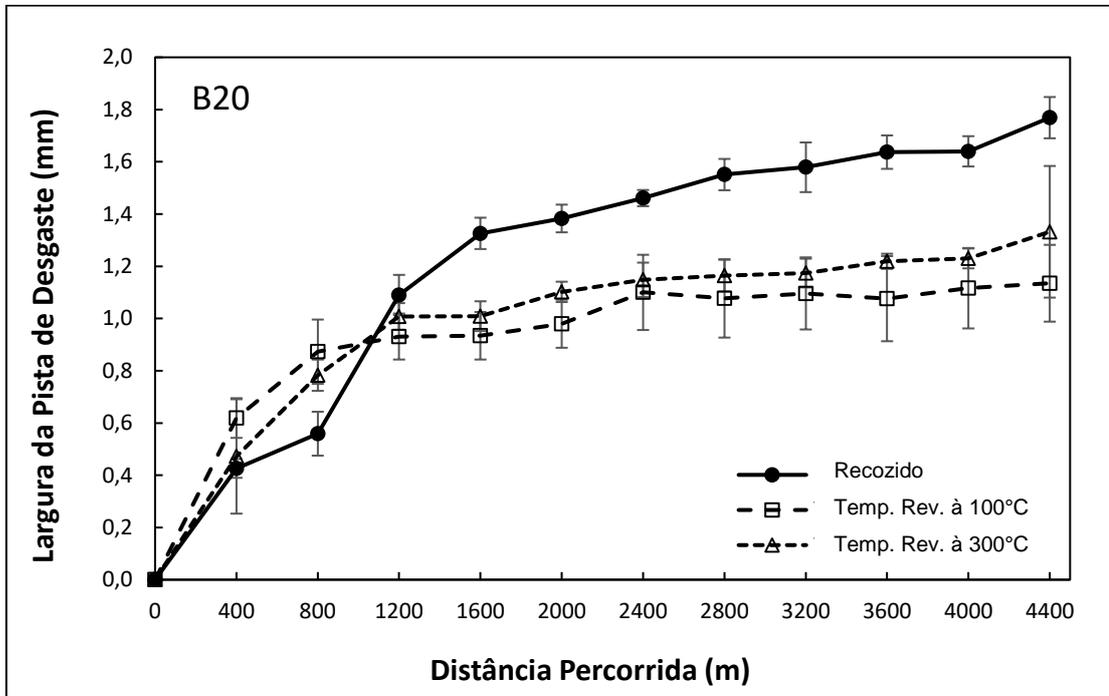


Figura 5.10. Largura da pista de desgaste nos discos com lubrificação biodiesel (B20).

A Tabela 5.7 apresenta a taxa de desgaste considerando a distância percorrida para os três discos; recozido (disco 20), temperado e revenido a 100°C (disco 12) e temperado e revenido a 300°C (disco 6), ensaiados na condição de lubrificados com biodiesel B20.

Na Figura 5.11 encontra-se a representação da tendência da taxa de desgaste, quando se utiliza o biodiesel B20. Observando-se as tendências, tem-se que o disco recozido apresenta taxa de desgaste, acentuadas ao atingir os 1.200 m e cai pouco para os 1.600 m, volta a crescer em 2.800 m e depois em 4.400 m encontra-se o maior valor de taxa de desgaste. O disco temperado e revenido a 100°C tem no ponto de 800 m seu pico máximo e volta a apresentar uma taxa de desgaste alta em 2.400 m. O disco temperado e revenido a 300°C as taxas de desgaste mais altas apareceram em 1.200 m, e em 4.400 m. As maiores taxas de desgaste ocorrem no disco recozido. E o disco temperado e revenido a 100°C apresenta as menores taxas. De modo geral as taxas foram mais baixas que nos

dois testes anteriores.

Tabela 5.7. Taxa de desgaste usando o volume desgastado, discos lubrificados com B20.

B20	Recozido (Disco 20)		Temperado e Revenido à 100°C (Disco 12)		Temperado e Revenido à 300°C (Disco 6)	
	Volume Desgastado Médio $\times 10^{-8}$ (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste $\times 10^{-5}$ (m <sup>3</sup> /m)	Volume Desgastado Médio $\times 10^{-8}$ (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste $\times 10^{-5}$ (m <sup>3</sup> /m)	Volume Desgastado Médio $\times 10^{-8}$ (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste $\times 10^{-5}$ (m <sup>3</sup> /m)
400	0,401	1,0025	1,231	3,0775	0,545	1,3625
800	0,906	1,2625	3,457	5,565	2,493	4,87
1200	6,737	14,578	4,194	1,8425	5,325	7,08
1600	12,151	13,535	4,235	0,1025	5,341	0,04
2000	13,791	4,1	4,893	1,645	6,963	4,055
2400	16,271	6,2	6,925	5,08	7,874	2,2775
2800	19,482	8,0275	6,498	1,0675	8,209	0,8375
3200	20,562	2,7	6,849	0,8775	8,423	0,535
3600	22,925	5,9075	6,481	0,92	9,432	2,5225
4000	23,052	0,3175	7,232	1,8775	9,691	0,6475
4400	28,969	14,793	7,609	0,9425	12,316	6,5625

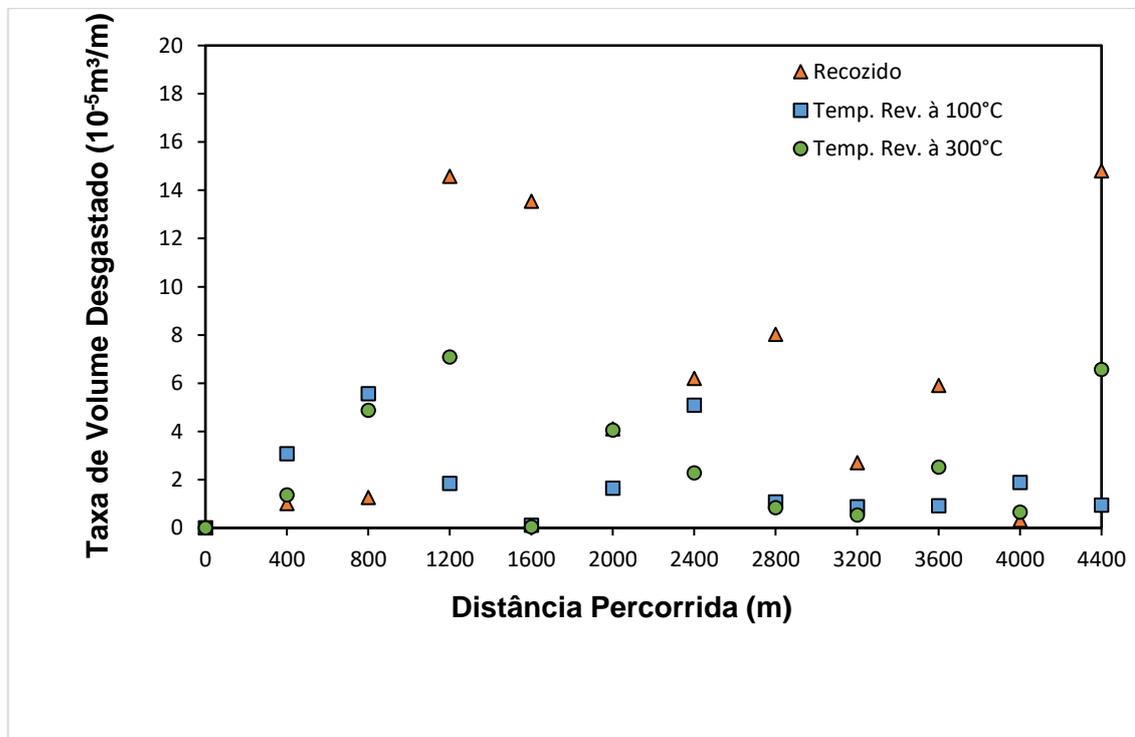


Figura 5.11. Comportamento da taxa de volume desgastado para a condição lubrificado com B20.

### 5.3.4. Ensaio Com Lubrificação - Biodiesel (B30)

Os resultados para o ensaio de desgaste do material (disco), utilizando-se como lubrificante o biodiesel B30, encontram-se na Tabela 5.8. Os discos que foram utilizados nesta etapa de ensaio são: 15 (recozido), 8 (temperado e revenido a 100°C) e 1 (temperado e revenido a 300°C). Os valores máximos de desgaste ocorrem após percorrida a distância de 4400 m, para todos os materiais, assim, tem-se a largura de desgaste máxima de 1,598 mm, com desvio padrão de 0,059 mm, para o material recozido, no material temperado e revenido a 100°C, encontra-se 1,066 mm, com desvio padrão de 0,084 mm, e 0,992 mm, com desvio padrão de 0,082 mm, para o material revenido a 300°C. O material recozido teve um desgaste superior a 50%, quando comparado aos outros materiais tratados termicamente, considerando a distância total percorrida.

Tabela 5.8. Largura da pista de desgaste com lubrificação de biodiesel (B30).

B30	Recozido (Disco15)		Temperado e Revenido à 100°C (Disco8)		Temperado e Revenido à 300°C (Disco1)	
	Média (mm)	Desvio Padrão	Média (mm)	Desvio Padrão	Média (mm)	Desvio Padrão
Distância Percorrida (m)						
400	0,381	0,031	0,621	0,068	0,559	0,076
800	0,580	0,139	0,683	0,047	0,764	0,094
1200	0,974	0,108	0,774	0,042	0,828	0,064
1600	1,089	0,119	0,830	0,022	0,896	0,063
2000	1,126	0,169	0,890	0,049	0,930	0,058
2400	1,258	0,112	0,946	0,030	0,927	0,045
2800	1,429	0,172	0,993	0,091	0,939	0,064
3200	1,434	0,175	1,033	0,054	0,957	0,066
3600	1,497	0,124	1,059	0,056	0,949	0,063
4000	1,540	0,074	1,063	0,072	0,990	0,060
4400	1,598	0,059	1,066	0,084	0,992	0,082

A Figura 5.12 apresenta o comportamento dos ensaios para os três discos, utilizando-se como lubrificante o biodiesel B30, e tem-se que o disco recozido, apresenta o maior desgaste percentual, visual e numérico, se for comparado a última medida com a primeira medida, e com um desempenho bastante irregular, enquanto que os outros dois tem um comportamento bastante parecidos, ao longo de todo o ensaio, ficando próximo de 7% a diferença de desgaste no ponto final da distância

percorrida, entre os materiais temperados, valor este dentro do desvio padrão.

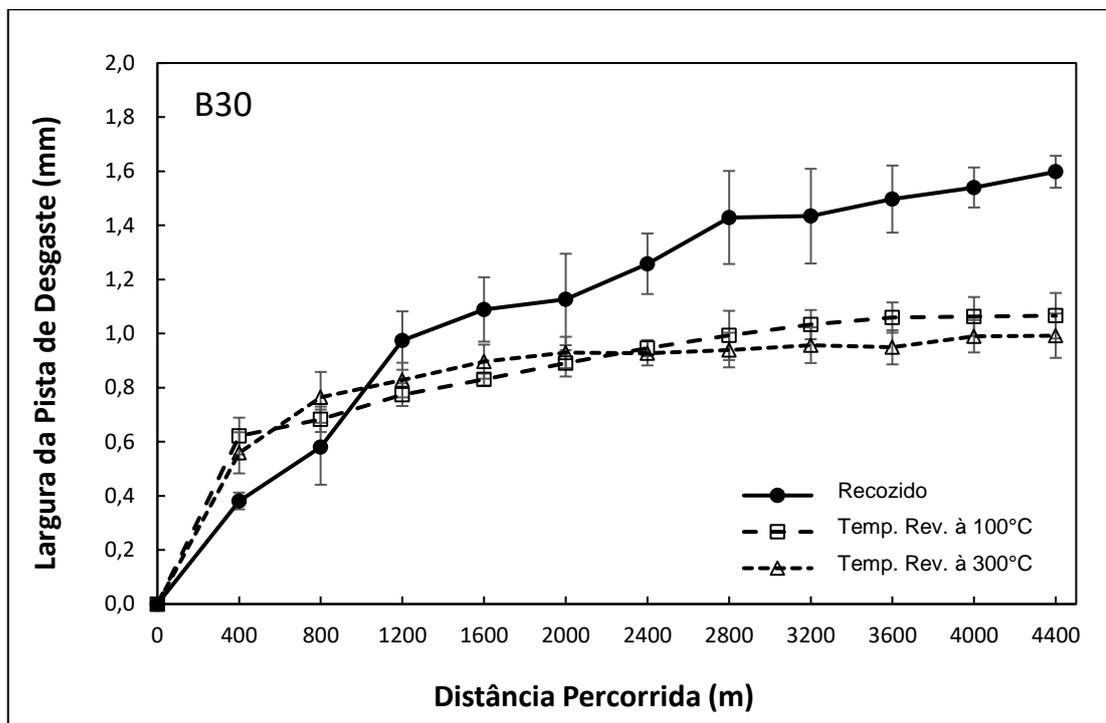


Figura 5.12. Largura da pista de desgaste nos discos com lubrificação biodiesel (B30).

Observando-se a Figura 5.12 tem-se que até 800m para os discos tratados com têmpera e revenidos ocorre um período de regime de transição e após este ponto o regime tende a ser estacionário. Analisando-se a primeira medida no deslocamento de 400 m e a última a 4400 m de cada disco encontra-se os seguintes percentuais de variação, para o disco: recozido 319%, revenido a 100°C, 72% e revenido a 300°C, 77%, entre os discos revenidos as variações são desconsideradas por estarem dentro do desvio padrão. Então após as comparações quem sofreu o menor desgaste foi o material temperado e revenido a 100°C.

Na Tabela 5.9 é mostrada a taxa de desgaste considerando a distância percorrida para três discos; recozido (disco 15), temperado e revenido a 100°C (disco 8) e temperado e revenido a 300°C (disco 1), ensaiados na condição de lubrificados com biodiesel B30.

Tabela 5.9. Taxa de desgaste usando o volume desgastado, discos lubrificado com B30.

B30	Recozido (Disco15)		Temperado e Revenido à 100°C (Disco8)		Temperado e Revenido à 300°C (Disco1)	
	Volume Desgastado Médio $\times 10^{-8}$ (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste $\times 10^{-5}$ (m <sup>3</sup> /m)	Volume Desgastado Médio $\times 10^{-8}$ (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste $\times 10^{-5}$ (m <sup>3</sup> /m)	Volume Desgastado Médio $\times 10^{-8}$ (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste $\times 10^{-5}$ (m <sup>3</sup> /m)
400	0,287	0,7175	1,243	3,1075	0,906	2,265
800	1,012	1,8125	1,654	1,0275	2,316	3,525
1200	4,803	9,4775	2,408	1,885	2,949	1,5825
1600	6,718	4,7875	2,97	1,405	3,738	1,9725
2000	7,429	1,7775	3,663	1,7325	4,181	1,1075
2400	10,369	7,35	4,4	1,8425	4,141	0,1
2800	15,22	12,128	5,091	1,7275	4,303	0,405
3200	15,381	0,4025	5,732	1,6025	4,556	0,6325
3600	17,508	5,3175	6,177	1,1125	4,442	0,285
4000	19,068	3,9	6,248	1,505	5,044	1,505
4400	21,317	5,6225	6,301	0,1325	5,075	0,0775

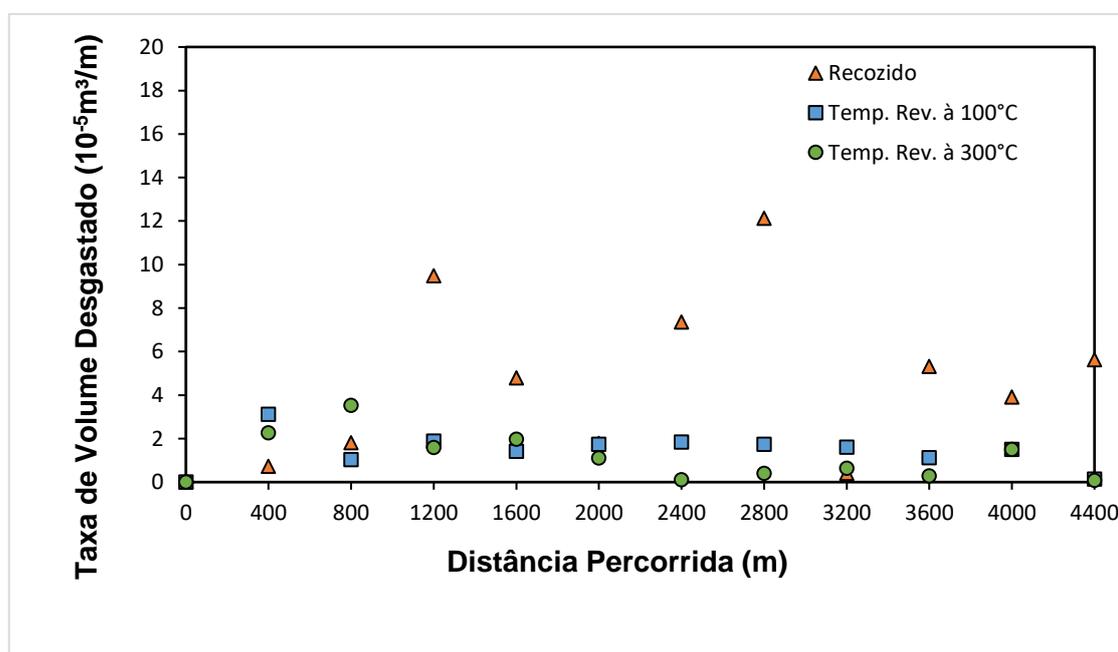


Figura 5.13. Comportamento da taxa de volume desgastado para a condição lubrificado com B30.

Na Figura 5.13 encontra-se a representação da tendência da taxa de desgaste, quando se utiliza o biodiesel B30. Observando-se as tendências tem-se que o disco recozido apresenta taxa de desgaste, acentuadas ao atingir os 1.200 m e tem uma taxa mais elevada em 2.800 m, e depois em 4.400 m encontra-se o terceiro maior valor de taxa de desgaste. O disco temperado e revenido a 100°C tem

uma taxa de desgaste mais acentuada em 400m e taxa de desgaste quase linear descendente. No disco temperado e revenido a 300°C a taxa de desgaste mais alta aparece em 800 m e depois parece ser oscilante e relativamente baixa. As maiores taxas de desgaste ocorrem no disco recozido. De modo geral as taxas foram mais baixas que nos testes anteriores e com comportamento mais linear para os discos tratados termicamente.

### 5.3.5. Ensaio Com Lubrificação - Biodiesel (B50)

Os resultados para o ensaio de desgaste do material (disco), utilizando-se como lubrificante o biodiesel B50, encontram-se na Tabela 5.10. Os discos que foram utilizados são de números: 18 (recozido), 13 (temperado e revenido a 100°C) e 2 (temperado e revenido a 300°C). Os valores máximos de desgaste após 4400 m, foram de 1,255 mm de largura de pista com desvio padrão de 0,108 mm para o disco de material recozido, no disco temperado e revenido a 100°C encontrou-se 1,084 mm com desvio padrão de 0,068 mm, e 1,104 mm com desvio padrão de 0,138 mm para o disco revenido a 300°C, sendo que o disco recozido, teve um desgaste aproximadamente 15% superior, quando comparado aos outros materiais tratados termicamente, comparando-se as larguras das pistas ao final do ensaio.

Tabela 5.10. Largura da pista de desgaste com lubrificação de biodiesel (B50).

B50	Recozido (Disco18)		Temperado e Revenido à 100°C (Disco 13)		Temperado e Revenido à 300°C (Disco2)	
	Média (mm)	Desvio Padrão	Média (mm)	Desvio Padrão	Média (mm)	Desvio Padrão
Distância Percorrida (m)						
400	0,359	0,066	0,627	0,053	0,444	0,083
800	0,521	0,073	0,774	0,113	0,701	0,034
1200	0,581	0,064	0,844	0,083	0,872	0,114
1600	0,843	0,135	0,906	0,066	0,921	0,086
2000	0,901	0,124	0,996	0,066	1,005	0,183
2400	0,888	0,107	0,974	0,046	1,009	0,162
2800	0,900	0,100	0,986	0,051	1,037	0,163
3200	0,969	0,100	0,978	0,074	1,084	0,131
3600	1,047	0,117	1,012	0,063	1,085	0,139
4000	1,103	0,168	1,039	0,059	1,086	0,143
4400	1,255	0,108	1,084	0,068	1,104	0,138

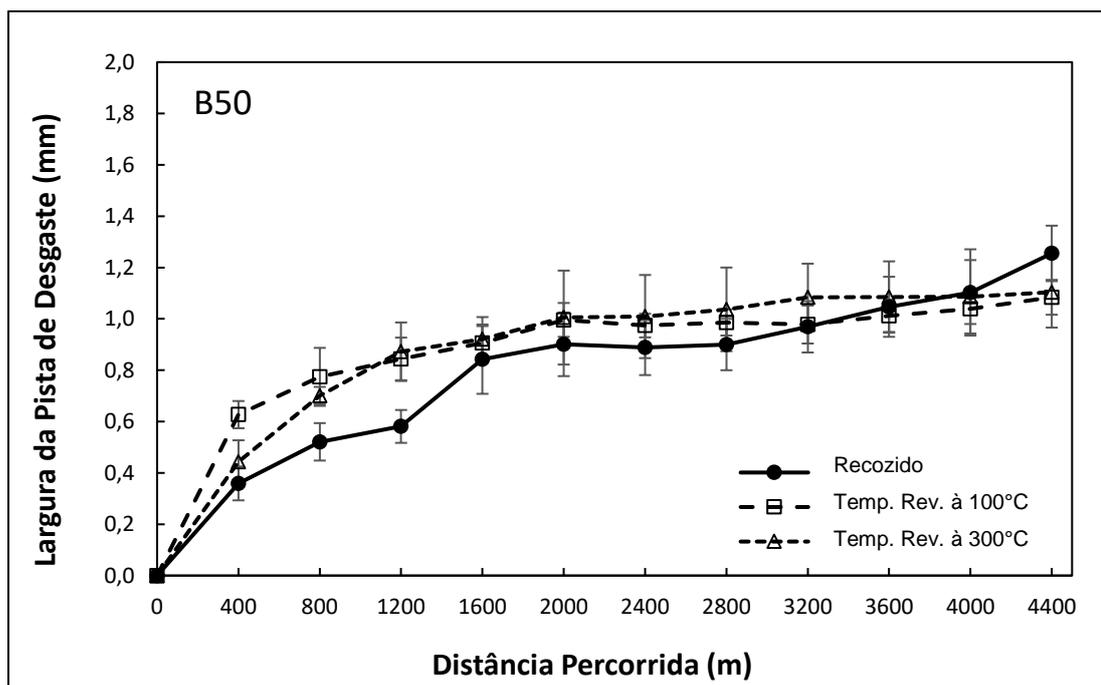


Figura 5.14. Largura da pista de desgaste nos discos com lubrificação biodiesel (B50).

A Figura 5.14 apresenta o comportamento dos ensaios para os três discos, utilizando-se como lubrificante o biodiesel B50 e tem-se que o disco recozido, apresenta o maior desgaste se comparado com os outros, e com um desempenho bastante irregular, enquanto que os outros dois tem um comportamento bastante parecidos, ao longo de todo o ensaio, mas com uma variação de desgaste mais acentuada, no ponto de 3200 m, para o material temperado e revenido a 300°C. Ficando próxima de 2% a diferença de desgaste na distância final percorrida de 4400 m entre os materiais temperados, é considerada desprezada por ficar dentro da faixa do desvio padrão. Pode-se ainda observar que ocorre uma transição de regime no ponto de 1600 metros percorridos, de regime transitório para regime constante, com grande distúrbio nos 4000 m no material recozido.

Na Tabela 5.11 tem-se a taxa de desgaste considerando a distância percorrida para os três discos, lubrificadas com biodiesel B50; recozido (disco 18), temperado e revenido a 100°C (disco 13) e temperado e revenido a 300°C (disco 2).

Tabela 5.11. Taxa de desgaste usando o volume desgastado, discos lubrificado com B50.

B50	Recozido (Disco18)		Temperado e Revenido à 100°C (Disco 13)		Temperado e Revenido à 300°C (Disco2)	
	Volume Desgastado Médio $\times 10^{-8}$ (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste $\times 10^{-5}$ (m <sup>3</sup> /m)	Volume Desgastado Médio $\times 10^{-8}$ (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste $\times 10^{-5}$ (m <sup>3</sup> /m)	Volume Desgastado Médio $\times 10^{-8}$ (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste $\times 10^{-5}$ (m <sup>3</sup> /m)
400	0,24	0,6	1,279	3,1975	0,454	1,135
800	0,734	1,235	2,408	2,8225	1,788	3,335
1200	1,018	0,71	3,123	1,7875	3,445	4,1425
1600	3,112	5,235	3,864	1,8525	4,06	1,5375
2000	3,8	1,72	5,137	3,1825	5,278	3,045
2400	3,638	0,405	4,803	0,835	5,341	0,1575
2800	3,788	0,375	4,984	0,4525	5,799	1,145
3200	4,73	2,355	4,863	0,3025	6,626	2,0675
3600	5,969	3,0975	5,389	1,315	6,645	0,0475
4000	6,982	2,5325	5,833	1,11	6,663	0,045
4400	10,295	8,2825	6,626	1,9825	7	0,8425

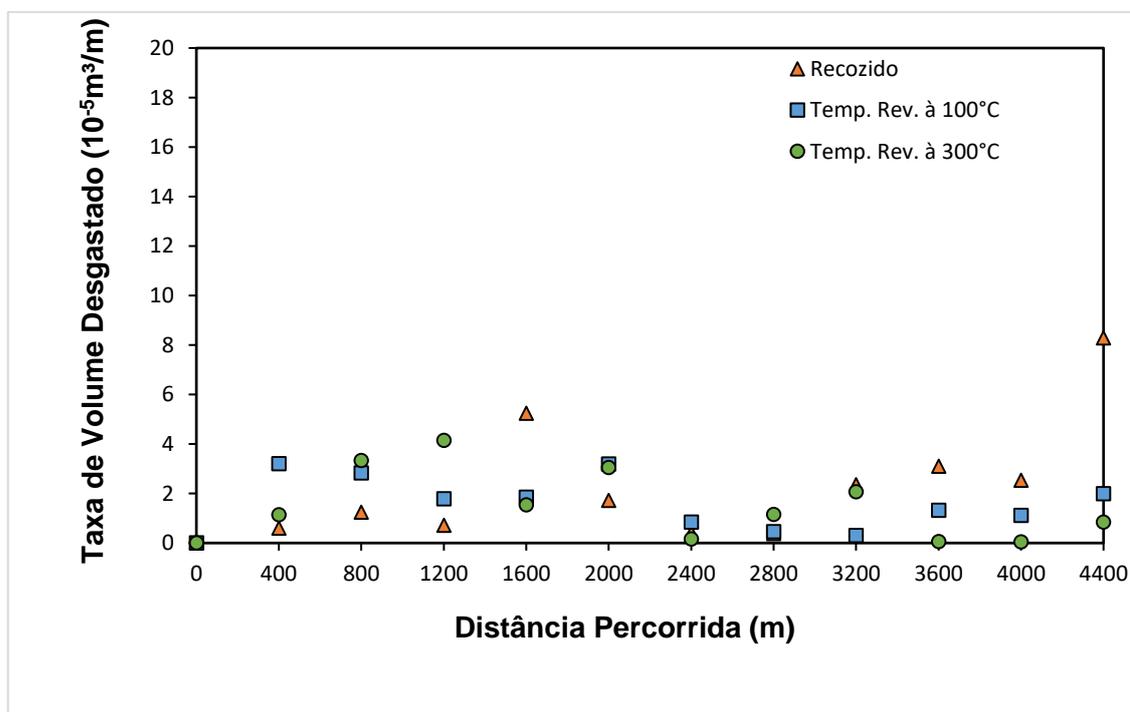


Figura 5.15. Comportamento da taxa de volume desgastado para a condição lubrificado com B50.

Na Figura 5.15 encontra-se a representação da tendência da taxa de desgaste, quando se utiliza o biodiesel B50. Observando-se as tendências tem-se que o disco recozido apresenta taxa de desgaste, mais acentuadas ao atingir os 1.600 m e em 4.400 m encontramos o maior valor de taxa de desgaste. O disco

temperado e revenido a 100°C tem taxas de desgaste maiores em 400 m e 2.000 m e ascende em 4.400 m. No disco temperado e revenido a 300°C as taxas de desgaste mais altas apareceram em 1.200 m e 2.000 m, parece haver uma diminuição de taxa de desgaste. As maiores taxas de desgaste ocorrem no disco recozido. Em todas as situações as taxas apresentam tendências de crescimento em 4.400 m mas os valores de um modo geral são pequenos, menores que nos casos anteriores, o que pode ser devido ao lubrificante apresentar um melhor desempenho como tal.

### **5.3.6. Ensaios Com Lubrificação - Biodiesel Puro (B100)**

Os resultados para os ensaios de desgaste dos discos usando-se lubrificação com biodiesel puro (B100) encontram-se na Tabela 5.12. Neste ensaio foram utilizados os discos: 17 (recozido), 11 (temperado e revenido a 100°C) e 7 (temperado e revenido a 300°C). Os valores máximos de desgaste ocorrem após percorrida a distância de 4400 m, para todos os materiais, assim tem-se a largura de desgaste 1,431 mm, com desvio padrão de 0,106 mm, como máxima agora no material temperado e revenido a 100°C, no disco recozido 1,315 mm com desvio padrão de 0,055 mm, e 1,142 mm com desvio padrão de 0,03 mm para o material revenido a 300°C, ficando nesta condição a única vez fora do desvio padrão para os discos revenidos.

A Figura 5.16 apresenta o comportamento dos ensaios para os três discos utilizando-se como lubrificante o biodiesel puro (B100), e tem-se que o material recozido, apresenta o maior desgaste percentual se comparado com a primeira leitura, e com um desempenho bastante irregular, enquanto que os outros dois tem um comportamento muito parecido, ao longo de todo o ensaio, mas com uma variação final de desgaste bem acentuada, ficando próxima a 24% a diferença de desgaste entre eles.

Tabela 5.12. Largura da pista de desgaste com lubrificação de biodiesel puro (B100).

B100	Recozido (Disco 17)		Temperado e Revenido à 100°C (Disco11)		Temperado e Revenido à 300°C (Disco7)	
	Média (mm)	Desvio Padrão	Média (mm)	Desvio Padrão	Média (mm)	Desvio Padrão
400	0,394	0,088	0,580	0,045	0,421	0,046
800	0,742	0,217	0,921	0,155	0,543	0,075
1200	0,799	0,183	1,066	0,041	0,669	0,085
1600	0,829	0,202	1,173	0,061	0,833	0,200
2000	0,994	0,053	1,274	0,167	0,959	0,079
2400	1,036	0,063	1,306	0,175	1,020	0,046
2800	1,123	0,129	1,377	0,150	1,039	0,053
3200	1,147	0,118	1,391	0,139	1,068	0,051
3600	1,175	0,113	1,389	0,127	1,069	0,047
4000	1,229	0,087	1,414	0,125	1,085	0,032
4400	1,315	0,055	1,431	0,106	1,142	0,030

Então após as comparações quem sofreu o menor desgaste real mediante a comparação entre 400 m e 4400 m, foi o material temperado e revenido a 100°C, ou seja, aquele que apresentou a maior dureza. Fato interessante que será melhor explicado a seguir.

