DEISSON ALEXANDER ZULETA DURANGO

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA, VELOCIDADE E FORÇA NO
DESGASTE E NO COEFICIENTE DE ATRITO DE MATERIAIS PARA
VÁLVULAS E SEDES DE VÁLVULAS DE MOTORES *FLEX-FUEL***

SÃO PAULO

2016

DEISSON ALEXANDER ZULETA DURANGO

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA, VELOCIDADE E FORÇA NO
DESGASTE E NO COEFICIENTE DE ATRITO DE MATERIAIS PARA
VÁLVULAS E SEDES DE VÁLVULAS DE MOTORES *FLEX-FUEL***

**Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em
Ciências.**

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica de Projeto e
Fabricação**

**Orientador:
Prof. Dr. Amilton Sinatora**

SÃO PAULO

2016

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Zuleta Durango, Alexander

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA, VELOCIDADE E FORÇA NO
DESGASTE E NO COEFICIENTE DE ATRITO DE MATERIAIS PARA
VÁLVULAS E SEDES DE VÁLVULAS DE MOTORES FLEX-FUEL / A. Zuleta
Durango -- versão corr. -- São Paulo, 2016.

247 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Coefficiente de atrito 2.Desgaste 3.Válvulas 4.Sedes 5.Motores Flex
Fuel I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia Mecânica II.t.

DEDICATÓRIA

A mamá, hermano, tías y a toda mi familia que
siempre me acompañaron en la distancia y
fueron mi combustible durante este
largo camino.

A minha mãe, meu irmão, minhas tias e toda a
minha família que sempre me acompanharam
na distância e tem sido meu combustível
durante este longo caminho.

Integro em sua personalidade...

Sábio em suas palavras...

“Grande Avô Tomás Durango”

(1921 - 2007)

AGRADECIMENTOS

Aos Professores

- ✚ Amilton Sinatora, pela oportunidade, dedicação e orientação permanente durante todo este ciclo de formação. A minha total admiração e o maior sentimento de orgulho por ser um dos seus alunos.
- ✚ Deniol K. Tanaka, pelas grandes contribuições e conhecimentos durante estes anos.
- ✚ Roberto Martnis de Souza, pelas boas conversas, contribuições e bons conselhos.
- ✚ Izabel Fernanda Machado, pelas boas conversas, pela confiança e acompanhamento.
- ✚ André Tschiptschin, pelos conhecimentos sobre MEV, pela confiança e boas conversas.

Aos colegas do LFS (2012 - 2013)

- ✚ Ane Cheila Rovani, Gil Magno Chagas, Renata Prata, Patrícia e Marcelo Bertolete, Luigi Greco, Gustavo Tressia, Nerio Vicente Junior, Cristiano Fernandes Laggata, Graciliano Fernandes, Erika Prados e Erich Policarpo pelo companheirismo e ótimos momentos.

LFS (2014 - 2016)

- ✚ Leandro Justino de Paula, Francisco dos Reis Faustino, Raquel Camponucci, Enio Yamamotu, Fabio do Nascimento, Raphael Ferreira pelas incansáveis ajudas na parte técnica do laboratório.
- ✚ Silene Carneiro e Sidney Carneiro, pela grande e incansável ajuda na administração dos projetos.

Aos Brazilians LFS

- ✚ Vanessa Seriacopi, Marcos Ara, Ana Julia Tertuliano, Paulo Machado, Rafael Obara, Gustavo Siebert, Roberto de Oliveira, Larissa Ihara, Pedro Tayer, Eleir Bortoleto,

Newton Fukumasu, Murilo Garcia, Ana Keiko Mizukami, Francisco Profito, Carlos Ramires, Rodnei Santos, Cassiano Bernardes, André Zuin, Arnaldo Oliveira, Luiz Lima, Felipe Carneiro e Iramar Tertuliano pela amizade, companheirismo e ótimos momentos compartilhados dentro e fora do nosso laboratório.

Ao World LFS

✚ Guido Boide, pela amizade e companheirismo. Grazie!

Aos Colombians LFS

✚ Juan Sebastian Ruiz, Jimmy Penagos, Juan Ignacio Pereira, Pablo Correa, Eduardo Pérez y Michell Cano por la amistad, buenas conversas, risas y momentos dentro y fuera del laboratorio.

Aos LFS Valves-Team

✚ Felipe Mazuco e Leonardo Thiodoro, pela amizade, companheirismo, apoio e pelo grande grupo de trabalho formado através de um par tribológico.

Aos colegas do PMT

✚ Luis Varela, Luis Armando Espitia, Verissimo Silva e o Rafael Maia “irmão Brasileiro”.

✚ Ao PPGEM e especialmente a Marissa e Regiane pela ajuda incondicional.

✚ A CAPES pela bolsa de doutorado que foi outorgada durante 4 anos fazendo possível o desenvolvimento desta pesquisa.

✚ À FAPESP e ao “Consórcio de P&D e Desafios Tribológicos em Motores Flex-Fuel” pela oportunidade de fazer parte de um grande grupo de estudos com a finalidade de desenvolvimento das pesquisas no Brasil.

✚ Mahle GmbH: Eduardo Tomanik, Renato Carlini e Sandro Silva.

✚ PETROBRAS: Eduardo Trindade.

✚ Fiat (FCA): Paulo Netto e Rodrigo Viegas.

✚ Renault: Gustavo Volci, Robson Rocha, Kiy Dalton e Sergio Márquez.

✚ INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA: Clayton Zabeu, Renato Romio, Rodrigo Faggi e Gilberto Freire.

✚ Villares Metals: Alexandre Farina.

✚ Ford: Leandro Ratamero, Eduardo Monteiro.

✚ GM: Eduardo Nunes.

✚ BAM (Federal Institute for Materials Research and Testing): Prof. Dr. Mathias Woydt.

✚ CBMM: Eduardo Canizza.

✚ Ao grande e respeitado Dr. Luiz Alberto Pereira das Neves “Franco” pelas ótimas conversas de aviões, carros e futebol, além dos conselhos e as boas risadas na sala alviverde.

✚ Ao Dr. Tiago Cousseau pelo companheirismo, conselhos e excelentes contribuições para que este trabalho tivesse sucesso.

Colômbia

✚ Ao Prof. John Ramiro Agudelo, por acreditar nas minhas loucuras e ainda assim me apoiar e aconselhar na distância para ser um bom embaixador no Brasil.

✚ A minha torcida na Colômbia que sempre acreditou.

✚ À Universidade de São Paulo (USP), pela formação, as experiências e o grande aporte profissional na minha vida.

✚ Ao Brasil, gigante pela própria natureza, belo, forte, impávido colosso, terra adorada, simplesmente, pátria amada Brasil.

“Acredite no seu potencial, procure motivar-se todos os dias,
mantenha sua auto-estima sempre elevada, você realizará grandes
feitos na sua vida”.

RESUMO

Na maioria dos equipamentos mecânicos há movimento relativo entre componentes, e como resultado desse deslizamento relativo, as forças de atrito na superfície geram deformação plástica e/ou remoção de massa (ou volume) do material. Nos motores de combustão interna a geração da potência é realizada pela transformação da energia química em calor por meio da combustão do combustível com o ar, gerando o movimento alternativo de mecanismos (pistões, biela, virabrequim).

Já no caso dos motores *flex-fuel*, o etanol como combustível aumenta a potência, levando a maiores carregamentos termomecânicos e, conseqüentemente, tribológicos nos seus componentes. Um dos sistemas do motor mais afetado pela mudança no combustível é o par válvula-sede, motivo pelo qual é necessário investigar os mecanismos de desgaste, os efeitos dos parâmetros de operação no comportamento frente ao atrito, e escolher apropriadamente pares deslizantes de materiais que apresentem baixas perdas de massa (taxas de desgaste) e coeficientes de atrito.

Ensaio do tipo *reciprocating* tinham sido empregados para realizar estudos tribológicos de materiais de válvulas e com tratamentos superficiais. As condições de ensaio mais representativas são de operação do motor. Portanto, a seleção de parâmetros como carga, velocidade e temperatura não é fácil: para alguns equipamentos de teste, as variáveis não são independentes. Além disso, devido à complexidade do sistema tribológico, a interação entre as variáveis afeta os resultados.

O objetivo deste trabalho de pesquisa foi dividido em duas frentes. A primeira, analisar isoladamente o efeito da temperatura, força normal e velocidade no coeficiente de atrito e no desgaste. O tribômetro SRV-4 do tipo *reciprocating* foi usado com uma esfera de aço AISI 52100 e distintos materiais de disco (aços e ligas intermetálicas sinterizadas de Nb). A segunda parte consistiu na caracterização dos mecanismos de desgaste de válvulas e sedes de motores distintos, após diferentes tipos de ensaios (dinamômetro e campo em veículo).

O coeficiente de atrito (μ) e a perda de massa foram medidos para determinar o desempenho tribológico dos sistemas estudados. Além disso, as superfícies das marcas de desgaste tanto no disco quanto na esfera, assim como das válvulas e sedes foram analisadas por microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) e espectroscopia Raman.

Para as distintas ligas intermetálicas de Nb ensaiadas com esfera de aço AISI 52100, encontrou-se que os mecanismos de desgaste nas superfícies após uma análise de MEV-EDS foram particularmente abrasão, adesão e oxidação. Já no caso dos motores que foram avaliados, muitos dos danos observados estavam presentes em ambas as válvulas e sedes de admissão e escape; no entanto, a oxidação ocorreu apenas nas válvulas de escape, provavelmente produzido pela alta temperatura durante a operação do motor.

Palavras-Chave: Coeficiente de atrito. Desgaste. Válvulas. Sedes. Motores *flex-fuel*.

ABSTRACT

In most of the mechanical assemblies there is relative motion between components, and as a result of this relative sliding action, frictional forces on the sliding surface result in removal or displacement of mass (or volume) of the material. The power generation of internal combustion engines comes from chemical energy transformation into heat through air fuel combustion with further expansion of gases generating the reciprocating movement of power cell (pistons, rod and crankshaft). For flex fuel engines, the ethanol increases power, leading to higher thermo-mechanical forces and consequently higher friction between its components. The valve/valve seat pair is one of the most affected system due to this change, leading to the need of more accurate analysis of its wear mechanisms, its operating parameters effects and his behavior regarding the friction so making possible to choose properly materials with lower mass loss (wear rate) and coefficient of friction.

Reciprocating tests had been used to tribological studies of valve materials with surface treatment purpose. The most important test boundary conditions are the engine operating conditions. Therefore, the load, speed and temperature parameters definition is not easy since for some test equipment those variables are not independent. Besides due to tribological system complexity the variable interaction affects its results.

The present research goal was divided in two groups. The first one analyzes the normal force, frequency and temperature effect on friction coefficient and wear, independently of each other. It was used a SRV-4 reciprocating tribometer with a sphere (AISI 52100 steel) against several disc materials (steel and sintered intermetallic alloys of Nb). The second one consisted in the characterization of wear mechanisms of valve/valve seat from different engines that were submitted to different test (engine dynamometer test bench and vehicle).

The coefficient of friction (μ) and mass loss were measured in order to define the studied systems tribological performance. Besides the both disc and sphere wear scars such as valve/valve seat were analyzed using optical microscopy (OM), scanning electron

microscopy (SEM) with energy dispersive spectroscopy of X-ray (EDS) and Raman spectroscopy.

For the tested intermetallic alloys of Nb with AISI 52100 sphere it was found the following wear mechanisms after SEM-EDS analyses: abrasion, adhesion and oxidation. In the case of the evaluated engines, several damages were observed in both intake and exhaust valves/valve seats; however, the oxidation occurred only on exhaust valves, probably due to high operating temperature.

Keywords: Coefficient of friction. Wear. Valves. Valve seats. Flex-fuel engines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema dos componentes que atuam no fenômeno de atrito.	34
Figura 2.2 - Taxa de desgaste em função da carga normal para um aço com 0,52% C. Velocidade de deslizamento 100 cm/s. x, pino; o anel.....	36
Figura 2.3 - Efeito da velocidade de deslizamento sobre as transições T_1 e T_2	37
Figura 2.4 - Partes que formam o pistão.	41
Figura 2.5 - Partes que formam a biela.	41
Figura 2.6 - Partes do virabrequim.	42
Figura 2.7 - Injeção de combustível a) direta b) indireta.	43
Figura 2.8 - Fiat 147 a álcool, primeiro carro movido pelo combustível vegetal produzido no Brasil (e no mundo, diga-se). Recebeu, pela façanha, o maroto apelido de “cachacinha”.	44
Figura 2.9 - a) Produção de veículos no Brasil entre 1977 e 2008 b) evolução da frota Brasileira por combustível.	45
Figura 2.10 - Volkswagen Gol 1.6 - Total Flex 2003.	46
Figura 2.11 - Componentes do trem de válvulas do motor.....	48
Figura 2.12 - Entrada e saída de gases no cabeçote do motor.....	49
Figura 2.13 - Ângulo de contato entre a válvula e sede de válvula de projeto.....	52
Figura 2.14 - Esquema das partes que compõem a válvula	53
Figura 2.15 - Dimensões para identificação de válvulas.....	53
Figura 2.16 - Válvula monometálica.	54
Figura 2.17 - Válvula bimetálica.	54
Figura 2.18 - Válvula oca.....	55
Figura 2.19 - Nomenclatura típica da sede de válvula.	59
Figura 2.20 - Comparação da carga aplicada em função do ângulo no assento da sede para determinar o coeficiente de atrito.....	60
Figura 2.21 - Processamento típico de metalurgia do pó para a fabricação de uma sede. ...	61
Figura 2.22 - Variação no R_{max} para válvula e sede com 10 e 25 Hz.	66
Figura 2.23 - Imagens obtidas no MEV das superfícies desgastadas da válvula e sede.	67
Figura 2.24 - a) Coeficiente de atrito em função do tempo para 400 e 800 °C. b) Volume de desgaste em função da temperatura após 15 h de ensaio.	68

Figura 2.25 - Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento para várias temperaturas utilizando a liga PM 1000.	69
Figura 2.26 - Influência da temperatura de ensaio na taxa de desgaste para Nimonic 80A e MA956.	69
Figura 2.27 - Influência da carga aplicada na taxa de desgaste para o aço 5CrNiMo.	70
Figura 2.28 - Superfície desgastada da válvula para 400 °C.	71
Figura 2.29 - Taxa de desgaste em função da velocidade de deslizamento para diferentes temperaturas.	71
Figura 2.30 - Desgaste na região do assento da válvula.	78
Figura 2.31 - Falha apresentada a) válvula deformada e quebrada na região do raio e haste b) cabeça da válvula quebrada na região do raio e haste.	78
Figura 2.32 - Fissura no assento da válvula.	79
Figura 2.33 - Válvula quebrada na região da cabeça.	79
Figura 2.34 - Desgaste na região da cabeça da válvula.	80
Figura 2.35 - Desgaste na região do assento da válvula a) desintegração localizada b) pontos de contaminação por resíduos de carbono.	81
Figura 2.36 - Irregularidades na válvula a) contaminação com óleo lubrificante b) faixa irregular de assentamento c) contaminação com excesso de carvão.	81
Figura 2.37 - Valve Recession.	82
Figura 2.38 - Comparação do efeito de VR entre gasolina (E00) e etanol (E100).	83
Figura 2.39 - Falhas produto da combustão a) <i>guttering</i> b) <i>torching</i>	84
Figura 2.40 - Cabeçote a) 8 válvulas b) 16 válvulas.	84
Figura 2.41 - Válvulas de admissão e escape a) motor 8 válvulas b) motor 16 válvulas.	85
Figura 3.1 - Tribômetro SRV®4 de movimento alternativo.	89
Figura 3.2 - Esquema da câmara de teste do tribômetro SRV®4.	90
Figura 3.3 - Disco e esfera utilizados como corpos de prova.	94
Figura 3.4 - Microestrutura do aço martensítico AISI 52100.	95
Figura 3.5 - Microestrutura do aço AISI H13.	96
Figura 3.6 - Microestrutura do aço AISI M2-1.	96
Figura 3.7 - Microestrutura do aço AISI M2-2.	97
Figura 3.8 - Disco da liga intermetálica de NbC-12Fe ₃ Al.	97
Figura 3.9 - Microestrutura da liga intermetálica sinterizada NbC-12Fe ₃ Al.	98
Figura 3.10 - Microestrutura da liga intermetálica sinterizada NbC-12Co.	99

Figura 3.11 - a) Cabeçote de motor <i>flex-fuel</i> 8V - 1.6L b) válvulas de admissão e escape. ..	100
Figura 3.12 - Cabeçote de motor <i>flex-fuel</i> 8V - 1.6L. a) serra de fita horizontal b) máquina de corte.	100
Figura 3.13 - Corte das válvulas de motor <i>flex-fuel</i> 8V - 1.6L. a) admissão b)escape.	101
Figura 3.14 - Perfilômetro óptico 3D CCI – MP.....	101
Figura 3.15 - Embutidora SIMPLIMET 3000.....	102
Figura 3.16 - Máquina para polimento automático.....	102
Figura 3.17 - Durômetros BUEHLER.	103
Figura 3.18 - Seção transversal das válvulas de admissão e escape polidas.	103
Figura 3.19 - Lupa Estereoscópica (STEREO MICROSCOPE SMZ800).	104
Figura 3.20 - Microscópio Óptico (OLYMPUS BX60M).	104
Figura 3.21 - Microscópio eletrônico de varredura (JEOL JSM-6010 LA).....	105
Figura 3.22 - Espectrômetro RAMAN (Xplora – Horiba Scientific).....	105
Figura 4.1 - Coeficiente de atrito em função do tempo para a) 200 °C b) 500 °C.	106
Figura 4.2 - Variação do coeficiente de atrito médio em função da temperatura após 30 min.....	107
Figura 4.3 - Perda de massa em função da temperatura após 30 min para cada condição testada.	107
Figura 4.4 - Variação da perda de massa em função da temperatura após 30 min.	108
Figura 4.5 - Variação na cor dos corpos de prova após 30 min. a) 25 °C b) 300 °C c) 350 °C.	109
Figura 4.6 - Imagens obtidas no MEV das superfícies desgastadas para 25 e 400 °C.....	110
Figura 4.7 - Coeficiente de atrito para 4 h a) 500 °C b) atrito médio em função da temperatura.....	111
Figura 4.8 - Coeficiente de atrito para 8 h a) 350 °C b) atrito médio em função da temperatura.....	111
Figura 4.9 - Variação da perda de massa em função da temperatura para 8 e 15 h.	112
Figura 4.10 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas 100 °C. a) AISI 52100 (esfera) b) AISI H13 (disco).	113
Figura 4.11 - Imagens obtidas por MEV da superfície desgastada da esfera de aço AISI 52100 para 100 °C. a) detector SE b) detector BSE.	113

Figura 4.12 - Imagens obtidas por MEV da superfície desgastada do disco de aço AISI H13 para 100 °C. a) detector SE b) detector BSE.	114
Figura 4.13 - a) Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de aço AISI H13 para 100 °C. b) Espectro obtido utilizando EDS no ponto 001 (região escura).	114
Figura 4.14 - Espectro obtido na superfície desgastada o disco de aço AISI H13 para 100 °C.	115
Figura 4.15 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas 350 °C. a) AISI 52100 (esfera) b) AISI H13 (disco).	115
Figura 4.16 - Imagens obtidas por MEV da superfície desgastada da esfera de aço AISI 52100 para 350 °C. a) detector SE b) detector BSE.	116
Figura 4.17 - Imagens obtidas por MEV da superfície desgastada do disco de aço AISI H13 para 350 °C. a) detector SE b) detector BSE.	117
Figura 4.18 - a) Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de aço AISI H13 para 100 °C. b) espectro obtido utilizando EDS no ponto 001 (região escura).	117
Figura 4.19 - Espectro obtido na superfície desgastada o disco de aço AISI H13 para 350 °C.	118
Figura 4.20 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas 400 °C. a) AISI 52100 (esfera) b) AISI H13 (disco).	118
Figura 4.21 - Imagens obtidas por MEV da superfície desgastada da esfera de aço AISI 52100 para 400 °C. a) detector SE b) detector BSE.	119
Figura 4.22 - Imagens obtidas por MEV da superfície desgastada do disco de aço AISI H13 para 400 °C. a) detector SE b) detector BSE.	119
Figura 4.23 - a) Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de aço AISI H13 para 100 °C. b) espectro obtido utilizando EDS no ponto 001 (região escura).	120
Figura 4.24 - Espectro obtido na superfície desgastada o disco de aço AISI H13 para 400 °C.	121
Figura 4.25 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas 500 °C. a) AISI 52100 (esfera) b) AISI H13 (disco).	121
Figura 4.26 - Imagens obtidas por MEV da superfície desgastada da esfera de aço AISI 52100 para 500 °C. a) detector SE b) detector BSE.	122
Figura 4.27 - Imagens obtidas por MEV da superfície desgastada do disco de aço AISI H13 para 500 °C. a) detector SE b) detector BSE.	122

Figura 4.28 - a) Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de aço AISI H13 para 500 °C. b) espectro obtido utilizando EDS no ponto 001 (região escura).	123
Figura 4.29 - Espectro obtido na superfície desgastada o disco de aço AISI H13 para 500 °C.	123
Figura 4.30 - Imagens obtidas no MEV da marca de desgaste para 8 h e 400 °C. a) disco de aço AISI H13 b) esfera de aço AISI 52100.	125
Figura 4.31 - Imagens obtidas no MO da marca de desgaste do disco de aço AISI H13 após 8 h. a) 100 °C b) 350 °C c) 400 °C d) 500 °C.	126
Figura 4.32 - Coeficiente de atrito em função do tempo para a) 700 °C b) 800 °C.	127
Figura 4.33 - Coeficiente de atrito em função do tempo para 700 °C a) 150 s b) entre 1200 e 1350 s.	128
Figura 4.34 - Disco de aço AISI H13 após 30 min de ensaio a) 700 °C b) 800 °C.	128
Figura 4.35 - Coeficiente de atrito e resistência elétrica em função do tempo para 700 °C.	129
Figura 4.36 - Coeficiente de atrito e stroke em função do tempo para a) 700 °C b) 800 °C.	129
Figura 4.37 - Coeficiente de atrito em função do tempo para 4 Hz, 1.350 s, temperatura ambiente e força normal de 100 N.	130
Figura 4.38 - Coeficiente de atrito em função do tempo até 150 s para 4 Hz.	131
Figura 4.39 - Coeficiente de atrito em função do tempo até 150 s para 80 Hz.	131
Figura 4.40 - Coeficiente de atrito e carga aplicada em função do tempo até 50 s. a) 4 Hz e 1.350 s b) 80 Hz e 2.700 s.	132
Figura 4.41 - Perda de massa em função da distância para a) 1350 s b) 2700 s.	132
Figura 4.42 - Perda de massa (escala log) em função da distância para a) 1.350 s b) 2.700 s.	133
Figura 4.43 - Perda de massa em função da distância para 1.350 e 2.700 s a) esfera b) disco.	133
Figura 4.44 - Imagens obtidas no MEV das superfícies desgastadas da esfera e do disco para 4 e 20 Hz e 2.700 s.	134
Figura 4.45 - Coeficiente de atrito em função do tempo a) 80 Hz e 2 min b) 40 Hz e 4 min.	135
Figura 4.46 - Variações em função da frequência no regime permanente para a) coeficiente de atrito médio b) perda de massa acumulada.	136

Figura 4.47 - Taxa de desgaste em função da frequência a) escala linear b) escala log.	137
Figura 4.48 - Imagens obtidas no MEV das superfícies desgastadas para 4 e 20 Hz. a) esfera b) disco.....	138
Figura 4.49 - Medida da área na marca de desgaste para 4, 20, 40 e 80 Hz após 38.400 mm. a) esfera b) disco.....	139
Figura 4.50 - Área da marca de desgaste após ensaio em função da frequência.	140
Figura 4.51 - Coeficiente de atrito em função do tempo (log) para 4 Hz e disco AISI M2-1.	141
Figura 4.52 - Coeficiente de atrito em função do tempo (log) para 4 Hz e disco AISI M2-2.	143
Figura 4.53 - Coeficiente de atrito médio e força normal no início do ensaio com 4 Hz e disco AISI M2-2.	144
Figura 4.544 - Coeficiente de atrito médio para a fase estável e de acomodação dos ensaios de 4 Hz.	145
Figura 4.55 - Perda de massa acumulada dos ensaios de 4 Hz.	146
Figura 4.56 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas dos discos nos ensaios de 4 Hz e material do disco de AISI M2-1 para a) 1.350 s, b) em detalhe, e c) 2.700 s, d) em detalhe.	147
Figura 4.57 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas das esferas nos ensaios de 4 Hz e material do disco de AISI M2-1 para a) 1.350 s e b) 2.700 s.	147
Figura 4.58 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas dos discos nos ensaios de 4 Hz e material do disco de AISI M2-2 para a) 1.350 s, b) em detalhe, e c) 2.700 s, d) em detalhe.	148
Figura 4.59 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas das esferas nos ensaios de 4 Hz e material do disco de AISI M2-2 para a) 1.350 s e b) 2.700 s.	149
Figura 4.60 - Topografia das marcas de desgaste do disco de AISI M2-1 nos ensaios de 4 Hz obtidas por WLI.	149
Figura 4.61 - Evolução das marcas de desgaste do disco de M2-1 nos ensaios de 4 Hz.	151
Figura 4.62 - a) Imagem obtidas por MEV das marcas de desgaste do disco de AISI M2-1 no ensaio de 4 Hz e 5 min. b) Análises EDS da marca de desgaste mostrando oxidação e deposição de <i>debris</i>	152
Figura 4.63 - Espectroscopia Raman da camada de óxido.	153

Figura 4.64 - Coeficiente de atrito e resistência de contato para o aço AISI M2-1 em 4 Hz.	154
Figura 4.65 - Perda de massa em função do tempo para 4 Hz e disco de aço AISI M2-1.	154
Figura 4.66 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas dos discos nos ensaios de 80 Hz e material do disco de aço AISI M2-1 para a) 1.350 s, b) em detalhe, e c) 2.700 s, d) em detalhe.	156
Figura 4.67 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas das esferas nos ensaios de 80 Hz e material do disco de aço AISI M2-1 para a) 1.350 s e b) 2.700 s.	156
Figura 4.68 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas dos discos nos ensaios de 80 Hz e material do disco de AISI M2-2 para a) 1.350 s, b) em detalhe, e c) 2.700 s, d) em detalhe.	157
Figura 4.69 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas das esferas nos ensaios de 80 Hz e material do disco de AISI M2-2 para a) 1.350 s e b) 2.700 s.	158
Figura 4.70 - Coeficiente de atrito em função do tempo a) 100 N b) 400 N.	158
Figura 4.71 - Variação do coeficiente de atrito médio em função da carga.	159
Figura 4.72 - Perda de massa (escala log) em função da carga.	159
Figura 4.73 - Taxa de desgaste em função da carga a) escala linear b) escala log.	160
Figura 4.74 - Imagens obtidas no MEV das superfícies desgastadas para 150, 300 e 600 N a) esfera b) disco.	161
Figura 4.75 - Imagens obtidas no MEV da marca de desgaste no disco para 600 N.	162
Figura 4.76 - Imagens obtidas no MEV das superfícies desgastadas para 125 N.	163
Figura 4.77 - Imagens obtidas no MEV da marca de desgaste no disco para 125 N.	163
Figura 4.78 - Espectro obtido utilizando EDS para a região escura no disco com 125 N.	164
Figura 4.79 - Imagem obtida no MEV da marca de desgaste na esfera para 125 N.	164
Figura 4.80 - Espectro obtido utilizando EDS para esfera na condição de 125 N.	165
Figura 4.81 - Imagens obtidas no MEV das superfícies desgastadas para 600 N.	165
Figura 4.82 - Espectros obtidos utilizando EDS para 600 N a) disco b) esfera.	166
Figura 4.83 - Coeficiente de atrito em função do tempo para o par AISI 52100 - Fe ₃ Al-NbC. a) 150 N b) 600 N.	167
Figura 4.84 - Perda de massa (escala log) em função da carga para o par AISI 52100 - Fe ₃ Al-NbC.	167
Figura 4.85 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas para 150 e 600 N. a) AISI 52100 (esfera) b) Fe ₃ Al-NbC (disco).	168

Figura 4.86 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas da esfera de aço AISI 52100 para 150 e 600 N a) detector SE b) detector BSE.	169
Figura 4.87 - Imagem obtida no MEV da marca de desgaste na esfera de aço AISI 52100 para 150 N.	170
Figura 4.88 - Espectro obtido utilizando EDS na esfera de aço AISI 52100 para 150N.	170
Figura 4.89 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas do disco de Fe ₃ Al-NbC para 150 e 600 N a) detector SE b) detector BSE.	171
Figura 4.90 - Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de Fe ₃ Al-NbC para 150 N.	172
Figura 4.91 - Espectro obtido utilizando EDS no disco de Fe ₃ Al-NbC para 150N. a) ponto 001 (região clara) b) ponto 002 (região escura).	172
Figura 4.92 - Coeficiente de atrito em função do tempo para o par AISI 52100 - NbC-12Co a) 150 N b) 600 N.	173
Figura 4.93 - Perda de massa (escala log) em função da carga para o par AISI 52100 - NbC-12Co.	174
Figura 4.94 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas para 150 e 600 N. a) AISI 52100 (esfera) b) NbC-12Co (disco).	175
Figura 4.95 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas do disco de NbC-12Co para 150 e 600 N a) detector SE b) detector BSE.	176
Figura 4.96 - Coeficiente de atrito em função do tempo para o par AISI 52100 - Hot-Pressed NbC a) 150 N b) 600 N.	177
Figura 4.97 - Perda de massa (escala log) em função da carga para o par	177
Figura 4.98 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas para 150 e 600 N. a) AISI 52100 (esfera) b) Hot-Pressed NbC (disco).	178
Figura 4.99 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas do disco de Hot-Pressed NbC para 150 e 600 N a) detector SE b) detector BSE.	179
Figura 4.100 - Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de Hot-Pressed NbC para 150 N.	180
Figura 4.101 - Espectro obtido utilizando EDS no disco de Hot-Pressed NbC para 150 N. a) ponto 001 (região clara) b) ponto 002 (região escura).	180
Figura 4.102 - Coeficiente de atrito em função do tempo para o par AISI 52100 - NbC _{0.88} -12Co a) 150 N b) 600 N.	181

Figura 4.103 - Perda de massa (escala log) em função da carga para o par AISI 52100 – NbC _{0.88} -12Co.....	181
Figura 4.104 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas para 150 e 600 N. a) AISI 52100 (esfera) b) NbC _{0.88} -12Co (disco).	182
Figura 4.105 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas da esfera de aço AISI 52100 para 150 e 600 N a) detector SE b) detector BSE.	183
Figura 4.106 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas do disco de NbC _{0.88} -12Co para 150 N a) detector SE b) detector BSE; e para 600 N detector SE c) lado esquerdo, d) lado direito.	184
Figura 4.107 - Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de NbC _{0.88} -12Co para 150 N.....	185
Figura 4.108 - Espectro obtido utilizando EDS no disco de NbC _{0.88} -12Co para 150 N. a) ponto 001 (região clara) b) ponto 002 (região escura).	185
Figura 4.109 - Coeficiente de atrito em função do tempo para o par AISI 52100 – NbC-12Fe ₃ Al. a) 150 N b) 600 N.....	186
Figura 4.110 - Perda de massa (escala log) em função da carga para o par AISI 52100 – NbC-12Fe ₃ Al.....	186
Figura 4.111 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas para 150 e 600 N. a) AISI 52100 (esfera) b) NbC-12Fe ₃ Al (disco).	187
Figura 4.112 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas da esfera de aço AISI 52100 para 600 N a) detector SE b) detector BSE.....	188
Figura 4.113 - Imagem obtida no MEV da marca de desgaste na esfera de aço AISI 52100 para 600 N.....	189
Figura 4.114 - Espectro obtido utilizando EDS na esfera de aço AISI 52100 para 600 N. a) ponto 001 (região clara) b) ponto 002 (região escura).	189
Figura 4.115 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas do disco de NbC-12Fe ₃ Al para 150 e 600 N a) detector SE b) detector BSE.	190
Figura 4.116 - Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de NbC-12Fe ₃ Al para 600 N.....	191
Figura 4.117 - Espectro obtido utilizando EDS no disco de NbC-12Fe ₃ Al para 600 N. a) ponto 001 (região clara) b) ponto 002 (região escura).	191
Figura 4.118 - Coeficiente de atrito em função do tempo para o par AISI 52100 – Nb ₂ O ₅	192