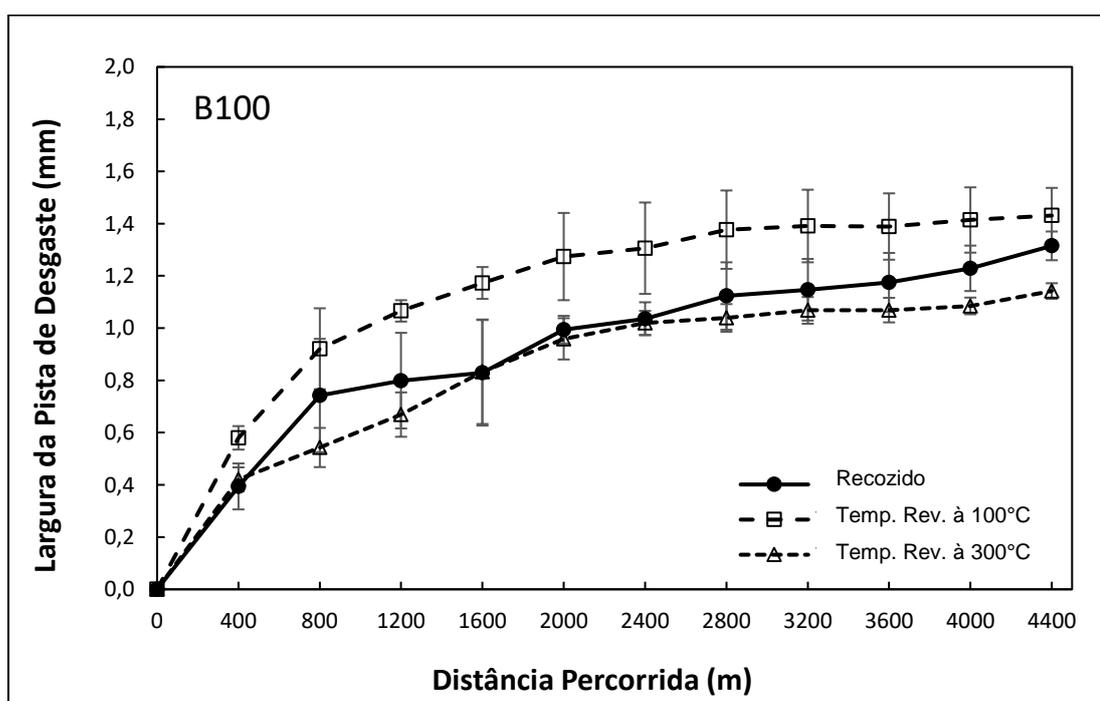


Figura 5.16. Largura da pista de desgaste nos discos com lubrificação biodiesel puro (B100).

Os discos temperados e revenidos apresentam uma dureza maior que o disco recozido, nos primeiros metros todos sofrem encruamento, aumentando a dureza e devido a lubrificação o disco com maior dureza acaba sofrendo um menor desgaste.

Após a análise de todos os discos, tem-se em valores absolutos que o maior desgaste ocorreu no disco 19 (recozido e sem lubrificação), apesar deste ter apresentado a maior dureza inicial para a condição recozida, com o valor de 2,999 mm de largura de desgaste. Da mesma maneira o disco 1 (temperado e revenido à 300°C e com B30) teve a menor largura final de desgaste com 0,992 mm.

Na Tabela 5.13 é mostrada a taxa de desgaste considerando a distância percorrida para os três discos; recozido (disco 17), temperado e revenido a 100°C (disco 11) e temperado e revenido a 300°C (disco 7), ensaiados na condição de lubrificadas com biodiesel B100.

Tabela 5.13. Taxa de desgaste usando o volume desgastado, discos lubrificadas com B100.

B100	Recozido (Disco 17)		Temperado e Revenido à 100°C (Disco11)		Temperado e Revenido à 300°C (Disco7)	
	Volume Desgastado Médio x10 <sup>-8</sup> (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste x10 <sup>-5</sup> (m <sup>3</sup> /m)	Volume Desgastado Médio x10 <sup>-8</sup> (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste x10 <sup>-5</sup> (m <sup>3</sup> /m)	Volume Desgastado Médio x10 <sup>-8</sup> (m <sup>3</sup> )	Taxa de Desgaste x10 <sup>-5</sup> (m <sup>3</sup> /m)
400	0,317	0,7925	1,012	2,53	0,387	0,9675
800	2,121	4,51	4,061	7,6225	0,831	1,11
1200	2,649	1,32	6,301	5,6	1,554	1,8075
1600	2,959	0,775	8,401	5,25	3,002	3,62
2000	5,106	5,3675	10,771	5,925	4,584	3,955
2400	5,783	1,6925	11,606	2,0875	5,518	2,335
2800	7,369	3,965	13,612	5,015	5,833	0,7875
3200	7,853	1,21	14,033	1,0525	6,336	1,2575
3600	8,444	1,4775	13,972	0,1525	6,354	0,045
4000	9,666	3,055	14,744	1,93	6,645	0,7275
4400	11,849	5,4575	15,284	1,35	7,751	2,765

Na Figura 5.17 encontra-se a representação da tendência da taxa de desgaste, quando se utiliza o biodiesel B100. Observando-se as tendências tem-se que o disco recozido apresenta taxa de desgaste, mais acentuadas ao atingir os 2.000 m e em 4.400 m a taxa encontrada tem o maior valor de taxa de desgaste e é

crecente. O disco temperado e revenido a 100°C tem uma taxa de desgaste acentuada em 800 m e volta a ter valores maiores nos pontos de 2.000 m e em 3.200 m, decresce finalizando com valores baixos. No disco temperado e revenido a 300°C as taxas de desgaste vão subindo e as mais altas apareceram em 2.000 m e volta a cair mas mostram tendência a crescer em 4.400 m. Neste caso as maiores taxas de desgaste ocorrem no disco temperado e revenido a 100°C até 2.800 m e depois diminuem, quando os outros dois discos apresentam uma tendência ao crescimento da taxa de desgaste.

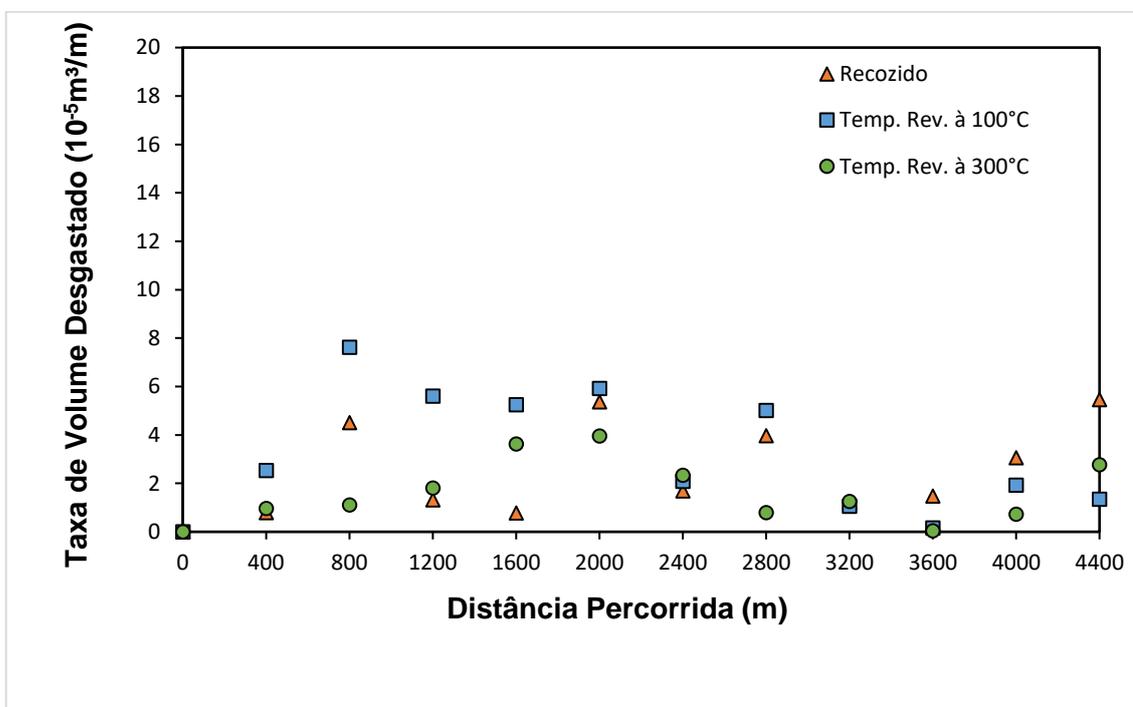


Figura 5.17. Comportamento da taxa de volume desgastado para a condição lubrificado com B100.

Após as análises da largura da pista de desgaste com a tendência da taxa de desgaste, tem-se que o comportamento dos discos lubrificado com S10(B7) e B20 são parecidos e o B30 tem um desempenho, quanto ao desgaste, um pouco melhor do que os anteriores. O combustível B50 teve o melhor desempenho quanto ao desgaste e apresentou uma taxa de desgaste mais uniforme.

### 5.3.7. Comparação das Larguras das Pistas de Desgaste

Na Tabela 5.14 têm-se os percentuais de desgaste de cada disco, comparando-se a primeira leitura (400 m) com a última leitura em cada ensaio (4400

m), considerou-se os primeiros 400 m como despressíveis supondo ser o desgaste de acatamento do anel. O disco em que se deu o maior desgaste foi o de número 15 (recozido e lubrificado com B30) com uma mudança percentual de 319% entre a primeira leitura e a última, e o disco 3 (temperado, revenido a 300°C e sem lubrificação) foi a que sofreu o menor desgaste com variação de 29%.

Considerando-se o ensaio dos discos sem lubrificação e a distância percorrida entre a primeira leitura a 400 metros e a última a 4400 metros como referências, pode-se considerar os resultados encontrados para a variação de desgaste nos discos: no estado recozido foi de 36%, no disco temperado e revenido à 100°C de 75% e no disco temperado e revenido à 300°C de 29%, obteve-se assim que o disco temperado e revenido a 100°C sofreu o maior desgaste.

Tabela 5.14. Variação percentual relativa da largura da pista de desgaste.

Disco (número / condição)	Distância Percorrida (m)		Variação (%)
	400	4400	
<b>SEM LUBRIFICAÇÃO</b>			
19 (recozida)	2,211	2,999	36%
14 (100°C)	0,821	1,434	75%
3 (300°C)	1,06	1,372	29%
<b>B7</b>			
16 (recozida)	0,838	1,959	134%
9 (100°C)	0,556	1,591	186%
4 (300°C)	0,477	1,629	242%
<b>B20</b>			
20 (recozida)	0,426	1,769	315%
12 (100°C)	0,619	1,135	83%
6 (300°C)	0,472	1,332	182%
<b>B30</b>			
15 (recozida)	0,381	1,598	319%
8 (100°C)	0,621	1,066	72%
1 (300°C)	0,559	0,992	77%
<b>B50</b>			
18 (recozida)	0,359	1,255	249%
13 (100°C)	0,627	1,084	73%
2 (300°C)	0,444	1,104	149%
<b>B100</b>			
17 (recozida)	0,394	1,315	234%
11 (100°C)	0,58	1,431	147%
7 (300°C)	0,421	1,142	171%

Ao considerar o ensaio com diesel S10 (B7) e a largura do desgaste ao final da distância percorrida, então, comparando-se os resultados das amostras obtém-se que o desgaste no material recozido foi de 134%, no disco temperado e revenido à 100°C de 186% e no disco temperado e revenido à 300°C de 242%, obteve-se assim que o disco temperado e revenido a 300°C sofreu o maior desgaste.

No final do ensaio com o biodiesel B20, comparando-se a distância percorrida entre 400 m e 4.400 m, o disco recozido, teve um desgaste de 315%, no disco temperado e revenido à 100°C, o percentual de desgaste foi de 83% e no disco temperado e revenido à 300°C de 182%, obteve-se assim que o disco temperado e revenido a 100°C sofreu o menor desgaste.

Usando-se o B30, comparando-se a primeira medida, com a última de deslocamento de cada disco encontra-se os seguintes percentuais de variação, para o disco recozido 319%, revenido a 100°C, 72% e revenido a 300°C, 77%. Então após as comparações quem sofreu o menor desgaste foi o material temperado e revenido a 100°C.

Usando-se o B50, comparando-se os três discos a partir da primeira leitura com a última, encontra-se uma variação do disco recozido de 249%, revenido a 100°C de 73% e revenido a 300°C de 149%. Então, após as comparações quem apresentou o menor desgaste real foi o disco temperado e revenido a 100°C.

Usando-se o B100, e comparando-se a primeira leitura de cada disco, em 400 m com a última leitura a 4400 m, nota-se que o disco recozido apresenta um desgaste maior, com variações de 234%, no material temperado e revenido a 100°C, 147% e no material temperado e revenido a 300°C, a variação é de 171%. Assim novamente o disco temperado e revenido a 100°C teve o menor desgaste.

Comparando-se os percentuais de desgaste, a lubrificação que teve um melhor desempenho foi o biodiesel B30, para discos tratados termicamente.

Foi observado que em percentual, os discos sem lubrificação apresentaram os menores percentuais de desgaste, que correspondem aos três primeiros discos

da Tabela 5.14, e tal fato deve-se possivelmente ao encruamento que eles sofreram durante o início do processo de desgaste.

Após a análise de seis situações de lubrificação os discos temperados e revenidos à 100°C apresentaram um desgaste menor em quatro momentos sempre se utilizando o biodiesel em qualquer proporção, o disco recozido apresentou melhor desempenho com diesel e o disco temperado e revenido à 300°C foi melhor quando o ensaio foi sem lubrificação.

A Figura 5.18 mostra o comportamento dos discos quanto a largura da pista de desgaste, onde a disco 19 (recozido, sem lubrificação) apresenta a maior largura visual, porém o disco 15 (recozido e lubrificado com B30) apresenta o maior desgaste percentual. Nota-se praticamente que os discos 19,16 e 20 recozidos são os que sofreram maiores desgastes, seguidos do disco 4 que foi tratado termicamente com têmpera e revenido a 100°C, com lubrificação com diesel S10(B7), o quinto disco com maior desgaste é o 15, recozido e lubrificado com B30.

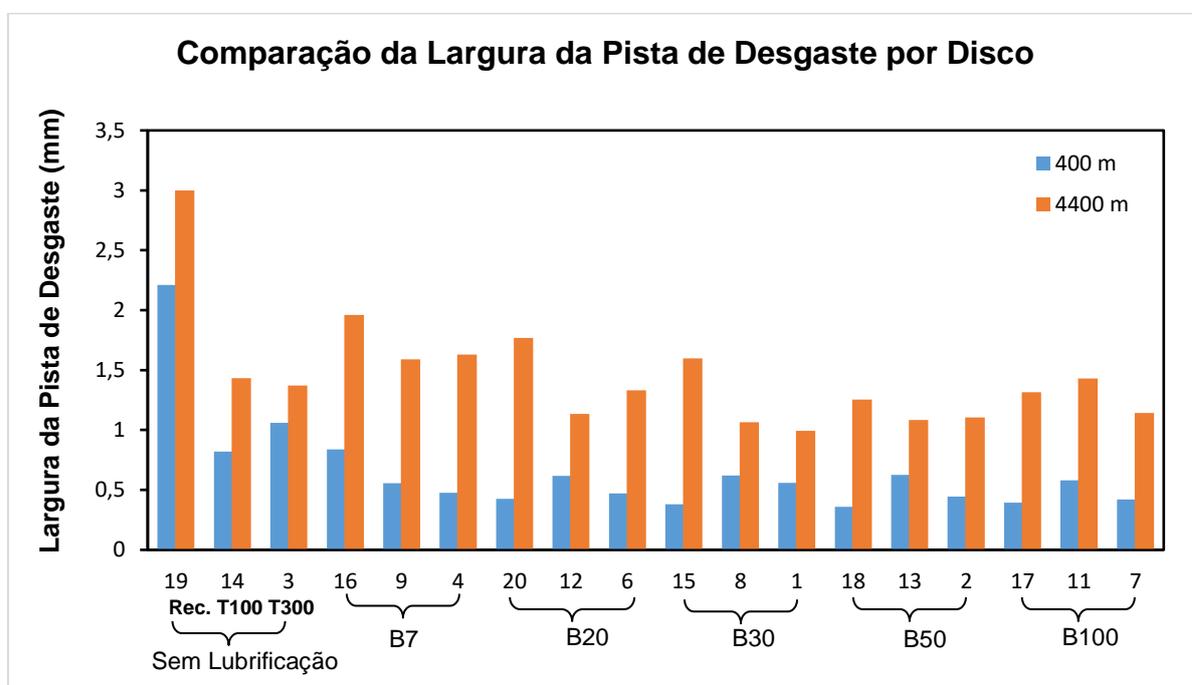


Figura 5.18. Comparação da largura da pista de desgaste no início e fim dos ensaios.

### 5.3.8. Análise do Coeficiente de Desgaste (k) e Dureza

A Tabela 5.15 apresenta os resultados obtidos no coeficiente de desgaste e microdureza superficial no aço AISI 440BC. A microdureza Vickers dos discos apresentam um aumento significativo na pista de desgaste após o ensaio devido ao encruamento gerado por deformação plástica, tanto no ensaio sem lubrificação, quanto nos ensaios lubrificados.

Comparando-se os resultados das durezas iniciais de todos os discos, fora da pista com a dureza medida no fundo da pista, nota-se um aumento percentual bem significativo nos discos sem tratamento térmico, chegando a 86,5% no disco 16 (recozida), onde o lubrificante foi o diesel comercial (B7). Já no disco 19 (recozida) sem lubrificação e sem tratamento térmico, o percentual foi de 68,5%, sendo seguido do disco 03 com tratamento térmico de têmpera e revenido a 300°C, sem lubrificação, com percentual de 20%. Pela dureza o aço temperado encrua menos que o esferoidizados.

Os ensaios lubrificados, que receberam tratamento de têmpera e revenimento, tiveram um aumento de dureza menos evidente, chegando ao máximo de 36% de aumento de dureza no disco 02, que recebeu têmpera e revenido a 300°C e lubrificada com B50. Nos discos lubrificados o menor percentual de aumento de dureza foi de 19,4% e se deu no disco 09 com tratamento de têmpera e revenido a 100°C.

Os discos lubrificados com biodiesel (B100) são as que apresentaram variações percentuais mais estáveis entre si, o disco 17 (recozido, bruto), com 31,4%, o disco 11 (temperado e revenido a 100°C) com 30,1% e o disco 07(temperado e revenido a 300°C) com 23,5%.

Os discos lubrificados com biodiesel (B50) são os únicos que independente de ter tratamento térmico ou não, todos apresentaram percentuais de variação de dureza superiores a 30% chegando a 63,1%.

De todos os discos o que sofreu o menor aumento de dureza foi o disco 14

(temperado e revenido a 100°C) sem lubrificação com variação de 13,5%.

Tabela 5.15. Coeficiente de desgaste (k) e microdureza (HV) nos discos.

	SEM LUBRIFICAÇÃO					
	Disco 19 (Recozido)		Disco 14 (à 100°C)		Disco 03 (à 300°C)	
	Fora da Pista	Pista	Fora da Pista	Pista	Fora da Pista	Pista
<b>Microdureza Vickers (HV)</b>	322,5	543,5	653	741,5	633	761
<b>Aumento de Dureza Percentual (%)</b>	68,5		13,5		20	
<b>Coeficiente de Desgaste Médio (K<sub>m</sub>) [10<sup>-2</sup>]</b>	0,6667		0,1433		0,1213	
	LUBRIFICADADO COM DIESEL COMERCIAL S10 (B7)					
	Disco 16 (Recozido)		Disco 09 (à 100°C)		Disco 04 (à 300°C)	
	Fora da Pista	Pista	Fora da Pista	Pista	Fora da Pista	Pista
<b>Microdureza Vickers (HV)</b>	260	485,5	674	805	613	777
<b>Aumento de Dureza Percentual (%)</b>	86,5		19,4		26,7	
<b>Coeficiente de Desgaste Médio (K<sub>m</sub>) [10<sup>-2</sup>]</b>	0,1476		0,2021		0,1975	
	LUBRIFICADO COM B20					
	Disco 20 (Recozido)		Disco 12 (à 100°C)		Disco 06 (à 300°C)	
	Fora da Pista	Pista	Fora da Pista	Pista	Fora da Pista	Pista
<b>Microdureza Vickers (HV)</b>	243	409,5	613	742	613	788
<b>Aumento de Dureza Percentual (%)</b>	68,5		21		28,5	
<b>Coeficiente de Desgaste Médio (K<sub>m</sub>) [10<sup>-2</sup>]</b>	0,1036		0,0665		0,1077	
	LUBRIFICADO COM B30					
	Disco 15 (Recozido)		Disco 08 (à 100°C)		Disco 01 (à 300°C)	
	Fora da Pista	Pista	Fora da Pista	Pista	Fora da Pista	Pista
<b>Microdureza Vickers (HV)</b>	238	428,5	697	844,5	633	788
<b>Aumento de Dureza Percentual (%)</b>	80		21,2		24,5	
<b>Coeficiente de Desgaste Médio (K<sub>m</sub>) [10<sup>-2</sup>]</b>	0,0762		0,0624		0,0458	
	LUBRIFICADO COM B50					
	Disco 18 (Recozido)		Disco 13 (à 100°C)		Disco 02 (à 300°C)	
	Fora da Pista	Pista	Fora da Pista	Pista	Fora da Pista	Pista
<b>Microdureza Vickers (HV)</b>	248	404,5	613	805	577	785
<b>Aumento de Dureza Percentual (%)</b>	63,1		31,3		36	
<b>Coeficiente de Desgaste Médio (K<sub>m</sub>) [10<sup>-2</sup>]</b>	0,0370		0,0579		0,0576	
	LUBRIFICADO COM B100					
	Disco 17 (Recozido)		Disco 11 (à 100°C)		Disco 07 (à 300°C)	
	Fora da Pista	Pista	Fora da Pista	Pista	Fora da Pista	Pista
<b>Microdureza Vickers (HV)</b>	272	357,5	674	877	613	757,5
<b>Aumento de Dureza Percentual (%)</b>	31,4		30,1		23,5	
<b>Coeficiente de Desgaste Médio (K<sub>m</sub>) [10<sup>-2</sup>]</b>	0,0463		0,1468		0,0678	

Analisando a Tabela 5.15 é observado que os discos que sofreram tratamentos térmicos de modo quase que geral os revenido a 100°C sofreram percentuais menores de aumento de dureza e todos estes discos tiveram percentuais menores de aumento de dureza que os discos recozidos.

De todos os discos, o que apresentou a maior dureza média fora da pista de desgaste foi o disco 08 (lubrificada com B30) com 697 HV (dureza Vickers), que foi tratado com têmpera e revenido a 100°C. Já o disco 11 (lubrificado com B100) que recebeu o mesmo tratamento foi o que apresentou a dureza de fundo de pista maior, com 877 HV (dureza Vickers).

Analisando-se os discos tratados termicamente observa-se que o único temperado e revenido a 100°C que apresentou um percentual de aumento de dureza superior aos temperados e revenidos a 300°C, foi o disco amostra 11 com 30,1%, enquanto que o disco 07 (temperado e revenido a 300°C) apresentou 23,5% no aumento de dureza e para ambos o lubrificante foi o B100.

Considerando uma relação entre discos sem lubrificação e com algum tipo de lubrificação, ocorreu uma tendência de maior aumento percentual de dureza nos ensaios lubrificados.

Para finalizar sobre o aumento de dureza é certo afirmar que todos os discos tiveram aumento de dureza no fundo da pista de desgaste.

É observado na Figura 5.19 que representa o coeficiente de desgaste por tratamento térmico e lubrificação entregue e na Tabela 5.15 que o maior coeficiente de desgaste se deu no disco 19 (recozido, bruto e sem lubrificação), com  $0,6667 \cdot 10^{-2}$  e o menor coeficiente de desgaste foi no disco 18 (recozido, lubrificado com B50), com  $0,0370 \cdot 10^{-2}$  ambos, os discos sem tratamentos térmicos, indicando que o desgaste mais severo se deu em disco não tratado, e não lubrificado.

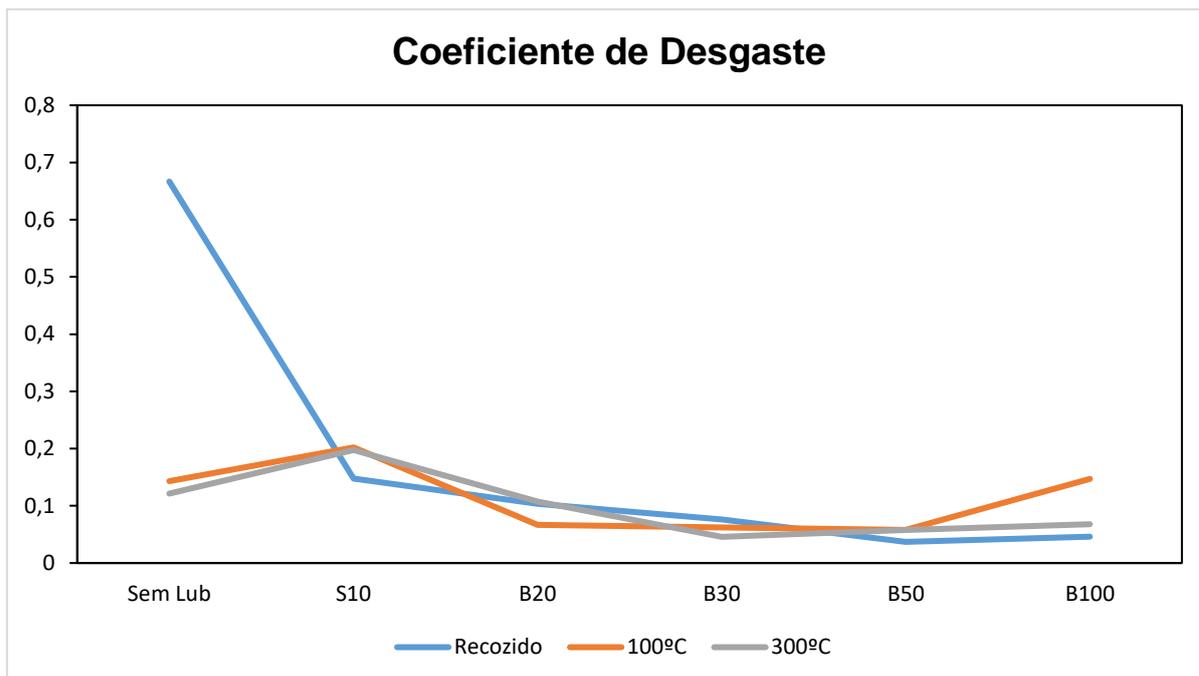


Figura 5.19. Representação do coeficiente de desgaste por tratamento térmico e Lubrificação.

O menor coeficiente de desgaste  $0,0370 \cdot 10^{-2}$  foi encontrado no disco 18, sem tratamento térmico, com uso de lubrificação do B50 e em seguida no disco 01 com  $0,0458 \cdot 10^{-2}$ , com tratamento de têmpera e revenido a  $300^{\circ}\text{C}$  e sendo usado o B30 como lubrificante.

Observamos na Figura 5.19 que a menor média de coeficiente de desgaste se dá com a lubrificação de biodiesel B50 considerando as três condições de ensaio, o que permite afirmar que este lubrificante desenvolveu melhor sua função. Ainda observando a Figura 5.19 que está em forma de gráfico podemos notar que o S10-B7 não desempenha um papel muito bom como lubrificante.

Os materiais tratados termicamente e lubrificados com B20, B30 e B50 apresentaram coeficientes de desgaste médios próximos, considerando material por material. Onde com B20 os materiais recozido e tratado com  $300^{\circ}\text{C}$  ainda apresentam uma leve queda no valor do coeficiente de desgaste, tendo estes o menor valor em B50 e o material tratado com  $100^{\circ}\text{C}$  já apresenta um valor constante até o B50.

O coeficiente de desgaste é considerado como principal critério de

comparação entre diferentes condições de ensaios e indica a resistência ao desgaste.

Considerando os discos com o mesmo tratamento térmico, tem-se:

Sem tratamento:

Que o disco 19 (recozido, sem lubrificação) comparado com o disco 18 (recozido e lubrificado com B50) teve a maior diferença na resistência ao desgaste na ordem de 1702%, seguido do disco 17 (recozido e lubrificado com B100), com a segunda maior diferença na resistência ao desgaste de 1340%. E o disco 16 (recozido, lubrificado com diesel comercial) teve uma diferença na resistência ao desgaste de 352%, sendo a menor diferença de resistência, em discos sem tratamento térmico.

Com têmpera e revenidas a 100°C:

Comparando-se pelo coeficiente de desgaste  $k$ , o disco 09 (temperado e revenido a 100°C e lubrificado com diesel comercial) com o disco 13 (temperado e revenido a 100°C e lubrificado com B50) ele apresentou a maior diferença na resistência ao desgaste na ordem de 249%. E o disco 11 (temperado e revenido a 100°C e lubrificado com B 100) comparado ao disco 09 (temperado e revenido a 100°C e lubrificado com diesel comercial) teve uma diferença na resistência ao desgaste de 37,5%, sendo a menor diferença apresentada na resistência, comparando-se todos os discos.

Com têmpera e revenidas a 300°C:

Usando-se o coeficiente de desgaste  $k$ , o disco 04 (temperado e revenido a 300°C e lubrificado com diesel comercial) comparado com o disco 01 (temperado e revenido a 300°C e lubrificado com B30) apresentou a maior diferença na resistência ao desgaste na ordem de 243%. O disco 03 (temperado e revenido a 300°C e sem lubrificação) comparado ao disco 04 (temperado e revenido a 300°C e lubrificado com diesel comercial) mostrou uma diferença na resistência ao desgaste de 63%, sendo a menor diferença apresentada na resistência ao desgaste de peças com revenido a 300°C.

É de se considerar que os discos tratados termicamente, apresentaram um valor médio de 246% na diferença da resistência ao desgaste, se comparados entre si, para o maior aumento.

Na Figura 5.20 encontram-se as durezas dos materiais comparadas às durezas nos fundos das pistas de desgaste, sendo observado que em todos os ensaios ocorreu uma diferença da dureza da pista, independente do material ou do lubrificante utilizado.

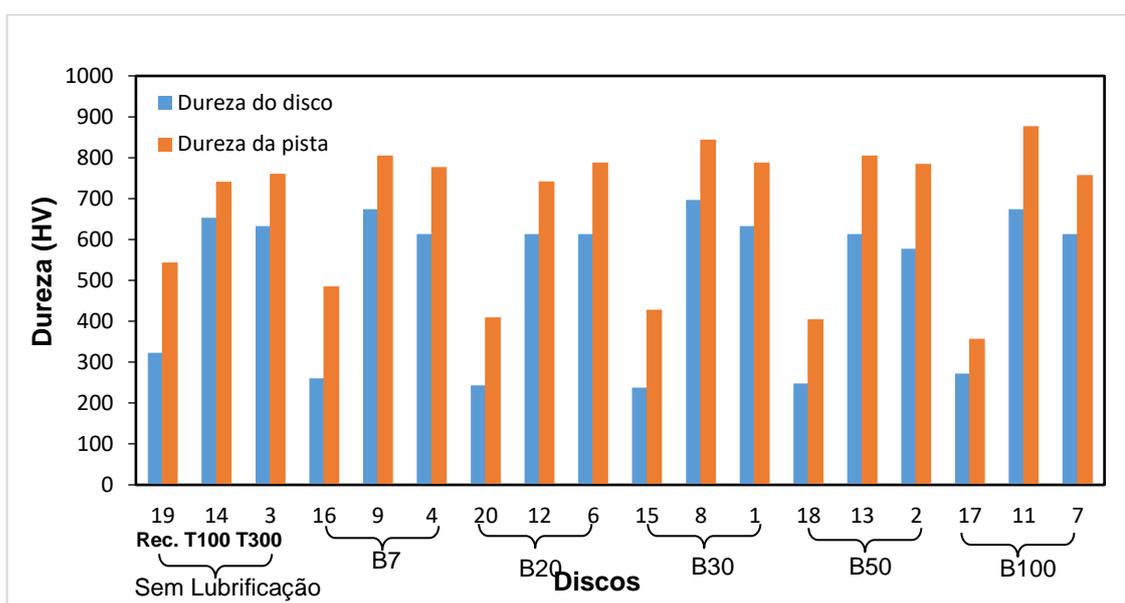


Figura 5.20. Comparação entre dureza da peça e da pista de desgaste.

Observa-se na Figura 5.21 que a menor diferença entre as durezas médias se dão entre os discos que foram ensaiados sem lubrificação, discos 19 (recozido), 14 (temperado e revenido a 100°C) e 3 (temperado e revenido a 300°C) e a maior diferença entre os valores médios de dureza se deu entre os discos lubrificados com B100, discos 17 (recozido), 11 (temperado e revenido a 100°C) e 7 (temperado e revenido a 300°C).

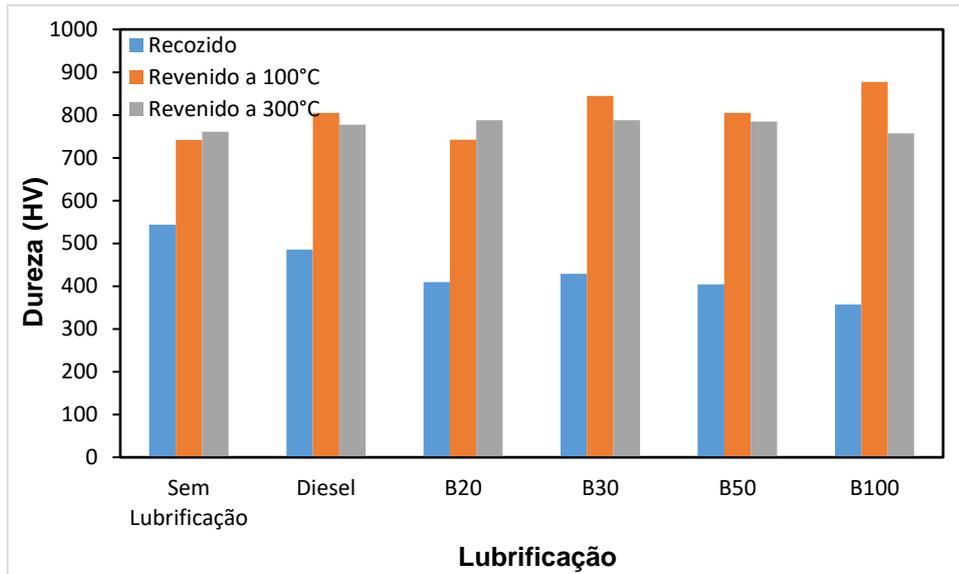


Figura 5.21. Dureza média da pista por condição de lubrificação empregada.

A Figura 5.22 mostra o percentual de aumento de dureza na pista em relação a dureza do disco e fica claro que o disco 16 (recozido) e lubrificado com diesel S10(B7), teve o maior aumento percentual de dureza e o disco 14, com tratamento de têmpera e revenido a 100° (sem lubrificação), teve o menor aumento percentual de dureza. De modo geral todos os discos recozidos apresentaram maiores aumentos percentuais de dureza.

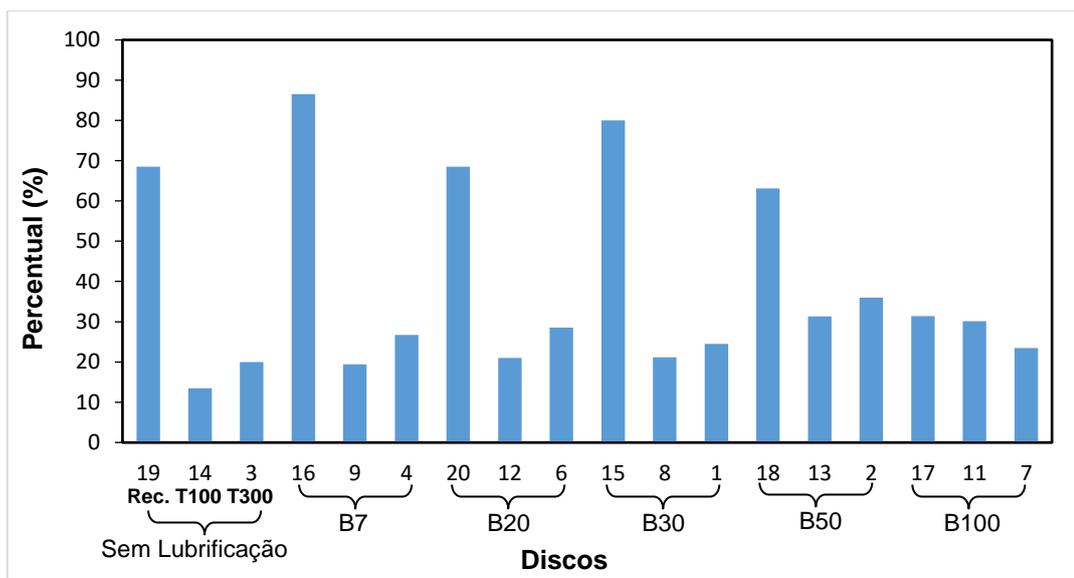


Figura 5.22. Comparação percentual do aumento de dureza entre o fundo da pista e a dureza do disco.

A Figura 5.23 apresenta o gráfico do coeficiente de desgaste, onde se nota

que o disco 19, recozido e sem lubrificação, apresenta o maior valor para o coeficiente de desgaste. Pelo gráfico ainda pode-se dizer que os discos lubrificados com biodiesel em qualquer das misturas do teste, apresentaram menores coeficientes de desgaste, independentes de serem tratados termicamente ou não, inclusive sendo menores que os dos lubrificados com diesel comercial, o que acaba indicando que o biodiesel em qualquer proporção é um melhor lubrificante.

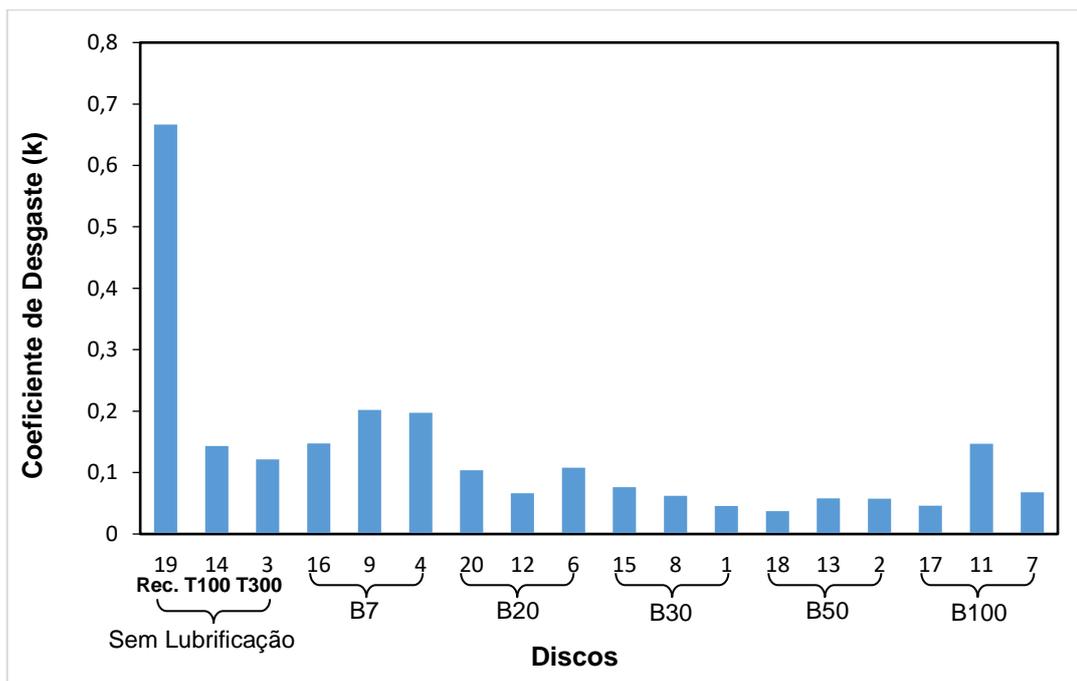


Figura 5.23. Comparação entre os coeficientes de desgastes (k).

#### 5.4. Análises das Superfícies de Desgaste

A análise microscópica da pista de desgaste das amostras dos discos foi realizada através do microscópio eletrônico de varredura (MEV). Foram analisadas as superfícies das pistas de desgastes nas amostras dos discos após os ensaios, no modo SE (Elétrons Secundários), com ampliações de 200x, 1.000x, 4.000x, 10.000x e 20.000x. Nesta parte do trabalho, as análises microscópicas da pista de desgaste foram comparadas com os trabalhos e imagens dos seguintes autores ALMEIDA et al (2013), DHAR et al (2014), FAZAL et al (2013), FAZAL et al (2013b), FARIAS et al (2014), LI et al (2015), LYU et al (2015), SYAHRULLAIL et al (2013), HABIBULLAH et al (2015) e CASTRO (2015).

#### 5.4.1. Microscopia do Aço AISI 440BC Recozido

As Figuras 5.24, 5.25 e 5.26 apresentam os resultados dos ensaios do material AISI 440BC na condição de recozido, sem lubrificação (Figura 5.24a) e lubrificado com diesel comercial S-10 (B7) (Figura 5.24b), biodiesel B20 (Figura 5.25a), biodiesel B30 (Figura 5.25b), biodiesel B50 (Figura 5.26a) e biodiesel B100 (Figura 5.26b).

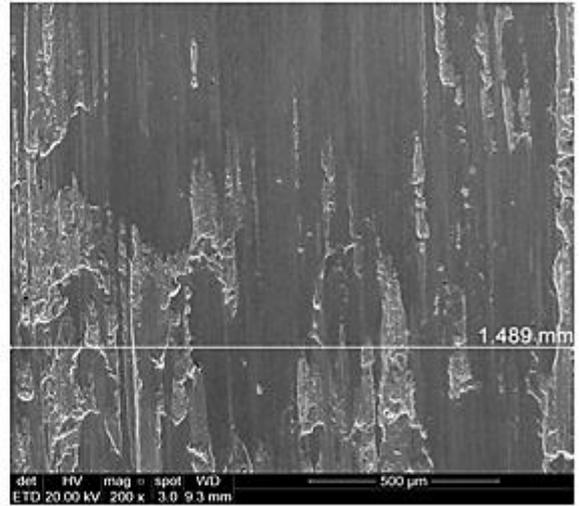
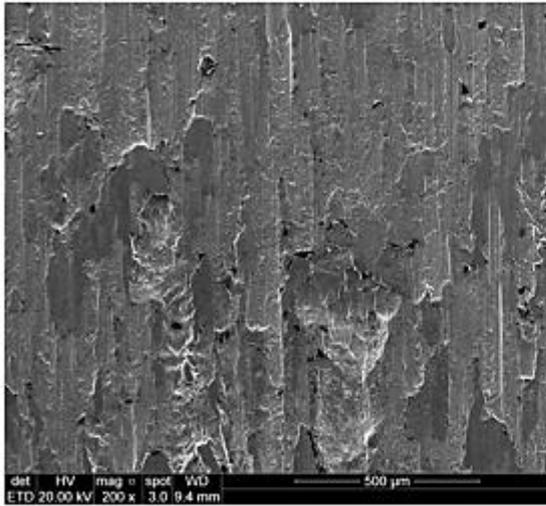
Na Figura 5.24a ocorre a presença de delaminação, característico de desgaste abrasivo. É visto um desgaste severo, onde partes são arrancadas com a presença de crateração, provavelmente por partículas de desgaste que são plasticamente deformadas pela ação tribológica. Na análise da amostra 19 (Figura 5.24a) recozida e sem lubrificação, com ampliação de 200x se percebe uma delaminação (Figura 5.24a1) e com ampliação em 1000x (Figura 5.24a2). No ponto de ataque com desgaste mais severo partes foram arrancadas, ocasionando uma crateração, ocorreu um desgaste abrasivo (Figura 5.24a3), e este pode ainda ser comprovado nas Figuras 5.24a4 e 5.24a5. Estas imagens apresentam quase que exclusivamente o defeito superficial de microcorte ou escoriação.

Na análise da amostra 16 (Figura 5.24b) recozida com lubrificação por diesel comercial B7, nota-se um desgaste menor (Figura 5.24b1) como defeito superficial de microcorte, sendo que na Figura 5.24b2 percebe-se um desgaste abrasivo severo, que é confirmado nas outras imagens, na Figura 5.24b3 o desgaste abrasivo é bem representado, e na Figura 5.24b4 nota-se a presença de óxido de ferro e óxido de alumínio.

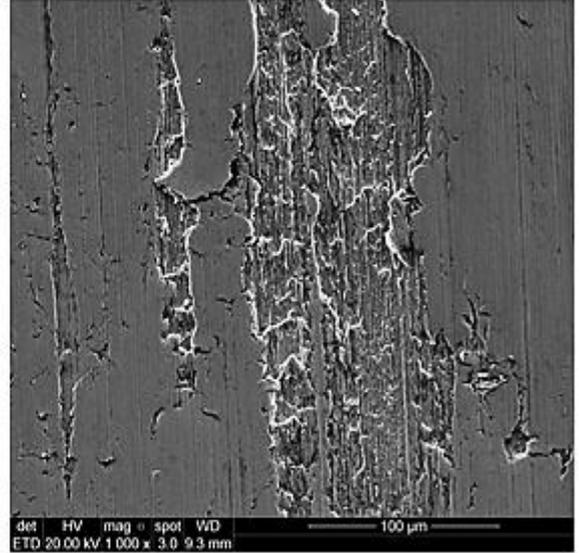
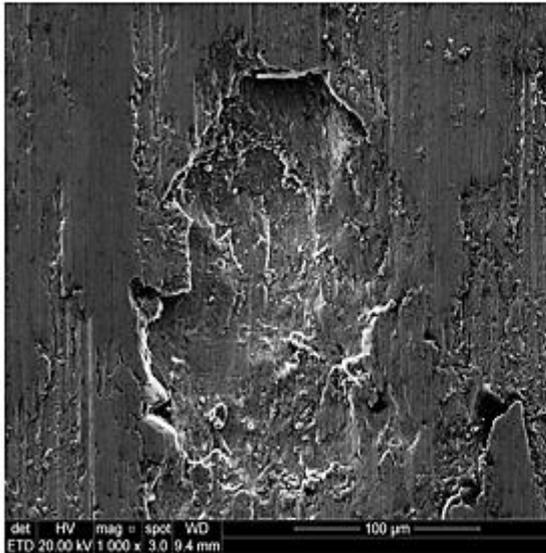
Amostra 19/Sem Lubrificação

Amostra 16/S10-B7

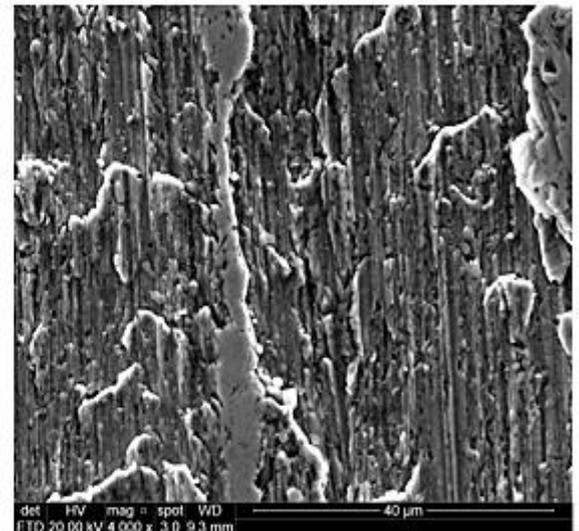
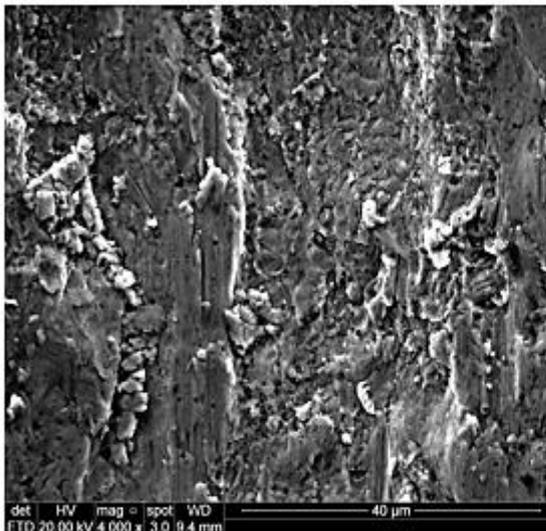
1



2



3



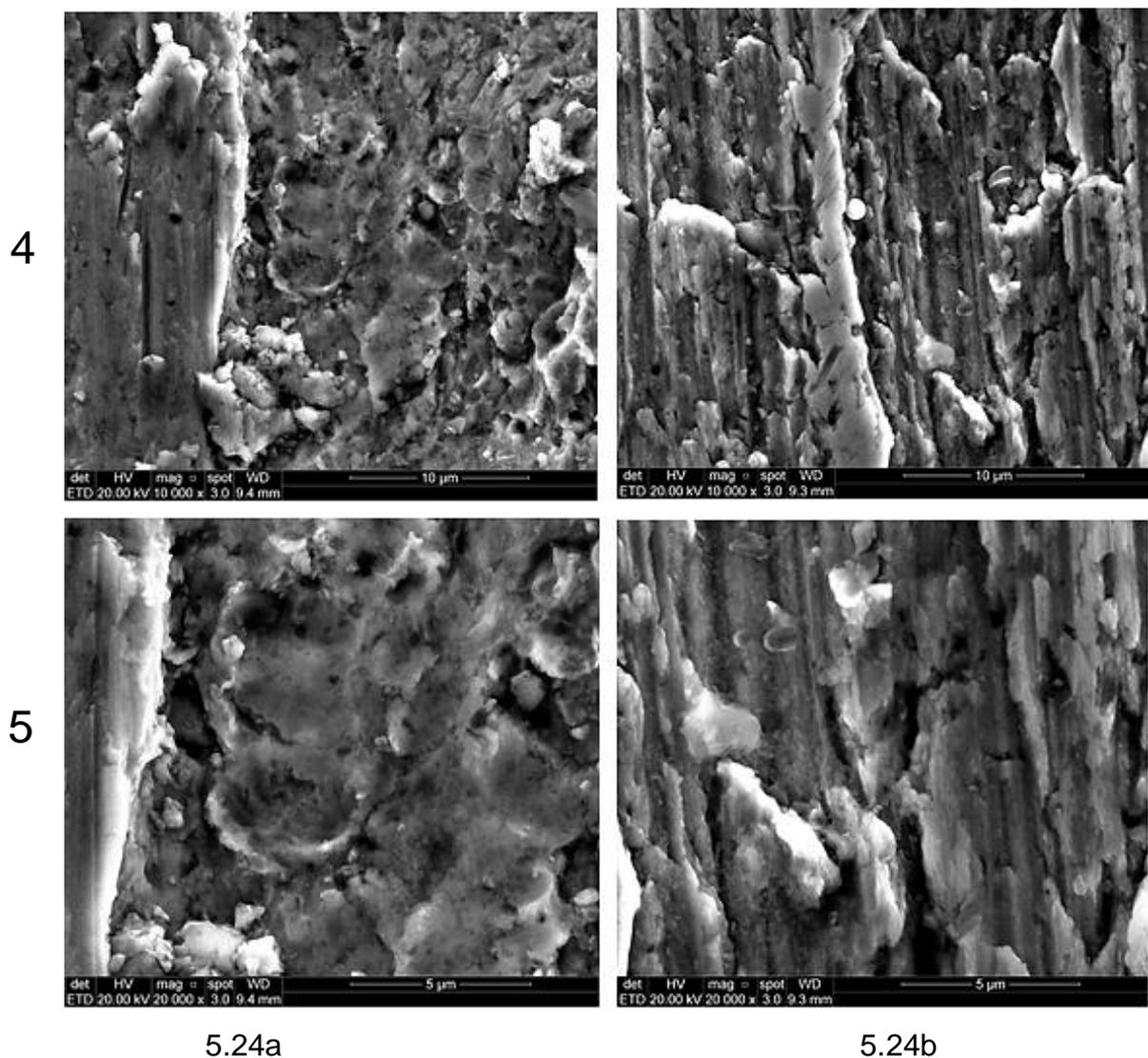


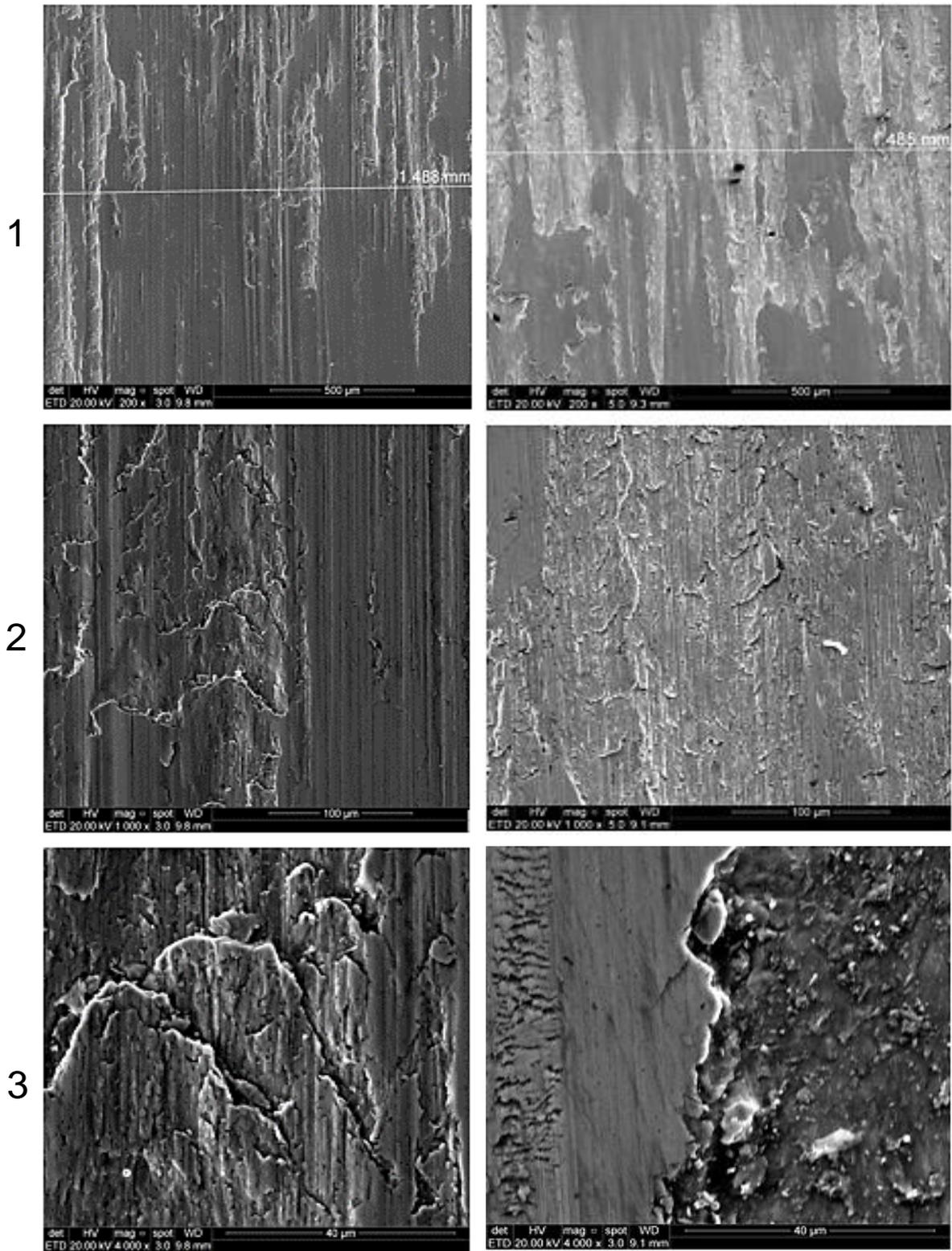
Figura 5.24. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 19 – recozida – sem lubrificação; b) Amostra 16 – recozida – B7.

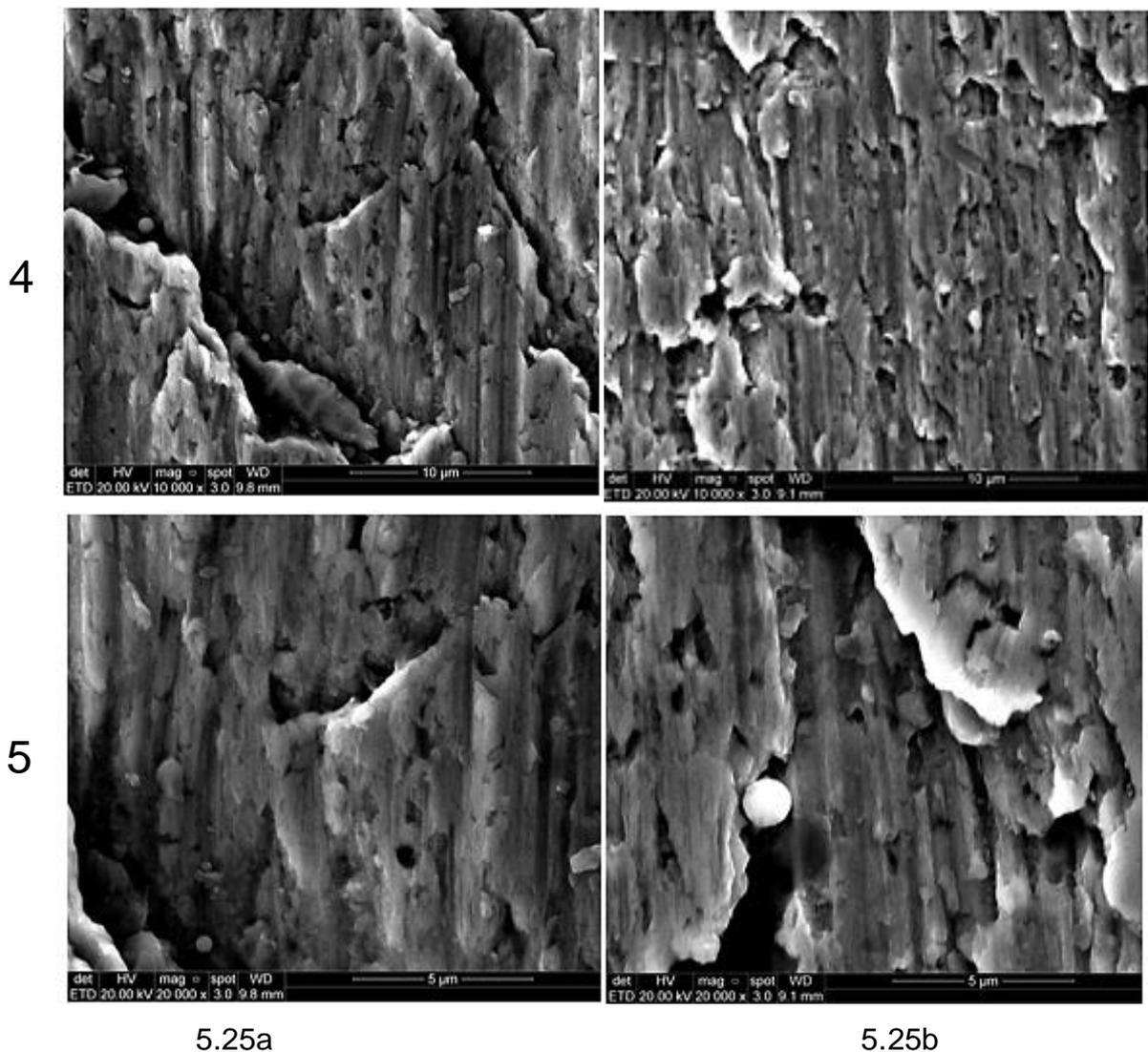
A Figura 5.25a apresenta a amostra 20 recozida e lubrificada por B20 e a Figura 5.25b apresenta o MEV da amostra 15 recozida e lubrificada com B30.

A Figura 5.25a1 mostra que ocorre um desgaste abrasivo. Na Figura 5.25a2 a imagem revela haver uma pequena deformação plástica do material, como sendo uma delaminação, que é reforçada na imagem da Figura 5.25a3 com ampliação de 4000x, nas Figuras 5.25a4 e 5.25a5, ocorre a presença de óxidos de ferro e o desgaste abrasivo.

Amostra 20/B20

Amostra 15/B30





5.25a

5.25b

Figura 5.25. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 20 – recozida – B20; b) Amostra 15 – recozida – B30.

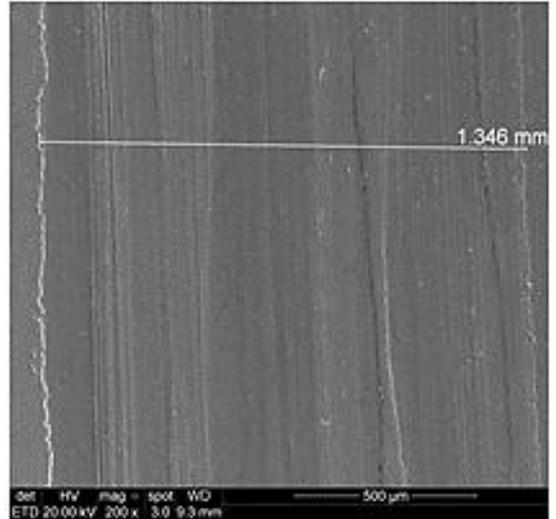
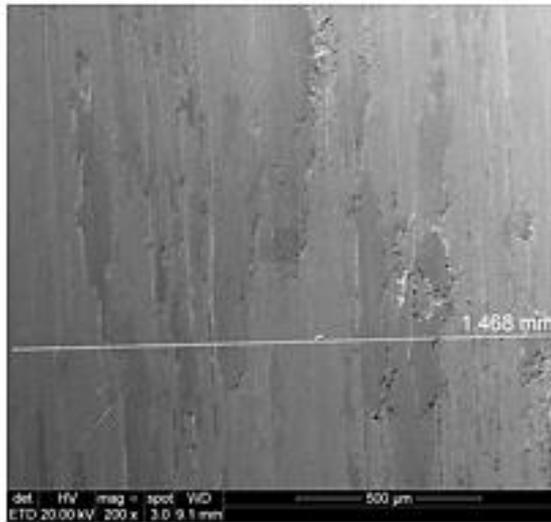
Na Figura 5.25b1 nota-se perfeitamente o desgaste do material típico de desgaste abrasivo levemente severo. Na Figura 5.25b2 ocorre a confirmação do desgaste abrasivo levemente severo com aparecimento de um corpo estranho. A Figura 5.25b3 mostra uma leve delaminação provocada pelo desgaste abrasivo, o mesmo que na Figura 5.25b4. Na Figura 5.25b5 nota-se a presença de óxido de alumínio.

A Figura 5.26 mostra a amostra 18 recozida e lubrificada com B50 e a amostra 17 recozida e lubrificada com B100.