Figura 4.119 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas para 150 N. a) AISI 52100 (esfera) b) Nb ₂ O ₅ (disco).....	192
Figura 4.120 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas do par AISI 52100- Nb ₂ O ₅ para 150 N a) detector SE b) detector BSE.	193
Figura 4.121 - Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de Nb ₂ O ₅ para 150 N.	194
Figura 4.122 - Espectro obtido utilizando EDS no disco de Nb ₂ O ₅ para 150N. a) ponto 001 (região clara) b) ponto 002 (região escura).....	194
Figura 4.123 - Perda de massa (escala log) em função da carga para o aço AISI 52100.....	196
Figura 4.124 - Perda de massa (escala log) em função da carga para os distintos aços e ligas intermetálicas de Nb.	197
Figura 4.125 - Perda de massa (escala log) em função da carga para os distintos aços e ligas intermetálicas de Nb.	198
Figura 4.126 - Coeficiente de atrito médio em função do tempo para os distintos aços e ligas intermetálicas de Nb na carga de 150 N.	198
Figura 4.127 - Coeficiente de atrito médio em função do tempo para os distintos aços e ligas intermetálicas de Nb na carga de 600 N.	199
Figura 4.128- Vista da face de contato do cabeçote e seus respectivos cilindros identificados. As sedes com maior diâmetro são referentes às válvulas de admissão. Cabeçote 8 válvulas - Motor Gasolina (E22).	202
Figura 4.129 - Cilindros 01 e 04 do cabeçote motor gasolina com sedes, válvula de admissão e escape.....	202
Figura 4.130 - Vista da face de contato do cabeçote e seus respectivos cilindros identificados. As válvulas com maior diâmetro são de admissão. Cabeçote 16 válvulas - Motor <i>flex-fuel</i>	204
Figura 4.131 - Cilindros 01 e 03 do cabeçote motor <i>flex-fuel</i> com sedes, válvulas de admissão e escape.....	204
Figura 4.132 - Presença de óleo e depósitos nas válvulas de admissão do motor gasolina.	206
Figura 4.133 - Marcas na superfície de contato entre a válvula e a sede do motor gasolina.	207
Figura 4.134 - Nível de depósitos nas válvulas de escape do motor gasolina.	207

Figura 4.135 - Presença de óleo e depósitos nas válvulas de admissão do motor <i>flex-fuel</i> .	208
Figura 4.136 - Nível de depósitos nas válvulas de escape do motor <i>flex-fuel</i>	208
Figura 4.137 - Desgaste na região do assento (válvula admissão cilindro 03).	209
Figura 4.138 - Fissuras na região do assento (válvula admissão cilindro 01).	210
Figura 4.139 - Desgaste na região do assento: faixa irregular de assentamento. a) MAHLE, 2012; b) válvula admissão cilindro 03; c) válvula admissão cilindro 01.	210
Figura 4.140 - Válvula de admissão contaminada com óleo lubrificante. a) MAHLE, 2012; b) válvula admissão cilindro 01; c) Lewis e Dwyer Joyce, 2002.	211
Figura 4.141 - (a) Válvula à esquerda e sede, à direita; (b); contato entre a válvula e sede.	211
Figura 4.142 - Superfície das válvulas novas (MT-1) obtidas por MEV a) admissão b) escape.....	212
Figura 4.143 - Superfície das válvulas novas (MT-1). Admissão a) MO b) detector BSE. Escape c) MO d) detector BSE.	213
Figura 4.144 - Microestrutura das válvulas obtidas por MO (MT-1) a) admissão b) escape.	213
Figura 4.145 - Vista da face de contato do cabeçote do motor MT-1 e seus respectivos cilindros identificados. As válvulas com maior diâmetro são de admissão. Cabeçote 8 válvulas - Motor <i>flex-fuel</i>	214
Figura 4.146 - 1 ^{er} . Cilindro motor MT-1 a) válvula de admissão b) sedes c) válvula de escape.....	214
Figura 4.147 - Imagem da superfície de contato da válvula de admissão do motor MT-1.	215
Figura 4.148 - Detalhe da superfície de contato da válvula de admissão do motor MT-1. a) MO com aumento de 2x b) MEV com aumento de 120x.	215
Figura 4.149 - Imagens obtidas no MEV da válvula de admissão do motor MT-1. a) superfície de contato b) depósito.	216
Figura 4.150 - Superfície da válvula de escape (MT-1) obtida por a) MO com aumento de 3x e b) MEV com aumento de 120x.....	216
Figura 4.151 - Região 1 da válvula de escape (MT-1) obtida por a) MEV com aumento de 500x utilizando detector BSE b)EDS para análise do ponto 001.	217
Figura 4.152 - Análise por espectrometria Raman no ponto 001 (MT-1).	218

Figura 4.153 - Superfície da sede de admissão (MT-1) obtida por a) MO com aumento 3x b) MEV com aumento 150x.....	218
Figura 4.154 - Superfície da sede de escape (MT-1) obtida por a) MO com aumento 3x b) MEV com aumento 120x.....	219
Figura 4.155 - Superfície das válvulas novas (MT-2). Admissão a) MO b) detector SE. Escape c) MO d) detector SE.....	219
Figura 4.156 - Microestrutura do aço martensítico AISI HNV 3. a) MO b) MEV com detector BSE indicando os pontos 001 até 004.	220
Figura 4.157 - Microestrutura do aço austenítico AISI XEV-F. a) MO b) MEV com detector BSE.	221
Figura 4.158 - Microestrutura de AR 20 para sede de admissão e de escape do motor MT-2.	221
Figura 4.159 - Vista da face de contato do cabeçote do motor MT-2 e seus respectivos cilindros identificados. As válvulas com maior diâmetro são de admissão. Cabeçote 8 válvulas. Motor <i>flex-fuel</i>	222
Figura 4.160 - 1 ^{er} . Cilindro motor MT-2 a) válvula de admissão b) sedes c) válvula de escape.....	222
Figura 4.161 - Superfície da válvula de admissão (MT-2).	223
Figura 4.162 - Topografia da superfície de contato da válvula de admissão obtida por WLI (MT-2).	223
Figura 4.163 - Superfície de contato da válvula de admissão (MT-2). a) riscos radiais b) riscos oblíquos.....	224
Figura 4.164 - a) superfície de contato da válvula de escape (MT-2) b) marca circular 350x.	224
Figura 4.165 - Superfície de contato da sede de admissão (MT-2).	225
Figura 4.166 - Superfície da sede de escape (MT-2) obtida por a) MO com aumento 2x b) MEV com aumento 80x.	226
Figura 6.1- Categorias para um tribossistema.	238
Figura 6.2- Bancada para teste de válvulas e sedes.	239

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação do filme interfacial.....	38
Tabela 2.2 - Licenciamento total de automóveis e comerciais leves por combustível.	47
Tabela 2.3 - Composição química nominal das ligas em porcentagem em peso.....	58
Tabela 2.4 - Composição química de materiais para sedes.....	62
Tabela 2.5 - Danos superficiais observados na superfície de contato das válvulas de admissão e de escape.	86
Tabela 3.1 - Parâmetros dos ensaios SRV®4 para o estudo da temperatura.	91
Tabela 3.2 - Materiais modelo para ensaios tribológicos.	94
Tabela 3.3 - Composição química nominal (% em peso) dos materiais modelo.....	95
Tabela 3.4 - Ligas intermetálicas para ensaios tribológicos.	98
Tabela 4.1 - Dureza do aço AISI H13 após 8 h de ensaio no tribômetro SRV.....	127
Tabela 4.2 - Resumo dos danos encontrados nos pares tribológicos.....	228

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

Símbolo	Definição	Unidade
μ	Coeficiente de atrito	-
F_f	Força de atrito	N
F_N	Força normal	N
T1	1ª. Transição de desgaste (moderado-severo)	-
T2	2ª. Transição de desgaste (severo-moderado)	-
cv	cavalo-vapor	W
D	Diâmetro da cabeça da válvula	mm
d	Diâmetro da haste da válvula	mm
L	Comprimento total da válvula	mm
α	Ângulo na sede da válvula em função do eixo central	graus

Abreviações

- LFS Laboratório de Fenômenos de Superfície
- USP Universidade de São Paulo
- UFPEL Universidade Federal de Pelotas
- MCI Motor de Combustão Interna
- CTA Centro Técnico Aeroespacial
- ANFAVEA Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
- SRV®4 Schwingung Reibung Verschleiß (reciprocating friction and wear)
- ASTM American Society for Testing Materials
- MO Microscopia Óptica
- MEV Microscopia Eletrônica de Varredura
- SE Secondary Eletrons Detector
- BSE Back-scatter Eletrons Detector
- EDS Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X
- AISI American Iron and Steel Institute
- SPS Spark Plasma Sintering
- E95H Etanol Combustível Hidratado 95%
- FFV Flexible Fuel Vehicle

- E85 Etanol Combustível Anidro 85%
- VR Valve Recession
- SOHC Single Over Head Camshaft
- MPFI Multi Point Fuel Injection
- GTI Grand Turismo Injection
- rpm revoluções por minuto.
- HV Dureza Vickers
- HRC Dureza Rockwell C
- MT-1 Motor 1
- MT-2 Motor 2
- WLI White Light Interferometry

SUMÁRIO

ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	25
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES	26
1. INTRODUÇÃO	30
2. SÍNTESE DA LITERATURA	33
2.1. ATRITO	33
2.2. DESGASTE	34
2.2.1. Os tipos de desgaste (classificação de desgaste)	34
2.2.2. Regimes de desgaste por deslizamento	35
2.2.3. Efeito da temperatura no desgaste por deslizamento	37
2.2.4. Efeito do material	39
2.3. MOTORES	39
2.3.1. Motores (caso brasileiro)	43
2.4. SISTEMA VÁLVULA - SEDE	47
2.4.1. Válvulas	48
2.4.2. Classificação de válvulas	49
2.4.3. Sedes de válvula	58
2.5. TRIBOLOGIA DO SISTEMA VÁLVULA-SEDE	63
2.6. FALHAS NO SISTEMA VÁLVULA-SEDE	77
2.6.1. Desgaste do assento da válvula	77
2.6.2. Fraturas, quebras e fissuras em válvulas	78
2.6.3. Desgaste generalizado na cabeça da válvula	80
2.6.4. <i>Valve recession</i>	82
2.6.5. Falhas gerais produto da combustão	83
2.6.6. Tendências atuais sobre a abordagem de desgaste no sistema válvula-sede	84
2.6.7. Tendências atuais sobre motores	86
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	89
3.1. ENSAIOS TRIBOLÓGICOS	89
3.2. MATERIAIS	94
3.2.1. Materiais modelo	94
3.2.2. Ligas intermetálicas	97
3.3. CARACTERIZAÇÃO DE VÁLVULAS E SEDES DE VÁLVULA	99
3.3.1. Materiais	99

3.3.2.	Metodologia para caracterização	99
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	106
4.1.	EFEITO DA TEMPERATURA.....	106
4.1.1.	Atrito e desgaste para AISI 52100 - AISI H13.....	106
4.2.	INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE (FREQUÊNCIA).....	130
4.2.1.	Atrito e desgaste para AISI 52100 - AISI H13	130
4.2.2.	Atrito e desgaste para AISI 52100 - AISI M2 (FREQUÊNCIA).....	141
4.3.	INFLUÊNCIA DA FORÇA (CARGA)	158
4.3.1.	Atrito e desgaste para AISI 52100 - AISI H13.....	158
4.3.2.	Atrito e desgaste para AISI 52100 - Ligas intermetálicas de Nb (carga).....	166
4.4.	ANÁLISE DOS MECANISMOS DE DESGASTE NO SISTEMA VÁLVULA – SEDE.	201
4.4.1.	Exame visual (válvulas).....	201
4.4.2.	Caracterização dos mecanismos de desgaste	211
5.	CONCLUSÕES	229
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	238
	REFERÊNCIAS	243

1. INTRODUÇÃO

Os motores de combustão interna são amplamente utilizados no transporte e na indústria, representando grande parte do consumo energético das nações e contribuindo de forma significativa para a contaminação atmosférica dos centros urbanos. Os esforços da comunidade científica internacional, que atualmente realiza atividades de pesquisa e desenvolvimento relacionado a estas máquinas térmicas, estão sendo direcionados para melhorar cada vez mais sua eficiência térmica, reduzir suas emissões de poluentes e estudar os efeitos do uso de combustíveis alternativos em substituição aos convencionais. Em relação aos combustíveis alternativos para estes motores, os biocombustíveis se mostram como uma das opções mais atrativas, em decorrência de suas vantagens técnicas, estratégicas e ambientais [Wheals et al.,1999].

No motor de combustão interna é possível utilizar o etanol de diversas formas: hidratado, anidro e misturado com gasolina em diferentes concentrações [Wheals et al., 1999]. O etanol hidratado é um combustível, com uma pureza que varia entre 92,6 e 94,7%. Pode ser usado puro ou misturado em qualquer proporção com gasolina unicamente na frota brasileira de veículos flexíveis (veículos *flex* ou FFV, do inglês, *Flexible Fuel Vehicle*) [Delgado et al., 2007]. Estes veículos podem ser originais de fábrica ou modificados a partir dos convencionais à gasolina para tal propósito.

A maior octanagem do etanol possibilita que maiores relações de compressão sejam aplicadas nos motores *flex-fuel*. Existe outra tecnologia de FFV na Europa e nos EUA, que tem sido desenvolvida a partir dos motores convencionais à gasolina. Estes motores usam qualquer proporção entre 0 e 85% de etanol anidro (E85) misturado com gasolina [Wicker et al., 1999]. A vantagem da tecnologia brasileira reside no fato de que se pode utilizar etanol hidratado, em quaisquer concentrações até 100%. Nos países onde as misturas etanol-gasolina foram implementadas nos veículos, se requer que o etanol tenha uma pureza de 99,5% para evitar inconvenientes no funcionamento do veículo e na durabilidade dos materiais que estão em contato com o combustível [Walter et al., 2008].

O uso de etanol em altas concentrações, normalmente superiores a 10% (E10), requer modificações no motor e no sistema de fornecimento de combustível, cuja capacidade aumenta com o conteúdo de etanol na mistura. Estas modificações, que são decorrentes das diferenças de propriedades entre o etanol e a gasolina, visam evitar perdas de desempenho no veículo e, o mais importante, proteger sua vida útil.

O contínuo aumento da potência específica de motores de combustão interna acarreta maiores carregamentos termomecânicos e, conseqüentemente, tribológicos. No Brasil duas demandas adicionais se colocam: a adequação destas mudanças a motores *flex-fuel* e ao uso de biodiesel. No caso de uso de etanol, além do aumento de solicitação decorrente da maior pressão de combustão, existem condicionantes ainda mal entendidos como possível lavagem e diluição do lubrificante durante a partida a frio, ambiente mais corrosivo, ou de modo geral, alteração no meio ambiente do sistema tribológico, o que já tem trazido falhas nos componentes de motores. Apesar do pioneirismo no uso de álcool e veículos *flex-fuel* no Brasil, existe o risco de em breve se tornarem importadores de tecnologia, dado ao crescente esforço de pesquisa internacional nesta área [Cairns et al., 2009]. Por outro lado, um melhor entendimento do problema e o desenvolvimento de novas soluções têm grande potencial de exportação para uso em outros países que adotarem biocombustíveis renováveis, em especial o etanol.

Na cadeia automotiva, a capacidade de atualização tecnológica é um fator importante na escolha de fornecedores, como aponta o estudo Panorama e Perspectivas para o Desenvolvimento da Indústria de Autopeças no Brasil [Salerno, 2008]. Adicionalmente, e talvez com maior importância do que os tópicos anteriores, o estudo tribológico de motores *flex-fuel* tem grande contribuição ao meio ambiente, pois subsidia inovações rumo à redução de emissões, através de economia de energia, uma vez que cada redução no coeficiente de atrito resulta diretamente em economia de combustível [Merlo, 2003].

Nos motores de combustão interna com o uso de combustíveis alternativos o sistema das válvulas de admissão e de exaustão estão sujeitas a um conjunto de solicitações que afetam seu desempenho tribológico. Numa formulação tecnológica são eles: pressão de combustão, forças devidas ao desalinhamento da válvula em relação ao assento, velocidade

de fechamento e temperatura. As respostas do sistema são ainda condicionadas pela lubrificação da interface assento-válvula e pelos materiais. Algumas destas solicitações e condicionantes serão analisadas resumidamente a seguir do ponto de vista do desgaste por deslizamento bem como do ponto de vista do sistema válvula-sede.

Diante desses desafios, o objetivo deste projeto é aplicar conceitos de tribologia visando melhor entendimento dos fenômenos de atrito e desgaste em motores *flex-fuel* concentrando-se especificamente nas particularidades do efeito da velocidade, força e temperatura no tribossistema válvula-meio interfacial-sede.

Além desta **Introdução (Capítulo 1)**, seguem o **Capítulo 2 Síntese da literatura**, que apresenta os conceitos sobre atrito, desgaste, motores *flex-fuel* e especificamente o sistema válvula-sede com as suas características, materiais e falhas, além de uma resenha sobre as tendências atuais em motores no Brasil. No **Capítulo 3 Materiais e Métodos** são descritos os materiais e equipamentos utilizados nos ensaios tribológicos, assim como a metodologia para a caracterização de válvulas e sedes dos distintos motores objeto de estudo. Os **Resultados e Discussões** sobre atrito e desgaste são apresentados no **Capítulo 4**, começando pelos ensaios no tribômetro SRV®4 de movimento alternado com os distintos materiais variando a temperatura, logo depois com a variação da frequência e finalizando com a carga. Assim como os resultados do exame visual e a caracterização das válvulas e sedes de dois motores após ensaios de teste de estrada e em dinamômetro, respectivamente. O **Capítulo 5 Comentários e Conclusões** seguido pelo **Capítulo 6 Sugestões para trabalhos futuros**, trabalhos apresentados em congressos e a lista de **Referências**.

2. SÍNTESE DA LITERATURA

Tribologia é um termo que foi cunhado em 9 de maio de 1966 para definir “...*The science and technology of interacting surfaces in relative motion and the practices related thereto*” [Dowson, 1979]. Palavra derivada do grego “tribos” (τριβος) que significa roçar-esfregar e do sufixo “logos” – estudo. Sintetizando, a tribologia é a ciência que estuda os fenômenos de atrito, desgaste e lubrificação que ocorrem em interfaces de superfícies em movimento relativo [Sinatora, 2005].

Zum-Gahr definiu a tribologia como a ciência e a tecnologia da interação entre superfícies com movimento relativo, envolvendo pesquisas científicas assim como as aplicações práticas dos fenômenos de atrito, desgaste e lubrificação [Zum-Gahr, 1987]. Como o estudo de atrito, desgaste e lubrificação, além de ressaltar a alta importância para os engenheiros mecânicos e projetistas de máquinas, foi a definição dada para a tribologia [Hutchings, 1992].

2.1. ATRITO

Uma das definições mais aceitas para atrito trata o termo como uma força tangencial à interface e de sentido contrário ao movimento chamado força de atrito. Esta força se define como a resistência ao movimento que experimenta um corpo sólido que desliza sobre outro com o qual está em contato [Blau, 2009; Hutchings, 1992].

Deste fenômeno se derivam várias componentes que determinam um esquema representativo como apresentado na Figura 2.1, na qual se observa a força tangencial de resistência atuando na direção oposta ao movimento chamada força de atrito, gerada por uma carga normal entre as superfícies em contato.

Figura 2.1 - Esquema dos componentes que atuam no fenômeno de atrito.

Geralmente, a força de atrito é considerada a partir do coeficiente de atrito “ μ ”, definido como a constante de proporcionalidade entre a força de atrito F_f e a força normal F_N (equação 1).

$$\mu = \frac{\text{Força de Atrito (N)}}{\text{Força Normal (N)}} \quad (1)$$

2.2. DESGASTE

Desgaste é o dano de uma superfície sólida, envolvendo geralmente perda progressiva de material, que se deve ao *movimento relativo* entre a superfície e outra superfície de contato ou em relação a uma substância. [ASM HANDBOOK, 1992]. Esta definição não exclui os fenômenos de dano de superfície sem remoção de massa como, por exemplo, os fenômenos de desgaste acompanhados de oxidação ou aqueles nos quais as partículas de desgaste ficam aderidas à superfície sólida ou ainda aqueles nos quais há apenas deformação da superfície.

2.2.1. Os tipos de desgaste (classificação de desgaste)

Existem diversas classificações de desgaste, uma delas, devida ao Hutchings classifica o desgaste em a) desgaste por deslizamento e b) desgaste por partícula dura. No desgaste por deslizamento incluem-se o desgaste por rolamento (*rolling wear, fatigue wear*) e o *fretting*. No desgaste por partícula dura o autor inclui a abrasão e a erosão [Hutchings, 1992].

Em aplicações práticas, os diferentes tipos de desgaste não atuam isolados, senão que pode haver vários deles atuando simultaneamente, produzindo uma grande complexidade do fenômeno de desgaste. Em geral, pode-se reduzir o processo de desgaste mediante a

utilização de elementos lubrificantes, de recobrimentos autolubrificantes ou de materiais mais resistentes ao desgaste, entre outros [Picas, 2000; Stachowiak, 1993; Hutchings, 1992].

Os mecanismos clássicos de atrito e de desgaste que ocorrem no desgaste por deslizamento se devem a Bowden e Tabor e são: a) deformação plástica (resistência do material mais mole a ser deformado pelas asperezas do material mais duro ou, mais modernamente, também pelos *debris* formados no desgaste) e b) adesão (resistência da interface formada entre corpo e contracorpo ao cisalhamento) [Bowden e Tabor, 1956].

O mecanismo de deformação é causado pelo sulcamento (deslocamento de uma protuberância ou *debris*) o que permite a interpretação de que a abrasão (enquanto mecanismo) atua no desgaste por deslizamento. Eles são citados até hoje como os mecanismos mais importantes no desgaste por deslizamento. Posteriormente, reconheceu-se que o meio interfacial seria responsável ou estaria envolvido no estabelecimento do valor do coeficiente de atrito e nas taxas de desgaste como, por exemplo, Stott [Stott, 2002]. Outras referências indicam a ação do meio interfacial como um outro mecanismo apontando um procedimento experimental para a determinação quantitativa desta contribuição [Leite, 2010].

A intensidade de atuação dos mecanismos acima citados resulta em regimes de desgaste conhecidos como regime severo de desgaste (maiores valores da taxa de desgaste e do coeficiente de atrito) e regime moderado de desgaste. Procede-se, a seguir a uma breve abordagem destes regimes.

2.2.2. Regimes de desgaste por deslizamento

Durante o desgaste por deslizamento, podem ocorrer alterações em sua taxa de desgaste influenciadas pela carga, velocidade e distancia de deslizamento, além de condições ambientais como temperatura e umidade. Com o aumento da carga normal, ocorre uma transição de desgaste de moderado a severo devido à ruptura da película de óxido formada na primeira etapa. Acima dessa transição, o desgaste aumenta linearmente com a carga até que ocorra uma segunda transição, na qual o desgaste muda novamente de

severo para moderado. Nessa nova transição, aparece uma nova película de óxido, a qual se forma pelas altas temperaturas de contato, e cuja estrutura difere da estrutura do óxido formado pelas baixas temperaturas.

O paradigma para estudo do desgaste por deslizamento foi estabelecido por Welsh [Welsh, 1965]. Na Figura 2.2 pode-se observar que existem três regiões distintas dentro das quais a taxa de desgaste se eleva linearmente com a carga aplicada. Cada uma destas regiões é conhecida como regime de desgaste; abaixo de T_1 e acima de T_2 os regimes são denominados regimes moderados de desgaste, enquanto entre T_1 e T_2 encontra-se o regime severo de desgaste. No primeiro regime a taxa de desgaste é controlada pela remoção dos óxidos pré-existentes sobre os materiais (aços), no segundo pela adesão, deformação plástica e ruptura de junções metálicas entre os corpos em movimento e no terceiro pela formação e remoção de óxidos devido às elevadas temperaturas de contato.

Figura 2.2 - Taxa de desgaste em função da carga normal para um aço com 0,52% C. Velocidade de deslizamento 100 cm/s. x, pino; o, anel.

Fonte: [Welsh, 1965]

Este estudo [Welsh, 1965] estabeleceu que a ocorrência de adesão fosse o fator mais importante para a intensificação do desgaste. Em decorrência os óxidos passaram a ser vistos como recursos eficientes para a redução do desgaste.

Os estudos de Welsh sobre o efeito da velocidade [Welsh, 1965], estão resumidos graficamente na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Efeito da velocidade de deslizamento sobre as transições T_1 e T_2

Fonte: [Welsh, 1965]

A figura indica que, como era de se esperar, maiores velocidades relativas resultam em menores forças para que a transição T_2 aconteça, ou seja, o aumento na velocidade de deslizamento aumenta a temperatura média, necessária para a formação de óxidos para cargas menores. O trabalho de Welsh explora convincentemente o efeito da força e da velocidade nas transições desgaste severo/ moderado no desgaste por deslizamento. No item a seguir aborda-se como a temperatura afeta o desgaste por deslizamento.

2.2.3. Efeito da temperatura no desgaste por deslizamento

O efeito da temperatura no desgaste por deslizamento foi revisado por Pauschitz e colaboradores [Pauschitz, 2008]. Os autores destacam a importância do filme interfacial formado no controle do atrito e do desgaste, designado por “glazed layer”. Eles propõem que a morfologia e as propriedades do filme interfacial permitam uma classificação mais detalhada do mesmo, sintetizada na Tabela 2.1 obtida com base no texto de revisão.

Tabela 2.1 - Classificação do filme interfacial.

Tipo de Filme Interfacial	NL ou DL (No Layer or Delamination Layer)	TL (Transfer Layer)	MML (Mechanically Mixed Layer)	CL (Composite Layer)
Temperatura	$T - T_{amb}$	$T - T_{amb}$	T (“maior”)	T (“alta”)
Dureza Corpo (HB) / Dureza contra corpo (HCB)	HB > HCB	HB < HCB	HB > (?) HCB HB - HCB	
Composição de: Superfície de desgaste (WS); Debris (D) e Camada (L)	$WS_{CB} - D$	$WS_B - D$ $WS_B - TL$	Baixo oxigênio $WS_{CB} > D > WS_B$ $WS_{CB} > MML > WS_B$	Alto oxigênio $WS_{CB} > D > WS_B$ $WS_{CB} > MML > WS_B$
Rugosidade (parâmetros de altura)	Aumenta com T	Baixa mas cresce com T	Decresce com T	Alta e diminui com T
Interface entre Camada (L) e Corpo (B) ou Contra Corpo (CB)			Difusa com o substrato (CB?)	
Propriedades			“Dura e tenaz”	“Dura e frágil”
Mecanismo de desgaste	Delaminação (do contra corpo)	Formação da TL		
Valores desgaste e atrito		“Baixo” coef. atrito		T menores “Alto” coef. Atrito; Baixa taxa desgaste. T maiores, “Baixo coef. Atrito; Baixa taxa desgaste.

Embora os autores, propusessem uma teoria geral, nota-se que o quadro contém muitas lacunas a preencher e que ele foi feito com base em experimentos realizados em apenas dois sistemas tribológicos, o aço inoxidável 253 MA sobre aço 100Cr6 (AISI 52100) e 253 MA sobre PM 1000 (superliga a base de níquel obtida pelo processo de metalurgia do pó).

No item seguinte trata-se do efeito do material no desgaste por deslizamento a quente.

2.2.4. Efeito do material

O efeito dos materiais no desgaste e no atrito a quente (sem uso de filmes protetores ou de barreiras térmicas) tem seguido duas abordagens principais. Numa delas, resumida da revisão de Pauschitz e colaboradores comparam-se os resultados de perda de massa e de coeficiente de atrito entre diversos materiais. Ou seja, os pesquisadores buscam materiais (volumétricos) que tenham maiores resistência ao desgaste a quente que seus antecessores [Pauschitz, 2008]. A segunda abordagem consiste em adicionar a materiais, elementos químicos capazes de gerar filmes de óxido (filmes interfaciais) que reduzam os valores de coeficiente de atrito e de desgaste.

Um exemplo desta abordagem é o trabalho de Fontalvo e Mitterer [Fontalvo e Mitterer, 2005] que empregou alumínio e silício como elemento de liga ou os trabalhos de Li e colaboradores [Bouaeshi e Li, 2007; Liu e Li, 1999] que usaram Y_2O_3 .

2.3. MOTORES

O texto a seguir foi adaptado de [UFPEL, 2013] e as fotos retiradas dessa mesma referência.

No século XIX apareceram os primeiros motores a combustão interna (MCI). Nesses, o combustível é queimado dentro do próprio motor e seu aparecimento provocou um rápido desenvolvimento mecânico. Estes motores levaram vantagem sobre as máquinas a vapor pela sua versatilidade, eficiência, menor peso por cavalo vapor, funcionamento inicial rápido e possibilidade de adaptação a diversos tipos de máquinas.

O primeiro motor a combustão interna foi construído pelo mecânico alemão Lenoir, em 1860, e tinha a potência de 1 cv, trabalhando com gás como combustível.

Em 1861, Otto e Langen, baseando-se na máquina de Lenoir, construíram um motor que comprimia a mistura de ar e gás, com ignição feita por uma centelha elétrica.

Em 1862, o engenheiro francês Beau de Rochas publicou estudos teóricos e estabeleceu alguns princípios termodinâmicos baseado no motor de Otto de 1861. Este por sua vez,

baseado no estudo de Rochas, desenvolveu um motor: o motor de ciclo Otto apresentado em 1872. Estes motores usavam como combustível o gás de carvão ou o gasogênio, com ignição feita por centelha elétrica.

Em 1889, fez-se a primeira aplicação do motor de ciclo Otto em veículos, utilizando-se como combustível a gasolina.

Em 1893, o engenheiro alemão Rudolf Diesel descreveu um novo motor, no qual a ignição da mistura ar/combustível era feita por compressão. Este motor, que Diesel denominou “motor térmico racional”, acabou ficando conhecido como motor Diesel.

Os motores modernos são derivados dos construídos por Otto e Diesel e as suas características básicas são as seguintes:

- ✓ Motores de ciclo Otto: utilizam como combustíveis a gasolina e o álcool. Uma centelha é produzida pelo sistema elétrico nos eletrodos das velas de ignição.
- ✓ Motores de ciclo Diesel: utilizam como combustível o óleo diesel. A inflamação do combustível injetado sob pressão na câmara de combustão ocorre pela compressão de ar e consequente elevação da temperatura.

O motor pode ser definido como uma máquina que converte qualquer forma de energia em trabalho mecânico. Especificamente, o motor de combustão transforma energia térmica (calorífica) em trabalho mecânico (energia mecânica).

Motores de combustão interna são aqueles em que o combustível é queimado internamente. Um mecanismo constituído por pistão, biela e virabrequim é que transforma a energia térmica em mecânica. O movimento alternativo do pistão dentro do cilindro é transformado em movimento rotativo por meio da biela e do virabrequim.

O pistão é a parte do motor que recebe o movimento de expansão dos gases. Normalmente, é feito de ligas de alumínio e tem um formato aproximadamente cilíndrico. No pistão encontram-se dois tipos de anéis (Figura 2.4):

- ✓ Anéis de vedação - estão mais próximos da parte superior (cabeça) do pistão;
- ✓ Anéis de lubrificação - estão localizados na parte inferior do pistão e têm a finalidade de lubrificar as paredes do cilindro.

Figura 2.4 - Partes que formam o pistão.

Fonte: [UFPEL, 2013]

O pistão liga-se à biela por meio de um pino. A biela é a parte do motor que liga o pistão ao virabrequim. É fabricada de aço forjado e divide-se em três partes: cabeça, corpo e pé (Figura 2.5). A cabeça é presa ao pistão pelo pino e o pé está ligado ao virabrequim por meio de um material antifricção, chamado casquilho ou bronzina.

Figura 2.5 - Partes que formam a biela.

Fonte: [UFPEL, 2013]

O virabrequim, também chamado girabrequim ou árvore de manivelas (Figura 2.6) é fabricado em aço forjado ou fundido e possui mancais de dois tipos:

- ✓ Excêntricos - estão ligados aos pés das bielas;
- ✓ De centro - sustentam o virabrequim ao bloco.

Figura 2.6 - Partes do virabrequim.

Fonte: [UFPEL, 2013]

Basicamente, este mecanismo de pistão-biela-virabrequim, além de outros sistemas é indispensável para o funcionamento do motor: alimentação de combustível e ar, sistema de arrefecimento, lubrificação e elétrico compõem o motor de combustão interna.

Os motores também são classificados quanto ao tipo de injeção de combustível, podendo ser injeção direta ou indireta (Figura 2.7). Na injeção indireta, o combustível é injetado no duto de admissão no momento da admissão de ar pelo motor. Já na injeção direta, o combustível é injetado diretamente dentro do cilindro.

A vantagem da injeção direta é o fato de que todo o combustível injetado é utilizado, ao contrário da injeção indireta, onde parte do combustível, normalmente, condensa nas paredes do duto de admissão e na cabeça da válvula, aumentando assim o consumo de combustível e em alguns casos prejudicando o desempenho do motor. Outra vantagem da injeção direta é a possibilidade de realizar injeção estratificada, ou seja, podem ser configuradas mais de uma injeção de combustível durante um ciclo de combustão,

permitindo assim, ajustá-la de acordo com as necessidades de projeto do motor (rotação, temperatura e carga), enquanto que na injeção indireta, a injeção de combustível, obrigatoriamente, deve ser realizada antes do fechamento da válvula de admissão.

Figura 2.7 - Injeção de combustível a) direta b) indireta.

Fonte: <http://www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=6478>

2.3.1. Motores (caso brasileiro)

Na década de 70 com a crise do petróleo, o Brasil passou a ter sua fonte energética fazendo uso do etanol extraído da cana de açúcar, como o principal combustível automotivo, principalmente pelo patrocínio do governo com o programa Proálcool. O programa visava substituir a escassa da gasolina pelo álcool etílico carburante. Na época da crise cerca de 80% do álcool era importado. As primeiras experiências com este tipo de combustível estavam sendo realizadas pelo Centro Técnico Aeroespacial (CTA) em São José dos Campos em conjunto com a Chrysler-Dodge oferecendo um modelo denominado Dodge 1800. Após a implantação do programa, em 1976, o Brasil já produzia cerca de 600 milhões de litros, em 1980, 3,4 bilhões e em 1987, 12,3 bilhões de litros de álcool etanol por ano.

O primeiro carro lançado comercialmente no Brasil movido a esse tipo de combustível foi o Fiat 147 em 1978. Popularmente, era conhecido como Cachacinha (Figura 2.8). O Fiat 147 a álcool trazia uma série de novidades, a maioria, claro, no propulsor 1.3 de 60 cv de potência. Em relação ao modelo gasolina, a principal diferença era a maior taxa de compressão, obtida a partir de uma série de modificações, como aplainamento do cabeçote

e o retrabalho dos pistões. As peças que tinham contato direto com o combustível também foram retrabalhadas para resistir ao maior poder corrosivo do álcool.

Figura 2.8 - Fiat 147 a álcool, primeiro carro movido pelo combustível vegetal produzido no Brasil (e no mundo, diga-se). Recebeu, pela façanha, o maroto apelido de “cachacinha”.

Fonte: (foto: Fiat/Bestcarswebsite)

Em 1986, praticamente 90% dos carros de passeio vendidos no Brasil eram movidos a esse tipo de combustível. No entanto, o Proálcool começou a desabar quando o preço internacional do petróleo começou a baixar muito ao mesmo tempo em que o preço do açúcar aumentava. Pela lei da demanda e oferta, os usineiros preferiam produzir mais açúcar que o álcool.

Depois, o combustível deixou de ser oferecido regularmente para o mercado e o aumento de preço foi considerável. Com crises sucessivas de abastecimento aliadas ao maior consumo do álcool pelos automóveis a esse tipo de combustível, levaram à diminuição do consumidor na motorização ao álcool. Já em 1989, automóveis a gasolina superaram em vendas comparando a aquelas movidas a etanol. De 1990 até o ano 2000, carros ao álcool se tornaram irrelevantes [Yuki Higa, 2011]. No entanto, no começo de 2002, o governo incentivou a produção do etanol como um combustível alternativo devido à instabilidade na situação nacional, causada pela constante oscilação no preço do petróleo. Os fabricantes de automóveis no Brasil decidiram acelerar nas suas pesquisas e no ano 2003 foi lançado um novo nível da tecnologia *flex-fuel* em veículos, na qual era possível utilizar etanol e gasolina em qualquer proporção.

Na Figura 2.9a pode se observar que a nova tendência nos motores foi revolucionária, mostrando altos valores na produção de veículos *flex-fuel*. Já na Figura 2.9b, a evolução da

frota de veículos por tipo de combustível até o ano 2014, com um incremento nos motores *flex-fuel* até um 54,3% e um decréscimo nos motores de gasolina de 70 para 34,3%.

Figura 2.9 - a) Produção de veículos no Brasil entre 1977 e 2008 b) evolução da frota Brasileira por combustível.

Fonte: [Araujo et al., 2011]

Como parte da tecnologia *flex-fuel*, uma série de problemas começaram afetar alguns componentes, e parte das soluções foram utilizar novos materiais e recobrimentos resistentes ao etanol. Componentes como o tanque, bomba e linhas do combustível, velas de ignição, geometria do pistão, mudanças para aumentar a taxa de compressão e definição de novos parâmetros de calibração no motor, que eram relevantes nos mecanismos de desgaste do sistema válvula-sede foram fortemente investigadas [Araujo et al., 2011].

2.3.1.1. Motor *flex-fuel*

O álcool combustível só se tornou interessante para o consumidor em uso automotivo com a tecnologia *flex-fuel*. A novidade possibilitava ao motorista, abastecer o tanque de acordo com o preço do álcool/gasolina. O primeiro carro a ser lançado com essa tecnologia foi o Volkswagen Gol Total Flex, lançado em Abril de 2003 (Figura 2.10) [Yuki Higa, 2011].

Figura 2.10 - Volkswagen Gol 1.6 - Total Flex 2003.

Fonte: <http://www.car.blog.br/2004/03/vw-gol-total-flex-e-o-primeiro-carro-bi.html>

No ano 2015, carros com a tecnologia *flex-fuel* representavam quase o 90% do total de automóveis licenciados segundo o tipo de combustível utilizado. Segundo ANFAVEA (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores) no final de 2015, o número de veículos *flex-fuel* licenciados quando comparado com a gasolina era de 2.194.020 contra 136.150 no total (Tabela 2.2). Esses valores com diferença em torno de 83%, representam um aumento significativo no uso deste tipo de motores e sua importância no mercado brasileiro. Já para o primeiro semestre do ano 2016, a diferença esteve em torno de 84%.

Tabela 2.2 - Licenciamento total de automóveis e comerciais leves por combustível.

Unidades	2015												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total Ano
Gasolina	12900	10123	12830	12424	11866	11681	11818	10903	10926	10421	8953	11305	136150
Elétrico	72	56	61	73	72	74	74	100	82	55	65	62	846
Flex Fuel	217010	158500	198763	185852	180471	181203	194484	177859	169869	164256	170039	195714	2194020
Diesel	14284	10584	14682	13653	12825	11940	13321	11246	11969	10752	10493	13764	149513

Fonte: Renavam

Porcentagem	2015												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total Ano
Gasolina	5,3	5,6	5,7	5,9	5,8	5,7	5,4	5,4	5,7	5,6	4,7	5,1	5,5
Elétrico	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Flex Fuel	88,8	88,4	87,8	87,7	87,9	88,4	88,5	88,9	88,1	88,6	89,7	88,6	88,4
Diesel	5,8	5,9	6,5	6,4	6,2	5,8	6,1	5,6	6,2	5,8	5,5	6,2	6,0

Fonte: Renavam

Unidades	2016												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total Ano
Gasolina	7494	6631	8019	6105	6142	6182	6033	0	0	0	0	0	46606
Elétrico	58	64	60	137	41	91	48	0	0	0	0	0	499
Flex Fuel	132454	125415	151120	138772	143453	146579	155281	0	0	0	0	0	993074
Diesel	9827	10148	14190	12807	12712	13763	13661	0	0	0	0	0	87108

Fonte: Renavam

Porcentagem	2016												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total Ano
Gasolina	5,0	4,7	4,6	3,9	3,8	3,7	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1
Elétrico	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Flex Fuel	88,4	88,2	87,2	87,9	88,4	88,0	88,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	88,1
Diesel	6,6	7,1	8,2	8,1	7,8	8,3	7,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,7

Fonte: Renavam

Fonte: (ANFAVEA, 2016)

Dado ao significativo avanço na fabricação de veículos com tecnologia *flex-fuel* é relevante continuar com as pesquisas que já foram iniciadas sobre os mecanismos de desgaste e alterações no uso de diferentes materiais dos diferentes sistemas que conformam o motor, em especial importância, o sistema válvula-sede.

2.4. SISTEMA VÁLVULA - SEDE

Nos motores de combustão interna, são utilizadas, praticamente com exclusividade, válvulas como dispositivos de bloqueio. A duração e a sequência dos movimentos das válvulas são determinadas pelo eixo comando. O conjunto de elementos que efetua a transferência do curso do came para as válvulas (incluindo as válvulas) é denominado trem de válvulas (Figura 2.11).

Figura 2.11 - Componentes do trem de válvulas do motor.

- 1) eixo comando; 2) guia do tuchos; 3) cabeçote do motor; 4) tuchos mecânicos; 5) retentor de válvulas; 6) mola da válvula; 7) guia da válvula; 8) válvula; 9) sede da válvula.

O trem de válvulas é submetido a grandes acelerações e desacelerações. As forças de inércia inerentes a esse processo aumentam em função da rotação crescente e submetem o conjunto a grandes esforços. Nos componentes que formam parte do denominado trem de válvulas, estão tanto a válvula como a sede (admissão/escape) [Schaeffler Technologies GmbH & Co, 2011].

2.4.1. Válvulas

São componentes de motores de combustão interna e elementos de alta precisão, sujeitos a elevadas tensões térmicas e mecânicas. Têm como principais funções, executar quatro tarefas no motor:

- ✓ Vedar as áreas de fluxo dos gases;
- ✓ Controlar a troca de gases;
- ✓ Selar os cilindros do exterior;
- ✓ Dissipar o calor gerado produto da combustão, transferindo-o para o anel de assento de válvula (sede) e para a guia de válvula.

Trabalhando a temperaturas acima de 800 °C, cada válvula abre e fecha até 70 vezes por segundo e durante a vida do motor, está sujeita a uma média de 300 milhões de alternâncias de carga.

2.4.2. Classificação de válvulas

Existem dois tipos distintos de válvulas quanto às funções no motor: admissão e escape.

As válvulas de admissão estão alojadas na região de entrada de gases no cabeçote (Figura 2.12), sua refrigeração ocorre através do ar admitido pelo duto, da troca de calor realizado pela área de apoio da sede da válvula com a sede do cabeçote e pela troca térmica do óleo lubrificante existente entre a guia e a haste da válvula.

Figura 2.12 - Entrada e saída de gases no cabeçote do motor.

As principais funções são controlar a entrada de ar ou ar/combustível para dentro da câmara de combustão do motor e dissipar o calor gerado após a combustão. Também vedam a câmara de combustão, permitindo que a mistura admitida para dentro desta seja comprimida a ponto de entrar em combustão forçada, por meio de centelha.

As válvulas de admissão são produzidas, em sua maioria, com um só material e por isso são denominadas *monometálicas* (Figura 2.16). Existem também as denominadas *válvulas ocas* (Figura 2.18) e tem como função principal o alívio de peso.

Para o caso das válvulas de escape, sua principal função é a de controlar a saída dos gases. Após a combustão na câmara, os gases têm elevada temperatura (superior a 800 °C) e são altamente corrosivos. A saída destes gases também ocorre à grande velocidade. Outra função é a troca térmica do calor absorvido através da dissipação entre o contato da sua sede com a sede do cabeçote. O calor, assim como o atrito gerado durante o acionamento da válvula, também é minimizado pelo óleo lubrificante existente entre a guia e a haste da válvula.

Como nas válvulas de admissão, também existem válvulas de escape ocas com a diferença é que são com enchimento de sódio. Nas válvulas com enchimento, a haste é um tubo de precisão preenchido parcialmente com sódio. Sua função também é reduzir a temperatura em 80 a 150 °C.

As válvulas de escape, além das grandes demandas mecânicas a que estão submetidas, têm que suportar altas tensões térmicas e corrosão química na região da cabeça. Por isso, elas requerem materiais especiais e processos de produção mais complexos durante a sua fabricação. Normalmente, em função da severidade de funcionamento, as válvulas de escape são produzidas com dois materiais diferentes e, em muitos casos, a sede da válvula pode receber blindagem [MAHLE GmbH, 2012].

Vale ressaltar que a diferença de diâmetro entre as válvulas de admissão e escape influenciam diretamente nos esforços atuantes na superfície de contato da válvula com a sede de válvula. Assim, considerando o instante do pico de pressão na combustão, onde em um motor de combustão interna, ciclo Otto, as pressões alcançam valores de aproximadamente 90 Bar, temos conseqüentemente que, quanto menor a área de contato, menor a força atuante na superfície de contato. Desta forma, com a redução dos esforços atuantes é reduzido o desgaste da superfície.

O calor introduzido nas válvulas de escape pela combustão e pelo fluxo de gases é dissipado em aproximadamente 80% pela sede de válvula e 20% pela guia de válvula [MAHLE GmbH, 2013]. Por este motivo, é de grande importância a capacidade de troca térmica dos materiais da válvula e sede. No caso da válvula de admissão, o fluxo da

mistura ar-combustível (ou somente ar no caso de injeção direta) é o maior responsável pelo seu resfriamento.

Em um projeto do par tribológico válvula-sede, devem ser consideradas as propriedades dos materiais de forma a obter uma melhor compatibilidade entre eles, isto é, propriedades térmicas que favoreçam a troca térmica, dureza suficiente para que não exista um desgaste excessivo de somente um dos materiais, resistência à alta temperatura (principalmente no par de escape), entre outras.

As propriedades geométricas também são de suma importância. Como por exemplo, o ângulo de contato da sede com a válvula. Atualmente, a maior parte das válvulas utilizadas em motores de ciclo Otto, tem um ângulo de contato de 45° . Este ângulo apresenta um melhor custo benefício quando considerados o desgaste, vedação do par e fluxo de ar [Wang, 2007]. Ângulos inferiores reduzem o desgaste, porém aumentam o efeito de rebatimento da válvula no instante do fechamento, aumentando a probabilidade de retenção de partículas residuais da combustão.

Outra característica de grande importância é o ângulo relativo entre a válvula e a sede de válvula, que por recomendação de projeto deve existir uma diferença de aproximadamente $0,5^\circ$ criando uma primeira linha de contato, para garantir uma melhor vedação do par durante o funcionamento do motor [MAHLE GmbH, 2013]. Esta diferença pode ser observada na Figura 2.13.

Figura 2.13 - Ângulo de contato entre a válvula e sede de válvula de projeto.

Fonte: [MAHLE, 2013]

Existem três razões para isto [LEWIS e DWYER-JOYCE, 2002]:

- ✚ A parte mais quente da válvula, nas condições de funcionamento é a parte inferior da cabeça. A expansão térmica deste lado faz com que os ângulos se igualem durante o funcionamento;
- ✚ Quando a válvula está muito quente, a carga da mola pode causar uma ligeira flexão na cabeça da válvula, a qual pode deslocar para cima o diâmetro menor da válvula criando uma abertura entre a válvula e a sede no lado da câmara de combustão, se os ângulos forem iguais na condição fria;
- ✚ O risco de reter partículas provenientes da combustão é reduzido.

2.4.2.1. Descrição da válvula

As válvulas são compostas geralmente por ponta, haste e cabeça. Estas podem ser também diferentes em suas formas, aplicações e tamanhos. Para se obter uma padronização nas partes que compõem as válvulas, são identificadas as principais como se observa na Figura 2.14.

Figura 2.14 - Esquema das partes que compõem a válvula

Fonte: [TRW, 2011]

Na Figura 2.15 podem se observar as dimensões mais comuns para identificar as válvulas, estas são baseadas na sua geometria. A seguir, diâmetro da cabeça (D), diâmetro da haste (d), comprimento total da válvula (L), e α que representa o ângulo na sede da válvula em função do eixo central da válvula (30 ou 45°).

Figura 2.15 - Dimensões para identificação de válvulas.

Fonte: [TRW, 2011]

Existem diferentes denominações para válvulas, entre as mais comuns estão monometálicas, bimetálicas e ocas.

- ✓ Monometálicas são produzidas eficientemente por processo de extrusão a quente ou por estampagem utilizando um só material.

Figura 2.16 - Válvula monometálica.

Fonte: [MAHLE, 2012]

- ✓ Bimetálicas que tornam possível o uso da combinação ideal de materiais tanto na haste como na cabeça.

Figura 2.17 - Válvula bimetálica.

Fonte: [MAHLE, 2012]

- ✓ Ocas servem para reduzir o peso e diminuir a temperatura de operação. Preenchidas com sódio (ponto de fusão a 97.5 °C), o efeito do movimento do sódio líquido faz com que o calor possa se deslocar da cabeça da válvula à sua haste, conseguindo assim uma redução da temperatura de 80 até 150 °C.

Figura 2.18 - Válvula oca.

Fonte: [MAHLE, 2012]

2.4.2.2. Materiais de válvulas

Para a fabricação das válvulas são utilizados diferentes tipos de materiais [MAHLE GmbH, 2012].

- ✓ CS - Aço Baixo Carbono. Utilizado em válvulas de admissão e para haste de válvulas de escape (bimetálicas).
- ✓ M - Aço Cromo Silício. Para válvulas de admissão e de escape em serviços moderados, também na haste de válvulas bimetálicas.
- ✓ MN - Aço Cromo Silício Níquel. Utilizado em válvulas de admissão com alta resistência à corrosão e às altas temperaturas.
- ✓ MV - Aço Cromo Molibdênio Vanádio. Para válvulas de admissão com alta resistência ao desgaste, à corrosão e às altas temperaturas.
- ✓ A/AB - Aço Austenítico Cromo Níquel Manganês. Utilizado para válvulas de escape resistentes a severas condições de operação.
- ✓ AN - Aço Austenítico Cromo Níquel. Para válvulas de escape resistentes a severas condições de operação.
- ✓ X - Super Ligas. Utilizada para válvulas de escape altamente solicitadas.

- ✓ ST – Altas ligas utilizadas para a blindagem da sede de válvulas de escape, com alta resistência à oxidação, ao desgaste e à corrosão.

Aços para válvulas em motores de combustão interna podem encontrar-se de diferentes tipos, entre os mais comuns: austeníticos, martensíticos e ligas especiais de níquel.

Os aços austeníticos podem ser empregados na produção de válvulas de escape de motores de média e alta potência que estejam expostas a temperaturas de serviço de até 870 °C. Geralmente estes aços são utilizados como material base em válvulas revestidas que exijam extrema resistência mecânica e à corrosão em alta temperatura. A microestrutura destes aços é fundamentalmente austenítica devido principalmente à presença de manganês, nitrogênio e níquel. O aço válvula austenítico comumente utilizado é o X50CrNiNbN21-9 (SAE XEV-F).

Os aços válvula martensíticos são aplicados principalmente em válvulas de admissão, entretanto também podem ser utilizados na fabricação de válvulas de escape quando a temperatura não ultrapassa 700 °C. Estes aços caracterizam-se por uma matriz martensítica com teores de cromo de até 20% apresentando teores de carbono e de elementos de liga variáveis em função da resistência mecânica, resistência ao desgaste e à corrosão de cada aplicação. O aço válvula martensítico comumente utilizado é o X45CrSi9 (SAE HNV 3).

Uma importante classe de materiais empregados na fabricação de válvulas para motores de combustão interna são as ligas à base de níquel. Estas ligas possuem o níquel como principal elemento na sua composição, além da presença de cromo, titânio, alumínio, molibdênio e ferro. Geralmente sua aplicação é realizada em motores de alto desempenho que trabalham em temperaturas muito elevadas [Villares Metals, 2013].

Atualmente, existe a tendência de algumas válvulas de admissão migrar para aços austeníticos, os quais podem conter até 2% de Nb, como o (SAE XEV-F) e algumas válvulas de exaustão migrarem para ligas intermediárias de níquel (30 a 40% Ni) ou mesmo ligas à base de níquel como a SAE HEV-3 (Inconel 751) com até 1% de Nb. Este tipo de ligas comumente utilizadas na fabricação de válvulas automotivas para motores de

combustão interna de alto desempenho, e com excelentes propriedades enquanto à resistência a quente, à oxidação, corrosão, fluência e estabilidade microestrutural, no entanto, apresentam baixa resistência ao desgaste e elevado custo, devido aos altos teores de Ni.

Evoluindo no desenvolvimento de novos materiais para aplicação em motores de combustão interna, e considerando que as normas ambientais são cada vez mais restritas como, por exemplo, as normas Euro V e VI, nas quais os materiais utilizados na fabricação de componentes automotivos são cada vez mais exigidos em termos de temperaturas e cargas mecânicas, novos sistemas tribológicos produto das alterações e variações nos combustíveis e materiais. Com o aumento na potência dos novos motores, e as variações na composição dos combustíveis alternativos, um dos sistemas tribológicos automotivo mais afetado é o par válvula-sede.

No Brasil, a empresa Villares Metals, visando contribuir com o desenvolvimento de novos materiais para uso em válvulas de admissão e escape de motores de combustão interna de alto desempenho, apresentaram duas ligas alternativas as SAE HEV-3 (Inconel 751) e HEV-5 (Nimonic 80A) comumente utilizadas. As novas ligas VAT 32® e VAT 36® (Designação Villares Metals) apresentam maiores teores de nióbio e menores teores de níquel. A adição de carbono combinada à de nióbio tem por objetivo propiciar a precipitação de carbonetos do tipo NbC primários. Estes carbonetos aumentam a resistência mecânica e ao desgaste.

A liga VAT 32® foi projetada para apresentar elevada resistência ao desgaste, apresentando uma elevada fração volumétrica de carbonetos. Já a liga VAT 36® foi projetada com uma baixa fração volumétrica de carbonetos, entretanto, devido aos maiores teores de cromo e níquel, esta liga apresenta maior resistência à corrosão e resistência mecânica similar em relação à liga VAT 32®.

A relação de composição química das ligas é apresentada na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Composição química nominal das ligas em porcentagem em peso.

Liga	C	Si	Mn	Ni	Nb	Al	Ti	Cr	Fe
VAT 32®	0,30	0,20	0,30	32,00	3,90	1,80	2,00	15,5	Balanço
VAT 36®	0,05	0,20	0,30	36,00	2,00	1,95	1,20	19,0	Balanço
UNS N07751	0,02	0,20	0,30	Balanço	1,00	1,20	2,30	15,5	7,00
UNS N07080	0,02	0,20	0,30	Balanço	---	1,50	2,20	20,0	0,30

As ligas UNS N07751 e UNS N07080 são produzidas industrialmente pelas Villares Metals sob o nome de VAT 751® VAT 80A® respectivamente. VAT 32®, VAT 36®, VAT 751® e VAT 80A® são marcas registradas da Villares Metals.

Patentes requeridas para as ligas VAT 32® e VAT 36®

Resultados interessantes sobre este tipo de liga mostram a importância da adição de nióbio. A liga VAT 32® por exemplo, foi desenvolvida com o objetivo de evitar, em algumas aplicações, a deposição de Stellite para aumentar a resistência ao desgaste, apresentando valores de dureza superiores para temperaturas entre 700 e 800 °C, associado com a elevada fração volumétrica de carbonetos do tipo NbC. Ao se evitar a deposição de Stellite, ao menos quatro etapas de processamento da válvula são eliminadas: a abertura do canal de deposição, a deposição, a usinagem e a inspeção do Stellite.

2.4.3. Sedes de válvula

As sedes tem sido muito importantes desde a utilização dos cabeçotes de alumínio. Estas sedes, junto com as válvulas, fecham hermeticamente a câmara de combustão do motor, além de absorver uma parte do calor produto da combustão que é transferido para a válvula.

As sedes de válvulas são instaladas no cabeçote do motor de combustão interna proporcionando uma superfície de assentamento para as válvulas. A superfície da sede está exposta a ambientes fortes, que incluem altas tensões de contato e temperaturas, além de gases corrosivos.

As sedes são utilizadas fundamentalmente por duas razões. A primeira, e a mais importante, as feitas de ligas são mais resistentes ao desgaste e ao calor quando

comparado com material do cabeçote do motor (ferro fundido ou ligas de alumínio), sendo os mais adequados para as severas condições durante o fechamento das válvulas. Segundo, o uso das sedes permite fácil trabalho de manutenção ou reconstrução de motores.

2.4.3.1. Descrição da sede

As sedes são compostas geralmente por um anel cilíndrico. Estas podem ser também diferentes em suas formas, aplicações e tamanhos. Para se obter uma padronização nas partes que compõem as válvulas, são identificadas as principais como se observa na Figura 2.19, na qual:

Figura 2.19 - Nomenclatura típica da sede de válvula.

Fonte: [Wang Y, 2007]

A escolha da largura total e o ângulo da face de contato da sede dependem principalmente do conflito entre duas características: vedação contra desgaste. Ambos os fatores dependem das seguintes variáveis: ângulo da face, coeficiente de atrito na interface, temperatura e pressão como produtos da combustão, velocidade de fechamento, formação de depósitos, seleção do material da válvula e da sede, entre outros.

A Figura 2.20 compara a carga e o ângulo no assento em função do coeficiente de atrito. O gráfico apresenta que para valores altos do ângulo no assento e baixos coeficientes de atrito, resultam altas cargas e pressões na superfície da face de contato da sede, o qual por

sua vez aumenta o *wedging* ou *nesting* entre a válvula e a sede. Altos valores do ângulo podem adicionar e até esmagar depósitos produto da combustão.

Figura 2.20 - Comparação da carga aplicada em função do ângulo no assento da sede para determinar o coeficiente de atrito.

Fonte: [Wang Y, 2007]

O aumento nas pressões de contato com ângulos maiores no assento da sede pode ser uma desvantagem em termos da taxa de desgaste, particularmente com condições de operação não lubrificadas (a seco). Ângulos menores reduzem as pressões de contato e podem reduzir o desgaste na sede, mas com o risco de causar *guttering* devido ao incremento de depósitos acumulados e vedação incompleta da câmara de combustão do motor. Os valores mais utilizados no ângulo do assento são 45 e 30° [Wang Y, 2007].

2.4.3.2. Materiais de sedes

Os materiais usados para fabricar as sedes são projetados para proporcionar resistência ao desgaste em condições ambientais severas, sujeitas à corrosão e a temperaturas entre 200 - 540 °C. Estes materiais tem uma taxa de expansão térmica similar à do cabeçote do motor em condições de operação, minimizando os problemas. A sede geralmente é um anel cilíndrico e pode ser fabricado mediante fundições, forjadas ou sinterizadas pelo processo de metalurgia do pó.

As sedes produzidas pelo processo de metalurgia do pó são amplamente utilizadas em motores automotivos. O processo de metalurgia do pó consiste em misturar o pó metálico como a matéria prima, mais um lubrificante e outros aditivos. Preenchendo completamente uma matriz com a mistura do pó, pressionando-o até compactar, e depois sinterizando-o a alta temperatura ligando as partículas do material (Figura 2.21).

Figura 2.21 - Processamento típico de metalurgia do pó para a fabricação de uma sede.

Fonte: [Wang Y, 2007]

O forjamento é um processo secundário na fabricação das sedes, e pode ser utilizado para aumentar a densidade das sedes feitas pelo processo de metalurgia do pó e consequentemente melhorar suas propriedades mecânicas.

As sedes fundidas, pela presença de grafite na microestrutura melhoram a usinagem e aumentam a medida de lubricidade na superfície de contato. Fundições do tipo austeníticas tem alto coeficiente de expansão térmica e são utilizadas no módulo admissão de cabeçotes de alumínio. Estas fundições contem níquel e cobre para estabilizar a fase austenítica.

Aços ferramenta fundidos e aços inoxidáveis martensíticos tipicamente são usados para aplicações severas no módulo de admissão e moderadas no módulo de escape do cabeçote do motor. As ligas de ferro tem uma temperatura de operação limite entre 430 e 600 °C. Para temperaturas mais altas, ligas de níquel ou cobalto resistentes ao desgaste podem ser utilizadas. O alto teor de níquel ou cobalto nas ligas reduz significativamente a condutividade térmica.

Em geral, motores automotivos à gasolina usam sedes fabricadas pela metalurgia do pó e em alguns casos sedes fundidas, enquanto que para aplicações severas em motores Diesel, CNG, e outros combustíveis secos adotam sedes de ligas de aço.

A Tabela 2.4 apresenta parte de materiais típicos (Bleistahl) para as sedes e sua composição química segundo a norma SAE J1692 [Wang Y, 2007].

Tabela 2.4 - Composição química de materiais para sedes.

<i>Valvetrain Components</i>										
TABLE 3.13 TYPICAL AVERAGE CHEMICAL COMPOSITIONS (IRON BALANCE UNLESS SPECIFIED) (SAE J1692)										
Trade Name	C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	W	Cu	Mo	Others
Bleistahl Produktions GmbH										
AR 16 FS	0.7/1.1			3.5/4.5			5.5/6.5		6.0/7.0	V 1.5/2.5, S 1.0/1.4
CN 024 FS	1.5/2.5	0.2/0.6			2.5/3.5					S 0.3/0.6
CN 10CU	0.8/1.2				0.3/0.7			8/12		S 0.2/0.5
COMO 12	0.6/1.1				1.0/2.0	10/12			1.0/2.0	Pb 0.5/1.5
COMO 12 07 Cr	0.8/1.2	0.3/0.7		2.0/3.0	1.0/2.0	9/11			1.5/2.5	S 0.3/0.7, Pb 0.5/1.5
COMO 12 FS	0.6/1.0	0.3/0.7			1.0/2.0				2.0/3.0	S 0.2/0.7, Pb 0.5/1.5
COMO 406 FS	0.8/1.2	0.4/0.8			1.0/2.0	3.0/5.0			2.5/3.5	S 0.4/0.6, Mo 2.5/3.5
FCN 335 15	0.5/1.0				2.5/3.5				0.7/1.1	S 0.4/0.8, Pb 2.0/3.5
FCR 2 05 FS	0.2/0.6	0.3/0.7		1.5/2.5	1.8/2.8					S 0.1/0.4
MS 20 CU	0.4/0.8			0.5/1.5	2.5/3.5		0.4/0.6	14/20	2.5/3.5	S 0.3/0.5

Fonte: [Wang Y, 2007]

2.5. TRIBOLOGIA DO SISTEMA VÁLVULA-SEDE

No sistema válvula-sede integram o sistema tribológico as válvulas, as sedes, o meio ambiente e os meios interfaciais. Nas válvulas de admissão e de exaustão os quatro elementos sofrem solicitações distintas. Nas válvulas de exaustão, a operação em altas temperaturas requer o estudo do desgaste a quente, o conhecimento detalhado do papel dos óxidos e eventualmente o entendimento do papel do meio interfacial que pode ser erosivo. Nas válvulas de admissão embora as temperaturas sejam menores os óxidos desempenham um importante papel e é possível que o fluxo de combustível desempenhe um papel importante no desempenho tribológico dos componentes.