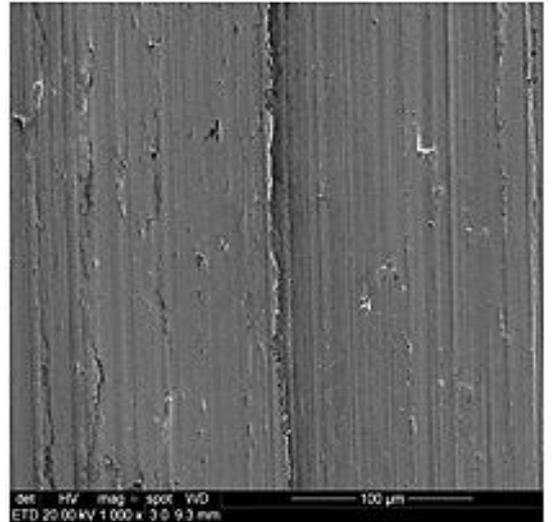
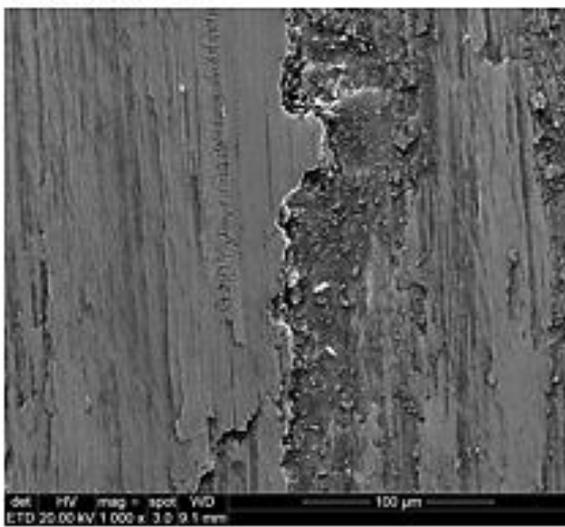
Amostra 18/B50

Amostra 17/B100

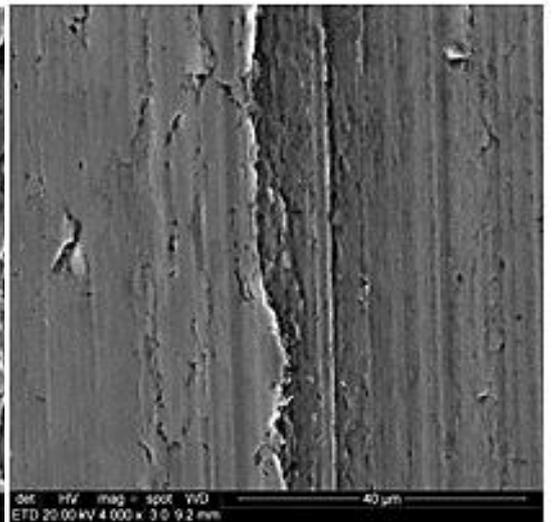
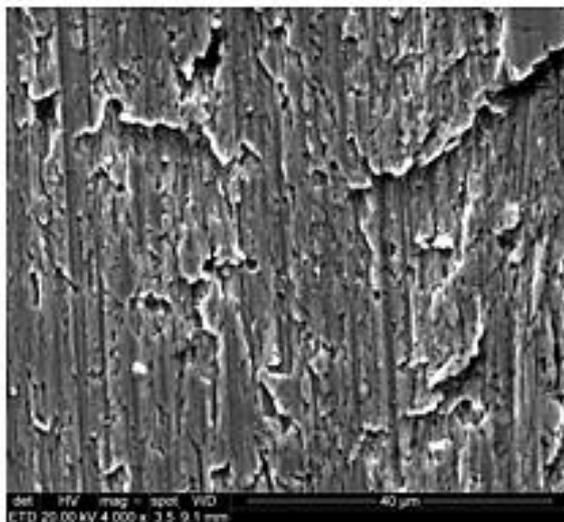
1



2



3



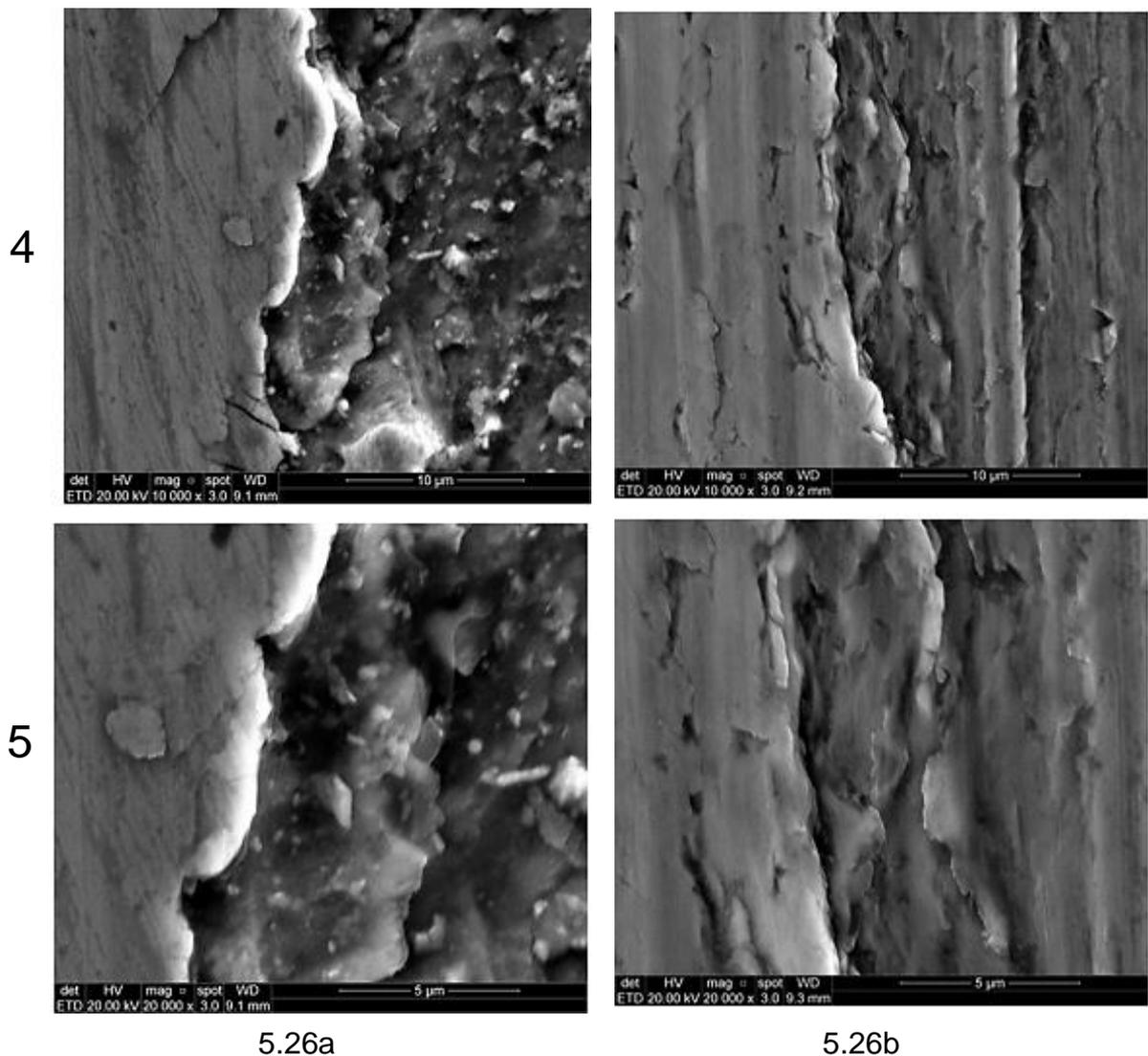


Figura 5.26. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 18 – recozida – B50; b) Amostra 17 – recozida – B100.

Na Figura 5.26a1 ocorre unicamente desgaste abrasivo sendo levemente maior que o da amostra com B100. Na Figura 5.26a2 aparece o desgaste abrasivo provocando um microcorte que pode ser acompanhado nas figuras seguintes, podendo ser comparado a um desgaste abrasivo na Figura 5.26a2. Nas Figuras 5.26a4 e 26a5, nota-se a presença de carbeto de cromo. Na Figura 5.26b1 já se observa que a lubrificação do B100 foi a que melhor resultado apresentou quanto ao desgaste, os pontos pretos são poros no material. Na Figura 5.26b ocorre unicamente desgaste abrasivo. Apenas na Figura 5.26b2 que começa a se observar o desgaste abrasivo, em forma de riscamento, que vai se confirmando conforme ocorre o aumento da ampliação do MEV.

Assim as Figuras 5.24 a 5.26 mostram microcortes decorrente de desgaste abrasivo, com maior severidade na amostra (19) recozida ensaiada sem lubrificação, e na amostra (16) recozida e lubrificada com diesel B7 encontra-se sinais de óxidos.

A amostra que recebeu lubrificação com B100 foi a que apresentou o menor desgaste inicial, seguida da amostra lubrificada com B50. As amostras lubrificadas com B20 e B30 apresentaram microcortes muito parecidos com o da amostra lubrificada com diesel comercial B7, decorrentes do desgaste abrasivo e também apresentaram sinais de óxidos. Em todas as imagens observa-se a remoção contínua e severa de material, sendo justificado pelo fato do material não ser tratado termicamente, ou seja pela baixa dureza que apresenta. Em todas as amostras ocorreram arrancamentos de matriz metálica, devido ao desgaste abrasivo mais severo, pelo fato da matriz ser menos dura.

Ao finalizar as análises, comparando-se as imagens anteriores, pode-se definir a importância da lubrificação, ao observar-se as imagens conclui-se que o melhor lubrificante é o B100, seguido do B50, B20, Diesel B7, B30 e sem lubrificação.

#### **5.4.2. Microscopia do Aço AISI 440BC Temperado e Revenido a 100°C.**

As Figuras 5.27 a 5.29 apresentam os resultados dos ensaios do material tratado termicamente, com têmpera e revenido a 100°C, sem lubrificação e lubrificado com; diesel comercial S-10 (B7), biodiesel B20, biodiesel B30 e biodiesel B50 e biodiesel B100 no microscópio eletrônico de varredura (MEV), nas gamas de ampliação de 200x, 1.000x, 4.000x, 10.000x e 20.000x.

A Figura 5.27a mostra a amostra 14 temperada e revenida a 100°C e sem lubrificação e a Figura 5.27b, a amostra 9 temperada e revenida a 100°C e lubrificada com diesel comercial B7.

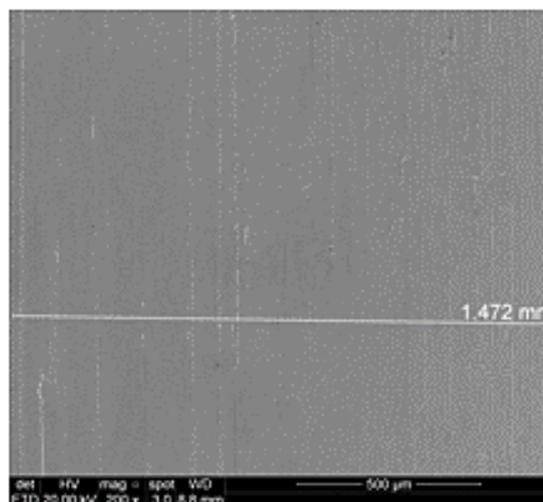
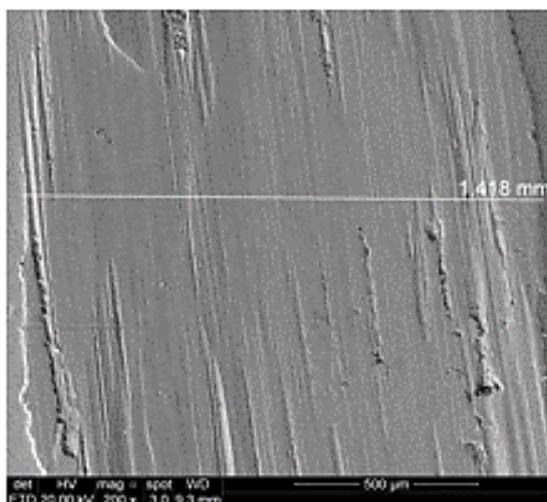
Na Figura 5.27a1 observa-se claramente riscos, que na Figura 5.27a2 evidencia o desgaste abrasivo na amostra. E na Figura 5.27a3 ocorre leve escoriação e aparecimento de óxidos de alumínio e a presença de carbeto de

chromium. Já as Figuras 5.27a4 e 5.27a5 confirmam o que se percebe na figura anterior.

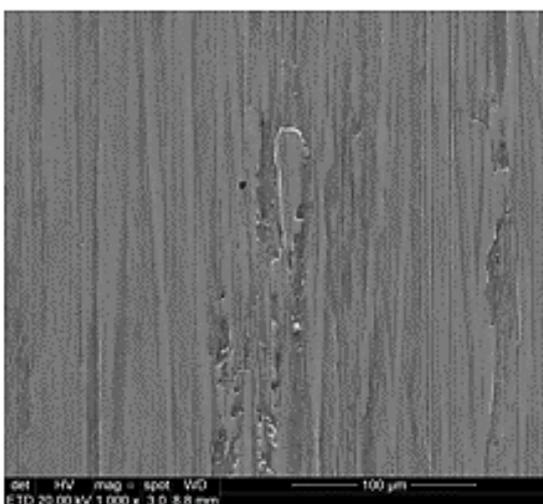
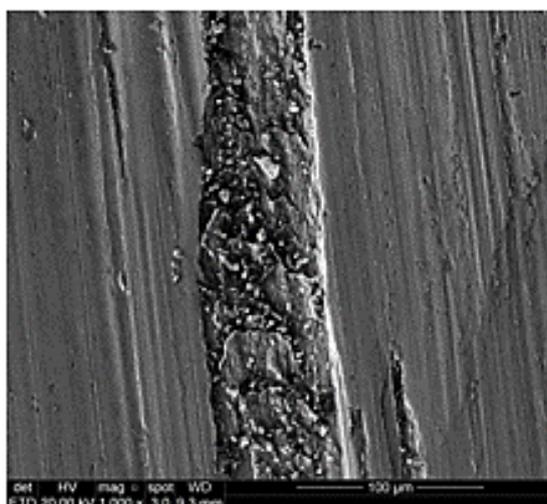
Amostra 14/Sem Lubrificação

Amostra 09/B7

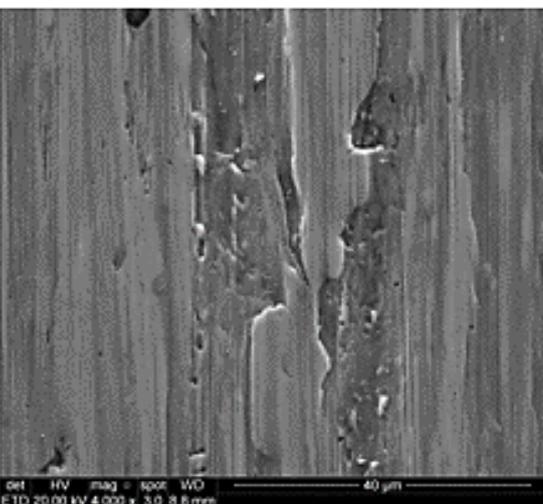
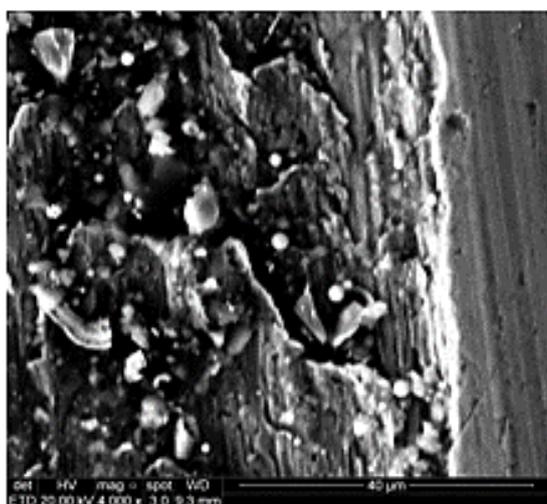
1



2



3



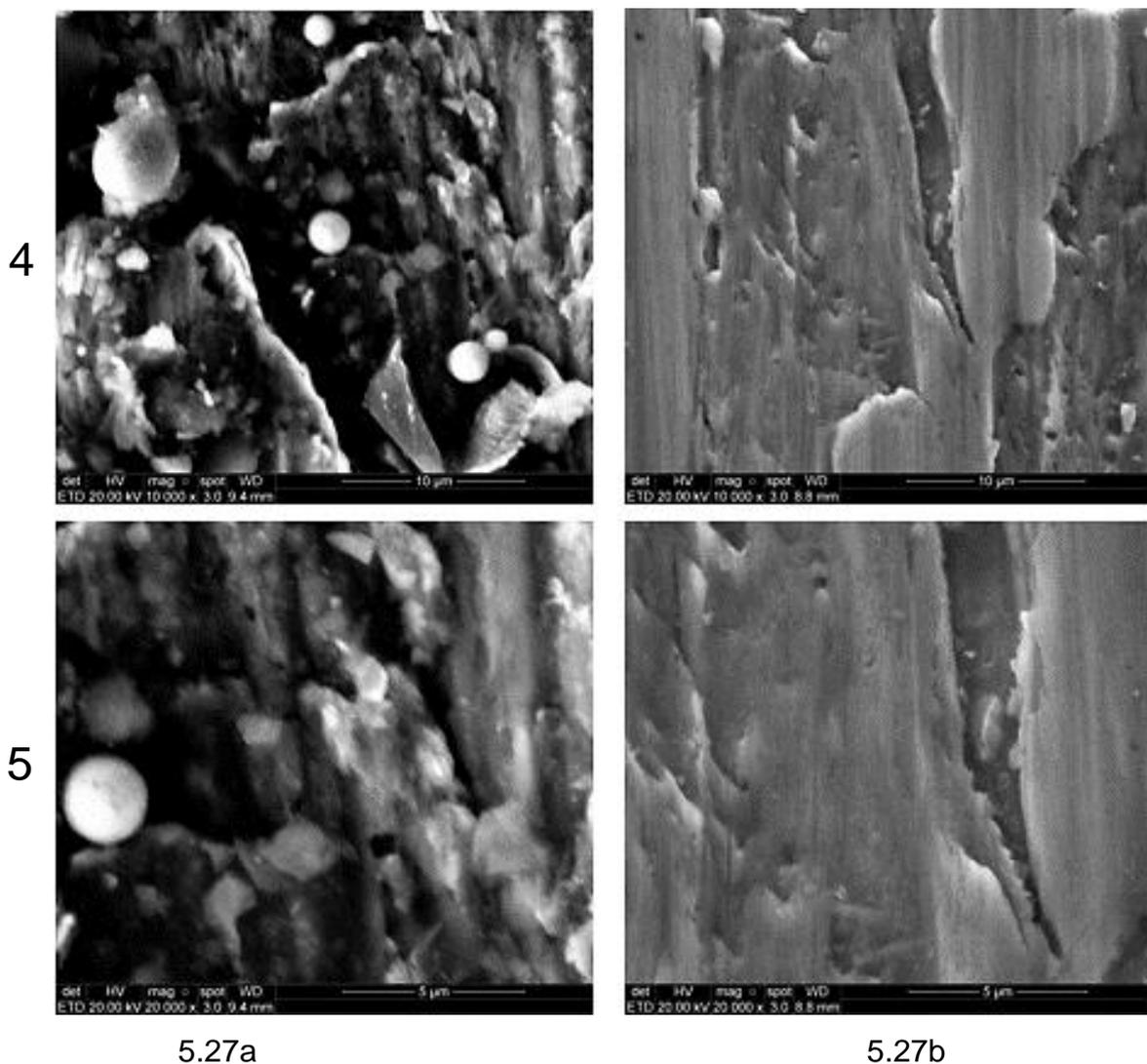


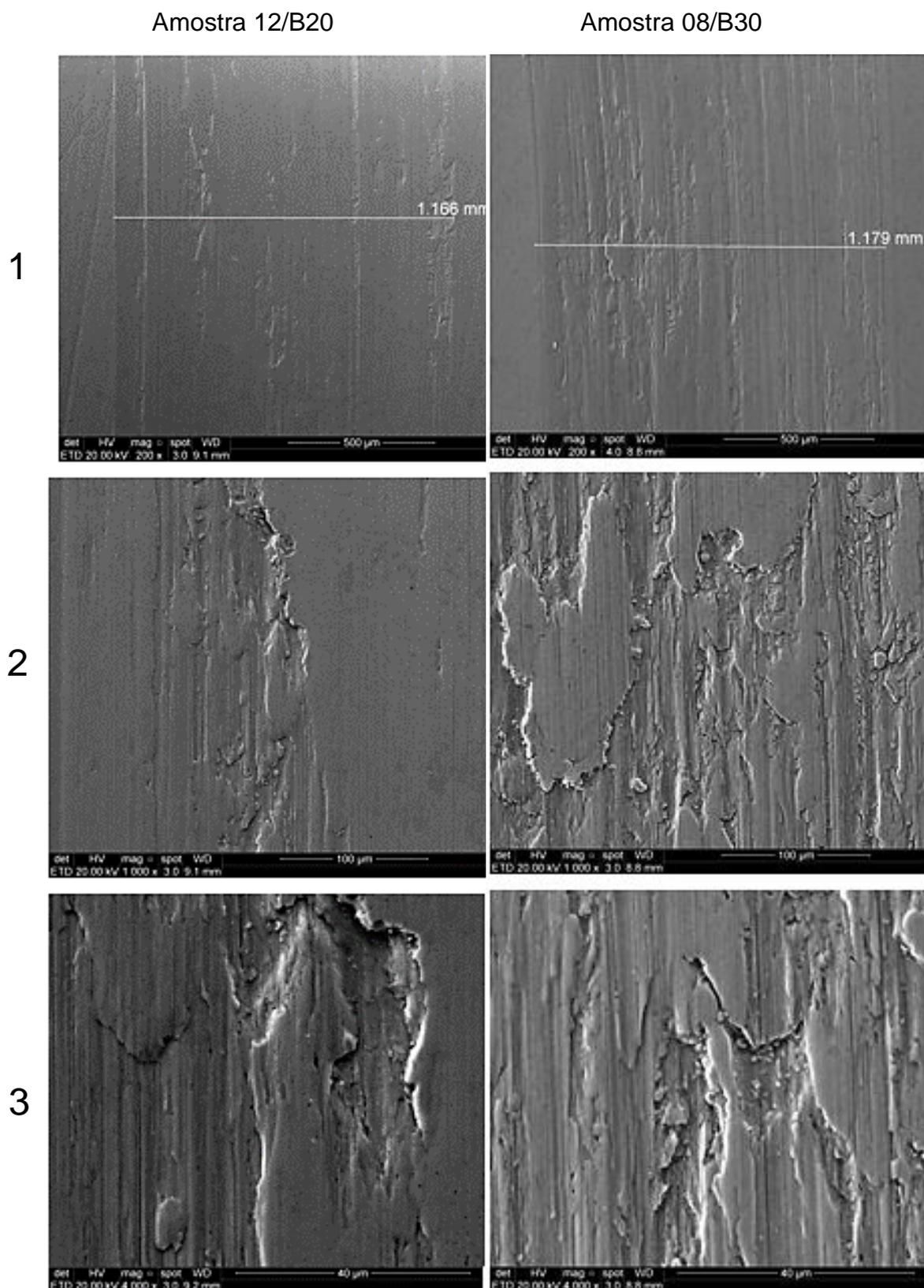
Figura 5.27. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 14 – 100°C – sem lubrificação; b) Amostra 9 – 100°C – B7 (Autor).

Na Figura 5.27b1 nota-se levemente o material riscado, sugerindo que este fato seja devido a lubrificação e a dureza do material. Nas Figuras 5.27b2 e 5.27b3, os riscos são mais visíveis devido ao aumento da ampliação, dando para concluir que se trata de desgaste abrasivo levemente severo. E nas Figuras 5.27b4 e 5.27b5 parece haver uma delaminação muito leve que é provocada pelo próprio desgaste abrasivo.

Em ambas figuras se observa o efeito que o endurecimento provocado pelo tratamento térmico, o de tornar as peças mais resistentes ao desgaste.

Na Figura 5.28a tem-se a amostra 12, temperada e revenida a 100°C,

lubrificada com B20, na Figura 5.28a1 vemos sinais do desgaste abrasivo leve, nas Figuras 5.28a2 e 5.28a3 ocorre o surgimento de pequeno microcorte.



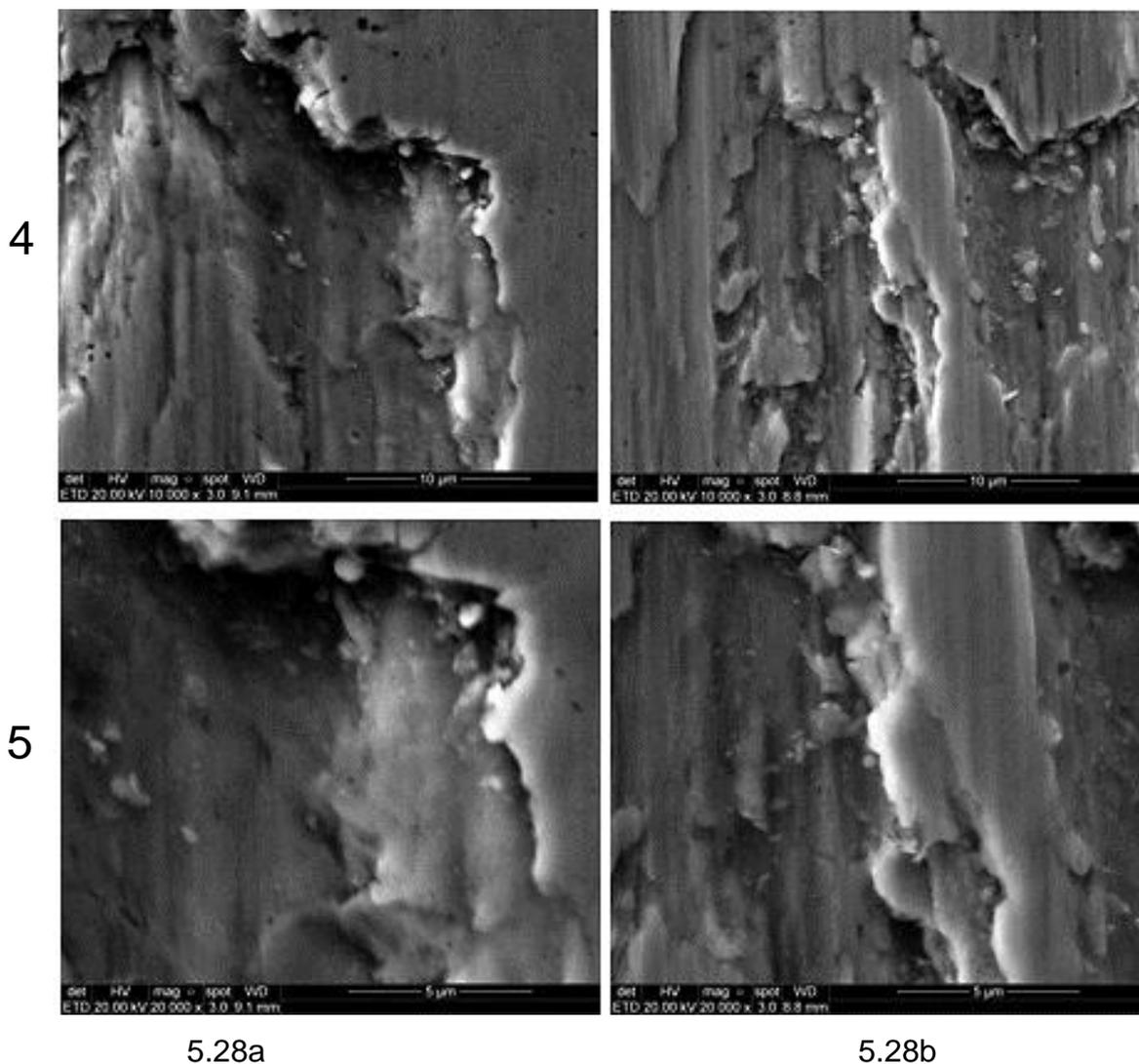


Figura 5.28. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 12 – 100°C – B20; b) Amostra 8 – 100°C – B30 (Autor).

Na Figura 5.28a4 após ampliação a visão sugere uma leve cratera devido ao desgaste abrasivo. Na Figura 5.28a5 ocorre a confirmação do fato descrito anteriormente e o surgimento de pequenos óxidos de carbonetos secundários, ricos em cromo não totalmente dissolvidos na matriz e de partículas soltas da própria matriz.

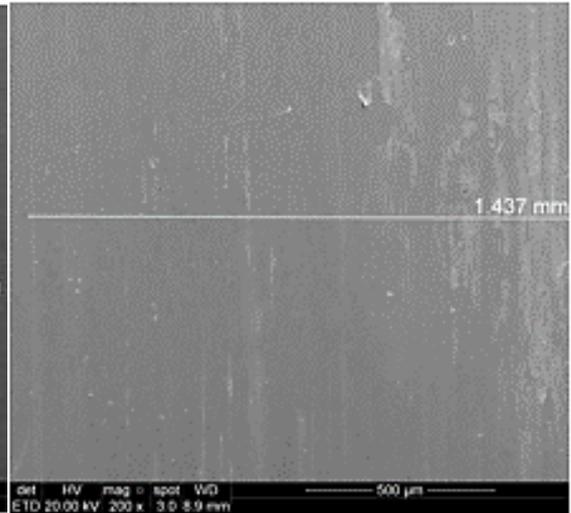
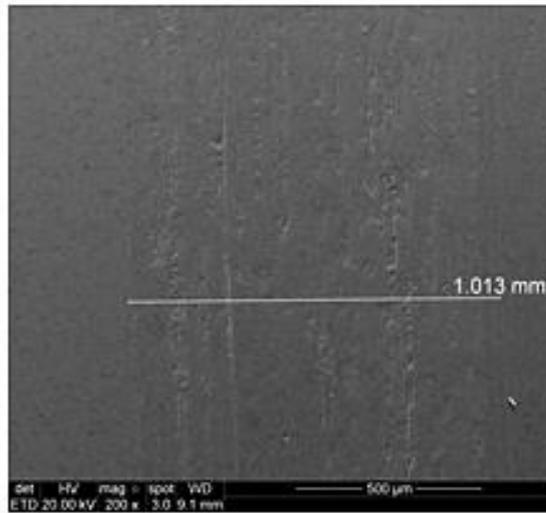
Na Figura 5.28b tem-se a amostra 8, peça temperada e revenida a 100°C, lubrificada com B30, na Figura 5.28b1 observa-se claramente na amostra o desgaste abrasivo de forma um pouco mais severa que na amostra da Figura 5.28a que usou o lubrificante B20. Nas Figuras 5.28b2 e 5.28b3 tem-se o surgimento de pequeno microcorte, que é conseqüente do desgaste provocado. Nas Figuras 5.28b4 e

5.28b5 é visto o desgaste abrasivo.

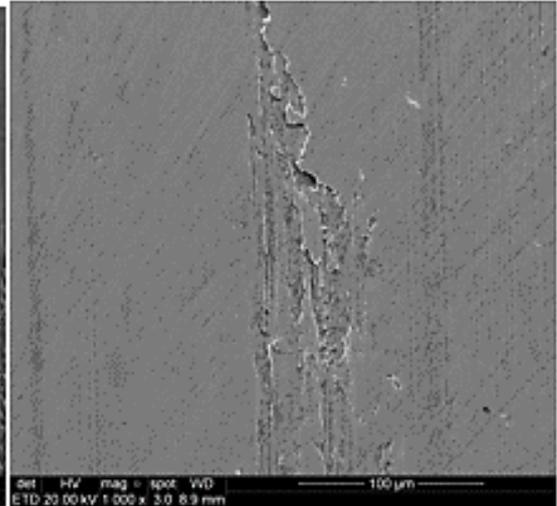
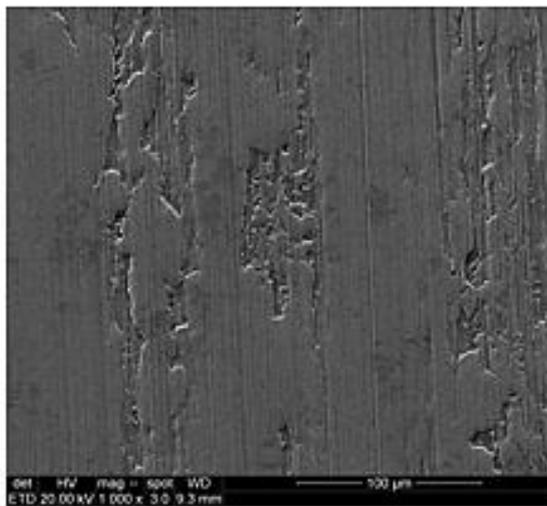
Amostra 13/B50

Amostra11/B100

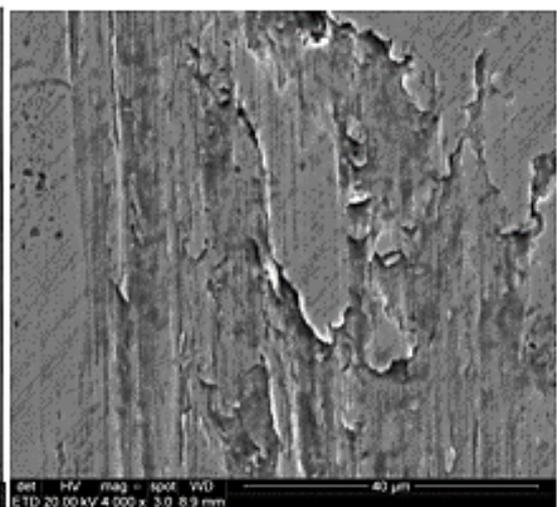
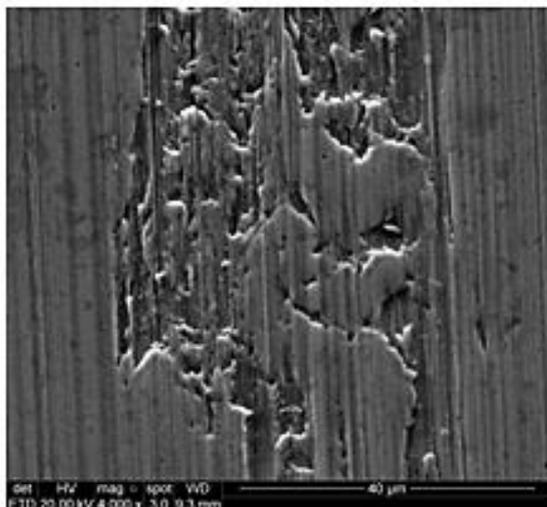
1



2



3



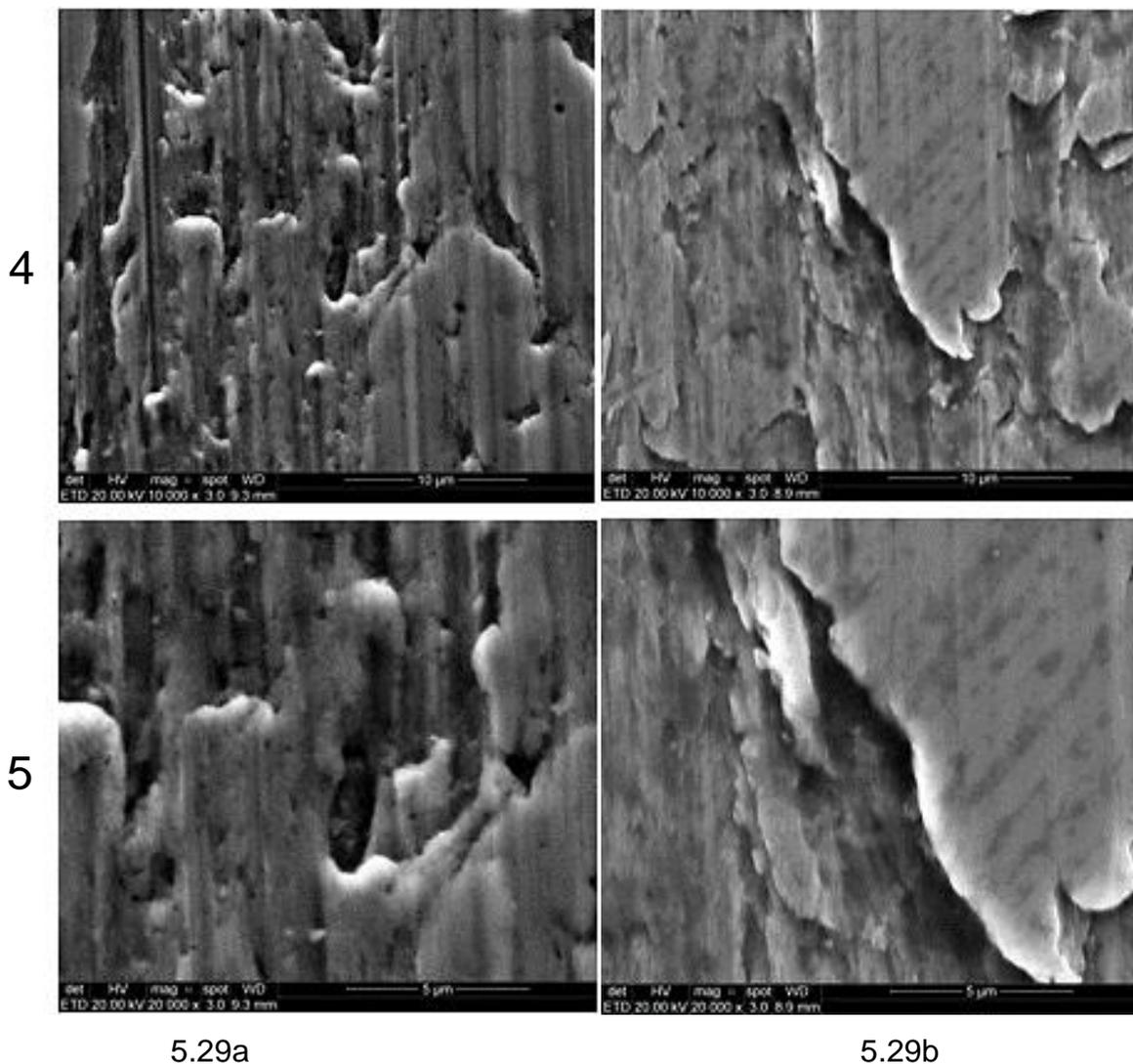


Figura 5.29. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 13 – 100°C – B50; b) Amostra 11 – 100°C – B100 (Autor).

Na Figura 5.29a, na primeira imagem Figura 5.29a1 mostra que ocorre o desgaste abrasivo, que se confirma na imagem da Figura 5.29a2. Na Figura 5.29a3 observa-se o surgimento de pequeno microcorte e as Figuras 5.29a4 e 5.29a5 sugerem leve deformação plástica.

A Figura 5.29b mostra a amostra 11, temperada e revenida a 100°C, lubrificada com B100, na Figura 5.29b1a amostra está bem conservada, praticamente sem sinais, o que leva a se considerar que a lubrificação foi bem eficiente. Já na Figura 5.29b2 ocorre pequeno desgaste. Na Figura 5.29b3 com maior ampliação, observa-se na amostra, o desgaste abrasivo. Nas Figuras 5.29b4 e 5.29b5 aparece uma leve deformação plástica. A amostra destoa um pouco do que

se imaginava encontrar, quando se observa as figuras com maior ampliação, que seria a de menor desgaste ou deformação por ter sido usado o biodiesel puro.

Nas Figuras 5.26 a 5.29 observa-se que o efeito dos microcortes é menor, e as amostras que receberam lubrificação B20 e B30 são as que melhor se igualam ao B7 (diesel comercial), todas as amostras apresentaram desgaste abrasivo. As amostras sem lubrificação e com lubrificação B20 apresentaram craterações, que são decorrentes do desgaste abrasivo. Não se percebe grande desgaste nas imagens de menor resolução. Nas amostras sem lubrificação, B7 e B20 ocorreram arrancamentos de matriz, devido ao desgaste abrasivo mais severo. Na Figura 5.29a3 observa-se desgaste adesivo.

#### **5.4.3. Microscopia do aço AISI 440BC Temperado e Revenido a 300°C.**

As Figuras 5.30 a 5.32 apresentam os resultados dos ensaios do material tratado termicamente, com têmpera e revenido a 300°C, amostra 03 sem lubrificação e lubrificado com diesel comercial S-10 (B7) amostra 04, biodiesel B20 para amostra 06, biodiesel B30 amostra 01, biodiesel B50 na amostra 02 e biodiesel B100 amostra 07.

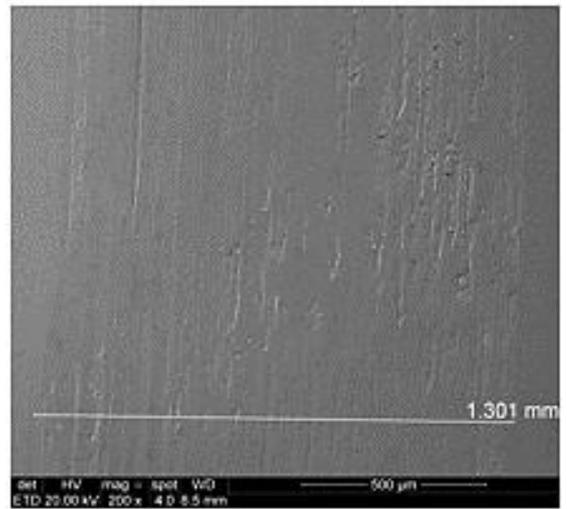
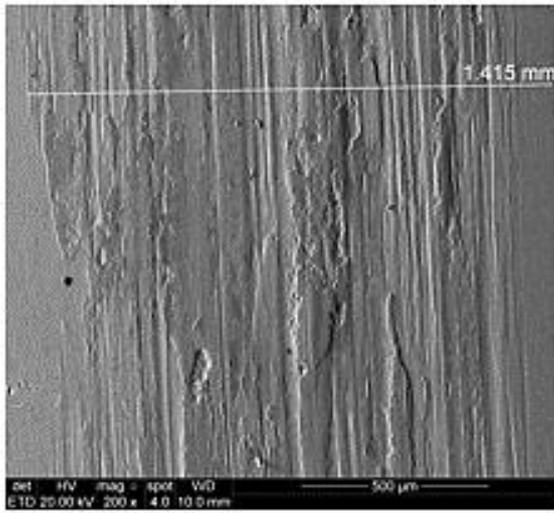
A Figura 5.30a tem a amostra 03 temperada e revenida a 300°C e sem lubrificação e a Figura 5.30b, a amostra 04 temperada e revenida a 300°C e lubrificada com diesel comercial B7.

Na Figura 5.30a1 observa-se claramente na amostra o desgaste abrasivo mais severo que o ocorrido no material anterior na amostra 14 (material temperado e revenido a 100°C) ver Figura 5.27a1, para mesma situação, material sem lubrificação, pelo fato de ter sido revenido a 300°C, que torna o material menos duro. Com surgimento de pequeno microcorte visto na Figura 5.30a2, e na Figura 5.30a3 apresenta crateração. A Figura 5.30a4 sugere leve escoriação. Já a Figura 5.30a5 confirma o que se percebe na figura anterior e mostra haver micropartículas soltas.

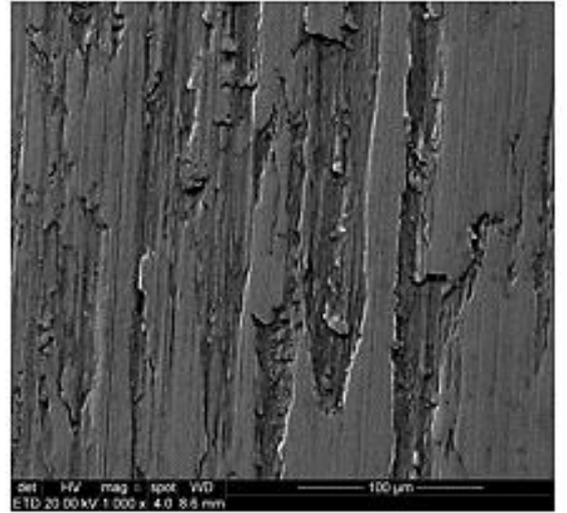
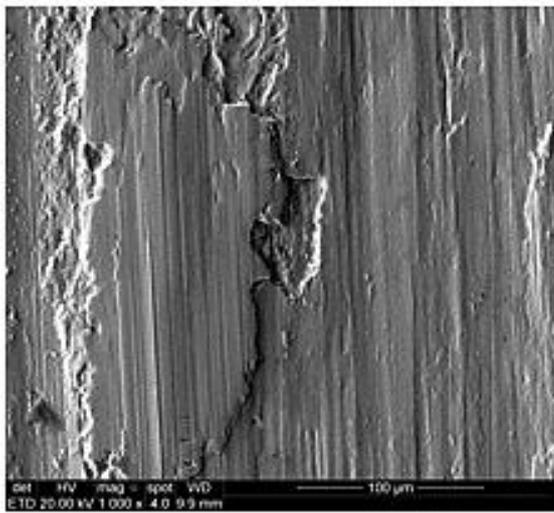
Amostra 03/Sem Lubrificação

Amostra 04/B7

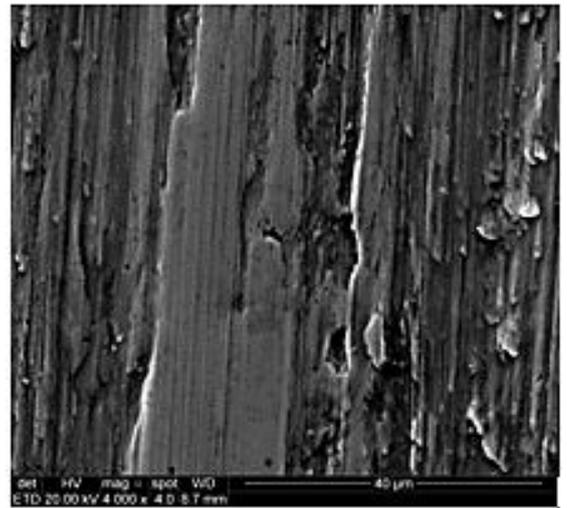
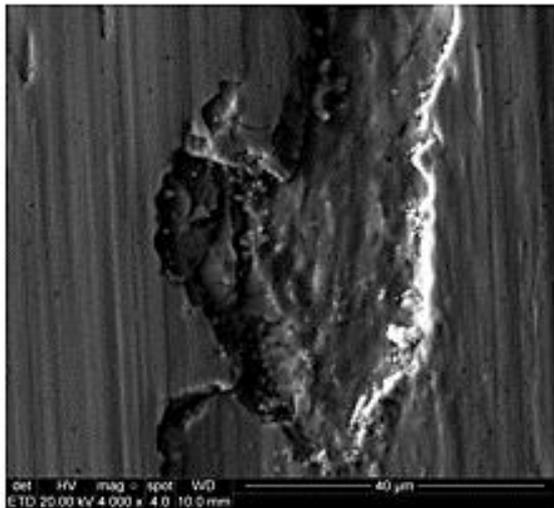
1

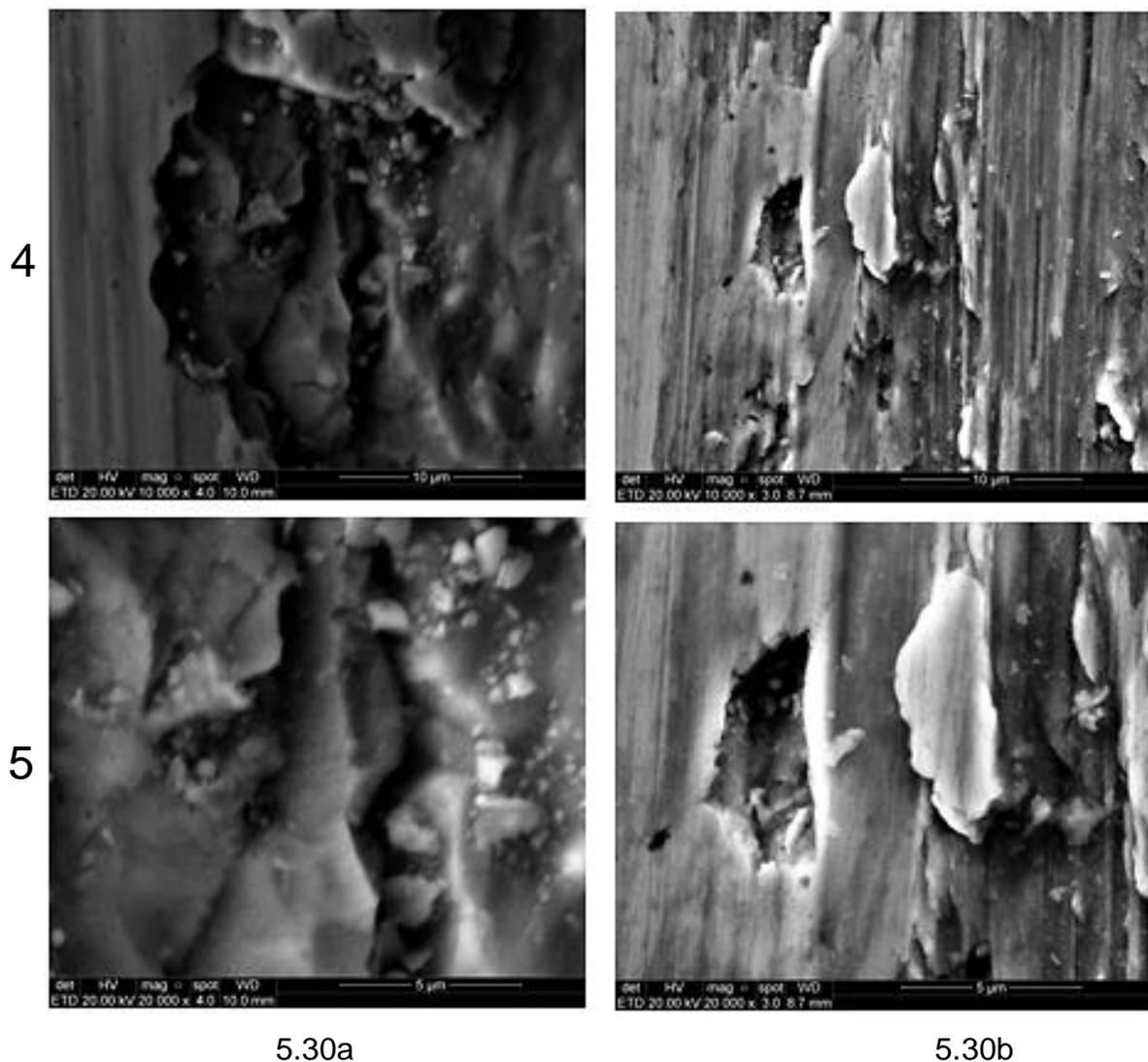


2



3





5.30a

5.30b

Figura 5.30. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 3 – 300°C – sem lubrificação; b) Amostra 4 – 300°C – B7 (Autor).

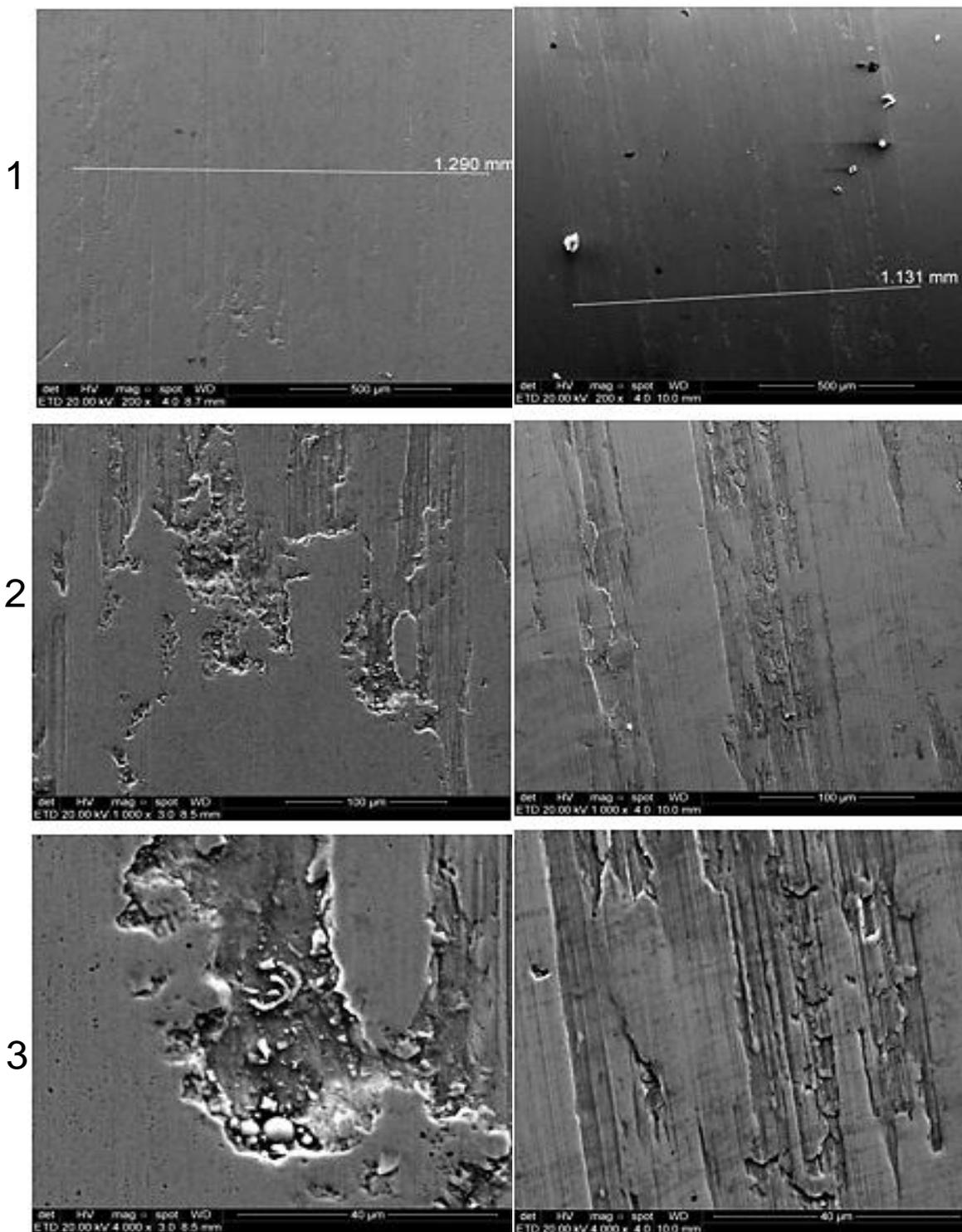
Na Figura 5.30b1 nota-se o material riscado, sugerindo que este fato seja devido a lubrificação e a dureza do material. Nas Figuras 5.30b2 e 5.30b3, os riscos são mais visíveis devido ao aumento da ampliação, dando para concluir que se trata de desgaste abrasivo levemente severo, com arrancamento de material. E nas Figuras 5.30b4 e 5.30b5, imagens de maior ampliação parece ter havido arrancamento de material, com surgimento de pequeno microcorte e leve deformação plástica com provável delaminação com aparecimento de fragmentos da matriz.

Na Figura 5.31a tem-se a amostra 06, parte do disco temperado e revenido a 300°C, lubrificado com B20, na Figura 5.31a1 vem-se sinais do desgaste abrasivo

leve, na Figura 5.31a2 ocorre o surgimento de pequeno microcorte, na Figura 5.31a3 acentua-se o surgimento de pequeno microcorte acrescido de crateração. Nas Figuras 5.31a4 e 5.31a5 além da crateração ocorre o surgimento de pequenas partículas que representam estarem soltas.

Amostra 06/B20

Amostra 01/B30



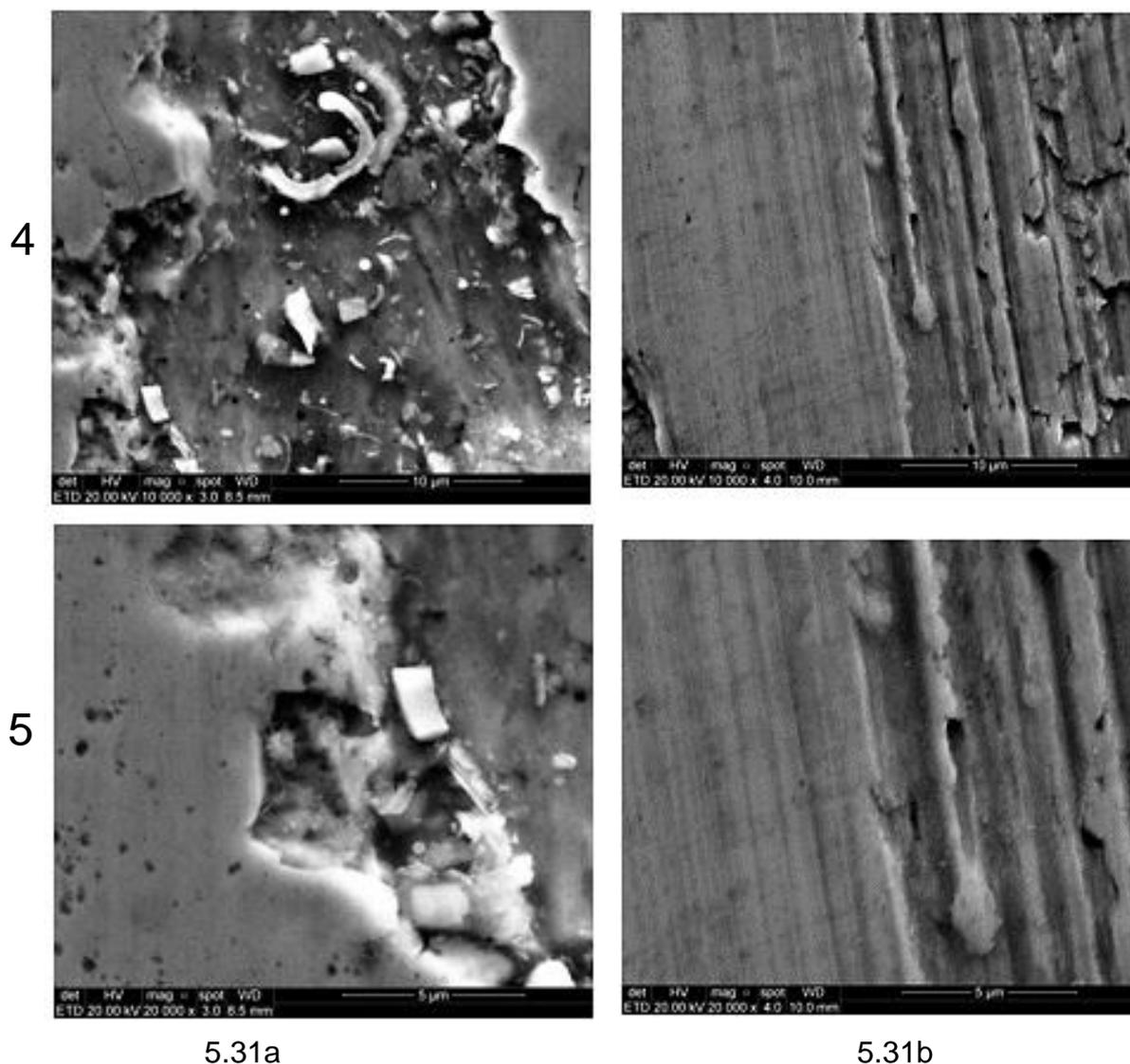
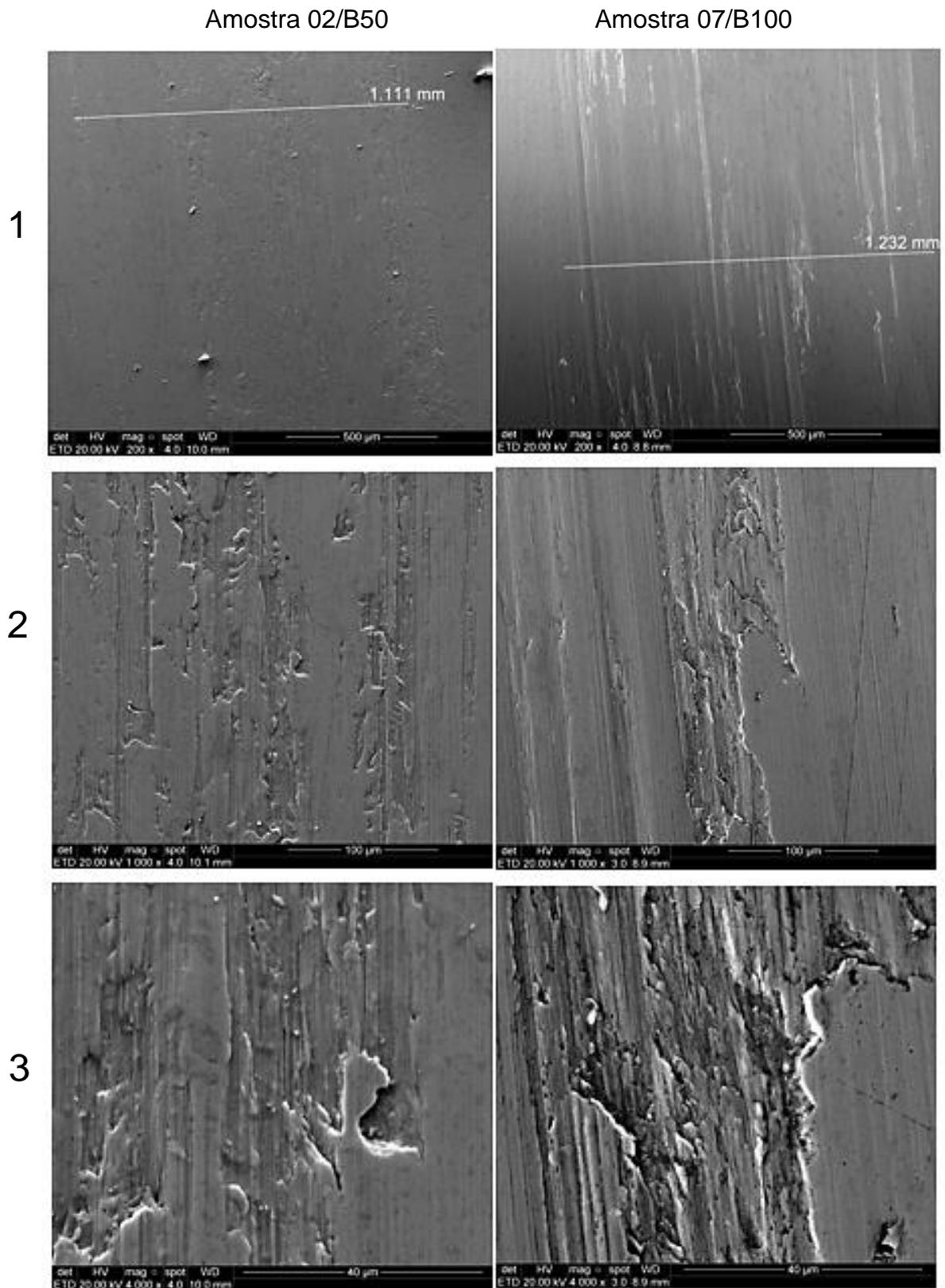


Figura 5.31. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 6 – 300°C – B20; b) Amostra1 – 300°C – B30 (Autor).