O estudo sistemático do sistema válvula-sede compreende a detecção dos mecanismos que ocorrem em serviço, a escolha de um sistema laboratorial capaz de reproduzi-lo e o estudo sistemático do fenômeno de modo a poder, se possível, modela-lo de modo a efetuar previsões que auxiliem no desenvolvimento de componentes ou de seleção de materiais.

Numa série de brilhantes artigos esta sequência foi aproximadamente seguida por Lewis e Dwyer-Joyce da Universidade de Sheffield. [Lewis e Dwyer Joyce, 2002, 2000, 1999] e orientou os procedimentos deste trabalho de doutorado com o aprimoramento de se usar válvulas e sedes testadas em motores e não em tribômetros de laboratório como realizado pelos autores [Lewis e Dwyer Joyce, 1999]. Procede-se a seguir a uma breve revisão sobre alguns estudos relativos à tribologia do sistema válvula-sede.

Em alguns estudos realizados sobre o desgaste do sistema válvula-sede encontrou-se que durante a operação dos motores, as superfícies da sede e da válvula de admissão podem atingir temperaturas de até 500 °C [Lewis et al., 1999]. Com a elevação de temperatura alteram-se a dureza dos materiais bem como dos óxidos sobre eles [Ramalho, 2009]. A temperatura afeta, a capacidade do material para servir de suporte aos óxidos, além do comportamento para funcionar como lubrificantes sólidos ou como abrasivos dependendo da dureza relativa (que também é função da temperatura) entre material e óxido ($H_{\text{material}}/H_{\text{óxido}}$) [Silva et al., 2005]. A elevação da carga pode causar transição de desgaste moderado para desgaste severo que, no caso das válvulas, deve ser

examinado em função da temperatura [Wang, 1996]. Esta transição causa mudanças de ordens de grandeza na taxa de desgaste [Welsh, 1965]. A elevação da velocidade relativa potencializa a transição de desgaste moderado para desgaste severo que ocorre para cargas menores na medida em que a velocidade relativa se eleva [Welsh, 1965].

O meio ambiente pode potencializar o efeito protetor do óxido ou ao contrário, inibi-lo. Pode ser também corrosivo potencializando os mecanismos de desgaste. O meio interfacial (os óxidos, partículas circulantes, líquidos) pode agir da mesma forma que o meio ambiente e ainda funcionar como agente de abrasão ou erosão [Wang, 1996].

Os trabalhos de Kimihiko e coautores [Kimihiko, 2005] e de Godfrey e Courtney [Godfrey e Courtney, 1971], citados por Chun e colaboradores [Chun et al., 2007] mostram que o combustível também é um fator importante no desgaste das válvulas e sedes.

Também é conhecido que em motores que utilizavam gasolina com chumbo como aditivo antidetonante em sua composição, tinham um desgaste de válvulas inferior a motores que operavam com combustíveis livres de chumbo. O brometo de etila, juntamente com o chumbo cria uma proteção nas sedes de válvula de ferro fundido e os oxi-sulfatos preveniam a oxidação do ferro à alta temperatura das válvulas de escape, além de prevenir contra a adesão, transferência de material e soldagem da sede na válvula [PYLE e SMRCKA, 1993].

Nos motores que utilizavam combustíveis livres de chumbo, o ferro fundido das sedes oxidava, produzindo cavacos de desgaste durante o funcionamento, que posteriormente eram prensados pela válvula, formando uma camada com a presença de partículas duras. Estas partículas davam origem ao desgaste por abrasão, aumentando o desgaste do par tribológico [PYLE e SMRCKA, 1993].

O mecanismo de desgaste do par tribológico também ocorre por adesão. O contato das asperezas das superfícies da válvula e sede, em alta temperatura e pressão, inicia o fenômeno de micro soldagem das asperezas, que posteriormente são “arrancadas” durante a abertura da válvula [HUTCHESON, 2000].

Oxidação e corrosão foram identificados como mecanismos de desgaste presentes em alguns casos, dependendo das condições de operação do motor e do combustível utilizado. A oxidação é mais comumente observada no par de escape, no qual as temperaturas de trabalho são mais altas. Em alguns casos, a oxidação pode ser benéfica, pois a camada de óxido pode atuar como um lubrificante sólido, evitando o contato metal-metal. Quando em excesso, pode haver destacamento de óxidos, e conseqüentemente maior quantidade de partículas duras, promovendo o desgaste por abrasão.

Testes relatados na literatura utilizam equipamentos de bancada construídos especificamente para ensaios no sistema válvula-sede, empregando-se as autopeças standard que são instaladas nos motores de combustão interna. Ensaios com variações na frequência e condições de carga e temperatura fixas [Chun et al., 2007], foram realizados utilizando válvulas do material SAE EV-8 (X53CrMnNiN 21-9) e uma liga sinterizada para a sede, a fim de avaliar o efeito da frequência no desgaste dos componentes anteriormente relacionados.

Outros trabalhos relacionados ao efeito da carga e da temperatura no desgaste de materiais de válvulas SAE HNV-3 (Silcrome 1 - X45) e sedes (Silcrome XB), foram realizados utilizando um equipamento de bancada projetado para simular as condições operacionais do sistema válvula-sede do motor. As variações na carga e na temperatura procuravam levar os materiais até condições similares à câmara de combustão com valores entre 6.615 e 24.255 N e 180 e 650 °C [Wang et al.,1996].

Além dos equipamentos projetados para simular o que acontece no sistema válvula-sede do motor, foram utilizados tribômetros do tipo *pin on disc*, *block on cylinder*, *ring on block*, *disc on cylinder*, *block on disc*, e *pin on disc reciprocating* para avaliar o efeito da temperatura de diferentes materiais empregados na fabricação de válvulas e sedes. Materiais como o aço 5CrNiMo usando o *ring on block* [Tu et al., 1998], aços de alto cromo na *pin on disc reciprocating* [Stott et al., 2001], Nimonic 80A no *block on cylinder* [Inman et al., 2006], foram testados para determinar os tipos de mecanismos de desgaste nas superfícies e as variações no coeficiente de atrito causadas pelo aumento da temperatura e da carga.

Trabalhos no sistema válvula-sede foram realizados visando avaliar o comportamento do coeficiente de atrito e taxa de desgaste com diferentes tipos de materiais frente à frequência [Chun et al., 2007; Ootani et al., 1995], carga [Pauschitz et al., 2008; Fricke et al., 1993] e temperatura [Ramalho et al., 2009; Pauschitz et al., 2008; Stott, 2002; Ootani et al., 1995], além de outras variáveis.

O Chun após ensaios com material de válvulas X53CrMnNiN 21-9 e uma liga sinterizada para a sede, obteve como resultados um aumento no R_{max} das superfícies em contato (Figura 2.22), com o incremento na frequência de 10 para 25 Hz (1.000 e 3.000 rpm no motor) para vários números de ciclos [Chun et al., 2007].

Figura 2.22 - Variação no R_{max} para válvula e sede com 10 e 25 Hz.

Fonte: [Chun et al., 2007]

Para 10 Hz, os valores obtidos tanto para válvula quanto para sede aumentam linearmente com o número de ciclos. Enquanto para 25 Hz, com o menor número de ciclos (2.0×10^6), os valores são significativamente maiores, mantendo-se aproximadamente constantes até o valor maior de 8.0×10^6 . Quando aumentada a frequência de 10 para 25 Hz, com a carga (1.960 N) e temperaturas fixas (350° C), a hipótese é que pode ter acontecido uma reação triboquímica entre as duas superfícies, por tanto, uma transferência de material entre os elementos (Figura 2.23). Na superfície da válvula foi encontrado o cobre (Cu), elemento que pertence à sede segundo a composição química do material (dopado com 15%), além do oxigênio (O) justificando a formação de algum tribofilme nas superfícies em contato.

Figura 2.23 - Imagens obtidas no MEV das superfícies desgastadas da válvula e sede.

a) 10 Hz e 8×10^6 ciclos; b) 25 Hz e 4×10^6 ; c) EDS do ponto B da válvula.

Fonte: [Chun et al., 2007]

É muito provável que na condição de ensaio de 2.0×10^6 ciclos a reação triboquímica esteja dada, levando ao efeito de proteger as superfícies da válvula e sede com relação ao desgaste e por tanto mantendo o valor do R_{max} aproximadamente constante [Chun et al., 2007].

Com relação à temperatura, o trabalho realizado pelo Stott utilizando o Nimonic 75, apresentou para 400 e 800 °C valores do coeficiente de atrito com dois regimes após certo tempo de ensaio (Figura 2.24a), além de uma transição no volume de desgaste entre 100 e 200 °C (Figura 2.24b) [Stott, 2002].

Figura 2.24 - a) Coeficiente de atrito em função do tempo para 400 e 800 °C.
b) Volume de desgaste em função da temperatura após 15 h de ensaio.

Fonte: [Stott, 2002]

Essas variações no coeficiente de atrito, de obter valores altos por um tempo determinado e logo depois, um valor inferior até o final do ensaio, além da transição de regime de desgaste de severo para moderado (Figura 2.24b), acima de um valor de temperatura dado, é justificado pelo fato de ter ocorrido durante o deslizamento do tipo *reciprocating*, uma estabilização de uma camada das partículas de *debris* desprendidas durante o ensaio. Para as temperaturas maiores, se promove oxidação, compactação e sinterização dessas partículas que podem levar à formação de “*glaze layer*” diminuindo as taxas de desgaste [Stott, 2002].

Pauschitz e colaboradores apresentaram as variações do coeficiente de atrito utilizando a liga PM 1000, a Figura 2.25 mostra especificamente para 1.073 K (800 °C) dois regimes em função da distância de deslizamento, o primeiro pode se observar até aproximadamente 1.000 m, após este valor e até atingir 2.000 m o valor apresenta uma queda para posteriormente se manter constante (segundo regime) até o final do ensaio [Pauschitz et al., 2008].

Figura 2.25 - Variação do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento para várias temperaturas utilizando a liga PM 1000.

Fonte: [Pauschitz et al., 2008]

No anterior trabalho além das variações no coeficiente de atrito, foram obtidos resultados da taxa de desgaste tanto para o Nimonic 80A quanto para a liga MA 956 em função da temperatura (Figura 2.26). Nota-se que para a liga MA 956, os valores são negativos para as temperaturas entre 273 e 673 K (25 e 400 °C), resultando em um ganho de massa dos corpos de prova. Temperaturas acima de 773 até 1.073 K (500 até 800 °C) apresentam valores positivos (perda de massa), exceto para 873 K (600 °C) [Pauschitz et al., 2008].

Figura 2.26 - Influência da temperatura de ensaio na taxa de desgaste para Nimonic 80A e MA956.

Fonte: [Pauschitz et al., 2008]

O efeito da carga aplicada na taxa de desgaste também foi analisado no trabalho do Pauschitz utilizando o aço 5CrNiMo. A Figura 2.27 apresenta os resultados obtidos para

temperaturas entre 673 e 873 K (400 e 600 °C) com a tendência ao aumento conforme vai se aumentando a carga de 75 até 250 N. Embora os valores sejam muito baixos, na ordem de 10×10^{-12} , o comportamento não é diretamente proporcional ao valor da temperatura, isto é, valores da taxa de desgaste menores para 673 K (400 °C) quando comparado com 873 K (600 °C) [Pauschitz et al., 2008].

Figura 2.27 - Influência da carga aplicada na taxa de desgaste para o aço 5CrNiMo.

Fonte: [Pauschitz et al., 2008]

Ramalho e colaboradores (PSA France) utilizando o aço X50 CrMnNiNbN 21-9 e a liga dopada com 20% Cu, 3% Co e 15% MoWNiVSi, encontraram após ensaios, elementos presentes na superfície desgastada da válvula usando EDS (Figura 2.28). Esses elementos (Cu, Mo e W) provenientes do material da sede revelam que houve transferência de material entre as superfícies em contato promovido pela temperatura de ensaio (400 °C) [Ramalho et al., 2009].

Figura 2.28 - Superfície desgastada da válvula para 400 °C.

Chemical composition and Vickers hardness (20 N).

	Cylinder	Plates
Material	Steel X50CrMnNiNbN21-9	0.8-1% C sintered steel, doped with 20% Cu, 3% CO, 15% CrMoWNiVSi

EDS: Cu, Mo, e W

Fonte: [Ramalho et al., 2009]

No trabalho do Ootani e colaboradores (*Nissan Motor Company*), houve uma mistura de variáveis durante os ensaios utilizando como materiais o aço SUH36 (X53CrMnNiN 21-9) na válvula e uma liga sinterizada na sede. Foram realizados ensaios com variações na temperatura desde ambiente até 400 °C e na velocidade de deslizamento até 0,8 m/s (Figura 2.29).

Figura 2.29 - Taxa de desgaste em função da velocidade de deslizamento para diferentes temperaturas.

Fonte: [Ootani et al., 1995]

Os resultados obtidos apresentados na mostram uma tendência de aumentar a taxa de desgaste conforme a é incrementada a velocidade de deslizamento na temperatura ambiente. Enquanto para valores de temperatura maiores (400 °C) o desgaste é significativamente menor associado ao efeito da oxidação nas superfícies [Ootani et al.,1995].

O desgaste do par tribológico depende além dos parâmetros de projeto e produção, da combinação de diversos fatores existentes durante o funcionamento do motor. Analisando o funcionamento deste par tribológico, pode-se identificar que os fatores envolvidos no desgaste são: o impacto da superfície de contato da válvula na sede no instante do fechamento da válvula, a pressão exercida durante a combustão, a rotação da válvula (relativamente à sede), a lubrificação do sistema e a temperatura de funcionamento.

Segue uma análise em cada uma das condições citadas anteriormente:

Impacto na superfície;

O fechamento da válvula é promovido pela força exercida pela mola na ponta da válvula, e tem sua velocidade controlada pelo perfil do came do eixo comando de válvulas e pela rotação do motor.

Velocidades típicas de fechamento das válvulas variam entre 0,3 e 0,6 m/s. Dependendo da rigidez do trem de válvulas e da rotação máxima do sistema, a velocidade pode atingir 1,0 m/s ou mais. No projeto dos motores modernos, a velocidade desejada é inferior a 0,5 m/s (MAHLE GmbH, 2013).

Vale ressaltar que quanto maior a velocidade de fechamento, maior o desgaste do par, já que, maior será a força exercida no impacto.

Pressão exercida durante a combustão;

No momento da combustão, o pico de pressão dentro da câmara pode atingir valores próximos de 90 Bar (*flex-fuel*). Esta pressão é exercida na face superior da válvula que por

sua vez é suportada por uma pressão de igual intensidade, exercida pela superfície de contato da sede sobre a válvula.

Devido a esta pressão na cabeça da válvula, ela sofre uma deformação elástica, promovendo o deslizamento entre a válvula e a sede. Este deslizamento pode causar desgaste por abrasão ou pelo próprio deslizamento relativo. A amplitude deste deslizamento varia de acordo com a rigidez do material da válvula.

Conforme experimentos realizados por Forsberg [Forsberg et al., 2014], foram encontrados comprimentos de escorregamento entre a válvula e sede entre 6 e 13 μm considerando uma variação de pressão de combustão entre 90 e 200 Bar. Este valor está próximo das limitações de projeto desejadas de um escorregamento máximo entre a válvula e sede de 10 μm (MAHLE GmbH, 2013).

Rotação da válvula;

Durante a abertura e fechamento da válvula, ocorre sua rotação. Isto devido à contração e expansão da mola, que, ao ser comprimida gera um torque, e ao se expandir este torque é parcialmente transferido à válvula através do prato e das travas. A rotação é fundamental para promover um desgaste homogêneo na superfície de contato.

É conhecido que a baixa rotação da válvula pode promover um desgaste não uniforme na superfície de contato, enquanto que uma rotação excessiva leva a um aumento no desgaste.

O desgaste do par tribológico pode ocasionar diferentes modos de falha, dentre eles, podemos citar:

Redução do desempenho do motor;

Segundo Forsberg e colaboradores, o desgaste acentuado do par tribológico promove alteração no fluxo de gases pela válvula no momento de abertura máxima. Isto ocorre, pois, a área da seção disponível para a passagem dos gases é reduzida quanto maior for a

penetração da válvula no corpo da sede, conforme indicado na Figura 2.29 sobre *valve recession*.

O desgaste do par válvula-sede leva a uma alteração no volume morto (volume da câmara de combustão no cabeçote), alterando assim a taxa de compressão do motor. Com a redução desta taxa e também da redução da massa de ar admitido, o desempenho do motor tende a diminuir.

✚ Perda da função de vedação;

Quando ocorre o desgaste excessivo da válvula e sede, maior do que a capacidade de compensação existente pela regulagem de folga de válvula, a válvula não fechará completamente, permitindo a passagem de gases quentes provenientes da combustão e consequente quebra da válvula (Figura 2.25) e posterior quebra do motor.

O mesmo pode ocorrer caso o desgaste seja de forma assimétrica, pela distorção do sistema devido às variações de temperatura existentes durante o funcionamento do motor, pelo desalinhamento da válvula com a sede ou até mesmo, erro de projeto.

Sintetizando, as possíveis causas de falha nas válvulas podem ser devido à:

- ✚ Defeitos de material;
- ✚ Falha durante o processo de fabricação (por exemplo, o desalinhamento entre a válvula e sede);
- ✚ Falha de projeto (por exemplo, alta velocidade no fechamento da válvula);
- ✚ Incompatibilidade de materiais da válvula e sede de válvula;
- ✚ Temperatura excessiva de trabalho;
- ✚ Solicitações mecânicas acima do especificado.

Alguns estudos desenvolvidos sobre o efeito do deslizamento no desgaste dos materiais da sede sob alta temperatura revelaram uma redução da quantidade de desgaste com o aumento da temperatura. Esta evolução poderia ser explicada pelas medidas de proteção dos óxidos da superfície que se produzem pelas provas a alta temperatura

[Chun et al., 2007; Ootani et al., 1995]. Existem principalmente dois fatores que devem ser considerados para analisar o efeito da temperatura, por um lado, há uma redução da resistência mecânica com o aumento da temperatura, e por outra parte o aumento da temperatura estabiliza a camada superficial de óxido. A ação de proteção da camada de óxidos deveria conduzir a uma redução do atrito.

O sistema tribológico é composto pelas válvulas, sedes, meio interfacial e o meio ambiente. As válvulas de admissão e de escape sofrem solicitações distintas, pois na exaustão os materiais estão expostos a temperaturas mais elevadas e a um meio mais corrosivo. Nesse contexto, é importante determinar quais são os meios interfaciais presentes, qual a diferença entre a utilização dos tipos diferentes de combustível, o papel dos lubrificantes e óleos no desgaste e o papel dos óxidos formados na superfície das válvulas e das sedes.

As válvulas não são intencionalmente lubrificadas, porém tem acesso a resíduos de óleo devido à movimentação dos anéis de pistão, que traz o óleo pela câmara de combustão, e devido à haste da válvula, por onde escorre óleo do sistema de lubrificação da guia-haste [Elo, et al., 2015].

Uma das principais causas do desgaste na região do assento da válvula é o *micro-sliding*, que é o pequeno escorregamento – 5-10 μm [Forsberg, et al., 2014] – entre a válvula e a sede devido ao contato com leve diferença de ângulo [Zinner, 1963]]. Esse desgaste acontece quando há contato metal-metal.

No estudo do desgaste de válvula e sede são utilizados pela literatura diferentes bancadas de teste onde são possíveis diversas condições de operação, por meio do controle da frequência, temperatura, força e lubrificantes (óleos e aditivos). Os mecanismos de desgaste encontrados em testes em laboratórios são uma combinação de desgaste adesivo, abrasivo e oxidativo [Wang, 1996]. Além desses mecanismos de desgaste também são observados transferência de material e deformação plástica nas superfícies [Zhao R., 1997]. O desgaste aumenta com a carga e o número de ciclos, porém diminui com o aumento da temperatura. Este efeito foi explicado pela aceleração da formação de filmes óxidos que impedem o contato metal-metal [Wang, 1996].

No estudo de válvulas de escape em diferentes números de ciclos foi observado que o desgaste era atenuado por camadas formadas por uma reação triboquímica entre os metais-base, o ar e os produtos de combustão [Chun, et al., 2007]. Em estudos recentes essas camadas protetivas são denominadas tribofilmes. Os tribofilmes são formados, principalmente, de resíduos de óleo do motor e de combustível [Forsberg, et al., 2011] e ocorrem devido ao aprisionamento desse particulado na superfície de contato da válvula devido ao fechamento da mesma. São formados aglomerados que são compactados pelos impactos devido ao fechamento e pelo *micro-sliding* gerando uma densa camada que, gradualmente, é renovada devido à entrada de novas partículas e ao desgaste da camada. Não é observado desgaste da válvula onde é formado o tribofilme [Forsberg, et al., 2013]. Como os tribofilmes são formados de resíduos de combustão, a estrutura e a composição dos tribofilmes são sensíveis a alterações na quantidade e tipo de aditivos presentes nos combustíveis e no óleo. Esse fato pode ser comprovado tanto em testes de bancada [Forsberg, et al., 2014] como em testes em campo [Elo, et al., 2014].

No mais recente estudo em bancada de válvulas [Elo, et al., 2015] em que uma mistura de óleo e combustível foi continuamente adicionada ao fluxo de ar que passava pelo conjunto válvula-sede, foi observado o desenvolvimento de um tribofilme formado por uma espessa camada baseada em carbono e uma fina camada baseada nos aditivos (cálcio e fósforo) após 1.000 ciclos. O tribofilme ficou estável, ou seja, recobriu toda a superfície de contato do assento da válvula com uma espessura de camada constante após 10.000 ciclos. Após alcançar a estabilidade do tribofilme, o fluxo da mistura de óleo e combustível foi desligado. A camada baseada em carbono foi rapidamente quebrada enquanto a camada baseada nos aditivos teve uma taxa de desgaste bem menor, porém, após 10.000 ciclos, ambas as camadas não protegiam os componentes contra o desgaste. O último experimento descrito é importante para indicar que a utilização de combustíveis mais “limpos” e diminuição do consumo de óleo (tendência na próxima geração de motores) podem levar ao desgaste severo de válvulas e sedes, diminuindo a potência produzida pelo motor e causando falhas e quebras.

2.6. FALHAS NO SISTEMA VÁLVULA-SEDE

O texto a seguir foi adaptado de [MAHLE, 2012] e as fotos retiradas dessa mesma referência.

A vida útil das válvulas é compatível com a dos demais componentes do motor. Os sistemas de injeção de combustível, lubrificação, arrefecimento e filtração de ar, assim como a operação do veículo, quando em condições normais de funcionamento, contribuem para que as válvulas tenham desgaste normal.

Em condições anormais de funcionamento do motor, podem ocorrer diversos tipos de problemas tanto na válvula quanto na sede. Trabalhos reportados na literatura apontam os tipos de dano e falhas mais comuns que acontecem no sistema válvula-sede do motor de combustão interna. Entre as falhas prematuras encontram-se o engripamento da haste, desgaste do assento, fraturas e até quebra, trincas e algumas outras irregularidades.

Com relação ao tema de pesquisa visando entender os mecanismos de desgaste no sistema válvula-sede apresentam-se os seguintes tipos de falhas.

2.6.1. Desgaste do assento da válvula

O aspecto desse tipo de falha é o desgaste excessivo na forma de canal em todo o diâmetro do assento (Figura 2.30), e pode ser causado pelo desalinhamento entre a sede de válvula do cabeçote e a guia. Este desgaste também pode ser provocado pela utilização inadequada de combustível em relação à válvula. Molas de válvulas deficientes também podem provocar o desgaste na região do assento da válvula. A rotação elevada do comando faz com que a válvula flutue (a válvula mal fecha e abre novamente) quando a mola está “fraca”.

Figura 2.30 - Desgaste na região do assento da válvula.

Fonte: [MAHLE, 2012]

2.6.2. Fraturas, quebras e fissuras em válvulas.

Este tipo de falha é de fácil interpretação, a válvula apresenta fratura ou quebra total da cabeça (Figura 2.31) na região do raio e haste. Este tipo de falha está relacionado a causas mecânicas. A quebra na região do raio e haste está relacionada ao aumento excessivo da tensão cíclica na haste. O movimento de abertura da válvula é provocado pelo ressalto do came, que além de forçar sua abertura também comprime e fecha a mola. O fechamento da válvula é feito pela parte menor do came do eixo comando e principalmente pela descompressão e abertura das molas. Elevadas rotações provocam a flutuação e o aumento da tensão na região do raio/haste. O atropelamento das válvulas pelo pistão pode ocorrer em função do sincronismo incorreto das engrenagens da distribuição.

Figura 2.31 - Falha apresentada a) válvula deformada e quebrada na região do raio e haste b) cabeça da válvula quebrada na região do raio e haste.

Fonte: [MAHLE, 2012]

A trinca/fissura (Figura 2.32) e posterior quebra (Figura 2.33) na região da cabeça estão relacionadas a causas térmicas. A fissura tem início devido a um choque térmico causado pelo aquecimento e resfriamento desigual da cabeça da válvula, provocando fadiga térmica. Desalinhamento entre a haste da válvula e a sede do cabeçote causa deficiência de apoio, contribuindo para o resfriamento inadequado.

Figura 2.32 - Fissura no assento da válvula.

Fonte: [MAHLE, 2012]

A quebra de parte da cabeça da válvula (Figura 2.33) tem início com uma fissura na região do assento, que é originada pelo aumento das pressões de combustão e temperatura na câmara, caso a fissura aumente, parte da cabeça vai se desprender. Este tipo de falha ocorre somente nas válvulas de escape e está relacionada à utilização de combustível inadequado, ponto de ignição incorreto, excesso de carvão no topo do pistão, velas inadequadas e válvulas aplicadas incorretamente. O apoio incorreto da válvula com a sede também pode originar a fratura da região da cabeça.

Figura 2.33 - Válvula quebrada na região da cabeça.

Fonte: [MAHLE, 2012]

2.6.3. Desgaste generalizado na cabeça da válvula

Como nos tipos de falha apresentados anteriormente, este tipo de desgaste está relacionado a causas térmicas e o aspecto de desgaste na válvula apresentasse na região da cabeça e no assento. O desgaste está relacionado ao aumento da força de fechamento da válvula combinado com elevadas temperaturas de operação e pressão de combustão.

Pré-ignição, detonação, mistura pobre de combustível e relação inadequada de compressão são fatores que alteram e desgastam a cabeça da válvula (Figura 2.34).

Figura 2.34 - Desgaste na região da cabeça da válvula.

Fonte: [MAHLE, 2012]

Outros tipos de desgaste generalizados na região da cabeça da válvula podem ser devidos ao excesso de calor. A válvula apresenta desgaste na região do assento e estende-se para a região do raio. Excesso de calor localizado na região da cabeça, assim como a passagem de gases concentrada em um só ponto, provocando a desintegração da cabeça da válvula (Figura 2.35a).

A vedação irregular do assento da válvula com a sede do cabeçote se dá devido a resíduos de carbono gerados na combustão irregular (mistura pobre). Estes resíduos se alojam na região de sede (Figura 2.35b) e comprometem a vedação entre a válvula e a sede do cabeçote. Outro fator é a refrigeração deficiente devido à obstrução parcial dos dutos de arrefecimento do cabeçote. Consequentemente, a válvula será resfriada de forma inadequada. Podemos ainda considerar que a folga incorreta de regulagem é outro fator que compromete a vedação e vai propiciar o surgimento deste tipo de falha.

Figura 2.35 - Desgaste na região do assento da válvula a) desintegração localizada b) pontos de contaminação por resíduos de carbono.

Fonte: [MAHLE, 2012]

Válvulas com contaminação de óleo (Figura 2.36a), marcação de assentamento deslocado e excesso de carvão na base da válvula, são muitas dos tipos de irregularidades que podem se apresentar durante o funcionamento do motor. A marcação de assentamento irregular (Figura 2.36b) é devida à falta de perpendicularidade entre o centro da sede do cabeçote e o centro da guia de válvulas. Esta deficiência vai aumentar a pressão da válvula sobre a sede na região de maior inclinação e permitir a passagem de gases diminuindo a pressão. O excesso de carvão (Figura 2.36c) é proveniente da folga excessiva entre a guia de válvulas e a haste, de retentores danificados ou comprometidos, ou ainda da altura incorreta da guia em relação ao cabeçote.

Figura 2.36 - Irregularidades na válvula a) contaminação com óleo lubrificante b) faixa irregular de assentamento c) contaminação com excesso de carvão.

Fonte: [MAHLE, 2012]

2.6.4. *Valve recession*

O tipo de falha denominada “*valve recession*” (VR) pode ser definida como o desgaste excessivo na área de contato entre a válvula e a sede. As principais variáveis que podem gerar o VR no motor de combustão interna estão relacionadas à pressão e temperatura da combustão, além do tipo de combustível [Lewis e Dwyer-Joyce, 2002].

A Figura 2.37 [Lewis e Dwyer-Joyce, 2002; Hiruma e Furuham, 1978] apresenta um esquema característico do VR como tipo de falha no motor. A válvula depois de fechada sobre a superfície da sede no cabeçote perde a tolerância da montagem, causando com isto, um aumento na altura da haste em relação ao came, balancins e os outros elementos do trem de válvulas, transladando igualmente o problema para a parte superior do cabeçote.

Figura 2.37 - Valve Recession.

Fonte: [Lewis e Dwyer-Joyce, 2002; Hiruma e Furuham, 1978]

A alteração na superfície da válvula obstrui o fluxo dos gases, o qual ocasiona uma redução do desempenho no motor. Quando atingir um valor de 3 mm de recessão da válvula, este pode causar uma diminuição de 20% na potência de saída e 4 mm reduz em até 30% o desempenho do motor [Forsberg, 2013].

Araújo e colaboradores depois de comparar vários tipos de materiais tanto nas válvulas (admissão e escape) quanto nas sedes, utilizando um motor em dinamômetro para avaliar

a durabilidade e fadiga, encontraram uma combinação (Soft Valves Seat Insert (SVSI) + Bimetallic Valves Non superficial Treatment (BVNT)) na qual o fenômeno de valve recession apresentava valores de 4 mm (Figura 2.38) afetando o desempenho motor. Além desse par de materiais, a combinação (Hard Valve Seat Insert (HVSİ) + Bimetallic Valve Nitrited (BVT)) apresentou os menores resultados de VR ($> 0,05$ mm) quando realizados ensaios com E100 [Araujo et al., 2011].

Figura 2.38 - Comparação do efeito de VR entre gasolina (E00) e etanol (E100).

Fonte: [Araújo, 2011]

Estes resultados obtidos evidenciam uma maior severidade do fenômeno de VR nas válvulas de escape quando comparado com admissão e segundo o autor o etanol como combustível é o principal responsável desse fato nos ensaios e nas condições testadas [Araujo et al., 2011].

2.6.5. Falhas gerais produto da combustão

Quando a válvula não fecha corretamente na sede, a pressão de combustão diminui e os gases produto da combustão podem causar *Guttering* ou *Torching*.

O *guttering* é o desgaste causado pela alta temperatura como produto dos gases de combustão, o qual causa um processo corrosivo geralmente pela deposição de *flaking* na superfície (Figura 2.39a) [Brêda e Gomes]. Este tipo de falha pode ocasionar inicialmente um vazamento da compressão do cilindro, levando à diminuição de potência do motor.

Enquanto ao *torching* (*melting*), este tipo de falha acontece devido ao aumento rápido na temperatura da cabeça da válvula (Figura 2.39b) e apresentasse depois de poucos ciclos manifestando pré-ignição no motor.

Figura 2.39 - Falhas produto da combustão a) *guttering* b) *torching*.

Fonte: [Brêda e Gomes, 2001]

2.6.6. Tendências atuais sobre a abordagem de desgaste no sistema válvula-sede

Como reportado no mais recente artigo sobre válvulas, no qual tomando como referência dois cabeçotes, diferenciados pelo número de válvulas por cilindro, 8 e 16 respectivamente (Figura 2.40), foi realizada uma inspeção visual da superfície da válvula que se encontrava em contato com a sede instalada no cabeçote [Sinatora e Tanaka, 2014].

Figura 2.40 - Cabeçote a) 8 válvulas b) 16 válvulas.

Fonte: [Sinatora e Tanaka, 2014]

As válvulas de admissão de ambos os cabeçotes, apresentaram depósitos de lubrificante na superfície da cabeça, enquanto nas válvulas de escape foram cobertas por um depósito cinza provavelmente produto da combustão e parte de lubrificante (Figura 2.41).

Figura 2.41 - Válvulas de admissão e escape a) motor 8 válvulas b) motor 16 válvulas.

Fonte: [Sinatora e Tanaka, 2014]

Resumindo, a Tabela 2.5 apresenta os diferentes tipos de danos que ocorreram tanto nas válvulas de admissão como nas de escape, existindo, no entanto, alguns danos que ocorreram apenas numa das válvulas, como a oxidação que só foi observado nas válvulas de escape. Observou-se ainda que muitas válvulas apresentassem mais de um tipo de dano, como a ocorrência de depósitos, riscos e sulcos, observados na válvula de admissão do primeiro cilindro do motor de oito válvulas [Sinatora e Tanaka, 2014].

Tabela 2.5 - Danos superficiais observados na superfície de contato das válvulas de admissão e de escape.

Dano Morfológico	Motor 8 válvulas		Motor 16 válvulas	
	Admissão	Escape	Admissão	Escape
Desgaste na forma de canal		C4		
Desgaste na região central		C4		
Depósitos	C1; C2; C3; C4	C1		
Polimento	C1	C3	C2-4	C1-1; C4-8
Endentação	C1	C3	C1-8; C2-7; C4-2	C1-1; C2-3; C2-4; C3-8
Oxidação		C1; C2		C2-3; C3-6; C3-8
Riscos Circunferenciais		C4	C2-7; C3-16; C4-2	C4-8
Riscos Radiais	C1; C2; C3			C2-4
Sulcos Circunferenciais	C1; C2; C4	C1; C2; C4	C1-8	C2-3; C3-6; C3-8
Fissuras		C1		

Fonte: adaptado de [Sinatora e Tanaka, 2014]

2.6.7. Tendências atuais sobre motores

Os chamados motores do futuro são o produto das metas mais rígidas de eficiência energética, estabelecidas pela Inovar-Auto em 2012. A partir de Outubro de 2016, os veículos novos tem que atingir a meta de 11,04 km/l de consumo médio com etanol e 15,93 km/l com gasolina.

Injeção direta e turbocompressor já são realidade entre os veículos compactos nacionais, tudo para buscar motores que respondam mais rápido sem exigir que sejam elevados demais os giros. Ao invés de buscar a potência máxima ou andar em plena carga, os motoristas ficam a 3.000 rpm e 10% de acelerador.

A turbina do turbocompressor é acionada pelos gases da exaustão e empurra mais ar para as câmaras de combustão do motor, enriquecendo a mistura e desempenho. Com as novas tecnologias, as turbinas respondem mais rápido e são bem mais eficientes.

A injeção direta além de injetar diretamente o combustível na câmara de combustão, faz este com uma alta pressão, em torno de 250 Bar contra 4,2 Bar da injeção eletrônica. O etanol é pulverizado e entra em ignição mais facilmente dispensando o tanquinho de partida, usado convencionalmente nos veículos de motor *flex-fuel*. A melhor combinação é um motor com turbo e injeção direta.

Como o etanol tem uma capacidade antidetonante maior, quando comparado com a gasolina, aceita taxas de compressão e pressão do turbo maior, devido que a injeção não é feita no coletor de admissão como na eletrônica, a injeção do etanol é mais controlável e exige menos combustível.

Devido às tendências atuais de downsizing, injeção direta e utilização de turbos, a temperatura nas zonas de admissão, e principalmente de exaustão, está aumentando consideravelmente (de ≈ 750 para > 850 °C). Ensaios de dinamômetro realizados em 2003 e 2004, utilizando um motor de combustão interna da Fiat-GM 1.0L MPFI, 8V, SOHC com injeção eletrônica (GM) e depois com a instalação de um turbo-compressor GT14, mostraram que os valores de temperatura dos gases de escape na versão aspirado com gasolina, alcançou os 821,5 °C a 6.000 rpm, enquanto que na versão turbo-alimentado, a temperatura atingiu os 873,4 °C. Quando foi usado o álcool como combustível, os valores de temperatura obtidos foram menores do que com a gasolina, 792,8 °C na versão aspirado para 6.200 rpm e de 723,6 °C para turbinado a 6.351 rpm [Danulette E. et al, 2004].

Analisando estes valores e com as novas tendências em motores cada vez mais leves e com características de alto desempenho, fazem uso de elementos como turbo-compressor para atingir maiores potências. O uso de combustíveis com o álcool faz com que essas temperaturas dos gases de escape diminuam, mas fatores como o torque e a potência, sejam maiores quando comparado com a gasolina. Este aumento nos valores acarreta maiores solicitações mecânicas nos componentes do motor, principalmente na câmara de combustão, na qual encontram-se o pistão, os anéis, a camisa, as válvulas de admissão e de escape com as suas sedes. Estes últimos elementos, muito importantes para o controle de

fluxo dos gases tanto na entrada, quanto na saída, além da vedação da câmara de combustão mantendo um ótimo desempenho do motor.

Outra novidade no mercado Brasileiro são os motores tricilíndricos (3 cilindros), procurando diminuir em peso e ganhando em potência e eficiência. Um cilindro a menos (pistão-biela), como uma diminuição no tamanho do bloco, comando e virabrequim significa pelo menos 24 kg a menos e um aumento em torno aos 16% na eficiência do motor.

Comparando alguns modelos clássicos do mercado Brasileiro, existem veículos com motores 1.0 de 4 cilindros (aspirado) com uma potência de 80 cv a 6.400 rpm (5 marchas) e os novos com motores tricilíndricos 1.0 com 82 cv a 6.250 rpm (5 marchas), 1.0 com 80 cv a 6.200 rpm (6 marchas) e 1.0 com 85 cv a 6.500 rpm (5 marchas).

Além de motores de 3 cilindros, as novas tendências com turbo, o aumento da potência pode alcançar até 25 cv a mais do que o motor aspirado. Motores 1.0 (*flex-fuel*) turbo com 105 cv abastecido com etanol e 98 cv com gasolina. Uma autonomia de combustível de 8,2 km/l (etanol) e 11,6 km/l (gasolina) na cidade. Já na estrada os valores em torno de 10,1 e 14,3 km/l (etanol/gasolina). Outra das variações nos novos motores é o uso de 4 válvulas por cilindro (12 válvulas no total) e uma transmissão de 6 marchas, totalizando um veículo leve e compacto e transformando-se em um total desafio para as montadoras e todo o grupo de pessoas envolvidas no desenvolvimento dos carros, reforçando o dito anteriormente e ressaltando a importância de continuar pesquisando nas áreas nas quais os componentes do motor tem maiores solicitações e carregamentos termomecânicos

Na Europa, os motores turbinados são o 67% do mercado e já dominam os motores a gasolina, na América do Sul, são apenas o 17%, mas deve chegar a 24% até 2019. Já a China vai saltar de 23% para 41% no mesmo período.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste Capítulo é apresentada uma descrição dos procedimentos experimentais utilizados com o objetivo de avaliar o efeito da força e velocidade de ensaio em diferentes temperaturas para materiais tradicionais e novos materiais utilizados na fabricação de válvulas e sedes. O capítulo será dividido em duas partes, uma metodologia para os ensaios tribológicos e depois para a caracterização de válvulas e sedes.

3.1. ENSAIOS TRIBOLÓGICOS

Os ensaios tribológicos foram realizados utilizando um tribômetro SRV®4 de movimento alternativo (*reciprocating*) da marca *Optimol Instruments Prüftechnik GmbH*, na configuração esfera/plano, e instalado no Laboratório de Fenômenos de Superfícies (LFS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). O equipamento é mostrado na Figura 3.1, enquanto que um esquema da câmara de teste pode ser observado na Figura 3.2.

Figura 3.1 - Tribômetro SRV®4 de movimento alternativo.

Figura 3.2 - Esquema da câmara de teste do tribômetro SRV®4.

(1) bloco suporte; (2) disco de teste; (3) suporte da esfera de teste; (4) esfera de teste; (5) haste de movimento oscilatório; (6) haste do carregamento da força; (7) termopar; (8) resistência térmica.

[Adaptado de ASTM D7421, 2011]

O tribômetro SRV®4 permite conforme informações de catálogo controlar parâmetros como: temperatura (até 900 °C), carga (até 2.000 N), frequência (1 até 511 Hz) e amplitude de oscilação (até 5 mm) enquanto os ensaios são realizados. Além disso, os resultados fornecidos pelo equipamento para sua análise são: coeficiente de atrito, desgaste combinado (esfera/plano), e variações na umidade relativa e temperatura da câmara de teste.

A parte experimental foi dividida em três fases, para avaliar isoladamente o efeito das variáveis: temperatura, força e velocidade. Para as três variáveis de estudo, os ensaios foram realizados na condição sem lubrificante (a seco).

FASE I: Para se estudar o efeito da temperatura, os valores da frequência, amplitude e carga foram definidos conforme às condições do trabalho realizado pelo Stott [Stott, 2002] como apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros dos ensaios SRV®4 para o estudo da temperatura.

Material da esfera	Aço AISI 52100
Material do disco	Aço AISI H13
Pré-carga	10 N por 30 s
Carga	15 N
Frequência	8 Hz
Amplitude	2,5 mm
Tempo	1.800 s (30 min) 14.400 s (4 h) 28.800 s (8 h) 54.000 s (15 h)
Temperatura	25 - 500 °C

FASE 2: Nesta fase, foram realizados ensaios para se estudar o efeito da carga com distintos materiais (aços e ligas intermetálicas de Nb), mantendo os parâmetros apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Parâmetros dos ensaios SRV®4 para o estudo da carga.

Material da esfera	Aço AISI 52100	Nomenclatura
Materiais do disco	Aço AISI H13	H13
	Aço AISI M2-1	M2-1
	Aço AISI M2-2	M2-2
	Fe ₃ Al-NbC	SC
	NbC-12Co	RX
	Hot Pressed NbC	RE
	NbC _{0,88} -12Co	SE
	NbC-12Fe ₃ Al	RY
	Nb ₂ O ₅	SD
Pré-carga	10 N por 30 s (15 N)	
Frequência	40 Hz	

Amplitude	2,0 mm
Tempo	2.700 s (45 min)
Temperatura	25 °C
Carga	15 - 600 N

FASE 3: Para se estudar o efeito da velocidade foram realizados ensaios com os valores da temperatura, amplitude e carga conforme apresentado na Tabela 3.3. Uma segunda série de ensaios foram realizados com o objetivo de manter a mesma distância percorrida, segundo o apresentado na Tabela 3.4 e Tabela 3.5.

Tabela 3.3 - Parâmetros dos ensaios SRV®4 para o estudo da velocidade.

Material da esfera	Aço AISI 52100
Material do disco	Aço AISI H13
Temperatura	25 °C
Amplitude	2 mm
Pré-carga	50 N por 30 s
Carga	100 N
Tempo	1.350 e 2.700 s (23 e 45 min)
Frequência	4 - 80 Hz

Tabela 3.4 - Parâmetros dos ensaios SRV®4 para o estudo da velocidade (distância percorrida igual).

Material da esfera	Aço AISI 52100
Material do disco	Aço AISI H13
Temperatura	25 °C
Amplitude	2 mm
Pré-carga	50 N por 30 s
Carga	100 N
Frequência - Tempo	(Hz - min) 4 - 40 20 - 8 40 - 4 80 - 2

Tabela 3.5 - Parâmetros dos ensaios SRV®4 para o estudo da velocidade com 4 e 80 Hz.

Material da esfera	Aço AISI 52100
Materiais do disco	Aço AISI M2-1 e M2-2
Temperatura	25 °C
Amplitude	2 mm
Pré-carga	50 N por 30 s
Carga	100 N
Tempo	1.350 e 2.700 s (23 e 45 min)
Frequência	4 e 80 Hz

O coeficiente de atrito e a taxa de desgaste foram medidos para determinar o comportamento do par esfera-disco em função das variáveis deste estudo. O desgaste foi medido pela perda de massa tanto no disco quanto na esfera. Antes e após a realização dos ensaios, os corpos de prova foram lavados utilizando um banho de álcool anidro 99,5 GL (etanol) com ultrassom por 10 min, secos com ar comprimido e pesados numa balança de precisão (Mettler Toledo, modelo: XP 205) com resolução de 0,01 mg. A perda de massa foi calculada pela diferença entre as massas do corpo de prova antes e depois do ensaio.

Os mecanismos de desgaste de cada par esfera-disco foram analisados utilizando as técnicas de Microscopia Óptica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS), Perfilometria Óptica 3D e Espectroscopia RAMAN nas marcas superficiais geradas nos ensaios.

3.2. MATERIAIS

Para os ensaios tribológicos foram padronizados o formato e a geometria das amostras. O disco tem diâmetro de 24 mm e 7,9 mm de espessura, já a esfera tem 10 mm de diâmetro, como apresentado na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Disco e esfera utilizados como corpos de prova.

3.2.1. Materiais modelo

Os materiais utilizados como modelo nos ensaios tribológicos, a composição química básica desses materiais e algumas características estão indicadas nas Tabela 3.2 e Tabela 3.3 apresentadas a seguir:

Tabela 3.2 - Materiais modelo para ensaios tribológicos.

Material	Dureza (HV ₃₀)	Acabamento	Dimensões (mm)
AISI 52100	772 ± 10	-	Ø 10
AISI H13	610 ± 10	Retificado	Ø 24 x 7,9
AISI M2-1	448 ± 13	Retificado	Ø 24 x 7,9
AISI M2-2	650 ± 30	Retificado	Ø 24 x 7,9

Tabela 3.3 - Composição química nominal (% em peso) dos materiais modelo.

Elemento	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W
AISI 52100	1,00	0,25	0,35	1,45	-	-	-
AISI H13	0,40	1,00	0,35	5,20	1,50	0,90	-
AISI M2	0,89	-	-	-	4,90	1,80	6,20

[Villares Metals, 2016]

As Figuras 3.4 até 3.7 apresentam as microestruturas obtidas por MEV dos materiais modelo. Na Figura 3.4, pode-se observar a microestrutura do aço martensítico AISI 52100, utilizado como contracorpo (esfera) nos ensaios tribológicos.

Figura 3.4 - Microestrutura do aço martensítico AISI 52100.

Observa-se uma microestrutura constituída por uma matriz de martensita revenida com precipitados dispersos, possivelmente carbonetos de cromo.

A microestrutura para os três materiais utilizados como corpo (disco) nos ensaios tribológicos é apresentada nas Figuras 3.5, para o aço AISI H13 com uma microestrutura constituída por martensita revenida e 3.6 e 3.7, para o aço AISI M2 nas duas distintas classificações, AISI M2-1 e AISI M2-2.

Figura 3.5 - Microestrutura do aço AISI H13.

O aço AISI M2, nas duas condições de dureza, foi fornecido pela empresa Villares Metals. O aço AISI M2-1 foi obtido após o processo de fusão a vácuo têmpera após austenitização na temperatura de 1040 °C durante 20 min e com um ciclo térmico realizado em três fases de revenimento a 560, 620 e 630 °C a cada duas horas respectivamente, obtendo um valor de dureza superficial de 45 HRC (446 HV).

Figura 3.6 - Microestrutura do aço AISI M2-1.

O aço AISI M2-2 foi obtido após o processo de vácuo têmpera em uma temperatura de 1040 °C durante 20 min e com um ciclo térmico realizado em três fases de revenimento a

560 °C e duas horas respectivamente, obtendo um valor de dureza superficial entre 55-58 HRC (613 HV).

Figura 3.7 - Microestrutura do aço AISI M2-2.

3.2.2. Ligas intermetálicas

Além dos ensaios com materiais modelo e aplicações em válvulas de motores de combustão interna, foram realizados ensaios tribológicos com ligas intermetálicas de nióbio sinterizadas, usando disco de 24 mm de diâmetro e 7,9 mm de espessura (Figura 3.8), já o contracorpo (esfera) foi de aço AISI 52100 de 10 mm de diâmetro.

Figura 3.8 - Disco da liga intermetálica de NbC-12Fe₃Al.

As ligas intermetálicas de nióbio sinterizadas utilizadas nos ensaios tribológicos, a composição química básica desses materiais e algumas características estão indicadas na Tabela 3.4 apresentada a seguir:

Tabela 3.4 - Ligas intermetálicas para ensaios tribológicos.

Material	Processo	Dureza (HV _{0.2})
Fe ₃ Al-NbC	SPS	-
NbC-12Fe ₃ Al T	SPS	1.632 ± 50
NbC-12Co T	SPS	1.463 ± 41
Hot Pressed NbC	-	-
Nb ₂ O ₅	SPS	643 ± 30
Nb _{0.88} -12Co HI	SPS	1.646 ± 30

As Figuras 3.9 e 3.10 apresentam as microestruturas obtidas por MEV de dois dos materiais denominados ligas intermetálicas de Nióbio que foram ensaiadas. Observa-se as microestruturas das ligas NbC-12Fe₃Al T e NbC-12Co T obtidas por SPS (Spark Plasma Sintering) com as condições de 1.300 °C e 1.280 °C por 4 min e 30 MPa respectivamente.

Figura 3.9 - Microestrutura da liga intermetálica sinterizada NbC-12Fe₃Al.

Fonte: [BAM, 2014]

Figura 3.10 - Microestrutura da liga intermetálica sinterizada NbC-12Co.

Fonte: [BAM, 2014]

3.3. CARACTERIZAÇÃO DE VÁLVULAS E SEDES DE VÁLVULA

3.3.1. Materiais

Motores distintos foram recebidos para análise dos mecanismos de desgaste das válvulas e sedes de válvulas após uso em diferentes condições de serviço. O Motor MT-1, 4 cilindros com 8 válvulas, 1.4L, foi testado em um veículo de passeio em teste de estrada para o sistema de injeção de combustível com etanol E95H. Já o motor MT-2, 4 cilindros com 8 válvulas, 1.6L, foi testado em dinamômetro e submetido a um ciclo de choque térmico com etanol E95H como combustível por um período de 200 h. O ciclo de rodagem consistiu na variação da rotação do motor da condição de marcha lenta à de rotação máxima, assim como variação da carga aplicada de 0% a 100%. A temperatura da água do motor foi controlada entre 40 e 100 °C, de acordo com o ciclo de ensaio.

3.3.2. Metodologia para caracterização

Para a caracterização das válvulas e sedes de válvula dos distintos motores analisados, foram realizadas as seguintes atividades:

- Desmontagem das válvulas do cabeçote depois de recebido pela montadora. Na Figura 3.11, pode-se observar um dos cabeçotes que foi analisado e suas respectivas válvulas de admissão e escape;

Figura 3.11 - a) Cabeçote de motor *flex-fuel* 8V - 1.6L b) válvulas de admissão e escape.

- Corte do cabeçote em seções menores usando uma serra de fita horizontal (FRANHO SF-250) e a máquina de corte (DISCOTOM-65 marca STRUERS) para retirar as sedes de válvula (Figura 3.12);

Figura 3.12 - Cabeçote de motor *flex-fuel* 8V - 1.6L. a) serra de fita horizontal b) máquina de corte.

- Corte das hastes das válvulas (Figura 3.13) usando a máquina de corte (DISCOTOM-65 marca STRUERS) para posterior análise na região da cabeça;

Figura 3.13 - Corte das válvulas de motor *flex-fuel* 8V - 1.6L. a) admissão b) escape.

- Análise da superfície de contato entre ambas as válvulas e sedes de válvula no perfilômetro óptico 3D sem contato (CCI MP- Taylor Hobson), utilizando o software Talysurf e Talymap próprios da marca (Figura 3.14);

Figura 3.14 - Perfilômetro óptico 3D CCI – MP.

- Corte de uma seção da válvula e sede de válvula na máquina de corte (ISOMET 5000 marca BUEHLER) para embutir na baquelite em pó, usando a embutidora (SIMPLIMET 3000 marca BUEHLER) como apresentado na Figura 3.15;

Figura 3.15 - Embutidora SIMPLIMET 3000.

- Polimento das superfícies nas amostras embutidas, utilizando a máquina automática (TegraPol-25 marca STRUERS) apresentada na Figura 3.16;

Figura 3.16 - Máquina para polimento automático.

- Medir dureza Vickers das superfícies na escala macro e micro, utilizando os durômetros (Figura 3.17) da referência (BUEHLER Model 1900-2100) e (BUEHLER Model 1600-6306) respectivamente;

Figura 3.17 - Durômetros BUEHLER.

- Ataque químico das superfícies polidas (Figura 3.18) com Nital 3% por 15 s para revelar a matriz martensítica (válvulas de admissão), Amberger (150 ml de água deionizada, 150 g de sulfato de cobre, 325 ml de ácido clorídrico 32%, 485 ml de etanol) ou ácido oxálico por 15 s para revelar a matriz austenítica (válvulas de escape). No caso das sedes de válvula foi utilizado o Nital 3% por 15 s para revelar a sua microestrutura;

Figura 3.18 - Seção transversal das válvulas de admissão e escape polidas.

- Imagens no Microscópio Óptico (OLYMPUS BX60M) utilizando o software LAS V4.2 (LEICA APPLICATION SUITE) e na Lupa Estereoscópica (STEREO MICROSCOPE SMZ800) com a câmera (NIKON DXM 1200F) no software ACT-1 (NIKON), como apresentadas nas Figuras 3.19 e 3.20;

Figura 3.19 - Lupa Estereoscópica (STEREO MICROSCOPE SMZ800).

Figura 3.20 - Microscópio Óptico (OLYMPUS BX60M).

- Análises das superfícies das válvulas e sedes de válvula no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) (PHILIPS XL30 & JEOL JSM-6010 LA), este último apresentado na Figura 3.21;

Figura 3.21 - Microscópio eletrônico de varredura (JEOL JSM-6010 LA).

- Análise da superfície de contato entre ambas as válvulas e sedes de válvula usando o Espectrômetro RAMAN (Xplora – Horiba Scientific) apresentada na Figura 3.22.

Figura 3.22 - Espectrômetro RAMAN (Xplora – Horiba Scientific).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo são apresentados e discutidos os resultados de atrito e desgaste em função da temperatura, frequência e carga separadamente.

4.1. EFEITO DA TEMPERATURA

4.1.1. Atrito e desgaste para AISI 52100 - AISI H13

Na Figura 4.1 são apresentados os resultados típicos de coeficiente de atrito em função do tempo para ensaios de 1800 s (30 min) em duas das temperaturas.

Figura 4.1 - Coeficiente de atrito em função do tempo para a) 200 °C b) 500 °C.

Para os ensaios realizados a 200 °C os valores de coeficiente de atrito apresentam oscilações até aproximadamente 300 s estabilizando-se a seguir e convergindo nas três repetições para valores próximos a 0,72. Para os ensaios realizados a 500 °C os valores de coeficiente de atrito exibem um período no qual o valor oscila menos do que nos ensaios a 200 °C. Entretanto as diferenças entre repetições são maiores e os valores no final do período de ensaio ficaram entre 0,71 e 0,67.

A Figura 4.2 apresenta os coeficientes de atrito médio em função da temperatura e seu desvio padrão após realizar três ensaios de cada condição.

Figura 4.2 - Variação do coeficiente de atrito médio em função da temperatura após 30 min.

O coeficiente de atrito aumenta de aproximadamente 0,46 para 0,80 quando a temperatura de ensaio passou da temperatura ambiente para 100 °C. O valor do coeficiente de atrito cai até 500 °C com um máximo relativo na temperatura de 350 °C.

Na Figura 4.3 são apresentados os valores de perda de massa obtidos após 30 min para três repetições em cada condição para a esfera e para o disco.

Figura 4.3 - Perda de massa em função da temperatura após 30 min para cada condição testada.

Para melhor visualização e interpretação das perdas de massa obtidas, é apresentada a Figura 4.4 em que pode se observar o comportamento da perda de massa com o aumento

da temperatura até 500 °C para os corpos de prova. Nota-se que a esfera e o disco perdem massa até cerca de 300 °C. Para temperaturas superiores a 350 °C os valores de perda de massa do disco são negativos, isto é, ocorre ganho de massa no disco sendo que o maior valor de ganho de massa ocorreu a 500 °C. Para a esfera os valores de perda de massa oscilam e são pequenos até 300 °C. Acima desta temperatura os valores de perda de massa aumentam progressivamente até 500 °C.

Figura 4.4 - Variação da perda de massa em função da temperatura após 30 min.

Nos ensaios de 30 min para o par tribológico estudado (AISI 52100 - AISI H13), encontraram-se três (3) mudanças significativas no comportamento do coeficiente de atrito médio e os valores obtidos de perda de massa para ambos os corpos de prova.

No intervalo entre a temperatura ambiente e 100 °C, tanto o coeficiente de atrito médio como o desgaste de ambos os corpos de prova aumentaram, logo depois na faixa entre 100 e 250 °C houve uma diminuição no valor médio do coeficiente de atrito e na perda de massa do material da esfera, e consequentemente um aumento na perda de massa do material do disco, a qual possivelmente é transferida para a esfera. Entre 250 e 500 °C houve uma inversão nos comportamentos da perda de massa para ambos os materiais, já o disco teve uma perda de massa negativa (ganho de massa) acima de 350 °C produto da formação de um filme de óxido em toda a sua superfície, enquanto que a esfera passou a ter uma maior perda de massa.

Para os materiais relacionados na Figura 4.4, observou-se uma mudança na cor da superfície após os ensaios, indicando possivelmente a formação de um filme de óxido na superfície como observado por Stott [Stott, 2002]. A Figura 4.5 apresenta os corpos de prova depois dos ensaios para três temperaturas nos quais podem ser observadas as mudanças na cor mencionadas anteriormente.

Figura 4.5 - Variação na cor dos corpos de prova após 30 min. a) 25 °C b) 300 °C c) 350 °C.

Na Figura 4.6 mostram-se as marcas de desgaste obtidas no MEV após 30 min de ensaio na temperatura de 25 e 400 °C. É possível perceber que a 25 °C o mecanismo atuante é abrasão. A 400 °C o principal mecanismo atuante é oxidação. Deste modo, a mudança de tamanho da marca de desgaste e de mecanismos de desgaste atuando durante o ensaio explica o aumento de perda de massa entre os ensaios realizados a 25 °C e os realizados a 400 °C.

Figura 4.6 - Imagens obtidas no MEV das superfícies desgastadas para 25 e 400 °C.

Prosseguindo com o entendimento do efeito da temperatura no coeficiente de atrito e na taxa de desgaste, são apresentadas as Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 em que são relacionadas variações do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio, quando aumentado para 4, 8 e 15 h como proposto por Stott [Stott, 2002].

Nota-se que na Figura 4.7a o coeficiente de atrito apresenta para o mesmo ensaio dois regimes diferentes ao longo das quatro horas, o primeiro regime e com maior variação permanece até aproximadamente 4.000 s, após este tempo um segundo regime aparece, constante até o final. A mudança de regime no coeficiente de atrito pode ser devida as alterações nas superfícies causado pela alta temperatura e possivelmente à formação de filmes de óxido [Pauschitz et al., 2008; Stott, 2002; Wang et al., 1996; Ootani et al., 1995].

Na Figura 4.7b são apresentados os valores de coeficiente de atrito obtidos para as diferentes temperaturas após três repetições. Observa-se que para 500 °C foram registrados dois valores de coeficiente de atrito, o mais elevado é o valor médio dos coeficientes de atrito na região de maior amplitude e o segundo valor é a média das medidas na região na qual o coeficiente de atrito é aproximadamente constante e tem menor oscilação em torno do valor médio.

Figura 4.7 - Coeficiente de atrito para 4 h a) 500 °C b) atrito médio em função da temperatura.

Para os ensaios de 8 h (Figura 4.8), apresenta-se o mesmo fenômeno que para 500 °C e 4 h da Figura 4.7, ou seja, existem dois regimes de atrito. Ocorreu a mudança de regime no coeficiente de atrito para a temperatura de 350 °C em aproximadamente 16.800 s. Estas variações são sujeitas à explicação dada nos trabalhos antes mencionados.

Figura 4.8 - Coeficiente de atrito para 8 h a) 350 °C b) atrito médio em função da temperatura.

Assim como as variações no coeficiente de atrito, a perda de massa dos corpos de prova também foi medida. Na Figura 4.9 são apresentados os valores obtidos em cada condição testada quando aumentado o tempo para 8 e 15 h.

Figura 4.9 - Variação da perda de massa em função da temperatura para 8 e 15 h.

Como nos ensaios de 30 min (Figura 4.4), em que foram obtidos valores de perda de massa do disco negativos (ganho de massa) a partir de 350 °C, na Figura 4.9 aconteceu o mesmo fenômeno quando aumentado o tempo de ensaio para 8 e 15 h. Observa-se que a proporção no tamanho das barras que representam o disco para 350 e 500 °C é aproximadamente igual, e pode ser entendido que o ganho de massa na superfície do disco não variou com o aumento do tempo. No caso da esfera, houve uma diminuição nas perdas de massa em torno de 50% quando aumentado o tempo de 8 para 15 h.

Essas variações nos valores de perda de massa podem ter ocorrido pela possível mudança nos mecanismos de desgaste e pela influência da temperatura na superfície, formando um filme ou camada de óxido que permaneceu estável durante o ensaio, protegendo-a e ajudando na diminuição do coeficiente de atrito.

Na Figura 4.10 são apresentadas as marcas de desgaste obtidas no MO após 8 h, nas quais é possível observar as diferenças tanto no disco quanto na esfera para 100 °C.

Figura 4.10 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas 100 °C.

a) AISI 52100 (esfera) b) AISI H13 (disco).

Nas Figuras 4.11 e 4.12 são apresentadas as imagens obtidas de MEV para a superfície desgastada da esfera de aço AISI 52100 e do disco de aço AISI H13 para 100 °C. As marcas de desgaste obtidas apresentaram uma região central com a combinação de riscos e regiões escuras, e uma segunda região nas bordas laterais contendo uma superfície mais lisa e limpa (região polida). Neste caso é possível perceber que houve uma perda de massa de ambos os corpos sendo coerente com o resultado apresentado na Figura 4.9a.

Figura 4.11 - Imagens obtidas por MEV da superfície desgastada da esfera de aço AISI 52100 para 100 °C. a) detector SE b) detector BSE.

Figura 4.12 - Imagens obtidas por MEV da superfície desgastada do disco de aço AISI H13 para 100 °C.

a) detector SE b) detector BSE.

Uma análise mais detalhada usando o EDS em algumas regiões da marca de desgaste no disco de aço AISI H13 (Figura 4.13a), mostrou no ponto 001 (região escura) a presença de C, Fe, Si, Cr, V e Mn como elementos principais do aço AISI H13. Além destes elementos, encontrou-se a presença do O (Figura 4.13b), levando a se considerar a formação de óxidos na superfície.

Figura 4.13 - a) Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de aço AISI H13 para 100 °C.

b) Espectro obtido utilizando EDS no ponto 001 (região escura).

Uma análise de espectroscopia Raman (Figura 4.14) realizada na região escura da Figura 4.13a (disco de aço AISI H13), apresentou os picos característicos de magnetita (Fe_3O_4) ao redor de 670 cm^{-1} e da hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) em 223, 289, 404 e 1310 cm^{-1} conforme foi apresentado pelo CHICOT, et al., 2011.