Na Figura 5.31b tem-se a amostra 01, amostra temperada e revenida a 300°C, lubrificada com B30, na Figura 5.31b1 observa-se claramente na amostra o desgaste abrasivo de forma diferente que tem apresentado até o momento parecendo partículas ali depositadas, que é o desgaste abrasivo sendo interrompido por carbeto, pontos pretos são poros e pontos claros óxido de alumínio. Nas Figuras 5.31b2 e 5.31b3 tem-se o surgimento de pequeno microcorte, que é consequente do desgaste abrasivo provocado. Nas Figuras 5.31b4 e 5.31b5 é confirmado o desgaste abrasivo através dos riscos que são bem representados nas figuras, com fragmentos da matriz.

Na Figura 5.32a tem-se a amostra 02, amostra temperada e revenida a

300°C, lubrificada com B50, a primeira imagem Figura 5.32a1 mostra o desgaste abrasivo, mostrada na imagem da Figura 5.32a2.



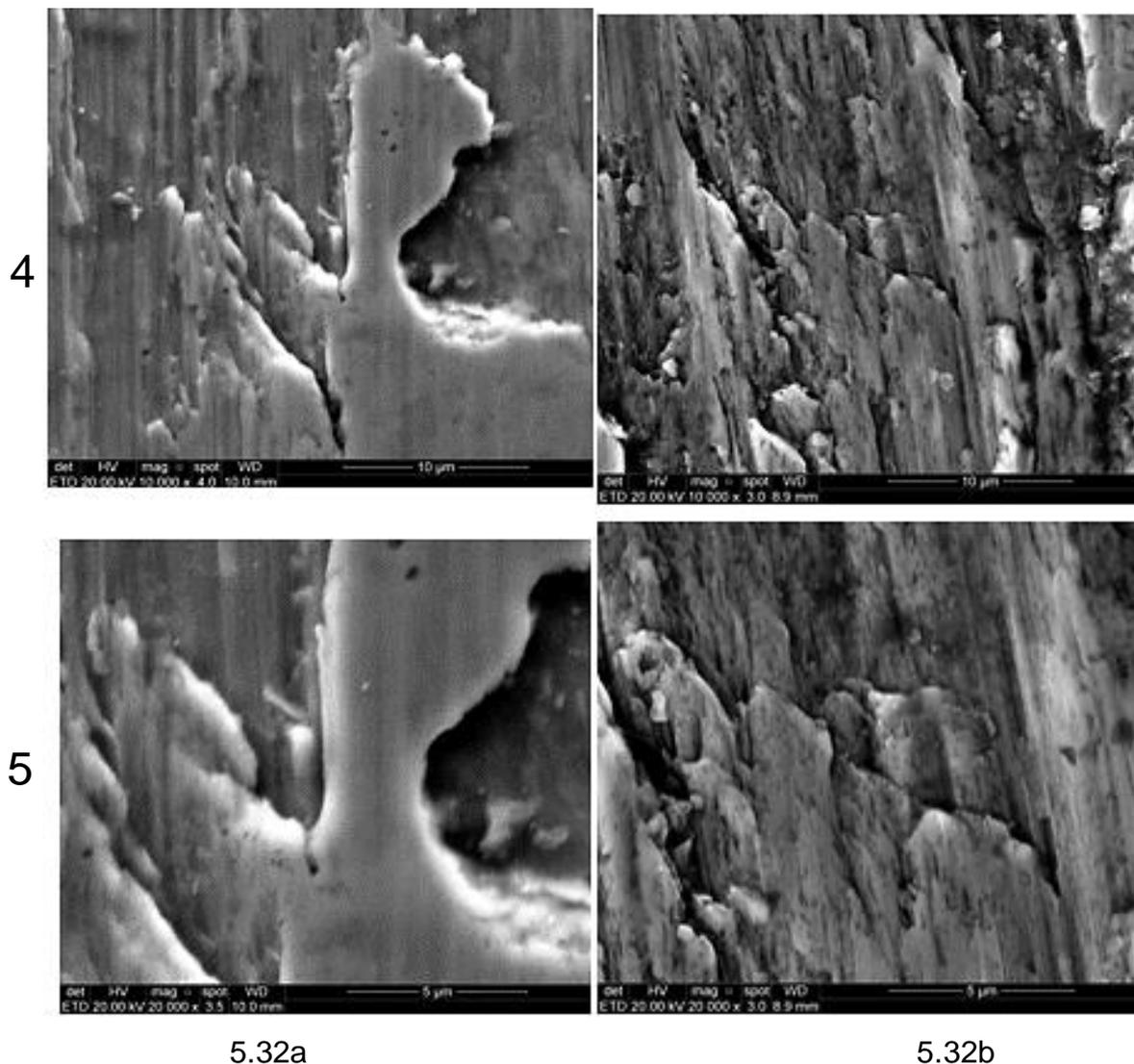


Figura 5.32. Superfícies das pistas de desgaste: a) Amostra 2 – 300°C – B50; b) Amostra 7 – 300°C – B100 (Autor).

Na Figura 5.32a3 observa-se o surgimento de pequeno microcorte com possível arrancamento de material e as Figuras 5.32a4 e 5.32a5 sugerem ter havido arrancamento de material, com crateração. A Figura 5.32b mostra a amostra 07, parte do disco temperado e revenido a 300°C, lubrificado com B100, na Figura 5.32b1 a amostra se mostra bem conservada, com sinais de riscos que confirmam que ocorreu um desgaste abrasivo, o que leva a se considerar que a lubrificação foi bem eficiente. Já na Figura 5.32b2 ocorre um pequeno desgaste abrasivo mais agressivo. Na Figura 5.32b3 com maior ampliação, observa-se na amostra, o desgaste abrasivo, com surgimento de pequeno microcorte. Nas Figuras 5.32b4 e 5.32b5 aparece uma leve deformação plástica.

Nas Figuras 5.30 a 5.32 observa-se microcortes semelhantes aos encontrados em amostras de material tratado termicamente com têmpera e revenidos a 100°C e a amostra que recebeu lubrificação B20 é a que melhor se iguala ao B7 (diesel comercial), todas as amostras apresentaram desgaste abrasivo. E basicamente todas apresentaram craterações, que são decorrentes do desgaste abrasivo. Não se percebe grande desgaste nas imagens de menor resolução. As amostras, sem lubrificação e B20, apresentam sinais de partículas soltas. Na análise do B30, parece ter regiões com crateração típicas de arrancamento de inclusões não metálicas.

De um modo geral percebe-se uma significativa melhora na redução da severidade do desgaste, nos materiais que receberam tratamento térmico e quando utilizado um lubrificante, sendo o B100 o de melhor desempenho neste quesito. As amostras lubrificadas com diesel (B7) e B20 apresentaram desgaste abrasivo muito parecidos, no estudo das primeiras ampliações.

Durante o ensaio de desgaste foram utilizadas duas esferas de alumina ( $Al_2O_3$ ) e observou-se um desgaste acentuado na primeira esfera por ter sido utilizada no ensaio sem lubrificação o que forçou sua substituição e a segunda esfera foi usada nos outros ensaios e o desgaste foi pequeno ao ponto de não ser necessária sua troca, a cada parada do tribômetro em cada 400 m percorridos, era verificado o estado da esfera, quando ela era limpa e era alterada sua posição.

### **5.5. Correlações entre as Características de Desgaste e as Condições dos Materiais e Lubrificação**

Com os resultados obtidos, foi possível estabelecer correlações entre os coeficientes de desgaste ( $k_0$ ) e as condições de lubrificação para o aço inoxidável AISI 440BC, tanto para as microestruturas e durezas para o material recozido, como tratado termicamente por têmpera e revenido. A Figura 5.33 mostra as variações de  $k_0$  com as condições de ensaio para os aços AISI 440BC, SAE 1045 e AISI 52100.

A escolha se deu por aceitarem têmpera e resfriamento em óleo, como o aço do presente trabalho. Nos gráficos, também são apresentadas equações que foram

geradas a partir de regressões com os pontos experimentais.

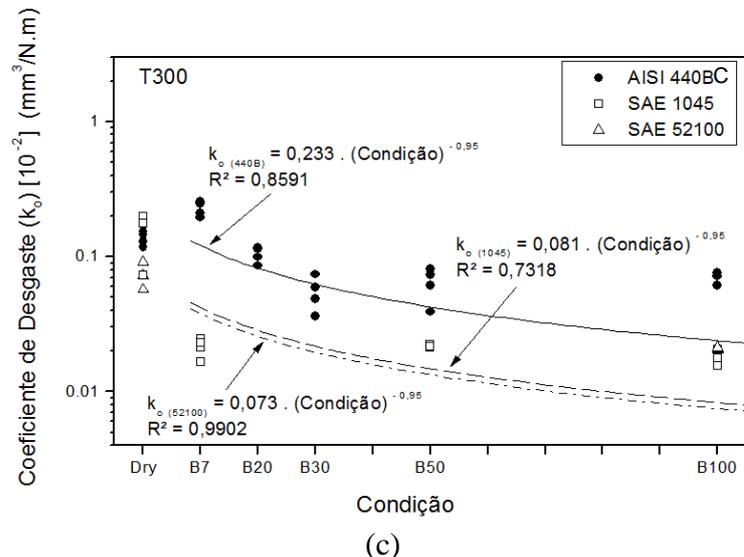
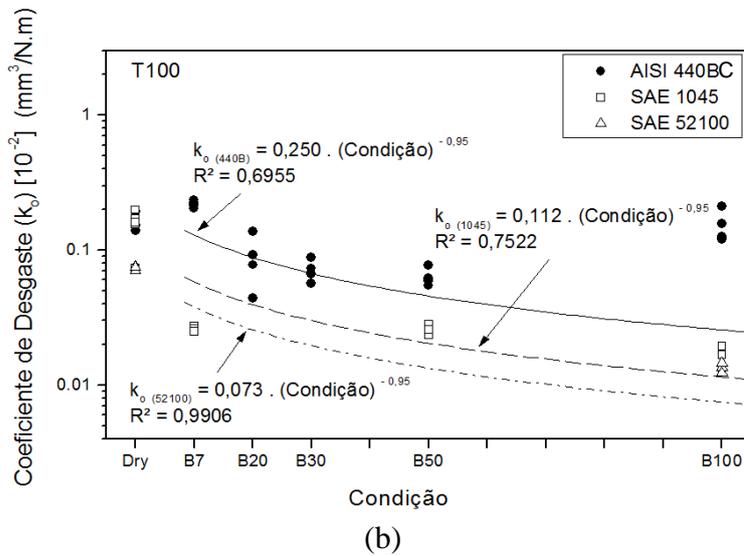
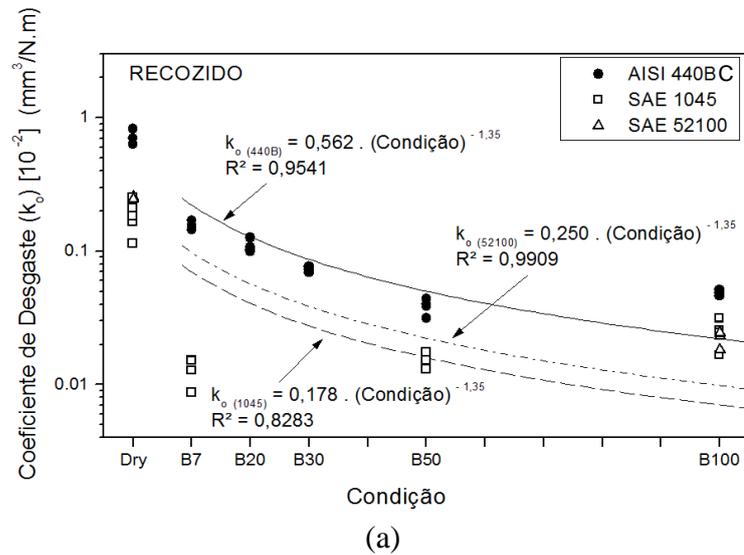


Figura 5.33. Correlações entre os coeficientes de desgaste e condições de lubrificação para o aço AISI 440BC recozido e tratado termicamente, e comparações com os aços SAE 1045 e SAE 52100.

Adaptado de CASTRO, 2015).

O aço SAE 1045, é utilizado na fabricação de componentes de uso geral onde seja necessária uma resistência mecânica superior à dos aços de baixo teor de carbono convencionais, aplicado principalmente em eixos em geral, pinos, cilindros, ferrolho, parafusos, pinças, pregos, entre outros e aço AISI 52100 é de elevado teor de carbono, ligado ao cromo, utilizado quando se pretende atingir elevada dureza após a têmpera, entre 62 e 66 HRC, sendo utilizado em componentes de uso geral nas indústrias de fabricação de rolamentos, foram analisados por Castro (2015), e utilizados neste trabalho para título de comparação.

A análise comparativa entre os materiais AISI 440BC, SAE 52100 e SAE 1045 mostra que os maiores coeficientes de desgaste foram obtidos para o AISI 440BC sem tratamento térmico e sem lubrificação. A medida que é utilizada lubrificação, com maiores teores de biodiesel, os coeficientes de desgaste diminuem, mas a tendência de valores maiores para o AISI 440BC se mantém em relação aos outros aços.

Equações experimentais foram determinadas sobre o comportamento do coeficiente de desgaste ( $k$ ) com as condições de lubrificação e percentual de biodiesel adicionado ao diesel, permitindo que estimativas sejam feitas sobre a resposta ao desgaste para as condições analisadas.

Os materiais tratados termicamente e lubrificados com B20, B30 e B50 apresentaram coeficientes de desgaste médios próximos, considerando material por material.

Na Tabela 5.16 temos todos os valores médios encontrados para o coeficiente de desgaste de todos os materiais analisados neste momento e auxiliam no entendimento do que foi encontrado e concluído.

Observa-se que, em média, para qualquer que seja o material sempre o tratado termicamente a 100°C tem o menor valor de coeficiente de desgaste com exceção do lubrificado com B100 no AISI 440BC. Os maiores valores do coeficiente de desgaste são encontrados em material recozido (bruto) para AISI 440BC e AISI

52100. A lubrificação é extremamente importante para baixar o valor do coeficiente de desgaste e ainda neste caso o biodiesel ainda é mais eficiente.

Tabela 5.16 Valores médios dos coeficientes de desgaste considerando o material e a lubrificação.

		Sem Lubr	S10-B7	B20	B30	B50	B100
440BC	Rec	0,6667	0,1476	0,1036	0,0762	0,0370	0,0463
	100°C	0,1433	0,2021	0,0665	0,0624	0,0579	0,1468
	300°C	0,1213	0,1975	0,1077	0,0458	0,0576	0,0678
1045	Bruto	0,16	0,013			0,016	0,028
	100°C	0,15	0,025			0,021	0,015
	300°C	0,21	0,025			0,022	0,018
52100	Bruto	0,25					0,021
	100°C	0,074					0,013
	300°C	0,089					0,021

Ocorre uma tendência de diminuição do valor do coeficiente de desgaste quando se melhora a lubrificação e quando ocorre o endurecimento do material.

## 6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados teóricos e experimentais apresentados ao longo deste trabalho, chegou-se as seguintes conclusões:

- Em relação ao comportamento ao desgaste, o aço inoxidável AISI 440BC na condição recozido e sem lubrificação (à seco) apresentou o maior desgaste em função da sua menor dureza do material, como esperado. A presença de uma matriz dúctil que favorece o arrancamento de material pelos carbonetos duros presentes, bem como a ausência de lubrificação contribuíram para isso. Com a adição de lubrificação, a resistência ao desgaste aumentou com o aumento do teor de biodiesel ao diesel, o que se refletiu nos menores valores do coeficiente de desgaste (k). Destaca-se o comportamento com o B50, que apresentou o menor valor de k, em relação aos outros lubrificantes, indicando melhor desempenho em relação à lubrificação para o caso de matriz com baixa dureza (dúctil).
- De modo geral, as amostras temperadas e revenidas apresentaram menores desgastes à seco quando comparadas à condição recozida, sendo que os revenidos à 100°C ou à 300°C não influenciaram de maneira significativa na resposta do material, como esperado. Quando analisado na condição lubrificada, as amostras AISI 440BC – temperadas e revenidas - apresentaram desempenho superior ao material na condição recozida, com exceção para o B100. A comparação do desgaste, das amostras com percentuais variáveis de adição do biodiesel ao diesel, mostra o B20 com desempenho um pouco melhor que o B30 e que o próprio diesel comercial, quando se considera matriz com alta dureza (resistente).
- As amostras temperadas e revenidas a 100°C tiveram sua dureza na pista de desgaste aumentada em torno de 23%, já as amostras temperadas e revenidas a 300°C tiveram a dureza da pista de desgaste aumentada em 26,5% em média, e as

amostras de material recozida tiveram um aumento da pista de desgaste em 66,33%. As amostras temperadas e revenidas tiveram menores aumentos de dureza na pista de desgaste que as peças sem tratamento, como esperado, devido a resistência ao encruamento. As amostras com maior dureza inicial também apresentaram menores acréscimos na dureza da pista.

- As análises micrográficas realizadas nas pistas de desgaste, para todos os ensaios, mostram defeitos superficiais do tipo delaminação, microcorte e crateração, característicos do mecanismo de desgaste abrasivo.

- O dispositivo pino-sobre-disco em desenvolvimento, do Laboratório de Materiais da PUC-RS, usado nos ensaios desenvolveu plenamente o objetivo, não ocorrendo durante todos os ensaios nenhuma intervenção necessária para algum tipo de correção.

- O material recozido e sem lubrificação apresentou o maior coeficiente de desgaste ( $k = 0,6667 \cdot 10^{-2}$ ) e a amostra recozida e lubrificada com B50 apresentou o menor coeficiente de desgaste ( $k = 0,0370 \cdot 10^{-2}$ ). As amostras temperadas e revenidas a 100°C apresentaram os seguintes valores: B20 ( $k = 0,0665 \cdot 10^{-2}$ ), B30 ( $k = 0,0624 \cdot 10^{-2}$ ), B50 ( $k = 0,0579 \cdot 10^{-2}$ ) e B100 ( $k = 0,1462 \cdot 10^{-2}$ ), enquanto as amostras temperadas e revenidas a 300°C apresentaram: B20 ( $k = 0,1077 \cdot 10^{-2}$ ), B30 ( $k = 0,0458 \cdot 10^{-2}$ ), e B50 ( $k = 0,0576 \cdot 10^{-2}$ ), e B100 ( $k = 0,0678 \cdot 10^{-2}$ ). Os resultados indicaram uma tendência de diminuição de desgaste com o uso do biodiesel B100, e desgastes muito parecidos entre os biodieseis B7 e B20, sendo um pouco melhor com B30 e B50.

- De uma maneira geral, verifica-se que o biodiesel puro ou misturas de biodiesel mais elevadas causam menos desgaste do que em misturas com baixos volumes de biodiesel ou diesel puro.

## 7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

As conclusões obtidas neste trabalho possibilitam dar continuidade, com uma série de aprofundamentos, em diversos trabalhos futuros. Seguem sugestões de abordagens de pesquisa para as seguintes propostas:

- Realizar o mesmo tipo de ensaio com outros materiais para novas comparações;
- Confeccionar anéis de motores com o material do estudo e testar em motores;
- Testar os biodieseis B20 e B30 diretamente em motores;
- Correlacionar diferentes valores de velocidade e distância percorrida com diferentes misturas de biodiesel, avaliando a influência dos mesmos no coeficiente de desgaste;
- Realizar a análise de lubricidade com dispositivo High Frequency Reciprocating Test Rig (HFRR).
- Realizar o mesmo tipo de ensaio usando o duplo revenido.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇOS ESPECIAIS. In: GERDAU. Disponível em: <[HTTP://www.ggdmetals.com.br/acos especiais](http://www.ggdmetals.com.br/acos-especiais)>. Acesso em: 31 out. 2016.

AGÊNCIA SENADO. Disponível em: <[www.12.senado.gov.br](http://www.12.senado.gov.br)>. Acesso em: 09 set. 2014.

ALMEIDA, F.A. de; MARUB, M.M.; BATISTAC, L. do N.; OLIVEIRA, F.J.A. de; SILVA, R.R.F. e ACHETEB, C.A. Wear and friction behaviour of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics under diesel and biodiesel lubrication. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 2, n. 2, p. 110-116, junho 2013.

AMBROZIN, A.R.P.; KURI, S.E. e MONTEIRO, M.R. Corrosão Metálica Associada ao uso de Combustíveis Minerais e Biocombustíveis. **Química Nova**, v. 32, n. 7, p. 1910-1916, 2009.

ANDRADE, L.C.T.; FRANÇA, F.R.M.; RAMOS, A.L.D. e SILVA, G.F. da. Influência da Atividade Antioxidante em Diferentes Percentuais de Diesel/biodiesel Utilizando o Composto Aditivo Obtido a Partir da Moringa Oleífera Lam. 2014. Disponível em: <[pdf.blucher.com.br/s3-sa-east-1.amazonaws.com/chemicalengineering...](http://pdf.blucher.com.br/s3-sa-east-1.amazonaws.com/chemicalengineering...)>. Acesso em: 16 jul. 2018.

ANP (Agência Nacional de Petróleo e Biocombustíveis). Resolução ANP nº 65 de 09/11/2011. Disponível em: <[www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br)>. Acesso em: 02 dez. 2018.

ANP (Agência Nacional de Petróleo e Biocombustíveis). 2015. Disponível em: <[www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br)>. Acesso em: 29 jul. 2015.

APROBIO. Associação dos Produtores de Biodiesel do Brasil. Disponível em: <<http://www.aprobio.com.br>>. Acesso em: 09 ago. 2015.

AQUINO, I.P., 2013. Influência da matéria-prima na corrosividade e degradação do biodiesel. Disponível em: <<http://www.bv.fapesp.br/pt/bolsas>>. Acesso em: 16 maio 2014.

AGARWAL, A.K.; and DHAR A. Wear, durability, and lubricating oil performance of a straight vegetable oil (Karanja) blend fuel direct injection compression ignition engine. **Journal Renewable Sustainable Energy**, n. 4, 2012.

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

ASTM D6751-15ce1, Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ATABANI, A.E.; SILITONGA, A.S.; BADRUDDIN, I. A.; MAHLIA, T.M.I.; MASJUKI, H.H.; MEKHIL, S. A. Comprehensive Review on Biodiesel as an Alternative Energy Resource and its Characteristics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Journal Elsevier, v. 16, 2012.

BASINGER, M.; REDING, T.; WILLIAMS, C.; LACKNER, K.S. e MO di V. Compression Ignition Engine Modifications for Straight Plant Oil Fueling in Remote Contexts: Modification Design and Short-run Testing. 2010. Disponível em: <[www.utterpower.com/wp-content/uploads/2010/2012/Basinger-Fuel-Article-1.pdf](http://www.utterpower.com/wp-content/uploads/2010/2012/Basinger-Fuel-Article-1.pdf)>. Acesso em: 12 set. 2014.

BELINELLI, M. **Desenvolvimento de um Sistema Informatizado Aplicado à Gestão de Planos Preventivos de Lubrificação Industrial**. Ponta Grossa. 2011. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Brasil.

BIODIESELBR. **Jornal de Notícias da Actioill**. 2014. Disponível em:

<<http://www.actioil.com.br/noticias>>. Acesso em: 10 set. 2014.

BIODIESELBR. Disponível em: <[www.biodieselbr.com/proalcool/proalcool/programa-etanol.htm](http://www.biodieselbr.com/proalcool/proalcool/programa-etanol.htm)>. Acesso em: 23 abr. 2014.

BIODIESELBR. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/noticias/regulacao/politica/sancionada-lei-que-consolida-aumento-da-mistura-250914.htm>>. Acesso em: 30 set. 2014.

BR, Distribuidora. Disponível em: <<http://www.br.com.br>>. Acesso em: 21 abr. 2014.

CAPANA, G.H. **Estudo do Impacto do Enxofre Presente no Diesel na Emissão de Poluentes e em Tecnologia de Pós Tratamento de Gases de Escape**. São Paulo. 2008. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Área de Concentração: Engenharia Automotiva, Brasil.

CASTRO, V.V. de. **Avaliação da Resistência ao Desgaste dos Aços SAE 52100 e SAE 1045 Lubrificados com Biodiesel e Óleo Diesel Comercial**. Porto Alegre. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia dos Materiais). Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

CONDE, A.P. **Desempenho de Motor Diesel Alimentado com Diesel de Óleo de Soja**. Lavras. 2007. 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Brasil.

CHRISTOFF, P. **Produção de Biodiesel a partir do Óleo Residual de Fritura Comercial Estudo de Caso: Guaratuba, Litoral Paranaense**. Curitiba. 2007, 82 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC. Instituto de Engenharia do Paraná, Brasil.

CRUZ, R.S. da; LÔBO, I.P.; FERREIRA, S.L.C.; Biodiesel: Parâmetros de Qualidade e Métodos Analíticos. **Química Nova**, v. 32, n. 6, p.1596-1608, 2009.

CUI, J.; ZHAO, L.; ZHU, W.; WANG, B.; ZHAO, C.; FANG, L.; REN, F. **Antibacterial activity, corrosion resistance and wear behavior of spark plasma sintered Ta-5Cu alloy for biomedical applications.** Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, v. 74, pp.315-323, 2017.

DHAR A.; and AGARWAL, A.K. Effect of Karanja biodiesel blend on engine wear in a diesel engine. **Fuel.** v. 134, Journal Elsevier. 2014.

DUQUE, J.L.R. Evaluación Del uso de Biodiesel Obtenido a partir de Aceite de Cocina Usado em un Motor Diesel. **Revista El Hombre y La Máquina.** 2012. Disponível em: <[HTTP://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47826850011](http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47826850011)> ISSN 0121-0777>. Acesso em: 31 out. 2014.

DWIVEDI, G.; JAIN, S.; SHARMA, M.P. **Diesel engine performance and emission analysis using biodiesel from various oil sources** – Review. Department of mechanical engineering, National institute of Technology Singapore, Singapore, 2013.

ESTEVES, M.A.P. **Melhoria da Resistência ao Desgaste e da Eficiência de correntes de Transmissão para Bicicleta por Aplicação de Revestimentos PVD.** Coimbra. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialização de Sistemas de Produção). Portugal.

FARIAS, A.C.M. de; MEDEIROS, J.T.N. de; ALVES, S.M. Micro and Nanometric Wear Evaluation of Metal Discs Use don Determination of Biodiesel Fuel Lubricity. **Materials Research.** v. 17, n. 1, 2014.

FAZAL, M.A.; HASEEB, A.S.M.A.; MASJUKI, H.H. Comparative corrosive characteristics of petroleum diesel and palm biodiesel for automotive materials. **Fuel Processing Technology.** v. 91, 2010.

FAZAL, M.A.; HASEEB, A.S.M.A.; MASJUKI, H.H. Biodiesel feasibility study: Anevaluation of material compatibility; performance; emission and engine durability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v. 15, 2011.

FAZAL, M.A.; HASEEB, A.S.M.A.; MASJUKI, H.H..Friction and wear Characteristics of Palm Biodiesel. Paper Reference ID: RTC 077. Regional **Tribology Conference**. Bayview Hotel, Langkawilsland, Malaysia, p. 22-24 November 2011b.

FAZAL, M.A.; HASEEB, A.S.M.A.; MASJUKI, H.H..Corrosion mechanism of copper in palm biodiesel. **Corrosion Science**, v. 67, p. 50–59, 2013.

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

FELTER, C.L. **Lubrication of Piston Rings in Large 2– and 4–stroke Diesel Engines**. 2007. Thesis the Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby. MAN Diesel A/S.

FONTALVO, G.A.; HUMER, R.; MITTERER, C.; SAMMT, K.; SCHEMMELE, I. Micro structural aspects determining the adhesive wear of tool steels. **Wear**, v. 260, p.1028–1034, 2006.

GARCIA, M.B. **Características do Desgaste de Anéis de Pistão com Diferentes Tecnologias de Tratamentos Superficiais**. São Paulo. 2003. 157 p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisa Energética e Nucleares (Autarquia da Universidade Estadual de São Paulo- USP), Brasil.

HABIBULLAH, M.; MASJUKI, H.H.; KALAM, M.A.; ZULKIFLI, N.W.M.; MASUM, B.M.; ARSLAN, A.; GULZAR, M. Friction and wear characteristics of Calophyllum inophyllum biodiesel. **Industrial Crops and Products**, v. 76, p. 188–197, 2015.

HU, Enzhu; HU, Xianguo, A. N.; LIU, Tianxia A.; SONG, Ruhong A.; DEARN, K. D.B.N.N.Effect of TiF<sub>3</sub> catalyst on the tribological properties of carbon black-contaminated engine oils. **Journal Wear**, v. 305, p. 166–176, 2013.

INOUE, G. H. **Uso do Óleo Vegetal em Motor Estacionário de Ciclo Diesel**.

Viçosa. 2008. 114 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola para Obtenção do Título de Doctor Science). Universidade Federal de Viçosa, Brasil.

IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada-2013. OS DESAFIOS DO DESENVOLVIMENTO E DA INCLUSÃO SOCIAL: O CASO DO ARRANJO POLÍTICO-INSTITUCIONAL DO PROGRAMA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DO BIODIESEL. Disponível em:

<[http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/2621/1/TD\\_1858.pdf](http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/2621/1/TD_1858.pdf)>. Acesso em: 20 abr. 2014.

JAKERIA, M.R.; FAZAL, M.A.; HASEEB, A.S.M.A. Influence of diferente factors on the stability of biodiesel: Areview. **Renewableand Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 154–163, 2014.

JOAQUIM, C.R. de O. **Verificação do comportamento da Lubricidade do Óleo Diesel Veicular com Adição de Etanol**. São Paulo. 2007. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica de Universidade de São Paulo. Brasil.

KIM, H-J. e KIM, D-E. Water Lubrication of Stainless Steel using Reduced Graphene Oxide Coating. **Scientific reports**, v.5, pp.17034, 2015.

KOIKE, G.H.A.; LOPES, A.; LIMA, L.P. de; CAMARA, F.T. da; PASSARINI, L. C.; HILDEBRAND, L.J. Comparativo de potência e consumo de combustível de um motor utilizando diesel e biodiesel de soja em bancada dinanométrica.4º Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel. **7º Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel**. Belo Horizonte- MG. Brasil 05 a 08 DE OUTUBRO DE 2010.

KRASZCZUK, A. **Caracterização microestrutural, mecânica e tribológica de um aço AISI 440B após tratamentos térmicos de têmpera e nitretação a plasma**. São Paulo. 2017. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica de Universidade de São Paulo. Brasil.

LI, X.; SOSA, M.; OLOFSSON, U. A pin-on-disc study of the tribology characteristics

of sintered versus standard steel gear materials. **Wear an International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrification and Wear**, 2015.

LYU, Y.; ZHU, Y.; OLOFSSON, U. Wear bet ween wheel and rail: A pin-on-disc study of environ mental conditions and iron oxides. **Wear**, v. 328-329, p. 277–285, 2015.

LIMA, L.P. de; LOPES, A.; OLIVEIRA, M.C.J. de; NEVES, M.C.T.; KOIKE, G. H.A. Comparativo entre Biodiesel de Dendê e Tucumã no Desempenho Operacional de Trator Agrícola. REVENG. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa - MG, v. 20, n. 3, p. 234-243, maio/junho 2012.

MAHLE, Metal Leve S.A. Manual Técnico – Motores de Combustão Interna. 2012. Disponível em:<<http://www.mahle-aftermarket.com/>>. Acesso em 12 nov. 2015.

MARQUES, G. Biodiesel: desafios a enfrentar. Disponível em: <<http://www.saebrasil.org.br/>>. Acesso em 12 set. 2014.