Figura 4.14 - Espectro obtido na superfície desgastada o disco de aço AISI H13 para $100\text{ }^\circ\text{C}$.

A baixa intensidade destes picos no espectro Raman (Figura 4.14) realizada na região escura do disco de aço AISI H13, mostrou uma combinação dos óxidos magnetita e hematita quando analisada a superfície após 8 h e $100\text{ }^\circ\text{C}$.

Na Figura 4.15 são apresentadas as marcas de desgaste obtidas no MO após 8 h, nas quais é possível observar as diferenças tanto no disco quanto na esfera para $350\text{ }^\circ\text{C}$.

Figura 4.15 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas $350\text{ }^\circ\text{C}$.

a) AISI 52100 (esfera) b) AISI H13 (disco).

Imagens obtidas no MEV para a superfície desgastada da esfera de aço AISI 52100 e do disco de aço AISI H13 para 350 °C são apresentadas nas Figuras 4.16 e 4.17. As marcas de desgaste obtidas na esfera (Figura 4.16) apresentaram em toda a sua área uma combinação de riscos na direção do deslizamento e regiões escuras setorizadas. Neste caso é possível perceber que houve uma perda de massa da esfera sendo coerente com o resultado apresentado na Figura 4.9a.

Figura 4.16 - Imagens obtidas por MEV da superfície desgastada da esfera de aço AISI 52100 para 350 °C. a) detector SE b) detector BSE.

Já no caso do disco de aço AISI H13, as imagens obtidas no MEV (Figura 4.17) para 350 °C apresentaram uma região central com acúmulo de material (depósito) e nas bordas laterais, uma combinação de riscos na direção do deslizamento e acúmulo de material em menor proporção quando comparado com a região central. Neste caso é possível perceber que não houve uma perda de massa do disco sendo coerente com o resultado apresentado na Figura 4.9a, no qual pode se perceber um ganho de massa na superfície do disco de aço AISI H13.

Figura 4.17 - Imagens obtidas por MEV da superfície desgastada do disco de aço AISI H13 para 350 °C.

a) detector SE b) detector BSE

Uma análise usando o EDS em algumas regiões da marca de desgaste no disco de aço AISI H13 (Figura 4.18a), mostrou no ponto 001 (região escura) a presença de Fe e Cr como elementos principais do aço AISI H13 e da esfera de aço AISI 52100. Além destes elementos, encontrou-se a presença do O (Figura 4.18b), levando a se considerar a formação de óxidos na superfície.

Figura 4.18 - a) Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de aço AISI H13 para 100 °C.

b) espectro obtido utilizando EDS no ponto 001 (região escura).

Uma análise de espectroscopia Raman (Figura 4.19) realizada na região escura da Figura 4.18a (disco de aço AISI H13), apresentou os picos característicos de magnetita (Fe_3O_4) ao redor de 670 cm^{-1} e da hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) em 223, 289, 404 e 1310 cm^{-1} conforme foi apresentado pelo CHICOT, et al., 2011. Esta informação obtida corrobora o indicio da formação de óxido na superfície do disco, além de mostrar que existe uma combinação entre hematita e magnetita.

Figura 4.19 - Espectro obtido na superfície desgastada o disco de aço AISI H13 para $350\text{ }^\circ\text{C}$.

No caso dos ensaios de 8h e $400\text{ }^\circ\text{C}$, as marcas de desgaste obtidas no MO são apresentadas na Figura 4.20.

Figura 4.20 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas $400\text{ }^\circ\text{C}$.

a) AISI 52100 (esfera) b) AISI H13 (disco).

Imagens obtidas no MEV para a superfície desgastada da esfera de aço AISI 52100 e do disco de aço AISI H13 para 350 °C são apresentadas nas Figuras 4.21 e 4.22. Da mesma forma que para 350 °C, as marcas de desgaste obtidas na esfera (Figura 4.21) apresentaram em toda a sua área uma combinação de riscos na direção do deslizamento e regiões escuras setorizadas.

Figura 4.21 - Imagens obtidas por MEV da superfície desgastada da esfera de aço AISI 52100 para 400 °C. a) detector SE b) detector BSE.

Para o disco de aço AISI H13, as imagens obtidas no MEV (Figura 4.22) para 400 °C apresentaram uma região central com acúmulo de material (depósito) e nas bordas laterais, uma combinação de riscos na direção do deslizamento e acúmulo de material.

Figura 4.22 - Imagens obtidas por MEV da superfície desgastada do disco de aço AISI H13 para 400 °C. a) detector SE b) detector BSE.

Uma análise de EDS na marca de desgaste do disco de aço AISI H13 (Figura 4.23a), mostrou no ponto 001 (região escura) a presença de Fe, Si e Cr como elementos principais do aço AISI H13 e da esfera de aço AISI 52100. Além destes elementos, encontrou-se a

presença do O (Figura 4.23b), levando a se considerar a formação de óxidos na superfície, da mesma forma que para 350 °C.

Figura 4.23 - a) Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de aço AISI H13 para 100 °C.

b) espectro obtido utilizando EDS no ponto 001 (região escura).

A análise de espectroscopia Raman (Figura 4.24) realizada na região escura da Figura 4.23a (disco de aço AISI H13), apresentou novamente os picos característicos de magnetita (Fe_3O_4) ao redor de 670 cm^{-1} e da hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) em 223, 289, 404 e 1310 cm^{-1} .

Figura 4.24 - Espectro obtido na superfície desgastada o disco de aço AISI H13 para 400 °C.

Na Figura 4.25 são apresentadas as marcas de desgaste obtidas no MO após 8 h, nas quais é possível observar as diferenças tanto no disco quanto na esfera para 500 °C.

Figura 4.25 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas 500 °C.

a) AISI 52100 (esfera) b) AISI H13 (disco).

Imagens obtidas no MEV para a superfície desgastada da esfera de aço AISI 52100 e do disco de aço AISI H13 para 500 °C são apresentadas nas Figuras 4.26 e 4.27. As marcas de desgaste obtidas na esfera (Figura 4.26) apresentaram em toda a sua área uma combinação de riscos na direção do deslizamento e regiões escuras setorizadas. Mais uma vez, é possível perceber que houve uma perda de massa da esfera, resultado coerente com o apresentado na Figura 4.9a.

Figura 4.26 - Imagens obtidas por MEV da superfície desgastada da esfera de aço AISI 52100 para 500 °C. a) detector SE b) detector BSE.

Para o disco de aço AISI H13 na temperatura de 500 °C foram obtidas as imagens no MEV (Figura 4.27) nas quais apresentaram na superfície desgastada uma região com acúmulo de material (depósito) na totalidade da área.

Figura 4.27 - Imagens obtidas por MEV da superfície desgastada do disco de aço AISI H13 para 500 °C. a) detector SE b) detector BSE.

Uma análise de EDS na marca de desgaste do disco de aço AISI H13 (Figura 4.28a), mostrou no ponto 001 (região escura) a presença de Fe, Si, V, Mo e Cr como elementos principais do aço AISI H13. Neste caso houve uma diferença com os outros espectros obtidos de EDS e foi o fato de não aparecer a presença do O (Figura 4.28b), para confirmar que houve oxidação na superfície desgastada do disco. Embora este resultado não haja sido obtido, a espectroscopia Raman no ponto 001 (Figura 4.29) mostrou que houve oxidação e confirmou a presença de magnetita e hematita na superfície do disco.

Figura 4.28 - a) Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de aço AISI H13 para 500 °C.

b) espectro obtido utilizando EDS no ponto 001 (região escura).

A análise de espectroscopia Raman realizada na região escura da Figura 4.28a (disco de aço AISI H13), apresentou novamente os picos característicos de magnetita (Fe_3O_4) ao redor de 670 cm^{-1} e da hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) em 223, 289, 404 e 1310 cm^{-1} .

Figura 4.29 - Espectro obtido na superfície desgastada o disco de aço AISI H13 para 500 °C.

Quando comparados todos os resultados de coeficiente de atrito e perda de massa do par AISI 52100 - AISI H13 nas distintas temperaturas, podem se inferir sobre o seu comportamento tribológico usando um tribômetro SRV®4 de movimento alternativo (*reciprocating*) as seguintes observações baseado no trabalho do Stott:

30 min de ensaio não é tempo suficiente para obter um comportamento no coeficiente de atrito como o observado na Figura 2.24, no qual é possível perceber dois regimes de atrito, mas é tempo para verificar que houve um ganho de massa do disco de aço AISI H13 (perda de massa negativa) acima de 350 °C, enquanto que para o aço AISI 52100, a perda de massa continua aumentando com o aumento da temperatura.

Os ensaios de 4 h mostraram para a temperatura de 500 °C um comportamento no coeficiente de atrito similar (dois regimes de atrito) ao observado pelo Stott (Figura 4.7a), e uma variação do valor médio de 0,68 para 0,52 em torno de 4.000 s, sendo que neste caso o par tribológico era o aço AISI 52100 (esfera) e o aço AISI H13 (disco) e na referência citada, o Nimonic 75 em ambos os corpos. Já para 350 °C e temperaturas menores houve um só regime de atrito ao longo do tempo de ensaio (Figura 4.7b).

Quando realizados ensaios de 8 e 15 h encontrou-se que para a temperatura de 350 °C já acontecia o mesmo fenômeno com dois regimes no comportamento do coeficiente de atrito com um tempo aproximado de 16.800 s, com uma variação do valor médio entre 0,72 e 0,47 (Figura 4.8a). Já para 400 e 500 °C houve o mesmo comportamento, mas em tempos bem menores, em torno de 7.000 e 3.600 s respectivamente. Estes resultados confirmam o apresentado pelo Stott [Stott, 2002], mostrando que existe um tempo no qual o regime de atrito muda possivelmente pela formação de filmes de óxido e manifestando-se com uma diminuição no coeficiente de atrito, além disso, quanto maior a temperatura de ensaio, menor o tempo para a mudança acontecer como apresentado na Figura 2.24.

O aço AISI 52100, material da esfera, sempre apresentou um aumento na perda de massa para os distintos tempos de ensaio, mudando os valores entre uma ordem de grandeza de 10^{-5} em temperatura ambiente e 100 °C para 10^{-2} nas temperaturas maiores de 350, 400 e 500 °C. Já o material do disco, o aço AISI H13, até a temperatura de 300 °C

sempre apresentou uma perda de massa positiva, e para 350, 400 e 500° C, houve uma perda de massa negativa (ganho de massa) com a particularidade que independente do tempo de ensaio, o ganho aumenta com a temperatura como apresentado nas Figuras 4.4, 4.9a e 4.9b.

Enquanto aos mecanismos de desgaste foram encontrados abrasão em forma de riscos, possivelmente produto das partículas de *debris* durante o ensaio como observado nas imagens de MO e MEV tanto da esfera quanto do disco; adesão como formação de camadas aderidas na superfície desgastada tanto na marca do disco (Figura 4.30a), quanto nos riscos observados nas distintas esferas como apresentado na Figura 4.30b. Outro fato sobre os mecanismos de desgaste é que não foi observada a transferência de material pela análise de EDS entre o par tribológico AISI 52100-AISI H13, provavelmente pela similaridade entre os elementos de liga dos aços em estudo, variando unicamente no Mo e V como elementos adicionais do disco de aço AISI H13.

Figura 4.30 - Imagens obtidas no MEV da marca de desgaste para 8 h e 400 °C.

a) disco de aço AISI H13 b) esfera de aço AISI 52100.

As análises de EDS em todos os casos apresentaram, exceto para 500 °C a presença do O nas regiões escuras confirmando que houve oxidação nas marcas de desgaste atuando como mecanismo de proteção e ajudando, no caso do disco em preservar a superfície e diminuindo o valor do coeficiente de atrito após um tempo de estabilização com descrito pelo Stott. [Stott, 2002].

Análises de espectroscopia Raman nas regiões escuras das marcas de desgaste do disco de aço AISI H13, apresentaram picos característicos de magnetita (Fe_3O_4) e de hematita

(α -Fe₂O₃) quando realizados os ensaios com temperaturas de 350, 400 e 500 °C. No caso de temperaturas menores (100 °C), encontrou-se um pequeno sinal com maior dificuldade do que nas temperaturas maiores. Estes filmes de óxido também foram reportados em outros trabalhos realizados com a variação de temperatura em distintos tipos de materiais [Pauschitz et al., 2008; Stott, 2002; Wang et al., 1996; Ootani et al., 1995].

Outro fato observado na superfície do disco de aço AISI H13, foi que não houve variação significativa na dureza do material. Foi reportada uma dureza média do disco de 610 HV₃₀ e após realizar os ensaios nas distintas temperaturas durante 8 h, os valores de dureza se mantiveram no mesmo padrão para o material sem uso, atingindo um valor médio em torno de $595,2 \pm 13,7$ HV₃₀ na parte externa da marca de desgaste (Figura 4.31) e de $582,5 \pm 17,4$ HV₃₀ (Tabela 4.1) na superfície da marca de desgaste, diminuído 2,4 e 4,5% respectivamente.

Figura 4.31 - Imagens obtidas no MO da marca de desgaste do disco de aço AISI H13 após 8 h.

a) 100 °C b) 350 °C c) 400 °C d) 500 °C

Tabela 4.1 - Dureza do aço AISI H13 após 8 h de ensaio no tribômetro SRV.

Temperatura	100 °C	350 °C	400 °C	500 °C	Dureza HV₃₀
Dureza HV₃₀ (Superfície)	599.6 ± 10.9	611.9 ± 5.7	589.3 ± 22.7	580.0 ± 17.8	595.2 ± 13.7
Dureza HV₃₀ (marca)	603.3 ± 2.3	561.3 ± 35.3	578.9 ± 27.9	586.5 ± 14.0	582.5 ± 17.4

O objetivo na avaliação do efeito da temperatura no comportamento do coeficiente de atrito e na perda de massa do par AISI 52100-AISI H13 era atingir valores mais elevados nos ensaios do tribômetro SRV, temperaturas em torno de 700 e 800 °C. Após realizar os ensaios nessas temperaturas e um tempo de 30 min, observou-se uma irregularidade no sinal do valor médio do coeficiente de atrito (Figura 4.32a e 4.32b), os valores tinham uma diminuição até zero ou próximo do zero sem alguma alteração nos outros parâmetros de ensaio (*stroke*, temperatura, carga, frequência ou resistência do contato).

Figura 4.32 - Coeficiente de atrito em função do tempo para a) 700 °C b) 800 °C.

Na Figura 4.33 podem se observarem em detalhe as irregularidades obtidas no comportamento do coeficiente de atrito durante o ensaio no tribômetro SRV-4, usando o par AISI 52100-AISI H13 na temperatura de 700 °C. Na Figura 4.33a observassem os primeiros 150 s de ensaio com pelo menos oito quedas no valor do coeficiente de atrito e voltando depois para um valor em torno de 0,7. Já para o tempo entre 1.200 e 1.350 s, percebesse como o coeficiente de atrito fica no zero por vários segundos após um tempo estável em torno de 0,75.

Figura 4.33 - Coeficiente de atrito em função do tempo para 700 °C a) 150 s b) entre 1200 e 1350 s.

Uma possível explicação para o fenômeno de haver uma diminuição no coeficiente de atrito para zero ou próximo do zero, poderia ser o fato de acontecer a formação de um filme de óxido na superfície do disco como apresentado na Figura 4.34 para 700 e 800 °C, mas foi constatado que durante os períodos de tempo nos quais aconteciam as mudanças nos valores do coeficiente de atrito médio, a resistência elétrica do contato permanecia com um comportamento similar aos períodos estáveis de atrito (Figura 4.35), levando à consideração que era outra a razão pela qual acontecia esse comportamento e não um fenômeno ou uma reação tribo química do contato entre ambos os corpos.

Figura 4.34 - Disco de aço AISI H13 após 30 min de ensaio a) 700 °C b) 800 °C.

Figura 4.35 - Coeficiente de atrito e resistência elétrica em função do tempo para 700 °C.

Outra hipótese era que estivesse acontecendo o mecanismo de adesão, manifestando-se mediante *Scuffing*, na qual podia se perceber pela mudança no *stroke* de 2,5 mm (2.500 μ m) durante o tempo de ensaio, hipótese que foi desconsiderada após verificar que permaneceu constante ao longo dos 30 min (Figura 4.36), ainda nos períodos de tempo nos quais o coeficiente de atrito diminuiu para zero.

Figura 4.36 - Coeficiente de atrito e stroke em função do tempo para a) 700 °C b) 800 °C.

Validando a informação obtida para as temperaturas acima de 600 °C, usando o tribômetro SRV®4 de movimento alternativo (*reciprocating*), nas condições de carga, frequência, e os materiais sendo uma esfera de aço AISI 52100 e um disco de aço AISI H13, existe alguma limitação do controle da máquina para manter um valor constante ou pelo menos na mesma faixa estável de um regime de atrito.

4.2. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE (FREQUÊNCIA)

4.2.1. Atrito e desgaste para AISI 52100 - AISI H13

Nesta primeira parte serão apresentados os resultados para o coeficiente de atrito em função do tempo e o desgaste para os ensaios com frequência de 4, 20, 40 e 80 Hz, para o aço AISI H13 como material do disco e o aço AISI 52100 como material da esfera. Todos os ensaios para estudo da frequência foram realizados a temperatura ambiente e com força normal de 100 N.

Resultados típicos de coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio são apresentados nas Figuras 4.37 e 4.38 para 4 Hz.

Figura 4.37 - Coeficiente de atrito em função do tempo para 4 Hz, 1.350 s, temperatura ambiente e força normal de 100 N.

Segundo o gráfico da Figura 4.37, os valores do coeficiente de atrito “ μ ” na frequência de 4 Hz, com o tempo de 1.350 s, apresenta uma tendência constante depois de 200 s, mantendo-se durante o ensaio com um valor aproximado de 0,6. O período de “*running-in*” aparece durante os primeiros 200 s, e os comportamentos são diferentes para cada valor de frequência como se observa nas Figuras 4.38 e 4.39.

Figura 4.38 - Coeficiente de atrito em função do tempo até 150 s para 4 Hz.

Figura 4.39 - Coeficiente de atrito em função do tempo até 150 s para 80 Hz.

Uma representação sobre os primeiros 200 s de ensaio pode ser observada na Figura 4.38, em que o coeficiente de atrito na frequência de 4 Hz apresenta um comportamento similar para o tempo de 1.350 s nas três repetições. Para 10, 35 e 73 s, são formados picos de máximo valor no coeficiente de atrito e depois a tendência é diminuir até chegar num valor constante em torno de 0,6 no qual permanece durante 1.350 s como observado na Figura 4.37. Na Figura 4.39 observa-se que, para 80 Hz o valor do coeficiente de atrito está em torno de 1,0 no começo do ensaio e fica constante por um período aproximado de 35 s, depois houve uma queda no coeficiente de atrito até 0,8 mantendo-se constante até o final do ensaio (1.350 s).

As possíveis diferenças entre os valores iniciais do coeficiente de atrito, em função da frequência, podem ser explicadas na Figura 4.40, as quais estão relacionadas com carga aplicada, coeficiente de atrito e tempo de ensaio. Observa-se que independente da frequência utilizada, o equipamento aplica uma pré-carga fixa de 50 N durante os primeiros 30 s, após esse tempo a carga aumenta até alcançar um valor final de 100 N.

Figura 4.40 - Coeficiente de atrito e carga aplicada em função do tempo até 50 s.

a) 4 Hz e 1.350 s b) 80 Hz e 2.700 s.

Assim como as variações no coeficiente de atrito, a taxa de desgaste dos corpos de prova também foi medida. Na Figura 4.41 são apresentados os valores obtidos da taxa de desgaste em função da frequência para os tempos de ensaio de 1.350 e 2.700 s.

Figura 4.41 - Perda de massa em função da distância para a) 1350 s b) 2700 s.

Como os valores obtidos na menor frequência são da ordem de 10^{-5} e procurando melhor visualização nas diferenças, é apresentada a Figura 4.42 na qual o comportamento da taxa de desgaste (escala log) em função do tempo.

Figura 4.42 - Perda de massa (escala log) em função da distância para a) 1.350 s b) 2.700 s.

No disco a taxa de desgaste aumenta em três ordens de grandeza de 4 para 20 Hz após este valor e até 80 Hz continua constante e na mesma ordem de grandeza, enquanto que para a esfera aumenta conforme com a frequência, apresentando inclinações diferentes entre 4 e 20 Hz, e após este valor até 80 Hz na qual aumenta linearmente. Os valores obtidos para a esfera até o valor de 40 Hz são inferiores quando comparados com o disco, exceto na frequência de 80 Hz em que houve inversão nos valores finais com diferença de uma ordem de grandeza.

A Figura 4.43 apresenta as tendências na perda de massa em função do tempo para as quatro frequências, na qual os comportamentos são similares tanto para a esfera quanto para o disco independente do tempo de ensaio.

Figura 4.43 - Perda de massa em função da distância para 1.350 e 2.700 s a) esfera b) disco.

Para 4 Hz as perdas de massa na esfera foram da ordem de 10^{-5} e para 20, 40 e 80 Hz entre 10^{-3} e 10^{-2} , estas variações nos valores podem ser atribuídas a mudanças nos regimes

de desgaste. Na primeira frequência pode ser considerado um regime de desgaste moderado no par esfera-disco, enquanto que nas maiores pode ser considerado um regime de desgaste severo.

Na Figura 4.44 são apresentadas as marcas de desgaste obtidas no MEV após ensaio no tribômetro para 4 e 20 Hz a 2.700 s, nas quais é possível observar as diferenças tanto na esfera quanto no disco para as duas frequências. Essas diferenças podem ajudar no entendimento das variações do coeficiente de atrito e das taxas de desgaste, uma vez que para 4 Hz a esfera está livre de oxidação e/ou material aderido, o formato é mais ovalado e só apresenta marcas na direção do deslizamento, enquanto que para 20 Hz aparecem varias regiões escuras na superfície desgastada e o formato é circular. Em relação ao disco, existem variações nos formatos das marcas de desgaste nas duas frequências e com uma maior região para 20 Hz, apresentando um aumento na área de desgaste com relação a 4 Hz.

Figura 4.44 Imagens obtidas no MEV das superfícies desgastadas da esfera e do disco para 4 e 20 Hz e 2.700 s.

Após constatar as diferenças na Figura 4.44, podem se perceber diferenças entre os mecanismos de desgaste que predominaram durante os ensaios, explicando os valores obtidos no coeficiente de atrito. Como reportado no trabalho de Forsberg, no qual após ensaios com materiais de válvula e sede, existe uma combinação de desgaste abrasivo, adesivo e oxidativo atuando juntos nos corpos de prova, o que faz mais difícil o entendimento do que acontece no sistema válvula-sede do motor [Forsberg, 2011].

Uma segunda fase de ensaios foi realizada com os valores de frequência e tempo, a fim de manter a mesma distância percorrida (38.400 mm) e as relações de aumentos entre as duas variáveis após o ensaio. As condições de ensaio foram 4 - 40, 20 - 8, 40 - 4, e 80 - 2 (Hz - min), com carga, temperatura e amplitude iguais aos ensaios anteriores.

Resultados típicos de coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio são apresentados nas Figuras 4.45 e 4.46 para duas condições.

Figura 4.45 - Coeficiente de atrito em função do tempo a) 80 Hz e 2 min b) 40 Hz e 4 min.

A Figura 4.45 apresenta os valores do coeficiente de atrito “ μ ” para 2 e 4 min, o período de *running-in* aparece durante os primeiros 30 s, tempo em que é aplicada a pré-carga (50 N) e depois os comportamentos mudam para alcançar o regime permanente até o fim do ensaio. Após realizar os ensaios nas quatro condições de frequência e tempo, foram obtidos os valores de coeficiente de atrito e perda de massa acumulada relacionados na Figura 4.46, na qual é apresentado o valor médio e o seu desvio padrão após alcançar o regime permanente.

Figura 4.46 - Variações em função da frequência no regime permanente para
a) coeficiente de atrito médio b) perda de massa acumulada.

Assim como as variações no coeficiente de atrito, a perda de massa dos corpos de prova também foi medida como se apresenta na Figura 4.46. Especialmente no caso do disco, o comportamento é similar às variações que ocorrem no coeficiente de atrito para todas as frequências. Isto é, para valores maiores da perda de massa, os valores de coeficiente de atrito foram maiores e vice-versa, como o apresentado para 4 Hz. As variações na esfera foram pouco significativas e os valores são muito menores quando comparados com o disco.

Uma análise de dados Anova com fator único foi realizada para verificar se há diferenças entre as médias dos valores obtidos nas perdas de massa, tanto na esfera quanto no disco. Esse fato equivale a testar a hipótese:

$$H_0: \rho_{4 \text{ Hz}} = \rho_{20 \text{ Hz}} = \rho_{40 \text{ Hz}} = \rho_{80 \text{ Hz}}$$

$$H_1: \text{os valores de } \rho_i \text{ não são todos iguais.}$$

Utilizando um valor de $\alpha=0,05$, o $F_{\text{calculado}} < F_{\text{tabelado}}$ ($0,639 < 4,066$), portanto, não se percebe uma diferença significativa entre as medidas de perda de massa da esfera, e podem ser considerados valores iguais. No caso do disco, os valores obtidos após a análise foram $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ ($27,311 > 4,066$). A diferença entre o valor calculado é muito maior quando comparado com o tabelado, portanto, as perdas de massa obtidas no disco são diferentes para as frequências estudadas.

Transformando as perdas de massa obtidas na Figura 4.46 para valores de taxa de desgaste em função da frequência, é apresentada a Figura 4.47. Nota-se que tanto no disco

quando na esfera os comportamentos são similares, apresenta inclinações diferentes entre 4 e 20 Hz, e após este valor até 80 Hz aumenta linearmente. Os valores obtidos para a esfera são inferiores quando comparados com o disco, o que poderia ser razoável considerando a diferença nos valores de dureza dos corpos de prova, na qual o disco tem 610 HV₃₀ e a esfera 772 HV₃₀.

Figura 4.47 - Taxa de desgaste em função da frequência a) escala linear b) escala log.

Aprofundando nos valores das taxas de desgaste obtidas, foram analisadas as marcas após terminar os ensaios utilizando o MEV e EDS, a fim de caracterizar as superfícies e determinar o tipo de mecanismo de desgaste predominante. Tanto na esfera quanto no disco foram medidas as áreas aproximadas da região desgastada procurando uma relação em função do aumento da frequência.

Na Figura 4.48 são apresentadas as marcas de desgaste para 4 e 20 Hz obtidas no MEV. O formato e similar ao mostrado na Figura 4.44 para os ensaios de 2.700 s.

Figura 4.48 - Imagens obtidas no MEV das superfícies desgastadas para 4 e 20 Hz. a) esfera b) disco.

Na Figura 4.49 as marcas na esfera e no disco com a medida aproximada da área que foi desgastada são apresentadas.

Figura 4.49 - Medida da área na marca de desgaste para 4, 20, 40 e 80 Hz após 38.400 mm.

a) esfera b) disco.

Sintetizando, a medida da área na marca de desgaste após ensaio foi relacionada em função da frequência (Figura 4.50) para melhor visualização e entendimento nas variações do coeficiente de atrito e taxas de desgaste.

Figura 4.50 - Área da marca de desgaste após ensaio em função da frequência.

As diferenças encontradas nas marcas de desgaste tanto na esfera quanto no disco, podem ser ocasionadas pelo tipo de desgaste que predomina durante o ensaio. O comportamento na área de desgaste apresenta uma tendência similar à Figura 4.46 quando comparado com a variação no coeficiente de atrito e perda de massa. Aparentemente a combinação dos mecanismos de desgaste (adesão + abrasão + oxidação) é mais relevante para 20 Hz.

Relacionando os resultados obtidos na Figura 4.41, pode se observar que o comportamento do desgaste da esfera é similar ao reportado por Ootani e colaboradores na qual a tendência é aumentar exponencialmente conforme aumenta a velocidade de deslizamento [Ootani et al., 1995]. Entre tanto na Figura 4.42 após 20 Hz, a taxa de desgaste não varia significativamente quando comparada com os valores a 4 Hz. Chun e colaboradores mostraram que para 10 Hz (1.000 rpm) o R_{max} tanto da válvula como da sede, aumentava conforme ao número de ciclos, e para 25 Hz (3.000 rpm) desde o $2,0 \times 10^6$ ciclos, os valores além de ser maiores permaneciam constantes até $8,0 \times 10^6$ [Chun et al., 2007]. O fato anterior poderia explicar o comportamento apresentado quando realizados ensaios a 1.350 e 2.700 s, na qual os valores obtidos são aproximadamente iguais tanto na esfera quanto no disco.

4.2.2. Atrito e desgaste para AISI 52100 - AISI M2 (FREQUÊNCIA)

Nesta parte serão apresentados os resultados para o coeficiente de atrito em função do tempo e o desgaste acumulado para os ensaios com frequência de 4 e 80 Hz, para o aço AISI M2 (nas designações AISI M2-1 e M2-2) como material de disco, e o aço AISI 52100 como material da esfera.

Na Figura 4.51, está apresentado o gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo (em escala logarítmica) para a frequência de 4 Hz e material do disco AISI M2-1, após serem realizados 5 ensaios para cada tempo de 1.350 e 2.700 s. Nota-se que os valores de coeficiente de atrito estabilizaram em, aproximadamente, 0,6, após 250 s, para as dez repetições. A curva média também está apresentada e representa de forma clara o comportamento do atrito para esta configuração.

Figura 4.51 - Coeficiente de atrito em função do tempo (log) para 4 Hz e disco AISI M2-1.

Os ensaios apresentaram um comportamento transitório durante os primeiros 250 s, indicado por meio das variações do coeficiente de atrito. Este comportamento foi separado em 5 fases:

- 1 - aplicação da carga e ajuste do stroke (0 - 8 s),
- 2 - alteração superficial macroscópica durante a pré-carga (que é a formação da geometria da marca de desgaste (8 - 32 s),
- 3 - alteração da carga e ajuste do stroke (32 - 36 s),
- 4 - alteração superficial macroscópica com 100 N (36 - 256 s),
- 5 - estabilização (250 s em diante).

Na fase 2 nota-se um aumento significativo no coeficiente de atrito, indicando que a total alteração superficial ainda não havia ocorrido. Na fase de alteração da carga o atrito cai substancialmente até que a carga do ensaio é totalmente aplicada. A partir daí, o atrito chega a um patamar mais alto na nova fase de alteração superficial macroscópica e, em seguida, decresce ao seu valor estável em torno de 0,6.

Na Figura 4.52, está apresentado o gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo (em escala logarítmica) para a frequência de 4 Hz e material do disco AISI M2-2. O gráfico está no mesmo formato do que os mostrados anteriormente. Novamente nota-se que os valores de coeficiente de atrito estabilizaram em, aproximadamente, 0,65 após 250 s, porém possui uma pequena tendência de crescimento conforme o ensaio avança.

Figura 4.52 - Coeficiente de atrito em função do tempo (log) para 4 Hz e disco AISI M2-2.

A curva média de atrito e a força normal aplicada nos primeiros 512 s dos ensaios de 4 Hz com disco de aço AISI M2-2 é apresentada na Figura 4.53 em que podem ser visualizadas as 5 fases do ensaio assim como caso anterior. Novamente, nota-se que os valores de coeficiente de atrito estabilizaram em, aproximadamente, 0,65 após 250 s, porém possui uma pequena tendência de crescimento conforme o ensaio avança.

Na fase de alteração superficial macroscópica durante a pré-carga, o coeficiente de atrito atinge um patamar de 0,7 e decresce a 0,65. No intervalo de alteração da carga, o coeficiente de atrito apresenta um pico e, assim que a carga total é aplicada, inicia-se a nova fase de alteração superficial macroscópica. Pela visualização da curva pode-se inferir que ha alteração superficial macroscópica em carga total, aparentemente, é a continuidade da fase de alteração superficial na pré-carga (com a interrupção devido à alteração da carga). As primeiras 4 fases do ensaio apresentaram grande influência das características do disco sobre o comportamento do coeficiente de atrito.

Figura 4.53 - Coeficiente de atrito médio e força normal no início do ensaio com 4 Hz e disco AISI M2-2.

Os valores médios do coeficiente de atrito nas situações expostas anteriormente foram calculados no regime estável da curva, ou seja, após 256 s. As situações também foram divididas pela duração do ensaio. Cada situação também apresenta os valores de atrito médio na fase transitória (< 256 s).

Os valores são apresentados na Figura 4.54. O coeficiente de atrito médio foi maior no par com menor diferença de dureza (esfera AISI 52100 e disco AISI M2-2). Neste caso, porém, a diferença de dureza entre a fase de acomodação e a fase estável foi menor. O aumento do coeficiente de atrito médio dos ensaios mais longos foi maior devido à leve tendência de crescimento da curva de atrito ao decorrer do tempo de ensaio.

Figura 4.544 - Coeficiente de atrito médio para a fase estável e de acomodação dos ensaios de 4 Hz.

A perda de massa medida após cada ensaio também foi avaliada por meio de uma média dos ensaios. A perda de massa de cada ensaio foi separada entre a perda da esfera e a perda no disco. Na Figura 4.55 estão apresentadas as perdas de massa (em mg) de cada ensaio. A maior perda de massa foi observada no par com maior diferença de dureza (esfera AISI 52100 – disco AISI M2-1). A perda de massa total da esfera aumentou com o tempo de ensaio, porém a perda de massa do disco diminuiu com o aumento da duração do ensaio o que não é esperado se considerado que o mecanismo de desgaste foi o mesmo durante todo o ensaio. Por este motivo, os ensaios de 4 Hz com disco de aço de AISI M2-1 foram minuciosamente avaliados para caracterização dos mecanismos de desgaste que compõem o processo.

Figura 4.55 - Perda de massa acumulada dos ensaios de 4 Hz.

Na Figura 4.56 encontram-se as marcas de desgaste no disco produzidas no ensaio de 4 Hz e material do disco de AISI M2-1 com tempos diferentes. As marcas possuem dimensões próximas uma da outra concordando com os resultados de perda de massa próximos entre os dois ensaios. As marcas apresentam riscos uniformes provenientes do desgaste por deslizamento e deposição de material indicados por setas. Na marca de desgaste do ensaio de 2.700 s é possível observar oxidação superficial que pode ter sido formada após o ensaio.

Na Figura 4.57 estão apresentadas as marcas de desgaste na superfície da esfera dos ensaios de 4 Hz e material do disco AISI M2-1 com tempos diferentes. A marca do ensaio de 2.700 s possui diâmetro consideravelmente maior do que a do ensaio de 1.350 s o que dá embasamento para o resultado de perda de massa duas vezes maior no ensaio mais longo. Ambas as marcas apresentam riscos uniformes de desgaste por deslizamento que indicam que não houve alteração no mecanismo de desgaste ao longo do ensaio. Também é possível observar oxidações nos entornos das marcas.

Figura 4.56 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas dos discos nos ensaios de 4 Hz e material do disco de AISI M2-1 para a) 1.350 s, b) em detalhe, e c) 2.700 s, d) em detalhe.

Figura 4.57 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas das esferas nos ensaios de 4 Hz e material do disco de AISI M2-1 para a) 1.350 s e b) 2.700 s.

Na Figura 4.58 encontram-se as marcas de desgaste no disco produzidas no ensaio de 4 Hz e material do disco de AISI M2-2 com tempos diferentes. As marcas possuem dimensões próximas uma da outra, indicando que a perda de massa entre os ensaios está na mesma faixa de valores. As marcas apresentam riscos uniformes provenientes do desgaste por deslizamento e deposição de material indicados por setas.

Na Figura 4.59 estão apresentadas as marcas de desgaste na superfície da esfera dos ensaios de 4 Hz e material do disco AISI M2-2 com tempos diferentes. A marca do ensaio de 2.700 s possui diâmetro consideravelmente maior do que a do ensaio de 1.350 s o que dá embasamento para o resultado de perda de massa duas vezes maior no ensaio mais longo. Ambas as marcas apresentam riscos uniformes de desgaste por deslizamento que indicam que não houve alteração no mecanismo de desgaste ao longo do ensaio. A superfície das esferas apresenta coloração escura nas bordas paralelas aos riscos de desgaste como indicados pelas setas na Figura 4.59.

Figura 4.58 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas dos discos nos ensaios de 4 Hz e material do disco de AISI M2-2 para a) 1.350 s, b) em detalhe, e c) 2.700 s, d) em detalhe.

Figura 4.59 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas das esferas nos ensaios de 4 Hz e material do disco de AISI M2-2 para a) 1.350 s e b) 2.700 s.

A topografia das marcas de desgaste de 1.350 e 2.700 s (23 e 45 min) do disco de AISI M2-1 foram avaliadas por WLI como mostra a Figura 4.60. Por meio dessa análise, foram obtidas as profundidades das marcas e obteve-se 18 μm para o ensaio de 1.350 s e 14 μm para o ensaio de 2.700 s. Pode-se concluir que a diferença de massa também é refletida por uma diferença de volume de material retirado entre os ensaios. Nos ensaios mais longos houve deposição de material ou formação de óxidos com espessura aproximada de 4 μm .

Figura 4.60 - Topografia das marcas de desgaste do disco de AISI M2-1 nos ensaios de 4 Hz obtidas por WLI.

Ensaaios com durações menores foram realizados com o intuito de avaliar o que acontecia no início do ensaio e se os resultados não esperados encontrados com durações de 1.350 e 2.700 s (23 e 45 min) poderiam ser explicados pelo ocorrido anteriormente. Na Figura 4.61 estão apresentadas as marcas de desgaste do disco de AISI M2-1 em ensaios de 2, 3, 5, 10, 15, 23 e 45 min.

Após 2 min, é possível observar que a geometria final da marca de desgaste já foi formada, indicando a ocorrência da alteração superficial macroscópica mencionada na descrição dos gráficos de atrito. Também nota-se a formação de uma camada de óxido de coloração escura, denominada a partir deste ponto de primeira camada de óxido, sobre os riscos devido ao desgaste. A partir de 3 min, inicia-se a deposição de *debris* do disco e da esfera sobre a marca de desgaste. Até os 10 min, a deposição cresce em área alcançando toda a marca de desgaste e a 1ª camada de óxido se limita às bordas da marca de desgaste. De 15 para 23 min ocorreu mudança na geometria da marca com o alargamento da região central da marca. A partir de 15 min, iniciou-se um ciclo contínuo de formação e quebra de camadas de óxidos sobre a deposição de *debris*. Essa formação se torna mais visível nas marcas de 23 e 45 min. Nesta última, a camada de óxido de coloração avermelhada está presente sobre toda a área de deposição.

Figura 4.61 - Evolução das marcas de desgaste do disco de M2-1 nos ensaios de 4 Hz.

Análises de EDS nas marcas de 5 min de ensaio foram realizadas para confirmar a presença dos óxidos e deposição dos *debris*. A Figura 4.62 apresenta uma análise quantitativa da primeira camada de óxido (camada escura) em que é possível observar a grande quantidade de oxigênio e pouca quantidade de molibdênio e tungstênio (principais elementos do material do disco). Já a análise da região clara mostrou uma forte presença de molibdênio e tungstênio com uma mínima quantidade de oxigênio, ou seja, são componentes do próprio disco que se depositaram sobre a camada de óxido.

Figura 4.62 - a) Imagem obtidas por MEV das marcas de desgaste do disco de AISI M2-1 no ensaio de 4 Hz e 5 min. b) Análises EDS da marca de desgaste mostrando oxidação e deposição de *debris*.

Pouca oxidação + depósito de *debris*.

Oxidação + transferência de material da esfera.

Oxidação sobre o depósito de *debris*.

A espectroscopia Raman da segunda camada de óxido, Figura 4.63, apresentou os picos de hematita - Fe_2O_3 (picos 208, 274, 384 e 1295 cm^{-1}) (CAUDRON, et al., 2011) e picos de magnetita - Fe_3O_4 (pico 641 cm^{-1}) (CHICOT, et al., 2011). A presença de óxido é mais pronunciada no centro da marca, porém a camada de óxido está por toda a superfície da marca.

Figura 4.63 - Espectroscopia Raman da camada de óxido.

Por meio da medição da resistência de contato entre a esfera e o disco disponível no tribômetro SRV-4, obteve-se a medição da Figura 4.64, em que se pode observar o aumento da resistência a partir de 3 min que está relacionada à formação da primeira camada de óxido. A resistência decresce até zero aos 12 min, relacionada à quebra da

camada de óxido. A partir de 15 min, a resistência apresenta picos intermitentes, relacionados a sucessivos ciclos de formação e quebra da segunda camada de óxido.

Figura 4.64 - Coeficiente de atrito e resistência de contato para o aço AISI M2-1 em 4 Hz.

A perda de massa no início do ensaio também foi avaliada e está apresentada na Figura 4.65. Primeiramente, é visível que a perda de massa da esfera cresce com inclinação constante, indicando que a taxa de desgaste é constante durante todo o ensaio e pode ser uma medida real do desgaste que ocorre no ensaio. Já a perda de massa do disco não apresenta nenhuma tendência provavelmente devido aos processos ocorridos durante o ensaio, não permitindo assim, estimar um comportamento esperado.

Figura 4.65 - Perda de massa em função do tempo para 4 Hz e disco de aço AISI M2-1.

Em suma, o mecanismo de desgaste no início do ensaio é, predominantemente, abrasivo, em que as asperezas das superfícies são arrancadas e seus *debris* e protuberâncias sulcam a superfície formando os riscos observados. Nesta fase transitória a dureza do material do disco teve influência sobre a curva de atrito. Apenas, após certa distância de deslizamento, são alcançadas as condições constantes de ensaio, e, a partir daí, são formados filmes óxidos que protegem a superfície do disco contra maior perda de massa e, portanto, causam maior perda de massa na esfera. Conjuntamente com o desgaste oxidativo, existe a deposição de material na marca de desgaste que aumenta a massa do disco, fazendo com que estes ensaios tenham menor perda global da massa do disco.

Na Figura 4.66 encontram-se as marcas de desgaste no disco produzidas no ensaio de 80 Hz e material do disco de aço AISI M2-1 com tempos diferentes. As marcas possuem dimensões substancialmente diferentes sendo que a marca do ensaio mais longo é maior, corroborando com o aumento de perda de massa no ensaio mais longo. As marcas possuem algumas regiões mais próximas das bordas com riscos indicando desgaste por riscamento de partículas, pela presença de *debris* que possibilitou a formação de um desgaste por abrasão a três corpos. Também existem regiões polidas características do desgaste por deslizamento na região centro-intermediária da marca

Na Figura 4.67 estão apresentadas as marcas de desgaste na superfície da esfera dos ensaios de 80 Hz e material do disco de AISI M2-1 com tempos diferentes. A marca do ensaio de 2.700 s possui diâmetro consideravelmente maior do que a do ensaio de 1.350 s o que dá embasamento para o resultado de perda de massa maior no ensaio mais longo. Na esfera fica mais evidente a diferença entre os mecanismos de desgaste, pois no ensaio de 1.350 s existe a predominância de riscos enquanto que no ensaio de 2.700 s existem riscos pouco uniformes e regiões polidas, indicando que os ensaios de 80 Hz possuem desgaste misto (deslizamento + abrasão).

Figura 4.66 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas dos discos nos ensaios de 80 Hz e material do disco de aço AISI M2-1 para a) 1.350 s, b) em detalhe, e c) 2.700 s, d) em detalhe.

Figura 4.67 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas das esferas nos ensaios de 80 Hz e material do disco de aço AISI M2-1 para a) 1.350 s e b) 2.700 s.

Na Figura 4.68 encontram-se as marcas de desgaste no disco produzidas no ensaio de 80 Hz e material do disco de aço AISI M2-2 com tempos diferentes. As marcas possuem dimensões similares sendo que a marca do ensaio aparenta profundidade maior, corroborando com o aumento de perda de massa no ensaio mais longo. As marcas possuem algumas regiões mais próximas das bordas com riscos indicando desgaste por

riscamento por partículas, porém possui, também, regiões polidas que indicam que ocorreu desgaste por deslizamento.

Na Figura 4.69 estão apresentadas as marcas de desgaste na superfície da esfera dos ensaios de 80 Hz e material do disco de aço AISI M2-2 com tempos diferentes. A marca do ensaio de 2.700 s possui diâmetro consideravelmente maior do que a do ensaio de 1.350 s o que dá embasamento para o resultado de perda de massa maior no ensaio mais longo. Na esfera fica mais evidente a diferença entre os mecanismos de desgaste, pois no ensaio de 1.350 s existe a predominância de riscos enquanto que no ensaio de 2.700 s existem riscos pouco uniformes e regiões polidas, indicando que os ensaios de 80 Hz possuem desgaste misto (deslizamento + abrasão) como descrito anteriormente.

Figura 4.68 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas dos discos nos ensaios de 80 Hz e material do disco de AISI M2-2 para a) 1.350 s, b) em detalhe, e c) 2.700 s, d) em detalhe.

Figura 4.69 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas das esferas nos ensaios de 80 Hz e material do disco de AISI M2-2 para a) 1.350 s e b) 2.700 s.

4.3. INFLUÊNCIA DA FORÇA (CARGA)

4.3.1. Atrito e desgaste para AISI 52100 - AISI H13.

Na Figura 4.70 são apresentados resultados típicos de coeficiente de atrito em função do tempo para duas das cargas ensaiadas nos ensaios realizados à temperatura ambiente.

Figura 4.70 - Coeficiente de atrito em função do tempo a) 100 N b) 400 N.

Segundo os gráficos da Figura 4.70, os valores do coeficiente de atrito “ μ ” nas duas cargas, apresenta o período de *running-in* durante os primeiros 450 s, sendo que os primeiros 30 s é a aplicação da pre-carga de 50 N e logo depois a carga aumenta até alcançar o valor final, depois aparece o regime permanente. O coeficiente de atrito médio no regime permanente varia entre ensaios na faixa de $0,88 \pm 0,04$ para 100 N e de $0,55 \pm 0,02$ para 400 N indicando que os ensaios são relativamente repetitivos.

A Figura 4.71 apresenta o coeficiente de atrito médio e seu desvio padrão no regime permanente, para as 10 condições de carga. Verifica-se que o coeficiente de atrito médio é máximo em torno das menores forças aplicadas e decresce com o aumento da força estabilizando-se em torno de 0,6.

Figura 4.71 - Variação do coeficiente de atrito médio em função da carga.

Assim como as variações no coeficiente de atrito, a perda de massa dos corpos de prova também foi medida e é apresentada na Figura 4.72. Abaixo de 150 N a perda de massa do disco apresenta um máximo para força de 100 N. Nesta faixa de forças a perda de massa da esfera é menor que a do disco e apresenta um mínimo para 100 N. Acima de 150 N as perdas de massa da esfera e do disco aumentam monotonamente com a força normal aplicada e a perda de massa da esfera é maior que a do disco, ordem que se inverte a partir de 500 N.

Figura 4.72 - Perda de massa (escala log) em função da carga.

Transformando os valores de perda de massa da Figura 4.72 para taxa de desgaste em função da carga, é apresentada a Figura 4.73. Nota-se que tanto no disco quanto na esfera os comportamentos são similares, apresenta inclinações diferentes até 100 N, e após este valor até 600 N a tendência é de aumentar linearmente.

Figura 4.73 - Taxa de desgaste em função da carga a) escala linear b) escala log.

A variação de massa e de taxa de desgaste do disco foi de (maior - menor) enquanto que a variação da massa e da taxa de desgaste da esfera foi de (menor - maior). Com base nesta variação é possível que não tenha ocorrido variação de regime, sendo que todos os ensaios geraram resultados no regime severo. Procurando um melhor entendimento do comportamento da taxa de desgaste dos corpos de prova em função da carga, foram analisadas as marcas de desgaste utilizando o MEV e EDS para determinar o tipo de mecanismo de desgaste que predominou durante os ensaios.

Na Figura 4.74 são apresentadas as marcas de desgaste para 150, 300 e 600 N obtidas no MEV, nas quais é possível observar deformação plástica, acúmulo de material e regiões escuras, tanto no disco quanto na esfera para as três cargas relacionadas. Essas diferenças podem ajudar ao entendimento nas variações do coeficiente de atrito e nas taxas de desgaste, uma vez que para 150 N a esfera está mais livre regiões escuras setorizadas e o formato é completamente circular, enquanto que para 300 N o tamanho aumenta se mantendo circular e apresentando maior quantidade de regiões escuras na superfície desgastada para uma direção preferencial.

No caso de 600 N, essas regiões escuras na superfície desgastada e com uma direção preferencial, desaparecem e o aspecto é mais voltado em proporção à carga de 150 N, mas o tamanho da área desgastada aumenta consideravelmente. Quando a carga aumenta de 150 para 300 e 600 N, a superfície desgastada é similar nos três casos para o disco. As maiores diferenças são nas extremidades das marcas de desgaste após o ensaio, na qual ocorreu maior deformação plástica e acúmulo do material da região desgastada (Figura 4.75).

Figura 4.74 - Imagens obtidas no MEV das superfícies desgastadas para 150, 300 e 600 N

a) esfera b) disco.

Figura 4.75 - Imagens obtidas no MEV da marca de desgaste no disco para 600 N.

Analisando os valores obtidos de perda de massa e após conversão para taxa de desgaste, existe uma inversão na tendência do comportamento tanto na esfera quanto no disco entre 100 e 150 N. Esta condição originou a realização de um ensaio para 125 N como carga intermediária e sua posterior análise da superfície desgastada.

Na Figura 4.76 é apresentada a marca de desgaste para 125 N obtida no MEV. Pode se observar que existem algumas diferenças quando comparada com 150 N da Figura 4.74, na qual o formato circular se mantém na esfera, mas com a parte central sem regiões escuras e com algumas linhas com direção preferencial. Na superfície do disco, aparece o maior acúmulo de material na região central quando comparado com a parte externa da marca de desgaste. Parece que as duas superfícies são complementares durante o ensaio induzindo a possíveis mudanças no mecanismo de desgaste quando comparadas com as outras cargas.

Figura 4.76 - Imagens obtidas no MEV das superfícies desgastadas para 125 N.

Aprofundando nos detalhes da marca de desgaste no disco para 125 N (Figura 4.77), foi realizada uma análise com EDS da região central na qual apareceram as regiões escuras. Comparando as composições químicas dos materiais utilizados como corpos de prova nos testes (AISI 52100 e AISI H13), encontrou-se a presença do oxigênio nas regiões mais escuras como a apresentada na Figura 4.78, levando a se considerar a formação de óxidos na superfície.

Figura 4.77 - Imagens obtidas no MEV da marca de desgaste no disco para 125 N.

Figura 4.78 - Espectro obtido utilizando EDS para a região escura no disco com 125 N.

Continuando com a análise, foi realizada a inspeção na superfície da esfera para mesma condição. Na Figura 4.79 é apresentada a região central na qual apareceu uma região mais escura ao longo da direção preferencial.

Figura 4.79 - Imagem obtida no MEV da marca de desgaste na esfera para 125 N.

Após realizar a EDS, foram obtidos os espectros para os dois pontos foco da análise e são apresentados na Figura 4.80. O ponto 001 representa a região escura e a superfície mais lisa o ponto 002. No ponto 001 é possível perceber a presença do oxigênio, além de elementos como Mo e V os quais são parte da composição química do aço AISI H13; entretanto, no ponto 002 somente se percebem os elementos constituintes do aço AISI 52100.

Figura 4.80 - Espectro obtido utilizando EDS para esfera na condição de 125 N.

Aprofundando na análise das marcas de desgaste para as condições testadas de carga, na Figura 4.81 pode se observar detalhes tanto na esfera quanto no disco com presença de regiões escuras (material aderido). Realizando uma análise de EDS (Figura 4.82) encontraram-se novamente diferenças quando comparados os pontos 001 e 002 de cada superfície desgastada, a presença do oxigênio e a transferência de material entre ambos os corpos.

Figura 4.81 - Imagens obtidas no MEV das superfícies desgastadas para 600 N.

a) disco b) esfera.

Figura 4.82 - Espectros obtidos utilizando EDS para 600 N a) disco b) esfera.

Igual ao encontrado na Figura 4.80 para 125 N, na Figura 4.82 é apresentado os espectros obtidos para a condição de 600 N na qual é possível identificar as diferenças entre os pontos 001 e 002 tanto no disco quanto na esfera. Observa se que para a superfície do disco no ponto 001 a presença de oxigênio difere quando comparado com o ponto 002, entre tanto na esfera o ponto 001 apresenta oxigênio, molibdênio e vanádio, elementos constituintes do disco, isto é, possível transferência de material durante o ensaio. O ponto 002, por tanto apresenta os elementos considerados constituintes do aço AISI 52100 da esfera.

4.3.2. Atrito e desgaste para AISI 52100 - Ligas intermetálicas de Nb (carga)

Na Figura 4.83 são apresentados resultados típicos de coeficiente de atrito em função do tempo (escala log) para 150 e 600 N no par tribológico AISI 52100 (esfera) - $\text{Fe}_3\text{Al-NbC}$ (disco). Cabe notar que a interpretação para todos os resultados de coeficiente de atrito dos materiais aqui referenciados (ligas intermetálicas de Nb), foi realizada após os primeiros 30 s, período no qual aconteceu a mudança de pré-carga de 50 N para a carga final de 150 e 600 N respectivamente.

Figura 4.83 - Coeficiente de atrito em função do tempo para o par AISI 52100 - $\text{Fe}_3\text{Al-NbC}$.

a) 150 N b) 600 N.

Os valores do coeficiente de atrito “ μ ” para as duas cargas apresentaram um período de *running-in* durante os primeiros 50 s aproximadamente, logo depois aparece o regime permanente de atrito com um valor médio em torno de 0,49 para 150 N. O valor do coeficiente de atrito em regime permanente foi de 0,32 para os ensaios realizados com força de 600 N. Da mesma forma que nos ensaios com menor força os valores do coeficiente de atrito passam a oscilar com maior amplitude em torno do valor médio. Para 600 N, entretanto a diferença entre os dois ensaios foi menor que para 150 N. Assim como as variações no coeficiente de atrito, a perda de massa dos corpos de prova também foi medida e é apresentada na Figura 4.84.

Figura 4.84 - Perda de massa (escala log) em função da carga para o par AISI 52100 - $\text{Fe}_3\text{Al-NbC}$.

Os resultados para o material da esfera (AISI 52100) mostraram um pequeno aumento na perda de massa com a elevação da força, mantendo a ordem de grandeza de 10^{-3} . Já para o material do disco sinterizado de $\text{Fe}_3\text{Al-NbC}$, na carga de 150 N os valores são da ordem de 10^{-4} com um desvio padrão maior do que para 600 N. Para este material no disco, não houve variações significativas da perda de massa com a mudança na carga, mantendo-se os valores na mesma ordem de grandeza de 10^{-4} .

Na Figura 4.85 são apresentadas as marcas de desgaste para 150 e 600 N.

Figura 4.85 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas para 150 e 600 N.

a) AISI 52100 (esfera) b) $\text{Fe}_3\text{Al-NbC}$ (disco).

Nas marcas de desgaste podem-se inferir as informações obtidas de perda de massa. No caso da esfera, nota-se um aumento no tamanho da marca após o ensaio, coerente com o resultado observado na Figura 4.84. Já para o disco, a marca de desgaste de 600 N tem uma área maior quando comparada com a marca de 150 N, apresentando características distintas conforme a Figura 4.89.

Na Figura 4.86 são apresentadas as imagens obtidas de MEV para a superfície desgastada da esfera nas condições de 150 e 600 N. As marcas de desgaste apresentaram umas regiões escuras isoladas (material aderido), riscos na direção de deslizamento e algumas pequenas regiões lisas e limpas (polidas). Neste caso, não houve uma diferença significativa nas marcas de desgaste da esfera em função das duas cargas ensaiadas (150 e 600 N), e as variações no comportamento da perda de massa e no coeficiente de atrito, provavelmente foram dominadas pelo comportamento do disco de $\text{Fe}_3\text{Al-NbC}$.

Figura 4.86 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas da esfera de aço AISI 52100 para 150 e 600 N a) detector SE b) detector BSE.

Uma análise EDS realizada na superfície da esfera na condição de 150 N (Figura 4.87) apresentou no ponto 001 (região clara) a presença dos elementos Fe, Cr, Si, e C como elementos principais do aço AISI 52100 (Figura 4.88a). No ponto 002 (região escura), além dos elementos do material da esfera mencionados anteriormente, encontrou-se a presença de Al, Nb e O (Figura 4.88b), levando a considerar a formação de óxidos na superfície e uma transferência de material do disco para esfera, dado que o ensaio foi realizado sobre o disco sinterizado de $\text{Fe}_3\text{Al-NbC}$.

Figura 4.87 - Imagem obtida no MEV da marca de desgaste na esfera de aço AISI 52100 para 150 N.

Figura 4.88 - Espectro obtido utilizando EDS na esfera de aço AISI 52100 para 150N.

a) ponto 001 (região clara) b) ponto 002 (região escura).

Figura 4.89 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas do disco de $\text{Fe}_3\text{Al-NbC}$ para 150 e 600 N a) detector SE b) detector BSE.

E possível perceber as diferenças nas imagens obtidas através do detector BSE no MEV (Figura 4.89), para 600 N a marca de desgaste apresenta uma região central escura (material aderido) enquanto que para 150 N, só umas pequenas porções mais cinzas isoladas na área da marca de desgaste. Estas regiões escuras na área das marcas de desgaste podem explicar as mudanças nos valores do coeficiente de atrito de 0,49 para 0,32, e a menor perda de massa no disco com 600 N, associado à quantidade de material acumulado (região escura).

Uma análise mais detalhada usando o EDS em algumas regiões da marca de desgaste no disco de $\text{Fe}_3\text{Al-NbC}$ (Figura 4.90), mostrou no ponto 001 (região clara) a presença de Nb e C (Figura 4.91a), como elementos principais da liga intermetálica de carbonetos de Nb. No ponto 002 (material aderido), além dos elementos de liga Fe, Nb e C, encontrou-se a presença do O e Cr (Figura 4.91b), levando a se considerar a formação de óxidos na superfície e uma transferência de material da esfera para o disco, dado que o Cr é um elemento de liga do aço AISI 52100.

Figura 4.90 - Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de $\text{Fe}_3\text{Al-NbC}$ para 150 N.

Figura 4.91 - Espectro obtido utilizando EDS no disco de $\text{Fe}_3\text{Al-NbC}$ para 150N.

a) ponto 001 (região clara) b) ponto 002 (região escura).

As análises de EDS explicam os distintos comportamentos dos coeficientes de atrito para 150 e 600 N, além de uma coerência com a perda de massa final. Uma diminuição no valor médio do coeficiente de atrito de 0,49 (150 N) para 0,32 (600 N) e menor perda de massa no disco de Fe₃Al-NbC (600 N), produto da formação de óxido na superfície durante o ensaio no tribômetro.

Na Figura 4.92 são apresentados resultados de coeficiente de atrito em função do tempo (escala log) para 150 e 600 N no par tribológico AISI 52100 (esfera) - NbC-12Co (disco).

Figura 4.92 - Coeficiente de atrito em função do tempo para o par AISI 52100 - NbC-12Co

a) 150 N b) 600 N.

Os valores do coeficiente de atrito “ μ ” apresentaram um período de *running-in* durante os primeiros 50 s conforme foi mencionado anteriormente, logo depois aparece o regime permanente com um valor médio em torno de 0,69 para 150 N e de 0,46 para 600 N. Para os ensaios com 150 N a amplitude dos valores do coeficiente de atrito aumenta até 800 s diminuindo a seguir. Nos ensaios com 600 N esta variação é menos pronunciada.

Assim como as variações no coeficiente de atrito, a perda de massa dos corpos de prova também foi medida e é apresentada na Figura 4.93.

Figura 4.93 - Perda de massa (escala log) em função da carga para o par AISI 52100 - NbC-12Co.

Os resultados para o material da esfera (AISI 52100) mostraram um aumento na perda de massa, mantendo a ordem de grandeza de 10^{-3} . Já para o material do disco sinterizado de NbC-12Co da ordem de 10^{-4} . Para este material no disco, houve uma pequena diminuição da perda de massa com a mudança de carga, ainda mantendo-se os valores na mesma ordem de grandeza.

Na Figura 4.94 são apresentadas as marcas de desgaste para 150 e 600 N obtidas no MO, nas quais é possível observar as diferenças tanto no disco quanto na esfera para as duas cargas relacionadas.

Figura 4.94 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas para 150 e 600 N.

a) AISI 52100 (esfera) b) NbC-12Co (disco).

A análise das marcas de desgaste permite inferir as informações obtidas de perda de massa. No caso da esfera, nota-se um aumento no tamanho da marca após o ensaio, coerente com o observado na Figura 4.93 quando aumentado a perda de massa de 150 para 600 N. Já para o disco, a marca de desgaste de 600 N tem uma área maior quando comparada com a marca de 150 N, apresentando características distintas conforme a Figura 4.96.

Figura 4.95 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas do disco de NbC-12Co para 150 e 600 N a) detector SE b) detector BSE.

É possível perceber as diferenças nas imagens obtidas no MO (Figura 4.94) e no MEV (Figura 4.95) para as duas cargas. Para 150 N, as marcas de desgaste apresentaram duas regiões características, uma primeira região no centro das marcas de desgaste tanto na esfera quanto no disco, com riscos na direção do deslizamento (ensaio de movimento alternado), e uma segunda região nas bordas laterais da marca apresentando uma superfície mais lisa e limpa (região polida).

As marcas de desgaste obtidas com 600 N apresentaram uma região central com a combinação de riscos e regiões escuras, e uma segunda região nas bordas laterais contendo só riscos. Estas regiões escuras (material aderido) na área das marcas de desgaste podem explicar a diminuição nos valores do coeficiente de atrito de 0,69 para 0,46, e a menor perda de massa no disco com 600 N, associado à quantidade de material acumulado.

Na Figura 4.96 são apresentados resultados de coeficiente de atrito em função do tempo (escala log) para 150 e 600 N no par tribológico AISI 52100 (esfera) - Hot-Pressed NbC (disco).

Figura 4.96 - Coeficiente de atrito em função do tempo para o par AISI 52100 – Hot-Pressed NbC

a) 150 N b) 600 N.

Para a carga de 150 N, o valor do coeficiente de atrito “ μ ” apresentou um comportamento crescente ao longo do tempo de ensaio com um valor médio de 0,77. Já para 600 N, após a aplicação da pré-carga (primeiros 30 s) o valor médio do coeficiente de atrito foi de 0,45 durante todo o tempo de ensaio (2700 s). A perda de massa dos corpos de prova também foi medida e é apresentada na Figura 4.97.

Figura 4.97 - Perda de massa (escala log) em função da carga para o par AISI 52100 – Hot-Pressed NbC.

Da mesma forma que nos casos anteriores, os resultados para o material da esfera (AISI 52100) mostraram um pequeno aumento na perda de massa, mantendo a ordem de grandeza de 10^{-3} . Já para o material do disco de Hot-Pressed NbC, não houve variações significativas da perda de massa com a mudança na carga, mantendo-se os valores na mesma ordem de grandeza, $6,35 \times 10^{-4}$ para 150 N e de $6,67 \times 10^{-4}$ para 600 N, além de ser estatisticamente iguais.

Na Figura 4.98 são apresentadas as marcas de desgaste para 150 e 600 N obtidas no MO, nas quais é possível observar as diferenças tanto no disco quanto na esfera para as duas cargas relacionadas.

Figura 4.98 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas para 150 e 600 N.

a) AISI 52100 (esfera) b) Hot-Pressed NbC (disco).