MASJUKI, H.H.; LIAQUAT, A.M.; KALAM, M.A.; FAZAL, M.A.; KHAN, Abdul Faheem; FAYAZ, H.; VARMAN, M. Impact of palm biodiesel blend on injector deposi tformation. **Applied Energy**, v.111, p. 882–893, 2013.

MATTOS, C.V.L. de. **Estudo da Correlação das propriedades do Diesel, Biodiesel e suas Blendas com a Lubricidade**. Porto Alegre. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil.

MAZIERO, J.V.G.; CORRÊA, I.M.; ÚNGARO, M.R.; BERNARDI, J.A.; STORINO, M. Desempenho de um motor diesel com óleo bruto de girassol. R. Bras. **Agrociência**, v. 13, n. 2, p. 249-255, abr-jun, 2007.

MCTI (Ministério de Ciências, Tecnologia e Inovação). 2007. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/>> Acesso em: 18 ago. 2014.

MCTI (Ministério de Ciências, Tecnologia e Inovação). 2014. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/>> Acesso em: 28 ago. 2014.

MDA (Ministério de Desenvolvimento Agrário). 2015. Disponível em: <<http://www.mda.gov.br/pnpb>> Acesso em: 24 jul. 2015.

MEHER, L.C.; SAGAR, D. Vidya; NAIK, S.N. Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.10, p. 248–268, 2006.

MINELLI, J. **9º Fórum de Debates sobre Qualidade e Uso de Combustíveis**, promovido pelo Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP), no Rio de Janeiro em maio de 2013. Disponível em: <[www.ibp.org.br](http://www.ibp.org.br)> Acesso em 05 set. 2014.

MINELLI, J.C. **VII Simpósio Internacional de Combustíveis em São Paulo**, promovido pela Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA), em 26 de agosto de 2014. Disponível em: <<http://www.aprobio.com.br>> Acesso em 09 set. 2014.

MIRAGAYA, J.C.G. Biodiesel: Tendências no mundo e no Brasil. In: Produção de Oleaginosas no Brasil. **Informe Agropecuário**, v. 26, n. 229, p. 7-73, 2005.

MULLER, I.C.; SHARP, J.; RAINFORTH, W. M.; HOVSEPIAN, P.; EHIASARIAN, A. **Tribological response and characterization of Mo-W doped DLC coating, (Report)**. *Wear*, v. 376-377, p.1622(8), 2017.

NICOLAU, A.; LUTCKMEIER, C.V.; SAMIOSA, D.; GUTTERRESC, M.; PIATNICKB, C.M.S. The relation bet ween lubricity and electrical properties of low sulfur diesel and diesel/biodiesel blends. **Fuel**, v. 117, p. 26–32, 2014.

NOGUEIRA, O.C.; REAL, M. de V. Estudo comparativo de motores diesel marítimos através da análise de lubrificantes usados e engenharia de confiabilidade. **ENGEVISTA**, v. 13, n. 3, p. 244-254, dezembro 2011.

OLIVEIRA, F.C.C.; SAUREZ, P.A.Z.; SANTOS, W.L.P. Biodiesel: Possibilidades e

Desafios. **Química Nova na Escola**, n. 28, p.3-8, maio 2008.

PARKER, A. Representante da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) no **9º Fórum de Debates sobre Qualidade e Uso de Combustíveis**, promovido pelo Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP), no Rio de Janeiro em maio de 2013. Disponível em: <[www.ibp.org.br](http://www.ibp.org.br)>. Acesso em 05 set. 2014.

PATEL, M. and ASWATH, P. Role of thermal, mechanical and oxidis ingtreatment onstructure and chemistry of carbono blackand its impact on wear and friction Part I: Extreme pressure condition. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1179/1751584X14Y.0000000086>>. Acesso em: 12 jul. 2015.

PEHAN, S.; JERMAN, M.S.; KEGL, M.; KEGL, B. Biodiesel influence on tribology characteristics of a diesel engine. **Fuel**, v. 88 (6), p. 970-979, 2009. Disponível em: SciVerseScienceDirectJournals. Acesso em: 05 set. 2014.

PÉREZ, F.M.; MORENO, A.B. Mejoras em laconstrucción de camisas de cilindro de motores de combustión interna ciclo diesel. **REVISTA DE METALURGIA**, v. 49, p. 100-110, março-abril 2013.

PIMENTEL, V.S.B.; BELCHIOR, C.R.P.; PEREIRA, P.P. Avaliação experimental do desempenho e emissões de motores diesel, usando misturas de óleo de mamona e óleo diesel. In: **Anais 5º Encontro de Energia no Meio Rural**, 2004. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n5v1/027.pdf>>. Acesso em 28 set. 2014.

PINTAÚDE, G. **Estudo do Regime Transiente em Desgaste Abrasivo – Ensaios em Britador de Mandíbulas**. São Paulo. 1998. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Brasil.

PORTE, A.F. **Metodologia para Avaliação de Motores Diesel Alimentados por Biodiesel**. Porto Alegre. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil.

PROGRAMA BRASILEIRO DE BIODIESEL (PBB). Disponível em: <[www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/.../NAEBiocombustiveis.pd...](http://www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/.../NAEBiocombustiveis.pd...)>. Acesso em: 16 maio 2014.

PROGRAMA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DE BIODIESEL. Selo combustível social e agricultura familiar. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/selo.htm>> Acesso em: 15 set. 2014.

RABINOWICZ, E. **Friction and Wear of Materials**. 2<sup>o</sup> Editions. New York, John Wileyand Sons. 2013. 336 p.

RAHMAN, M.; HASSAN, M.H.; KALAM, A.; ATABANI, A.E.; MEMON, L.A.; RAHMAN, A. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 304-310, 2014.

RENEWABLES 2014. GLOBAL STATUS REPORT. Disponível em:<[http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014\\_full%20report\\_low%20res.pdf](http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf)>. Acesso em: 04 out. 2014.

Shen, H.H.; Liu, L.; Liu, X.J.; Guo, Q.; Meng, T.X.; Wang, Z.X.; Yang, H.J.; Liu, X.P. **Zr/ZrC modified layer formed on AISI 440B stainless steel by plasma Zr-alloying**. Applied Surface Science, v. 388, pp.126-132, 2016.

SILVA, A.L.V. da C. e; MEI, P.R. **Aços e Ligas Especiais**. 2<sup>a</sup> Edição revista e ampliada. Editora Edgar Blücher. São Paulo. 2006.

SILVA, F.D. de L. **Avaliação do Desempenho, Desgaste e Emissões de Motores Diesel Operando com Biodiesel (B100)**. Belém-Pa. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Instituto de Tecnologia. Universidade Federal do Pará, Brasil.

SYAHRULLAIL, S.; NURALIZA, N.; IZHAN, M.I.; HAMID, M.K. Abdul; RAZAKA, D. Md. Wear Characteristic of Palm Olein as Lubricant in Different Rotating Speed. **The Malaysi na International Tribology Conference** 2013, MITC2013. Procedia

Engineering, v. 68, p. 158 – 165, 2013.

SP. GOV. Disponível em: <[www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/.../NAEBiocombustiveis.pd...](http://www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/.../NAEBiocombustiveis.pd...)>. Acesso em: 24 abr. 2014.

SOARES, P.M. Presidente da Fecombustíveis. Portal Transporta Brasil - Notícias em transporte e logística. Disponível em: <<http://www.transportabrasil.com.br/2011/11/biodiesel-uma-guerra-pela-quantidade-da-mistura/>> Acesso em: 25 ago. 2014.

SOUZA, G. de. **Impactos da adição de Biodiesel no motor Diesel**. Araçatuba. 2010. Trabalho de conclusão de Curso (Tecnologia em Biocombustíveis). Faculdade de Tecnologia de Araçatuba. Brasil.

SOUZA, D.V.; TORRES, E.A.; SANTOS, D.C.; PEIXOTO, L.B. e FRANÇA, T. Ensaio de Motores Estacionários do ciclo Diesel Utilizando óleo Diesel e Biodiesel (B100). An. 6. Enc. Energ. Meio Rural, 2006. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n6v1/057.pdf>> Acesso em: 30 set. 2014.

SUDA, K.J. Vegetable oil or diesel fuel-a \_exible option. Tech. Rep. 840004, SAE International, engine Study. 1984. Power Plant Research Caterpillar Tractor Co.

TORRES, E.A.; SANTOS, D.C.; SOUZA, D.V.; PEIXOTO, L.B. e FRANÇA, T. Ensaio de Motores Estacionários do ciclo Diesel Utilizando óleo Diesel e Biodiesel (B100). **An. 6. Enc. Energ. Meio Rural**, 2006. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n6v1/057.pdf>> Acesso em: 30 set. 2014.

VAZ, A. (Presidente executivo do SINDICOM). No **9º Fórum de Debates sobre Qualidade e Uso de Combustíveis**, promovido pelo Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP), no Rio de Janeiro em maio de 2013. Disponível em: <[www.ibp.org.br](http://www.ibp.org.br)> Acesso em 05 set. 2014.

VENTILII. No **Fórum de Debates da APROBIO** em 2012. (APROBIO) Associação dos Produtores de Biodiesel do Brasil. Disponível em: <<http://www.aprobio.com.br>>. Acesso em 29 set. 2014.

WAHNFRIED, C.M. Novo Diesel S10 - Problemas e Soluções. Informativo Bosch. 2007. Disponível em: <[http://www.aprobio.com.br/noticia\\_new.aspx](http://www.aprobio.com.br/noticia_new.aspx)>. Acesso em: 08 ago. 2014.

WANDER, P.R.; ALTAFINI, C.R.; COLOMBO, A.L.; PERERA, S.C. Avaliação de desgaste e lubrificação em motores de combustão interna monocilíndricos operando com óleo diesel, biodiesel de soja e biodiesel de mamona. **4º Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel e 7º Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel**. Belo Horizonte–Minas Gerais, Brasil, 2010.

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

YOKAYO. A history of the diesel engine. Disponível em: <[http://www.ybiofuels.org/bio\\_fuels/history\\_diesel.html](http://www.ybiofuels.org/bio_fuels/history_diesel.html)>. Acesso em: 10 jun. 2014.

## ANEXO A – LARGURA DA PISTA DE DESGASTE E MÉDIAS

Os resultados obtidos na medição da largura da pista de desgaste dos discos, em cada uma das condições de lubrificação propostas são apresentadas a seguir.

Tabela A.1. Largura da pista de desgaste no disco 19, lado A, sem lubrificação.

Peça 19A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	2,28	2,40	2,17	2,32	2,27	2,36	2,00	2,30
800	2,48	2,48	2,25	2,40	2,50	2,50	2,43	2,50
1200	2,88	2,95	2,90	2,95	2,93	2,94	2,93	2,92
1600	2,90	2,96	2,92	2,95	2,95	2,95	2,95	2,94
2000	2,91	3,00	2,90	2,90	2,90	2,90	2,95	2,94
2400	3,00	3,00	2,92	3,00	3,00	2,87	2,91	2,91
2800	2,90	3,00	3,10	3,14	3,20	2,97	2,90	2,90
3200	2,87	3,00	3,15	3,14	3,22	2,95	2,90	2,90
3600	2,95	3,01	3,15	3,22	3,24	3,17	2,92	2,91
4000	2,95	3,05	3,16	3,23	3,30	3,17	2,87	2,92
4400	3,00	3,05	3,16	3,24	3,23	3,16	2,87	2,90

Tabela A.2. Largura da pista de desgaste no disco 19, lado B, sem lubrificação e média.

Peça 19B	1	2	3	4	5	6	7	8	Média dos ensaios
400	2,17	2,16	2,14	2,16	2,20	2,18	2,15	2,12	2,212
800	2,72	2,80	2,83	2,85	2,85	2,85	2,85	2,84	2,634
1200	2,82	2,92	2,90	2,90	2,95	2,96	2,96	2,85	2,918
1600	2,85	2,95	2,93	2,90	2,99	2,96	2,96	2,88	2,934
2000	2,86	2,95	2,94	2,94	2,95	2,97	2,99	2,94	2,934
2400	2,88	2,91	2,82	2,83	2,88	3,00	2,95	2,86	2,921
2800	2,88	2,91	2,89	2,86	2,95	2,98	2,90	2,86	2,959
3200	2,88	2,93	2,89	2,86	2,88	2,95	2,90	2,86	2,949
3600	2,88	2,95	2,89	2,86	2,90	2,95	2,92	2,86	2,986
4000	2,88	2,95	2,89	2,87	2,90	2,95	2,93	2,90	2,995
4400	2,88	2,95	2,90	2,90	2,92	2,95	2,94	2,93	2,999

Tabela A.3. Largura da pista de desgaste nodisco 14, lado A, sem lubrificação.

Peça 14A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	1,00	1,02	0,91	1,01	0,94	1,00	0,96	0,98
800	1,14	1,22	1,22	1,24	1,15	1,18	1,22	1,15
1200	1,28	1,26	1,47	1,47	1,37	1,38	1,47	1,49
1600	1,35	1,16	1,17	1,17	1,18	1,25	1,30	1,28
2000	1,40	1,25	1,34	1,34	1,34	1,33	1,50	1,29
2400	1,60	1,50	1,44	1,42	1,40	1,35	1,34	1,43
2800	1,57	1,55	1,54	1,51	1,50	1,45	1,51	1,30
3200	1,53	1,50	1,39	1,37	1,36	1,45	1,47	1,45
3600	1,56	1,56	1,54	1,43	1,37	1,35	1,37	1,38
4000	1,67	1,61	1,44	1,45	1,44	1,44	1,60	1,61
4400	1,55	1,37	1,57	1,49	1,43	1,43	1,43	1,47

Tabela A.4. Largura da pista de desgaste nodisco 14, lado B, sem lubrificação e média.

Peça 14B	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
400	0,56	0,86	0,82	0,63	0,70	0,52	0,60	0,63	0,821
800	0,56	0,84	0,87	0,52	0,83	0,83	0,82	0,55	0,959
1200	0,54	0,88	1,00	0,94	0,82	0,98	0,70	0,70	1,109
1600	0,80	1,06	0,77	1,02	1,00	1,14	0,91	1,20	1,110
2000	1,06	1,00	1,20	1,12	1,17	1,17	1,25	1,30	1,254
2400	1,50	1,10	1,22	1,37	1,46	1,42	1,31	1,35	1,388
2800	1,15	1,20	1,15	1,30	1,50	1,38	1,35	1,20	1,385
3200	1,15	1,30	1,39	1,30	1,32	1,35	1,35	1,26	1,371
3600	1,15	1,25	1,30	1,30	1,45	1,25	1,37	1,28	1,369
4000	1,15	1,30	1,40	1,38	1,39	1,37	1,28	1,28	1,426
4400	1,26	1,37	1,39	1,39	1,47	1,44	1,50	1,38	1,434

Tabela A.5. Largura da pista de desgaste nodisco 3, lado A, sem lubrificação.

Peça 3A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	1,05	1,08	0,87	0,87	1,30	1,00	1,16	1,07
800	1,00	1,10	1,20	1,25	1,39	1,50	1,50	0,85
1200	1,16	1,20	1,15	1,05	1,42	1,30	1,13	1,20
1600	1,29	1,33	1,20	1,05	1,39	1,38	1,25	1,08
2000	1,27	1,15	1,19	1,22	1,09	1,27	1,27	1,27
2400	1,26	1,40	1,28	1,10	1,40	1,27	1,27	1,35
2800	1,30	1,35	1,35	1,35	1,65	1,50	1,43	1,42
3200	1,37	1,37	1,36	1,34	1,39	1,44	1,35	1,46
3600	1,44	1,44	1,40	1,30	1,46	1,45	1,40	1,46
4000	1,45	1,45	1,40	1,35	1,47	1,47	1,45	1,47
4400	1,45	1,45	1,38	1,30	1,46	1,43	1,47	1,38

Tabela A.6. Largura da pista de desgaste nodisco 3, lado B, sem lubrificação e média.

Peça 3B	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
400	1,00	1,10	1,11	1,11	0,91	1,15	1,18	1,00	1,060
800	0,85	1,14	1,14	1,00	1,01	1,18	1,09	1,15	1,147
1200	1,06	1,07	1,14	1,13	1,14	1,14	1,05	1,14	1,155
1600	0,86	1,18	1,10	1,11	1,10	1,18	1,17	1,16	1,177
2000	1,06	1,06	1,02	1,18	1,04	1,18	1,17	1,18	1,164
2400	1,04	1,17	1,17	1,18	1,20	1,24	1,17	1,23	1,233
2800	1,10	1,22	1,25	1,30	1,21	1,11	1,18	1,27	1,312
3200	1,06	1,17	1,25	1,26	1,25	1,18	1,18	1,27	1,294
3600	1,11	1,26	1,30	1,34	1,18	1,22	1,20	1,23	1,324
4000	1,20	1,40	1,31	1,36	1,30	1,24	1,22	1,27	1,363
4400	1,20	1,40	1,33	1,38	1,35	1,30	1,30	1,37	1,372

Tabela A.7. Largura da pista de desgaste no disco 16, lado A, lubrificação com Diesel S10.

Peça 16A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	0,46	0,46	0,44	0,46	0,46	0,46	0,40	0,42
800	0,46	0,46	0,45	0,46	0,47	0,46	0,44	0,44
1200	0,77	0,78	0,73	0,77	0,77	0,76	0,77	0,77
1600	1,27	1,26	1,25	1,27	1,27	1,27	1,28	1,30
2000	1,66	1,66	1,65	1,54	1,60	1,56	1,69	1,66
2400	1,70	1,63	1,65	1,63	1,68	1,62	1,73	1,73
2800	1,84	1,82	1,76	1,75	1,71	1,73	1,75	1,75
3200	1,87	1,77	1,76	1,76	1,73	1,76	1,76	1,76
3600	1,87	1,86	1,76	1,76	1,73	1,76	1,76	1,76
4000	1,89	1,87	1,78	1,76	1,76	1,76	1,78	1,80
4400	2,02	2,01	1,97	1,99	2,02	1,96	1,95	1,90

Tabela A.8. Largura da pista de desgaste no disco 16, lado B, lubrificação com Diesel S10 e média.

Peça 16B	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
400	1,25	1,26	1,20	1,26	1,27	1,21	1,20	1,19	0,838
800	1,54	1,55	1,50	1,58	1,68	1,60	1,49	1,52	1,006
1200	1,56	1,56	1,60	1,65	1,63	1,75	1,56	1,55	1,186
1600	1,70	1,63	1,75	1,73	1,67	1,76	1,66	1,56	1,477
2000	1,79	1,70	1,75	1,82	1,78	1,88	1,79	1,72	1,703
2400	1,80	1,78	1,84	1,84	1,80	1,83	1,80	1,75	1,738
2800	1,80	1,83	1,84	1,85	1,88	1,92	1,83	1,75	1,801
3200	1,80	1,85	1,86	1,85	1,86	1,95	1,83	1,80	1,811
3600	1,80	1,80	1,86	1,85	1,88	1,96	1,84	1,78	1,814
4000	1,86	1,81	1,87	1,85	1,88	1,96	1,86	1,80	1,831
4400	2,00	1,94	1,91	1,91	1,91	2,06	1,90	1,90	1,959

Tabela A.9. Largura da pista de desgaste nodisco 9, lado A, lubrificação com Diesel S10.

Peça 9A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	0,37	0,55	0,60	0,60	0,45	0,62	0,60	0,62
800	0,70	0,70	0,75	0,76	0,70	0,83	0,85	0,88
1200	0,78	1,00	1,00	1,04	1,05	1,09	1,01	1,10
1600	1,10	1,10	1,12	1,12	1,11	1,15	1,11	1,15
2000	1,16	1,18	1,20	1,19	1,18	1,28	1,29	1,30
2400	1,30	1,32	1,34	1,33	1,30	1,36	1,38	1,31
2800	1,36	1,40	1,41	1,35	1,35	1,37	1,40	1,36
3200	1,39	1,40	1,45	1,40	1,41	1,40	1,40	1,38
3600	1,48	1,43	1,48	1,46	1,45	1,44	1,44	1,42
4000	1,55	1,57	1,55	1,50	1,50	1,53	1,54	1,59
4400	1,64	1,60	1,60	1,50	1,59	1,61	1,65	1,66

Tabela A.10. Largura da pista de desgaste nodisco 9, lado B, lubrificação com Diesel S10 e média.

Peça 9B	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
400	0,55	0,61	0,54	0,53	0,47	0,62	0,60	0,57	0,556
800	0,95	0,97	0,86	0,82	0,82	0,85	0,81	0,81	0,816
1200	1,09	1,20	1,11	1,12	1,17	1,18	1,09	1,14	1,073
1600	1,20	1,25	1,23	1,22	1,21	1,22	1,24	1,26	1,174
2000	1,25	1,25	1,24	1,24	1,23	1,25	1,24	1,27	1,234
2400	1,35	1,35	1,29	1,30	1,29	1,32	1,27	1,37	1,324
2800	1,40	1,38	1,37	1,33	1,32	1,33	1,30	1,41	1,365
3200	1,40	1,39	1,37	1,34	1,35	1,36	1,35	1,42	1,388
3600	1,46	1,44	1,41	1,40	1,46	1,45	1,38	1,43	1,439
4000	1,50	1,47	1,45	1,47	1,55	1,55	1,51	1,46	1,518
4400	1,58	1,58	1,56	1,59	1,57	1,60	1,57	1,55	1,591

Tabela A.11. Largura da pista de desgaste nodisco 4, lado A, lubrificação com Diesel S10.

Peça 4A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	0,40	0,39	0,36	0,40	0,34	0,39	0,35	0,35
800	0,90	0,87	0,85	0,87	0,88	0,88	1,00	0,90
1200	1,02	1,00	1,00	1,01	0,99	0,97	1,03	1,04
1600	1,45	1,50	1,50	1,40	1,33	1,34	1,35	1,40
2000	1,50	1,53	1,53	1,52	1,50	1,44	1,46	1,54
2400	1,54	1,54	1,55	1,56	1,55	1,53	1,54	1,55
2800	1,54	1,55	1,55	1,51	1,55	1,56	1,57	1,55
3200	1,60	1,58	1,60	1,53	1,55	1,57	1,57	1,58
3600	1,63	1,66	1,66	1,55	1,55	1,60	1,62	1,64
4000	1,65	1,66	1,66	1,55	1,57	1,60	1,63	1,64
4400	1,72	1,70	1,71	1,70	1,65	1,74	1,75	1,67

Tabela A.12. Largura da pista de desgaste nodisco 4, lado B, lubrificação com Diesel S10 e média.

Peça 4B	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
400	0,47	0,55	0,64	0,62	0,50	0,63	0,64	0,60	0,477
800	0,96	0,92	0,90	0,90	0,97	0,89	0,84	0,83	0,898
1200	0,97	0,96	0,92	0,92	1,00	0,91	0,90	0,88	0,970
1600	0,97	0,97	0,96	0,95	1,04	0,98	0,96	0,88	1,186
2000	0,97	0,99	0,98	1,00	1,00	0,96	0,95	0,93	1,238
2400	1,00	1,00	1,00	1,02	1,08	1,07	0,99	0,98	1,281
2800	1,05	1,02	1,07	1,07	1,08	1,08	1,00	0,99	1,296
3200	1,13	1,10	1,20	1,14	1,21	1,16	1,08	1,00	1,35
3600	1,16	1,35	1,39	1,39	1,49	1,47	1,37	1,29	1,489
4000	1,43	1,42	1,55	1,47	1,60	1,61	1,54	1,35	1,558
4400	1,53	1,54	1,59	1,53	1,61	1,63	1,57	1,43	1,629

Tabela A.13. Largura da pista de desgaste nodisco 20, lado A, lubrificação com B20.

Peça 20A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	0,41	0,41	0,40	0,36	0,39	0,38	0,40	0,41
800	0,43	0,49	0,49	0,48	0,50	0,49	0,51	0,46
1200	1,07	1,12	0,97	0,93	1,09	1,17	1,07	0,96
1600	1,45	1,33	1,28	1,20	1,41	1,38	1,30	1,27
2000	1,47	1,44	1,46	1,44	1,43	1,43	1,35	1,31
2400	1,47	1,46	1,38	1,45	1,47	1,48	1,47	1,45
2800	1,62	1,52	1,63	1,60	1,65	1,62	1,53	1,48
3200	1,68	1,70	1,63	1,68	1,72	1,70	1,63	1,56
3600	1,65	1,69	1,61	1,77	1,76	1,67	1,63	1,65
4000	1,69	1,69	1,61	1,63	1,72	1,74	1,62	1,62
4400	1,73	1,88	1,82	1,68	1,85	1,87	1,85	1,84

Tabela A.14. Largura da pista de desgaste nodisco 20, lado B, lubrificação com B20 e média.

Peça 20B	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
400	0,47	0,43	0,45	0,46	0,45	0,46	0,46	0,48	0,426
800	0,68	0,63	0,64	0,63	0,64	0,64	0,60	0,64	0,559
1200	1,10	1,10	1,10	1,11	1,16	1,20	1,15	1,14	1,090
1600	1,33	1,32	1,31	1,36	1,36	1,33	1,32	1,26	1,326
2000	1,36	1,36	1,37	1,36	1,36	1,33	1,32	1,33	1,383
2400	1,41	1,44	1,47	1,47	1,49	1,51	1,49	1,46	1,461
2800	1,55	1,56	1,51	1,54	1,56	1,51	1,48	1,45	1,551
3200	1,47	1,49	1,49	1,49	1,54	1,51	1,48	1,49	1,579
3600	1,58	1,58	1,61	1,61	1,67	1,59	1,55	1,57	1,637
4000	1,58	1,60	1,60	1,67	1,72	1,62	1,59	1,54	1,640
4400	1,62	1,78	1,74	1,68	1,80	1,74	1,71	1,71	1,769

Tabela A.15. Largura da pista de desgaste nodisco 12, lado A, lubrificação com B20.

Peça 12A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	0,64	0,54	0,58	0,62	0,64	0,61	0,56	0,42
800	0,71	0,72	0,75	0,74	0,79	0,80	0,90	0,85
1200	0,82	0,77	0,89	0,91	0,91	0,95	0,92	0,86
1600	0,82	0,78	0,91	0,98	0,99	1,06	0,93	0,87
2000	0,86	0,81	0,93	1,02	1,05	1,07	1,01	0,87
2400	0,92	0,93	1,19	1,30	1,29	1,41	1,20	0,99
2800	0,92	0,94	1,23	1,32	1,40	1,17	0,95	0,82
3200	0,94	0,98	1,26	1,25	1,26	1,36	1,09	0,83
3600	0,88	0,88	1,20	1,25	1,27	1,36	0,93	0,83
4000	0,94	0,94	1,31	1,32	1,30	1,39	0,99	0,97
4400	0,94	0,94	1,31	1,34	1,32	1,37	1,08	0,94

Tabela A.16. Largura da pista de desgaste nodisco 12, lado B, lubrificação com B20 e média.

Peça 12B	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
400	0,55	0,67	0,70	0,67	0,73	0,68	0,67	0,62	0,619
800	0,92	0,95	0,98	1,10	1,11	0,90	0,90	0,85	0,873
1200	0,95	0,94	1,05	1,10	1,09	0,93	0,90	0,91	0,931
1600	0,95	0,94	1,03	1,07	1,04	0,87	0,90	0,80	0,934
2000	0,96	0,98	1,06	1,14	1,10	0,92	0,97	0,93	0,980
2400	1,10	1,05	1,08	1,10	1,10	0,94	0,98	1,02	1,100
2800	1,01	1,07	1,06	1,10	1,15	1,00	1,04	1,05	1,077
3200	1,07	1,05	1,09	1,14	1,17	1,00	1,01	1,04	1,096
3600	1,08	1,09	1,15	1,18	1,22	1,00	0,92	0,98	1,076
4000	1,09	1,10	1,10	1,18	1,24	0,97	0,97	1,05	1,116
4400	1,09	1,10	1,20	1,18	1,22	1,00	1,08	1,05	1,135

Tabela A.17. Largura da pista de desgaste nodisco 6, lado A, lubrificação com B20.

Peça 6A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	0,33	0,27	0,26	0,26	0,29	0,27	0,26	0,20
800	0,91	0,77	0,81	0,81	0,84	0,81	0,78	0,73
1200	0,97	0,99	1,02	1,03	1,07	1,10	1,01	0,99
1600	1,06	1,02	1,06	1,04	1,08	1,10	1,05	0,99
2000	1,12	1,08	1,10	1,09	1,05	1,10	1,09	1,04
2400	1,14	1,12	1,10	1,09	1,14	1,13	1,10	1,03
2800	1,14	1,09	1,08	1,12	1,14	1,13	1,09	1,10
3200	1,16	1,09	1,12	1,14	1,14	1,17	1,15	1,12
3600	1,21	1,18	1,23	1,23	1,23	1,24	1,21	1,23
4000	1,27	1,24	1,25	1,24	1,23	1,24	1,22	1,23
4400	1,27	1,27	1,26	1,26	1,35	1,34	1,23	1,24

Tabela A.18. Largura da pista de desgaste nodisco 6, lado B, lubrificação com B20 e média.

Peça 6B	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
400	0,77	0,77	0,55	0,58	0,67	0,69	0,68	0,70	0,472
800	0,83	0,81	0,75	0,70	0,79	0,80	0,68	0,70	0,783
1200	1,09	1,06	0,95	0,95	1,01	0,94	0,98	0,96	1,008
1600	1,02	1,04	0,91	0,95	0,99	0,97	0,93	0,94	1,009
2000	1,20	1,15	1,08	1,08	1,15	1,10	1,11	1,09	1,102
2400	1,30	1,28	1,13	1,15	1,18	1,18	1,16	1,14	1,148
2800	1,24	1,28	1,17	1,20	1,22	1,20	1,19	1,23	1,164
3200	1,29	1,26	1,14	1,16	1,23	1,20	1,19	1,23	1,174
3600	1,29	1,21	1,24	1,20	1,20	1,18	1,24	1,18	1,219
4000	1,29	1,29	1,17	1,18	1,22	1,19	1,17	1,25	1,230
4400	1,35	1,31	1,21	1,22	2,26	1,22	1,25	1,27	1,332

Tabela A.19. Largura da pista de desgaste no disco 15, lado A, lubrificação com B30.

Peça 15A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	0,38	0,38	0,37	0,36	0,43	0,42	0,32	0,32
800	0,45	0,45	0,42	0,44	0,49	0,48	0,43	0,42
1200	0,98	0,96	0,88	0,81	0,84	0,89	0,85	0,83
1600	0,94	0,99	0,99	0,95	0,98	0,99	0,98	0,99
2000	0,94	1,02	0,95	0,90	1,00	0,98	0,96	0,98
2400	1,11	1,20	1,18	1,09	1,16	1,23	1,19	1,11
2800	1,27	1,25	1,24	1,29	1,32	1,36	1,19	1,24
3200	1,35	1,20	1,27	1,20	1,30	1,33	1,24	1,28
3600	1,40	1,30	1,39	1,40	1,38	1,42	1,39	1,40
4000	1,41	1,49	1,50	1,52	1,49	1,48	1,47	1,48
4400	1,59	1,62	1,58	1,56	1,53	1,57	1,53	1,58

Tabela A.20. Largura da pista de desgaste no disco 15, lado B, lubrificação com B30 e média.

Peça 15B	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
400	0,39	0,39	0,36	0,38	0,38	0,40	0,39	0,42	0,381
800	0,66	0,68	0,71	0,73	0,74	0,73	0,74	0,71	0,580
1200	1,07	1,10	1,08	1,09	1,08	1,08	1,01	1,03	0,974
1600	1,21	1,20	1,20	1,21	1,21	1,22	1,23	1,14	1,089
2000	1,25	1,27	1,29	1,29	1,32	1,34	1,26	1,27	1,126
2400	1,40	1,38	1,38	1,40	1,36	1,35	1,29	1,30	1,258
2800	1,61	1,59	1,59	1,52	1,58	1,70	1,59	1,52	1,429
3200	1,58	1,59	1,57	1,58	1,59	1,70	1,59	1,58	1,434
3600	1,58	1,59	1,58	1,56	1,60	1,70	1,69	1,57	1,497
4000	1,67	1,60	1,54	1,54	1,57	1,60	1,66	1,62	1,540
4400	1,74	1,65	1,54	1,54	1,64	1,62	1,59	1,69	1,598

Tabela A.21. Largura da pista de desgaste no disco 8, lado A, lubrificação com B30.

Peça 8A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	0,70	0,72	0,72	0,67	0,53	0,51	0,53	0,63
800	0,69	0,72	0,71	0,67	0,60	0,61	0,62	0,65
1200	0,80	0,80	0,78	0,75	0,70	0,74	0,69	0,72
1600	0,84	0,85	0,80	0,82	0,80	0,82	0,83	0,85
2000	0,94	0,89	0,91	0,86	0,83	0,80	0,83	0,87
2400	1,00	1,00	0,96	0,93	0,94	0,93	0,93	0,96
2800	1,10	1,10	1,11	1,04	1,06	1,02	1,04	1,02
3200	1,04	1,04	1,13	1,09	1,07	1,04	1,08	1,09
3600	1,13	1,15	1,14	1,09	1,05	1,06	1,10	1,10
4000	1,16	1,13	1,16	1,04	1,10	1,10	1,12	1,14
4400	1,17	1,16	1,17	1,10	1,09	1,10	1,14	1,14

Tabela A.22. Largura da pista de desgaste no disco 8, lado B, lubrificação com B30 e média.

Peça 8B	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
400	0,62	0,64	0,62	0,61	0,62	0,61	0,53	0,68	0,621
800	0,72	0,72	0,72	0,74	0,74	0,68	0,63	0,71	0,683
1200	0,80	0,80	0,81	0,81	0,82	0,81	0,78	0,78	0,774
1600	0,85	0,84	0,85	0,83	0,87	0,83	0,79	0,81	0,830
2000	0,89	0,88	0,93	0,90	0,97	0,98	0,89	0,87	0,890
2400	0,92	0,94	0,95	0,97	0,95	0,96	0,90	0,89	0,946
2800	0,93	0,92	0,93	0,97	1,00	1,01	0,81	0,82	0,993
3200	0,98	0,99	0,97	1,04	1,05	1,02	0,95	0,94	1,033
3600	1,01	1,00	1,06	1,04	1,04	1,03	0,96	0,98	1,059
4000	1,01	1,00	1,01	1,08	1,07	0,97	0,96	0,95	1,063
4400	0,98	0,98	1,01	1,08	1,08	1,00	0,92	0,93	1,066

Tabela A.23. Largura da pista de desgaste no disco 1, lado A, lubrificação com B30.

Peça 1A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	0,55	0,50	0,50	0,56	0,49	0,43	0,48	0,47
800	0,91	0,93	0,82	0,83	0,79	0,79	0,84	0,83
1200	0,98	0,90	0,85	0,80	0,81	0,81	0,83	0,87
1600	0,93	0,90	0,94	0,85	0,83	0,81	0,80	0,85
2000	0,95	0,97	0,91	0,90	0,89	0,89	0,89	0,88
2400	0,95	0,97	0,94	0,91	0,90	0,92	0,84	0,86
2800	1,03	1,03	0,91	0,93	0,88	0,89	0,89	0,88
3200	1,08	1,08	0,97	0,94	0,95	0,92	0,91	0,88
3600	0,98	0,98	0,97	0,95	0,86	0,89	0,90	0,88
4000	1,10	1,08	0,99	0,98	0,97	0,94	0,98	0,99
4400	1,14	1,13	0,99	0,97	0,96	0,90	0,91	0,92

Tabela A.24. Largura da pista de desgaste no disco 1, lado B, lubrificação com B30 e média.

Peça 1B	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
400	0,67	0,63	0,62	0,65	0,64	0,65	0,57	0,54	0,559
800	0,65	0,66	0,67	0,72	0,77	0,74	0,64	0,64	0,764
1200	0,72	0,80	0,85	0,85	0,85	0,84	0,75	0,73	0,828
1600	0,83	0,90	1,00	1,01	0,93	0,94	0,90	0,92	0,896
2000	0,92	1,02	1,02	0,99	1,00	0,93	0,81	0,91	0,930
2400	0,93	1,00	1,01	0,94	0,94	0,87	0,89	0,92	0,927
2800	0,99	1,02	1,02	0,98	0,96	0,86	0,86	0,90	0,939
3200	0,93	0,96	1,02	1,04	0,87	0,91	0,89	0,96	0,957
3600	0,97	1,02	1,05	1,07	0,93	0,89	0,89	0,96	0,949
4000	1,00	1,00	1,03	1,02	1,01	1,00	0,86	0,89	0,990
4400	1,02	1,05	1,06	1,06	1,02	0,97	0,91	0,86	0,992

Tabela A.25. Largura da pista de desgaste no disco 18, lado A, lubrificação com B50.

Peça 18A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	0,44	0,25	0,30	0,31	0,28	0,32	0,32	0,25
800	0,50	0,44	0,45	0,44	0,46	0,45	0,45	0,51
1200	0,56	0,51	0,54	0,49	0,51	0,56	0,55	0,56
1600	0,85	0,91	0,92	0,97	1,10	1,05	0,99	0,85
2000	1,00	1,09	1,00	1,02	1,03	1,06	0,99	0,95
2400	1,00	1,03	0,88	1,00	0,90	1,06	1,04	0,89
2800	0,90	1,03	0,90	1,02	0,91	1,10	1,03	0,95
3200	1,05	1,08	0,98	1,04	1,04	1,12	1,05	1,10
3600	1,16	1,15	1,15	1,14	1,15	1,24	1,10	1,14
4000	1,26	1,25	1,23	1,24	1,24	1,30	1,28	1,30
4400	1,31	1,31	1,33	1,45	1,43	1,27	1,36	1,33

Tabela A.26. Largura da pista de desgaste no disco 18, lado B, lubrificação com B50 e média.

Peça 18B	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
400	0,43	0,40	0,40	0,40	0,41	0,42	0,40	0,41	0,359
800	0,60	0,66	0,58	0,56	0,55	0,59	0,48	0,62	0,521
1200	0,65	0,68	0,64	0,60	0,57	0,69	0,53	0,66	0,581
1600	0,77	0,80	0,74	0,71	0,67	0,69	0,75	0,71	0,843
2000	0,82	0,80	0,79	0,77	0,76	0,79	0,78	0,77	0,901
2400	0,90	0,83	0,78	0,78	0,76	0,79	0,79	0,78	0,888
2800	0,90	0,83	0,80	0,78	0,80	0,83	0,80	0,82	0,900
3200	0,93	0,93	0,90	0,88	0,82	0,87	0,83	0,88	0,969
3600	0,99	0,98	0,98	0,94	0,93	0,90	0,90	0,90	1,047
4000	1,00	0,98	0,98	0,95	0,90	0,90	0,91	0,93	1,103
4400	1,20	1,17	1,17	1,10	1,17	1,14	1,16	1,18	1,255

Tabela A.27. Largura da pista de desgaste no disco 13, lado A, lubrificação com B50.

Peça 13A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	0,63	0,62	0,60	0,60	0,57	0,59	0,60	0,58
800	0,64	0,64	0,67	0,75	0,78	0,65	0,60	0,66
1200	0,74	0,81	0,82	0,85	0,85	0,77	0,71	0,72
1600	0,90	0,89	1,03	0,90	0,85	0,82	0,80	0,84
2000	1,02	1,09	1,12	1,06	1,03	1,00	1,04	1,02
2400	1,03	1,06	1,03	0,94	0,95	0,99	0,96	1,03
2800	1,03	1,08	1,09	1,03	0,98	1,00	1,02	0,93
3200	1,06	1,11	1,13	1,04	1,00	0,99	0,99	0,89
3600	1,04	1,16	1,15	1,04	0,98	1,00	0,99	1,00
4000	1,05	1,13	1,18	0,96	0,98	0,99	0,98	0,99
4400	1,07	1,23	1,20	1,06	1,04	1,04	1,02	0,97

Tabela A.28. Largura da pista de desgaste no disco 13, lado B, lubrificação com B50 e média.

Peça 13B	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
400	0,64	0,70	0,74	0,74	0,61	0,63	0,59	0,59	0,627
800	0,82	0,89	0,92	0,89	0,85	0,86	0,88	0,88	0,774
1200	0,80	0,88	0,95	0,97	0,97	0,87	0,90	0,89	0,844
1600	0,84	0,91	0,98	0,97	0,99	0,94	0,94	0,90	0,906
2000	0,90	0,94	1,01	1,00	0,93	0,93	0,94	0,90	0,996
2400	0,90	0,98	1,00	0,98	0,93	0,93	0,96	0,92	0,974
2800	0,93	0,94	0,97	0,99	0,96	0,95	0,94	0,94	0,986
3200	0,91	0,92	0,96	0,95	0,90	0,95	0,90	0,94	0,978
3600	1,02	1,00	0,99	0,99	1,00	0,95	0,95	0,93	1,012
4000	1,02	1,00	1,10	1,05	1,06	1,05	1,05	1,03	1,039
4400	1,10	1,07	1,17	1,03	1,11	1,09	1,09	1,05	1,084

Tabela A.29. Largura da pista de desgaste no disco 2, lado A, lubrificação com B50.

Peça 2A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	0,44	0,40	0,39	0,38	0,36	0,36	0,34	0,35
800	0,67	0,66	0,70	0,69	0,69	0,70	0,65	0,67
1200	1,04	0,99	1,01	0,99	1,04	0,97	0,86	0,85
1600	0,91	0,98	1,03	1,04	1,03	1,02	1,00	0,96
2000	1,11	1,22	1,23	1,23	1,21	1,17	1,16	1,09
2400	1,13	1,15	1,22	1,22	1,15	1,16	1,16	1,11
2800	1,21	1,22	1,25	1,24	1,19	1,12	1,12	1,17
3200	1,21	1,28	1,21	1,23	1,21	1,16	1,16	1,20
3600	1,20	1,22	1,28	1,26	1,17	1,21	1,20	1,19
4000	1,25	1,24	1,27	1,28	1,20	1,20	1,15	1,16
4400	1,17	1,28	1,29	1,24	1,23	1,21	1,25	1,21

Tabela A.30. Largura da pista de desgaste nodisco 2, lado B, lubrificação com B50 e média.

Peça 2B	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
400	0,56	0,54	0,53	0,51	0,56	0,54	0,45	0,39	0,444
800	0,70	0,71	0,73	0,73	0,75	0,70	0,68	0,78	0,701
1200	0,73	0,72	0,79	0,80	0,78	0,79	0,78	0,81	0,872
1600	0,80	0,83	0,85	0,84	0,83	0,87	0,88	0,86	0,921
2000	0,81	0,84	0,85	0,87	0,85	0,86	0,77	0,81	1,005
2400	0,81	0,84	0,86	0,87	0,89	0,90	0,87	0,81	1,009
2800	0,89	0,92	0,90	0,89	0,90	0,85	0,87	0,85	1,037
3200	0,96	0,96	0,98	0,97	0,99	0,93	0,92	0,97	1,084
3600	0,93	0,96	0,97	0,97	0,99	0,96	0,93	0,92	1,085
4000	0,93	0,98	0,97	0,96	0,99	0,94	0,95	0,90	1,086
4400	0,95	0,98	0,95	0,97	1,00	1,01	0,96	0,97	1,104

Tabela A.31. Largura da pista de desgaste nodisco 17, lado A, lubrificação com B100.

Peça 17A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	0,35	0,34	0,31	0,29	0,28	0,29	0,31	0,31
800	0,50	0,55	0,51	0,54	0,53	0,54	0,54	0,55
1200	0,59	0,60	0,60	0,61	0,65	0,65	0,64	0,65
1600	0,60	0,60	0,60	0,56	0,63	0,72	0,70	0,71
2000	1,00	0,95	0,94	0,91	0,97	0,95	0,95	0,96
2400	1,05	1,01	0,91	0,98	0,98	0,98	0,96	0,99
2800	1,05	1,00	0,98	1,00	1,00	0,99	0,98	1,00
3200	1,07	1,01	1,03	1,02	1,02	1,06	1,03	1,04
3600	1,10	1,08	1,06	1,02	1,04	1,08	1,08	1,09
4000	1,16	1,16	1,13	1,13	1,13	1,15	1,15	1,16
4400	1,29	1,28	1,26	1,26	1,22	1,26	1,27	1,29

Tabela A.32. Largura da pista de desgaste nodisco 17, lado B, lubrificação com B100 e média.

Peça 17A	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
400	0,47	0,49	0,49	0,49	0,47	0,47	0,47	0,47	0,394
800	0,94	0,95	0,98	0,97	0,92	0,97	0,97	0,91	0,742
1200	0,95	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,96	0,799
1600	0,95	0,99	1,03	1,03	1,02	1,08	1,02	1,03	0,829
2000	0,95	1,02	1,02	1,03	1,05	1,08	1,06	1,07	0,994
2400	1,11	1,08	1,12	1,09	1,07	1,09	1,07	1,09	1,036
2800	1,21	1,27	1,30	1,27	1,23	1,24	1,21	1,23	1,123
3200	1,23	1,29	1,28	1,26	1,21	1,26	1,27	1,27	1,147
3600	1,29	1,26	1,25	1,25	1,29	1,32	1,30	1,29	1,175
4000	1,33	1,31	1,32	1,32	1,28	1,31	1,31	1,32	1,229
4400	1,37	1,40	1,34	1,33	1,39	1,36	1,36	1,36	1,315

Tabela A.33. Largura da pista de desgaste nodisco 11, lado A, lubrificação com B100.

Peça 11A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	0,57	0,60	0,64	0,68	0,64	0,51	0,63	0,56
800	1,05	1,07	1,06	1,08	1,04	1,08	1,10	1,08
1200	1,05	1,09	1,05	1,07	1,09	1,10	1,11	1,12
1600	1,12	1,14	1,14	1,15	1,15	1,14	1,09	1,10
2000	1,14	1,14	1,13	1,11	1,06	1,13	1,11	1,10
2400	1,15	1,18	1,15	1,16	1,10	1,14	1,12	1,10
2800	1,20	1,24	1,23	1,24	1,25	1,25	1,26	1,22
3200	1,23	1,26	1,25	1,27	1,27	1,26	1,28	1,26
3600	1,25	1,26	1,26	1,26	1,28	1,29	1,29	1,28
4000	1,30	1,31	1,31	1,22	1,28	1,33	1,32	1,31
4400	1,31	1,34	1,31	1,34	1,35	1,33	1,33	1,35

Tabela A.34. Largura da pista de desgaste no disco 11, lado B, lubrificação com B100 e média.

Peça 11A	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
400	0,54	0,56	0,56	0,54	0,57	0,56	0,55	0,57	0,580
800	0,77	0,80	0,79	0,79	0,78	0,72	0,74	0,79	0,921
1200	1,01	1,06	1,00	1,12	1,07	1,00	1,02	1,09	1,066
1600	1,11	1,17	1,27	1,28	1,21	1,22	1,23	1,24	1,173
2000	1,40	1,48	1,50	1,41	1,42	1,41	1,42	1,43	1,274
2400	1,43	1,49	1,50	1,48	1,49	1,46	1,47	1,47	1,306
2800	1,44	1,49	1,50	1,63	1,53	1,52	1,53	1,50	1,377
3200	1,44	1,49	1,56	1,58	1,53	1,52	1,55	1,50	1,391
3600	1,46	1,49	1,58	1,58	1,45	1,48	1,52	1,50	1,389
4000	1,48	1,49	1,58	1,59	1,52	1,51	1,54	1,53	1,414
4400	1,48	1,49	1,58	1,60	1,52	1,53	1,51	1,52	1,431

Tabela A.35. Largura da pista de desgaste no disco 7, lado A, lubrificação com B100.

Peça 7A	1	2	3	4	5	6	7	8
400	0,36	0,38	0,38	0,36	0,40	0,41	0,40	0,35
800	0,41	0,43	0,46	0,47	0,52	0,50	0,52	0,51
1200	0,59	0,55	0,57	0,57	0,61	0,65	0,61	0,57
1600	0,65	0,59	0,64	0,61	0,67	0,66	0,70	0,61
2000	0,98	0,94	0,96	0,95	0,87	0,89	0,80	0,81
2400	1,02	0,95	0,97	0,97	0,96	1,02	0,98	1,01
2800	1,03	0,97	0,95	0,97	1,04	1,00	0,99	1,02
3200	1,04	0,98	1,00	1,00	1,07	1,06	1,03	1,04
3600	1,04	1,00	1,01	1,00	1,06	1,04	1,06	1,03
4000	1,06	1,06	1,05	1,05	1,11	1,08	1,10	1,04
4400	1,14	1,15	1,13	1,12	1,14	1,08	1,16	1,13

Tabela A.36. Largura da pista de desgaste no disco 7, lado B, lubrificação com B100 e média.

Peça 7B	1	2	3	4	5	6	7	8	Média
400	0,47	0,46	0,44	0,46	0,47	0,46	0,47	0,47	0,421
800	0,59	0,60	0,64	0,58	0,63	0,60	0,58	0,64	0,543
1200	0,72	0,74	0,76	0,76	0,78	0,74	0,73	0,75	0,669
1600	1,04	1,01	0,95	1,02	1,03	1,03	1,06	1,05	0,833
2000	1,04	1,06	0,98	1,01	1,02	1,03	1,00	1,00	0,959
2400	1,12	1,06	1,04	1,02	1,06	1,06	1,03	1,05	1,020
2800	1,12	1,13	1,09	1,05	1,07	1,08	1,05	1,06	1,039
3200	1,16	1,14	1,12	1,06	1,11	1,10	1,08	1,09	1,068
3600	1,13	1,14	1,11	1,06	1,09	1,11	1,12	1,11	1,069
4000	1,15	1,14	1,08	1,08	1,10	1,11	1,08	1,07	1,085
4400	1,20	1,20	1,16	1,15	1,12	1,11	1,15	1,13	1,142

## ANEXO B – MEDIDAS DE DUREZA E MÉDIAS

Tabela B.1. Medida da dureza e médias.

Medidas em Rockwell B, discos Recozidos									
Disco	A 1	2	3	4	B 1	2	3	4	Média
S/L 19	95	98	108	122	125	110	98	102	107,25
S10 16	100	98	96	99	99	115	97	101	100,63
B20 20	100	98	97	100	96	98	96	100	98,13
B30 15	98	99	97	98	97	97	98	98	97,75
B50 18	96	97	99	98	98	96	96	110	98,75
B100 17	97	98	100	96	108	100	99	122	102,5
									100,84
Medidas em Rockwell C, discos temperados e revenidos a 100°C									
Disco	A 1	2	3	4	B 1	2	3	4	Média
S/L 14	59	58	55	58	58	58	58	59	57,88
S10 9	56	57	56	54	59	56	71	61	58,75
B20 12	56	56	57	54	56	56	56	56	55,88
B30 8	58	54	61	61	62	62	59	63	60
B50 13	58	52	56	58	55	55	56	55	55,63
B100 11	58	59	58	61	58	59	61	59	59,13
									57,88
Medidas em Rockwell C, discos temperados e revenidos a 300°C									
Disco	A 1	2	3	4	B 1	2	3	4	Média
S/L 3	54	58	59	57	58	58	58	58	57
S10 4	56	52	54	56	58	56	59	58	56,13
B20 6	56	57	57	57	56	56	56	56	56,38
B30 1	57	56	57	56	57	56	57	58	56,75
B50 2	52	53	48	55	53	53	56	57	53,63
B100 7	56	56	57	57	55	56	56	55	56
									56,01

## ANEXO C – VOLUME DESGASTADO MÉDIO

Tabela C.1. Volume desgastado médio nos discos de aço AISI 440BC.

Distância percorrida em metros	Volume Desgastado Médio x10 <sup>-8</sup> (m <sup>3</sup> )								
	Sem lubrificação			Diesel			B20		
	Peça 19	Peça 14	Peça 3	Peça 16	Peça 9	Peça 4	Peça 20	Peça 12	Peça 06
400	56,87	2,87	6,19	3,057	0,892	0,563	0,401	1,231	0,545
800	96,67	4,58	7,85	5,294	2,822	3,763	0,906	3,457	2,493
1200	131,96	7,09	8,02	8,684	6,426	4,744	6,737	4,194	5,325
1600	134,47	7,11	8,49	16,813	8,423	8,684	12,151	4,235	5,341
2000	134,47	10,27	8,21	25,829	9,785	9,881	13,791	4,893	6,963
2400	132,66	13,94	9,76	27,464	12,095	10,951	16,271	6,925	7,874
2800	138,01	13,85	11,77	30,581	13,258	11,341	19,482	6,498	8,209
3200	137,43	13,43	11,29	31,097	13,942	12,824	20,562	6,849	8,423
3600	141,89	13,38	12,09	31,253	15,543	17,228	22,925	6,481	9,432
4000	143,19	15,12	13,19	32,146	18,259	19,948	23,052	7,232	9,691
4400	143,78	15,38	13,46	39,429	21,037	22,589	28,969	7,609	12,316

Tabela C.2. Volume desgastado médio nos discos de aço AISI 440BC.

Distância percorrida em metros	Volume Desgastado Médio x10 <sup>-8</sup> (m <sup>3</sup> )								
	B30			B50			B100		
	Peça 15	Peça 08	Peça 01	Peça 18	Peça 13	Peça 02	Peça 17	Peça 11	Peça 07
400	0,287	1,243	0,906	0,24	1,279	0,454	0,317	1,012	0,387
800	1,012	1,654	2,316	0,734	2,408	1,788	2,121	4,061	0,831
1200	4,803	2,408	2,949	1,018	3,123	3,445	2,649	6,301	1,554
1600	6,718	2,97	3,738	3,112	3,864	4,06	2,959	8,401	3,002
2000	7,429	3,663	4,181	3,80	5,137	5,278	5,106	10,771	4,584
2400	10,369	4,4	4,141	3,638	4,803	5,341	5,783	11,606	5,518
2800	15,22	5,091	4,303	3,788	4,984	5,799	7,369	13,612	5,833
3200	15,381	5,732	4,556	4,73	4,863	6,626	7,853	14,033	6,336
3600	17,508	6,177	4,442	5,969	5,389	6,645	8,444	13,972	6,354
4000	19,068	6,248	5,044	6,982	5,833	6,663	9,666	14,744	6,645
4400	21,317	6,301	5,075	10,295	6,626	7,00	11,849	15,284	7,751

## ANEXO D – Características dos Combustíveis

Tabela D.1. Características do combustível diesel S-10 (B7).

	Unidade	Limite/tipo A e B	Método ABNT/NBR	Método ASTM/EN
Aspecto		Límpido e isento de impurezas	14954	D4176
Cor		Incolor a amarelo		
Teor de Biodiesel	%Vol	7	15568	EN14078
Enxofre, máx.	Mg/kg	10,0		D2622, D4294, D5453, D2039, D2220
Destilação 10%Vol	°C	180	9619	D86
50	°C	245 a 295	9619	D86
95	°C	370	9619	D86
Massa específica a 20°C	Kg/cm <sup>3</sup>	815,0 a 850,0	7148, 14065	D1298, D4052
Ponto de fulgor, mín.	°C	38,0	7974, 14598	D56, D93, D3828
Viscosidade cinemática a 40°C	Mm <sup>2</sup> /s	2,0 a 4,5	10441	D445
CFPP	°C	0 a 12*		
Número de cetano		48		
Resíduo de carbono	% massa	0,25	14318	D524
Cinzas, máx.	% massa	0,010	9842	D482
Corrosividade a cobre 3h a 50°C, máx.	-	1	14359	D130
Teor de água, máx.	Mg/Kg	200		D6304, EN12937
Contaminação total, máx.	Mg/Kg	24		EN12662
Água e sedimentos, máx.	%Vol	0,05		D2709
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, máx.	% massa	11		D5186, D6591
Estabilidade a oxidação	Mg/100ml	2,5		D2274, D5304
Lubricidade	um	460		D6079, ISO12156
Condutividade Elétrica, mín.		25		D2624, D4308

(\*) Depende da época do ano e do Estado. Fonte: HABIBULLAH et al. (2015).

Tabela D.2. Características do combustível biodiesel B100.

Característica		Unidade	Resultado	Especificações	Métodos
Aspecto/Temperatura	21,9 °C	-	LII	LII	Visual
Massa Específica a 20 °C		kg/m <sup>3</sup>	878,2	850-900	NBR 7148:2013
Viscosidade Cinemática a 40 °C		mm <sup>2</sup> /s	4,3	3,0-6,0	NBR 10441:2014
Teor de água (Procedimento A)		mg/kg	146,7	200,0 (máx.)	ASTM D6304-07
Contaminação Total		mg/kg	21	24 (máx.)	EN 12662:2008
Ponto de Fulgor (Procedimento C)		°C	172,0	100,0 (mín.)	NBR 14598:2012
Teor de éster		% massa	97,2	96,5 (mín.)	EN 14103:2015
Cinzas Sulfatadas		% massa	##	0,020 (máx.)	NBR 6294:2008
Enxofre total		mg/kg	6,7	10 (máx.)	ASTM D5453-12
Sódio + Potássio		mg/kg	2,5	5 (máx.)	NBR 15553:2015
Cálcio + Magnésio		mg/kg	0,23	5 (máx.)	NBR 15553:2015
Fósforo		mg/kg	3,3	10 (máx.)	NBR 15553:2015
Corrosão ao Cobre, 3h a 50 °C		-	##	1 (máx.)	NBR 14359:2013
Ponto de entupimento de filtro a frio(*)		°C	2	3 (máx.)	NBR 14747:2008
Índice de acidez (Método B)		mgKOH/g	0,48	0,50 (máx.)	ASTM D664-11a
Glicerol livre		%massa	0,02	0,02 (máx.)	ASTM D6584-13
Glicerol total		%massa	0,18	0,25 (máx.)	ASTM D6584-13
Metanol ou Etanol		%massa	-	0,20 (máx.)	EN 14110:2003
Estabilidade à oxidação a 110°C		h	10	8 (mín.)	EN 14112:2003
Monoacilglicerol		%massa	0,6	0,7 (máx.)	ASTM D 6584-13
Diacilglicerol		%massa	0,10	0,20 (máx.)	ASTM D 6584-13
Triacilglicerol		%massa	0,004	0,20 (máx.)	ASTM D 6584-13
Índice de Iodo		g/100g	111	ANOTAR	EN 14111:2003

Fonte: Oleoplan S/A.

## Sliding Wear Behavior of an AISI 440B Martensitic Stainless Steel Lubricated with Biodiesel and Diesel–Biodiesel Blends

Arlei Franz Venske, Victor Velho de Castro, Eleani Maria da Costa, and Carlos Alexandre dos Santos

(Submitted October 26, 2017; in revised form July 16, 2018)

The aim of this work was to analyze the effect of biodiesel and diesel–biodiesel blends on the sliding wear behavior of AISI 440B martensitic stainless steel. Lubricated tests were performed on AISI 440B martensitic stainless steel samples using Brazilian commercial diesel (containing 7 vol.% biodiesel), pure biodiesel, and diesel–biodiesel blends with biodiesel additions of 20% v/v, 30% v/v, and 50% v/v. Non-lubricated tests were also performed. The stainless steel was analyzed in the as-received condition (annealed) and after heat treatments (quenched and tempered at different temperatures), using a pin-on-disk device with an alumina pin, at a 1.8 m/s sliding speed, 14.7 N load, and 4400 m sliding distance, following the ASTM G99-04 Standard. Wear track widths, wear coefficients, and wear track surfaces were analyzed by optical and scanning electron microscopy. The results showed that AISI 440B presented the worst wear behavior in the dry condition with a microstructure characterized by a ferritic matrix and dispersed carbides (annealed condition). The wear resistance increased with the increase in biodiesel content due to the matrix strengthening by the martensitic transformation (heat-treated condition). When the biodiesel content was superior to 50% v/v, a reverse result was found. The observed wear mechanism was abrasive in all conditions. A  $-1.35$  power law coefficient characterized the wear coefficient as a function of biodiesel content for the annealed condition and a  $-0.95$  power law coefficient for the heat-treated conditions.

**Keywords** biodiesel, heat treatment, microstructures, pin on disk, stainless steel, wear

### 1. Introduction

Use of biodiesel as a substitute for fossil diesel has intensified in recent years, and countries in the European Union, Asia, North America, and South America now have public policies to increase the percentage of biodiesel added to petroleum diesel. In this context, Brazil holds an important position when compared to other countries. Today, Brazilian commercial diesel contains 7% biodiesel, which is expected to reach 10% by 2020 (Ref 1).

Due to the environmental preoccupation related to global climate change, and the necessity to reduce greenhouse gas emissions, mainly sulfur oxides, fossil diesel now has a low sulfur concentration, the consequence of which is lower fuel lubricity and a higher potential for increased wear of metallic parts under friction. When biodiesel is added to diesel, the lubricity increases, and consequently, the wear may decrease (Ref 2, 3).

Although there are numerous studies on biodiesel lubricity and its physical and chemical properties, there is a lack of information on the metallurgical interaction of biodiesel with metallic materials such as carbon steels, stainless steels, and

non-ferrous alloys, especially on their wear characteristics in conventional diesel engines. Many studies have reported the effect of biodiesel addition on the lubricity of diesel–biodiesel blends. Aspects such as temperature, feedstocks, and friction conditions have also been analyzed to understand the lubrication properties and material interactions with biofuel. Lubricity decreases when temperature increases, and consequently, both friction and wear increase, as shown by Hasseb et al. (Ref 4) using palm biodiesel, four-ball wear tests, and temperatures range of 30–75 °C. When the temperature was fixed at 75 °C and the speed was increased from 600 to 1500 rpm, an increase in the palm biodiesel content in fossil diesel decreased the friction and wear in all conditions (Ref 5). These results were also noted in reviews reported by the same researchers (Ref 6–8), as well as by others (Ref 9). *Calophyllum inophyllum* biodiesel was studied as a lubricity enhancer in wear tests performed by Habibullah et al. (Ref 10). The authors used the four-ball wear test and different diesel–biodiesel blends and loads. The results confirmed that wear decreases with increasing biodiesel content. The effect of a 20% addition of Karanja biodiesel to diesel on the wear of engine components was investigated during 250-h endurance tests in a four-stroke, four-cylinder, 2520-cc diesel engine. Parts such as inlet and exhaust valves, cylinder liners, pistons, piston rings, cranks, and pins were analyzed by weight loss and physical measurements to measure wear. Under these conditions, no severe wear was observed when compared to fossil diesel (Ref 11). Using a simulator test rig prototype, a similar investigation was performed by Reddy et al. (Ref 12) on the effect of biodiesel blends on the wear of mechanical fuel injection systems. The results showed that biodiesel blends presented lower wear as compared to that of diesel in some fuel injection components. Using a pin-on-disk apparatus, Hamdan et al. (Ref 13)

Arlei Franz Venske, Victor Velho de Castro, Eleani Maria da Costa, and Carlos Alexandre dos Santos, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, Av. Ipiranga, 6681, Porto Alegre, Rio Grande do Sul 90619-900, Brazil. Contact e-mail: carlos.santos@pucrs.br.



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul  
Pró-Reitoria de Graduação  
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 1 - 3º. andar  
Porto Alegre - RS - Brasil  
Fone: (51) 3320-3500 - Fax: (51) 3339-1564  
E-mail: [prograd@pucrs.br](mailto:prograd@pucrs.br)  
Site: [www.pucrs.br](http://www.pucrs.br)