Assim como nos casos anteriores, as marcas de desgaste para o material da esfera (AISI 52100) tiveram um aumento no seu tamanho após o ensaio, sendo coerente com o resultado da Figura 4.97 e mantendo as características de riscos, material aderido e algumas regiões lisas e limpas (polidas). No caso do disco, já o formato é distinto para ambas as marcas de desgaste. Para 150 N, a marca de desgaste apresentou regiões lisas e

limpas (polidas) nas bordas laterais, duas faixas de riscos e uma região central similar às laterais. Já para 600 N, a marca apresentou riscos nas bordas laterais e uma região central escura. Na Figura 4.99 é possível confirmar as características que foram descritas anteriormente para as marcas de desgaste obtidas por MO (Figura 4.98) na superfície do disco.

Figura 4.99 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas do disco de Hot-Pressed NbC para 150 e 600 N a) detector SE b) detector BSE.

No disco de Hot-Pressed NbC é possível perceber as diferenças descritas anteriormente nas imagens obtidas através do detector BSE no MEV (Figura 4.96). Estas diferenças na área das marcas de desgaste podem explicar as mudanças nos valores médios do coeficiente de atrito de 0,77 para 0,45, e a menor perda de massa no disco com 600 N, associado à quantidade de material acumulado (regiões escuras).

Uma análise mais detalhada usando o EDS em algumas regiões da marca de desgaste no disco de Hot-Pressed NbC (Figura 4.100), mostrou no ponto 001 (região clara) a presença de Nb e C (Figura 4.101a), como elementos principais da liga intermetálica de carbonetos de Nb. No ponto 002 (região escura), além dos elementos de liga Fe, Nb e C, encontrou-se

a presença do O e Cr (Figura 4.101b), levando a se considerar a formação de óxidos na superfície e uma transferência de material da esfera para o disco, dado que o Cr é um elemento de liga do aço AISI 52100.

Figura 4.100 - Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de Hot-Pressed NbC para 150 N.

Figura 4.101 - Espectro obtido utilizando EDS no disco de Hot-Pressed NbC para 150 N.

a) ponto 001 (região clara) b) ponto 002 (região escura).

Na Figura 4.102 são apresentados resultados de coeficiente de atrito em função do tempo (escala log) para 150 e 600 N no par tribológico AISI 52100 (esfera) - NbC_{0.88}-12Co (disco).

Figura 4.102 - Coeficiente de atrito em função do tempo para o par AISI 52100 - NbC_{0.88}-12Co

a) 150 N b) 600 N.

Neste caso, para a carga de 150 N, o valor do coeficiente de atrito “μ” apresentou um comportamento crescente ao longo do tempo de ensaio com um valor médio de 0,72. Já para 600 N, após a aplicação da pré-carga (primeiros 30 s) e o ajuste da carga final, houve um comportamento crescente até os 120 s aproximadamente, logo depois, uma diminuição no valor de atrito e instável até o final do ensaio com o valor médio do coeficiente de atrito de 0,51. Assim como as variações no coeficiente de atrito, a perda de massa dos corpos de prova também foi medida e é apresentada na Figura 4.103.

Figura 4.103 - Perda de massa (escala log) em função da carga para o par AISI 52100 – NbC_{0.88}-12Co.

Neste caso em particular, os resultados para o material da esfera (AISI 52100) apresentaram um pequeno aumento na perda de massa, mudando a ordem de grandeza de $8,84 \times 10^{-4}$ para $1,83 \times 10^{-3}$. Já para o material do disco de $\text{NbC}_{0,88}\text{-12Co}$, houve variações significativas da perda de massa com a mudança na carga, mantendo-se os valores na mesma ordem de grandeza considerando o desvio padrão obtido em ambos os casos.

Na Figura 4.104 são apresentadas as marcas de desgaste para 150 e 600 N obtidas no MO, nas quais é possível observar as diferenças tanto no disco quanto na esfera para as duas cargas relacionadas.

Figura 4.104 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas para 150 e 600 N.
a) AISI 52100 (esfera) b) $\text{NbC}_{0,88}\text{-12Co}$ (disco).

As marcas de desgaste para o material da esfera (AISI 52100) indicam um aumento no seu tamanho após o ensaio, sendo coerente com o resultado da Figura 4.103. Além do aumento do tamanho, encontraram-se características distintas como riscos, material aderido e algumas regiões lisas e limpas (polidas) para 150 N e regiões escuras para 600 N. No caso do disco, já o formato é distinto para ambas as marcas de desgaste (Figura 4.106). Para 150 N, a marca de desgaste apresentou regiões lisas e limpas (polidas) nas bordas

laterais, e uma faixa central de riscos com material aderido de forma isolada. Já para 600 N, a marca apresentou quase na totalidade da sua área, uma superfície lisa e limpa (polida) com algumas regiões escuras isoladas. Na Figura 4.105 é possível confirmar as características que foram descritas anteriormente para as marcas de desgaste obtidas por MO (Figura 4.104) na superfície da esfera para ambas as cargas.

Figura 4.105 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas da esfera de aço AISI 52100 para 150 e 600 N a) detector SE b) detector BSE.

Figura 4.106 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas do disco de $\text{NbC}_{0.88-12}\text{Co}$ para 150 N a) detector SE b) detector BSE; e para 600 N detector SE c) lado esquerdo, d) lado direito.

Uma análise EDS realizada na superfície do disco na condição de 150 N (Figura 4.107) apresentou no ponto 001 (região clara) a presença dos elementos Nb, Co e C como elementos da liga sinterizada de $\text{NbC}_{0.88-12}\text{Co}$ (Figura 4.108a). No ponto 002 (região escura), além dos elementos do material do disco mencionados anteriormente, encontrou-se a presença de Fe, Cr, e O (Figura 4.108b), levando a considerar a formação de óxidos na superfície e uma transferência de material da esfera para o disco, dado que o ensaio foi realizado usando o aço AISI 52100.

Figura 4.107 - Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de $\text{NbC}_{0.88}\text{-12Co}$ para 150 N.

Figura 4.108 - Espectro obtido utilizando EDS no disco de $\text{NbC}_{0.88}\text{-12Co}$ para 150 N.

a) ponto 001 (região clara) b) ponto 002 (região escura).

Na Figura 4.109 são apresentados resultados de coeficiente de atrito em função do tempo (escala log) para 150 e 600 N no par tribológico AISI 52100 (esfera) - $\text{NbC-12Fe}_3\text{Al}$ (disco).

Figura 4.109 - Coeficiente de atrito em função do tempo para o par AISI 52100 – NbC-12Fe₃Al.

a) 150 N b) 600 N.

Os valores do coeficiente de atrito “ μ ” nas duas cargas para o par tribológico após o período de *running-in*, apresentou valores médios em torno de 0,72 para 150 N e de 0,44 para 600 N. Já as variações na perda de massa também foi medida e é apresentada na Figura 4.110.

Figura 4.110 - Perda de massa (escala log) em função da carga para o par AISI 52100 - NbC- 12Fe₃Al.

Os resultados para o material da esfera (AISI 52100) mostraram mais uma vez um pequeno aumento na perda de massa, mantendo-se na ordem de grandeza de 10⁻³. Já para o material do disco sinterizado de NbC-12Fe₃Al, houve um aumento na perda de massa quando aumentado a carga de 150 N para 600 N, mas continuou mantendo-se a ordem de grandeza de 10⁻⁴.

Na Figura 4.111 são apresentadas as marcas de desgaste para 150 e 600 N obtidas no MO, nas quais é possível observar as diferenças tanto no disco quanto na esfera para as duas cargas relacionadas.

Figura 4.111 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas para 150 e 600 N.

a) AISI 52100 (esfera) b) NbC-12Fe₃Al (disco).

As marcas de desgaste para o material da esfera (AISI 52100) indicam um aumento no seu tamanho após o ensaio, sendo coerente com o resultado da Figura 4.110. Além do aumento do tamanho, encontraram-se características distintas como riscos e algumas regiões com material aderido para ambas as cargas. No caso do disco, já o formato é distinto para ambas as marcas de desgaste (Figura 4.115). Para 150 N, a marca de desgaste apresentou regiões lisas e limpas (polidas) nas bordas laterais, e uma faixa central de riscos com material aderido de forma isolada. Já para 600 N, a marca apresentou quase na totalidade da sua área, uma superfície com riscos combinada com regiões escuras e nos extremos, uma região lisa e polida.

Na Figura 4.112 é possível confirmar as características que foram descritas anteriormente para as marcas de desgaste obtidas por MO (Figura 4.111) na superfície da esfera para 600 N.

Figura 4.112 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas da esfera de aço AISI 52100 para 600 N a) detector SE b) detector BSE.

Uma análise EDS realizada na superfície da esfera na condição de 600 N (Figura 4.113) apresentou no ponto 001 (região clara) a presença dos elementos Fe, Cr, Si, e C como elementos do aço AISI 52100 (Figura 4.114a). No ponto 002 (região escura), além dos elementos do material da esfera mencionados anteriormente, encontrou-se a presença de Nb e O (Figura 4.114b), levando a considerar a formação de óxidos na superfície e uma transferência de material do disco para esfera, dado que o ensaio foi realizado sobre o disco sinterizado de NbC-12Fe₃Al.

Figura 4.113 - Imagem obtida no MEV da marca de desgaste na esfera de aço AISI 52100 para 600 N.

Figura 4.114 - Espectro obtido utilizando EDS na esfera de aço AISI 52100 para 600 N.

a) ponto 001 (região clara) b) ponto 002 (região escura).

Figura 4.115 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas do disco de NbC-12Fe₃Al para 150 e 600 N a) detector SE b) detector BSE.

Uma análise EDS realizada na superfície do disco na condição de 600 N (Figura 4.116) apresentou no ponto 001 (região clara) a presença dos elementos Fe, Al, Nb e C como elementos da liga sinterizada de NbC-12Fe₃Al (Figura 4.117a). No ponto 002 (região escura), além dos elementos do material do disco mencionados anteriormente, encontrou-se a presença de Cr e O (Figura 4.117b), levando a considerar a formação de óxidos na superfície e uma transferência de material da esfera para o disco, dado que o Cr é um elemento da liga do aço AISI 52100.

Figura 4.116 - Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de NbC-12Fe₃Al para 600 N.

Figura 4.117 - Espectro obtido utilizando EDS no disco de NbC-12Fe₃Al para 600 N.

a) ponto 001 (região clara) b) ponto 002 (região escura).

Na Figura 4.118 são apresentados resultados típicos de coeficiente de atrito em função do tempo (escala log) para 150 N no par tribológico AISI 52100 (esfera) – Nb₂O₅ (disco).

Figura 4.118 - Coeficiente de atrito em função do tempo para o par AISI 52100 - Nb₂O₅.

Neste par tribológico em particular, o valor do coeficiente de atrito “μ” apresentou um comportamento crescente ao longo do tempo de ensaio com um valor médio de 0,73 para a carga de 150 N. Já para a carga de 600 N, não foi possível obter um valor do coeficiente de atrito devido à quebra do disco de Nb₂O₅ após aplicação da carga, apresentado uma fragilidade na sua superfície.

Na Figura 4.119 são apresentadas as marcas de desgaste para 150 N obtidas no MO, nas quais é possível observar as diferenças tanto na esfera quanto no disco de Nb₂O₅.

Figura 4.119 - Imagens obtidas por MO das superfícies desgastadas para 150 N.

a) AISI 52100 (esfera) b) Nb₂O₅ (disco).

150 N

A marca de desgaste para o material da esfera (AISI 52100) apresentou na sua superfície, características como riscos e algumas regiões com material aderido. No caso do disco, já o formato é distinto para a marca de desgaste (Figura 4.119). Para 150 N, a marca de desgaste apresentou regiões lisas e limpas (polidas) nas bordas laterais e na parte central, já nos extremos, material aderido de forma isolada. Na Figura 4.120 é possível confirmar as características que foram descritas anteriormente para as marcas de desgaste obtidas por MO (Figura 4.119) na superfície do par AISI 52100 - Nb₂O₅ para 150 N.

Figura 4.120 - Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas do par AISI 52100- Nb₂O₅ para 150 N a) detector SE b) detector BSE.

Uma análise mais detalhada usando o EDS em algumas regiões da marca de desgaste no disco de Nb₂O₅ (Figura 4.121) mostrou no ponto 001 (região clara) a presença de Nb e O, como elementos principais da liga, além do C (Figura 4.122a). No ponto 002 (região escura), além dos elementos da liga, encontrou-se a presença do Fe e Cr (Figura 4.122b), levando a se considerar que houve uma transferência de material da esfera para o disco, dado que o Cr e o Fe são elementos de liga do aço AISI 52100.

Figura 4.121 - Imagem obtida no MEV da marca de desgaste no disco de Nb_2O_5 para 150 N.

Figura 4.122 - Espectro obtido utilizando EDS no disco de Nb_2O_5 para 150N.

a) ponto 001 (região clara) b) ponto 002 (região escura).

Sintetizando, os resultados obtidos para os aços AISI H13 e AISI M2 nas duas designações (M2-1 e M2-2), e as diferentes ligas intermetálicas de Nb quando ensaiadas com esfera do aço AISI 52100 são apresentados na Figura 4.123.

Para 150 N a maior perda de massa da esfera ocorreu quando ela foi esfregada contra o aço H13 e a menor quando o contracorpo foi de “SE”. A redução percentual do maior para o menor foi de 86,92 % para os ensaios com 150 N. A ordem decrescente de perda de massa foi H13, M2-1, M2-2, SC, RE, RY, RX e SE.

Para os ensaios realizados com 600 N a maior perda de massa da esfera ocorreu nos ensaios realizados contra aço H13 e a menor quando o contracorpo foi de “SE”. A redução percentual da maior para a menor perda de massa foi de 90,75% para os ensaios com 600 N. A ordem decrescente de perda de massas foi H13, M2-1, M2-2, RE, RY, RX, SC e SE. Para as duas forças estudadas os contracorpos metálicos apresentaram maiores perdas de massas das esferas do que os contracorpos de ligas intermetálicas de Nb.

A elevação da força normal no ensaio à temperatura ambiente causou:

- a) Elevação das perdas de massa da esfera para todos os materiais de contracorpo estudados.
- b) Os aumentos de perda de massa não superaram uma ordem de grandeza exceto para o ensaio sobre o disco de NbC_{0,88}-12Co (SE) que apresentou um aumento na perda de massa, mudando a ordem de grandeza de 10^{-4} em 150 N para 10^{-3} em 600 N.
- c) O maior aumento da perda de massa foi sobre o disco de aço AISI M2, na designação M2-2 ($653,7 \pm 33,0$ HV₃₀), com um incremento de 78,6% ($2,20 \times 10^{-3}$ para $1,03 \times 10^{-2}$) de 150 N para 600 N. Já o menor aumento da perda de massa foi encontrado quando utilizado o disco sinterizado de Nb_{0,88}-12Co (SE) (1646 ± 30 HV_{0,2}), com um incremento de 51,5% ($8,88 \times 10^{-4}$ para $1,83 \times 10^{-3}$) de 150 N para 600 N.

Figura 4.123 - Perda de massa (escala log) em função da carga para o aço AISI 52100.

A Figura 4.124 apresenta os valores de perda de massa para os distintos materiais de disco em ambas as cargas. Encontraram-se distintos mecanismos de desgaste atuando nas superfícies desgastadas quando realizado o ensaio com uma esfera de aço AISI 52100, como já foram comentados anteriormente para cada um dos pares tribológicos.

Para 150 N a maior perda de massa ocorreu para o disco de aço M2-1 e a menor quando o ensaio foi realizado com o disco da liga sinterizada de “RY”. A redução percentual do maior para o menor foi de 96,08% para os ensaios com 150 N. A ordem decrescente de perda de massa foi M2-1, H13, SE, M2-2, RE, SC, RX e RY.

Para os ensaios realizados com 600 N a maior perda de massa do disco ocorreu nos ensaios realizados com o aço H13 e a menor com a liga sinterizada “RX”. A redução percentual da maior para a menor perda de massa foi 99,31% para os ensaios com 600 N. A ordem decrescente de perda de massa foi H13, SE, M2-2, M2-1, RE, RY, SC e RX.

A elevação da força normal no ensaio à temperatura ambiente causou:

- Tanto aumento como redução nas perdas de massa para todos os materiais de disco estudados. Os aços H13 e M2-2 e as ligas sinterizadas de SE e RY aumentaram a perda de massa.
- O maior aumento de perda de massa foi apresentado pelo aço AISI H13 com um incremento de 89,7% ($2,74 \times 10^{-3}$ para $2,67 \times 10^{-2}$), e o menor aumento de perda de

massa de 4,8% ($6,35 \times 10^{-4}$ para $6,67 \times 10^{-4}$) no disco de Hot-Pressed NbC (RE) ambas de 150 N para 600 N.

- c) A maior redução de perda de massa foi observada para o aço AISI M2 (na designação M2-1) com um decremento de 69,3% ($4,36 \times 10^{-3}$ para $1,34 \times 10^{-3}$), e a menor redução de perda de massa de 44% ($3,27 \times 10^{-4}$ para $1,83 \times 10^{-4}$), no disco de NbC-12Co (RX) ambas de 150 N para 600 N.

Figura 4.124 - Perda de massa (escala log) em função da carga para os distintos aços e ligas intermetálicas de Nb.

A Figura 4.89 apresenta os valores de perda de massa total (esfera + disco) para os distintos materiais em ambas as cargas.

Para 150 N a maior perda de massa total ocorreu para o par AISI 52100-AISI H13 e a menor quando o contracorpo foi de “RY”. A redução percentual do maior para o menor foi de 85,94% para os ensaios com 150 N. A ordem decrescente de perda de massa foi H13, M2-1, M2-2, SE, SC, RE, RX e RY.

Para os ensaios realizados com 600 N a maior perda de massa da esfera ocorreu no par AISI 52100-AISI H13 e a menor quando o contracorpo foi de “SC”. A redução percentual da maior para a menor perda de massa foi de 90,94% para os ensaios com 600 N. A ordem decrescente de perda de massas foi H13, M2-1, M2-2, SE, RE, RY, RX e SC. Para as duas forças estudadas os contracorpos metálicos apresentaram maiores perdas de massas do que os contracorpos de ligas intermetálicas de Nb.

Figura 4.125 - Perda de massa (escala log) em função da carga para os distintos aços e ligas intermetálicas de Nb.

A Figura 4.126 apresenta os valores médios do coeficiente de atrito para os distintos materiais de disco na carga de 150 N. Pode se observar que os valores variam entre 0,54 e 0,94, alcançados pelos discos da liga intermetálica sinterizada de $\text{Fe}_3\text{Al-NbC}$ e o aço AISI M2 (na designação M2-1) contra a esfera de aço AISI 52100 respectivamente. A sequência decrescente de coeficientes de atrito para os ensaios realizados com 150 N foi M2-1, RE, RY, H13, SE, RX, M2-2 e SC.

Figura 4.126 - Coeficiente de atrito médio em função do tempo para os distintos aços e ligas intermetálicas de Nb na carga de 150 N.

A Figura 4.127 apresenta os valores médios do coeficiente de atrito para os distintos materiais de disco na carga de 600 N. Já neste caso, pode se observar que os valores variam

entre 0,31 e 0,64, alcançados pelos discos da liga intermetálica sinterizada de $\text{Fe}_3\text{Al-NbC}$ e o aço AISI H13 contra a esfera de aço AISI 52100 respectivamente. A sequência decrescente de coeficientes de atrito para os ensaios realizados com 600 N foi H13, SE, RX, RE, RY, M2-1, M2-2 e SC.

Figura 4.127 - Coeficiente de atrito médio em função do tempo para os distintos aços e ligas intermetálicas de Nb na carga de 600 N.

Quando comparados todos os resultados de coeficiente de atrito e perda de massa nas duas condições de carga de 150 e 600 N, podem se inferir que os materiais com o melhor comportamento tribológico usando um tribômetro SRV®4 de movimento alternativo (*reciprocating*) foram os seguintes:

O aço AISI M2 (na designação M2-1) apresentou o melhor comportamento em função do aumento da carga de 150 para 600 N, com um decréscimo de 69,3% na sua perda de massa ($4,36 \times 10^{-3}$ para $1,34 \times 10^{-3}$) e com uma redução no valor médio do coeficiente de atrito de 0,84 para 0,44.

A liga sinterizada de Hot-Pressed NbC apresentou a melhor relação quando aumentada a carga de 150 para 600 N, com um incremento de 4,8% na sua perda de massa ($6,35 \times 10^{-4}$ para $6,67 \times 10^{-4}$) e uma redução no valor médio do coeficiente de atrito de 0,77 para 0,45.

O aço AISI H13 apresentou o maior aumento na sua perda de massa, com um incremento de 89,7% ($2,74 \times 10^{-3}$ para $2,67 \times 10^{-2}$) e uma redução no valor médio do coeficiente de atrito de 0,73 com 150 N para 0,57 com 600 N.

A liga sinterizada de NbC-12Co apresentou a menor redução na sua perda de massa, com um decremento de 44% ($3,27 \times 10^{-4}$ para $1,83 \times 10^{-4}$), e uma redução no valor médio do coeficiente de atrito de 0,69 com 150 N para 0,47 com 600 N.

Para as distintas ligas intermetálicas de Nb ensaiadas com esfera de aço AISI 52100, encontrou-se que os mecanismos de desgaste nas superfícies após uma análise de MEV-EDS foram abrasão, adesão e oxidação. Sendo que os danos morfológicos encontrados nas superfícies de ambos os corpos de prova (esfera-disco) foram reportados como presença de riscos na direção do deslizamento, combinada com regiões escuras (material aderido), nas quais após uma análise de EDS, encontrou-se o oxigênio como elemento particular, além da presença de elementos combinados do par tribológico analisado permitindo perceber a transferência de material entre os materiais.

Esses fenômenos de transferência também foram observados por Chun e colaboradores usando o aço X53CrMnNiN 21-9 para a válvula de escape e uma liga sinterizada dopada com 15% Cu, 6,5% Co e 2,0% de W na sede, na qual houve presença do Cu na superfície desgastada da válvula [Chun et al., 2002].

Ramalho e colaboradores reportaram transferência de material quando usado o aço X50CrMnNiNbN 21-9 na válvula e na sede uma liga sinterizada dopada com 20% Cu, 3% Co e 15% MoWNiVSi. Elementos como Cu, Mo e W foram encontrados na superfície de válvula após análise mediante o uso do EDS [Ramalho et al., 2009].

4.4. ANÁLISE DOS MECANISMOS DE DESGASTE NO SISTEMA VÁLVULA – SEDE.

Neste Capítulo são apresentados e discutidos os resultados da caracterização dos mecanismos de desgaste no sistema válvula-sede. A apresentação é dividida em duas partes, o exame visual de dois motores distintos que foram submetidos a testes de dinamômetro comparados com informações da literatura, e uma segunda parte, a caracterização de válvulas e sedes de dois motores distintos que foram submetidos a testes diferentes em dinamômetro e em veículo de teste em estrada. O objetivo das análises foi estabelecer quais os mecanismos de desgaste de modo a comparar com os resultados obtidos nos ensaios de laboratório quando utilizado o tribômetro SRV, como discutido no Capítulo 5.

4.4.1. Exame visual (válvulas)

O primeiro motor é equipado com 8 válvulas no cabeçote e funcionou exclusivamente com E22 (2012), ou seja, não contava com tecnologia *flex-fuel*. Esse motor funcionou em um teste de bancada por 200 horas e tinha a temperatura do fluido de arrefecimento reduzida de 110 para 40 °C para simular um choque térmico, o que ocorreu algumas vezes durante o teste. As válvulas de admissão são do material referenciado como o aço X45CrSi9 (SAE HNV 3) nitretado e válvulas de escape de aço X45CrSi9 (SAE HNV 3) na haste e X50CrNiNbN21-9 (AISI XEV-F) com nitretação na cabeça. O material das sedes é a liga sinterizada NOVOFER AR 20 D.

As Figuras 4.128 e 4.129 a seguir mostram o estado do cabeçote do motor a gasolina, suas válvulas e sedes. Na Figura 4.128 é mostrada a vista inferior do cabeçote, ou seja, a face de contato com o bloco do motor sem as válvulas.

Figura 4.128- Vista da face de contato do cabeçote e seus respectivos cilindros identificados. As sedes com maior diâmetro são referentes às válvulas de admissão.

Cabeçote 8 válvulas - Motor Gasolina (E22).

Na Figura 4.129 são apresentados os cilindros 01 e 04, as válvulas de admissão, escape e a montagem nos seus respectivos assentos. No interior dos dutos de admissão do cabeçote, é evidenciada a presença de óleo. Para facilitar o entendimento a letra A foi usada para identificar a admissão e a letra E para identificar o escape.

Figura 4.129 - Cilindros 01 e 04 do cabeçote motor gasolina com sedes, válvula de admissão e escape.

O segundo motor possui 16 válvulas no cabeçote e conta com tecnologia *flex-fuel*. Esse motor funcionou em um teste de bancada por 300 horas e, assim como o motor 8 válvulas, foi sujeito ao teste de choque térmico com a redução da temperatura do fluido de arrefecimento de 110 para 40 °C com um intervalo de algumas horas entre cada redução de temperatura. O material da válvula de admissão é o aço X45CrSi9 (SAE HNV 3) nitretado e da válvula de escape o aço X45CrSi9 (SAE HNV 3) na haste e X50CrNiNbN21-9 (AISI XEV-F) também com nitretação na cabeça. O material das sedes é a liga sinterizada AR 16 FS.

As Figuras 4.130 e 4.131 a seguir mostram de forma resumida o estado do cabeçote do motor com tecnologia *flex-fuel*, suas válvulas e sedes. Na Figura 4.130 é mostrada a vista inferior do cabeçote, ou seja, a face de contato com o bloco do motor com as válvulas.

Figura 4.130 - Vista da face de contato do cabeçote e seus respectivos cilindros identificados. As válvulas com maior diâmetro são de admissão.

Cabeçote 16 válvulas - Motor *flex-fuel*.

Na Figura 4.131 apresenta os cilindros 01 e 03, o par de válvulas tanto de admissão e escape, quanto a montagem nos seus respectivos assentos. No interior dos dutos de admissão, é evidenciada a presença de óleo, a qual é menor em relação quando comparada com a encontrada no cabeçote 8 válvulas. Assim como no cabeçote 8 válvulas a letra A foi utilizada para mostrar as válvulas de admissão e a letra E usada para mostrar as válvulas de escape, entretanto as válvulas foram definidas como 01 e 02 para saber-se em qual posição do cabeçote encontrava-se.

Figura 4.131 - Cilindros 01 e 03 do cabeçote motor *flex-fuel* com sedes, válvulas de admissão e escape.

No motor equipado com cabeçote 8 válvulas, nota-se que aparentemente válvulas que desempenham a mesma função no motor possuem diferentes níveis de depósitos. Tais depósitos são gerados pelo próprio óleo do motor e causam problemas de dirigibilidade do veículo, aumentam o nível de emissões e também aumento no consumo de combustível [Belincanta, J. e Silva, K. 2009].

Essa diferença do nível de depósitos se dá pela diferença de temperatura e também pelo fluxo de ar diferente em cada cilindro, o que faz com que o combustível atinja a válvula de forma ligeiramente diferente para válvulas de admissão de motores PFI - *Port Fuel Injection*- e isso faz com que uma quantidade diferente de combustível entre em contato com a mesma. Tal problema é acentuado quando a válvula não tem uma rotação constante

[Daneshgari et al., 1989] e quando a temperatura na válvula varia de 160 a 250 °C, além da presença ou ausência de óleo no combustível [Ohsawa et al., 1992].

Outro fenômeno que ocorre é a formação de uma pasta densa e negra na haste de válvula causado por óleo e outros produtos oxidados, esse óleo poder passar pelo retentor ou também ser carregado pelo combustível [Lewis e Dwyer-Joyce, 2002].

As figuras a seguir demonstram o que aconteceu com as válvulas do motor gasolina. Foi encontrado óleo oxidado em todas as hastes como apresentado na Figura 4.132, na qual são ilustradas as válvulas de admissão dos quatro cilindros respectivamente e todas contendo depósitos na superfície da cabeça, além de uma pasta densa e negra (borra) na haste.

Figura 4.132 - Presença de óleo e depósitos nas válvulas de admissão do motor gasolina.

Além dos resíduos de óleo nos dutos de admissão, presença de óleo nas hastes e depósitos nas superfícies das válvulas, também foi observada na área de contato entre a válvula e a sede pequenas marcas na superfície. Na Figura 4.133 podem se observar as áreas de contato tanto da válvula quanto da sede com as marcas mencionadas anteriormente.

Figura 4.133 - Marcas na superfície de contato entre a válvula e a sede do motor gasolina.

Enquanto às válvulas de escape, o nível de depósito apresentado, aparentemente é similar em todos os cilindros (Figura 4.134).

O óleo não é encontrado na haste como nas válvulas de admissão, pois a temperatura de operação chega até os 800 °C [Lewis e Dwyer-Joyce, 2002]. O depósito na válvula de escape é formado basicamente por componentes produto da combustão.

Figura 4.134 - Nível de depósitos nas válvulas de escape do motor gasolina.

Com relação ao motor equipado com cabeçote 16 válvulas encontraram-se que, aparentemente válvulas que desempenham a mesma função e no mesmo cilindro possuem diferentes níveis de depósitos. Como ocorreu no motor 8 válvulas a temperatura e o óleo na haste criaram uma borra (Figura 4.135).

Figura 4.135 - Presença de óleo e depósitos nas válvulas de admissão do motor *flex-fuel*.

Da mesma forma que no motor gasolina, o nível de depósito apresentado nas válvulas de escape, aparentemente é similar em todos os cilindros (Figura 4.136).

Figura 4.136 - Nível de depósitos nas válvulas de escape do motor *flex-fuel*.

Depois do exame visual das válvulas tanto do cabeçote gasolina quanto do *flex-fuel*, foram comparadas as superfícies do assento das válvulas com o reportado na literatura, procurando uma relação sobre o efeito do tipo de combustível utilizado nos testes de dinamômetro.

Enquanto ao desgaste na região do assento, é possível observar as marcas características na válvula de admissão do cilindro 03 no motor gasolina após o exame visual. Essas marcas são mais bem apresentadas, visualizando as linhas radiais quando foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (Figura 4.137).

Figura 4.137 - Desgaste na região do assento (válvula admissão cilindro 03).

Além do desgaste na região do assento no cilindro 03, foram encontradas fissuras na válvula de admissão do cilindro 01 do mesmo motor. Quando comparadas as marcas reportadas na literatura com a imagem obtida utilizando o MEV, encontrou-se o tipo de dano sofrido na superfície do assento da válvula (Figura 4.138).

Figura 4.138 - Fissuras na região do assento (válvula admissão cilindro 01).

Algumas irregularidades foram encontradas na cabeça da válvula, em especial, válvulas de admissão dos cilindros 01 e 03 no motor gasolina. Na região do assento da válvula pode se observar uma faixa irregular de assentamento como reportado na literatura. A Figura 4.139 apresenta de forma resumida a comparação mencionada anteriormente.

Figura 4.139 - Desgaste na região do assento: faixa irregular de assentamento.

a) MAHLE, 2012; b) válvula admissão cilindro 03; c) válvula admissão cilindro 01.

Finalmente, foram encontrados resíduos e sinais de excesso de carvão na base da válvula. Esses resultados confrontam com o que foi reportado na literatura pesquisada, [MAHLE GmbH, 2012] [Lewis e Dwyer-Joyce, 2002] seguindo os mesmos parâmetros e fundamentos para que a falha, dano ou anomalia aconteça no sistema válvula-sede. Na Figura 4.140 é apresentado o fato discutido anteriormente.

Figura 4.140 - Válvula de admissão contaminada com óleo lubrificante.

a) MAHLE, 2012; b) válvula admissão cilindro 01; c) Lewis e Dwyer Joyce, 2002.

4.4.2. Caracterização dos mecanismos de desgaste

Nesta segunda parte, as análises de desgaste foram realizadas nas válvulas e sedes de dois motores distintos designados por MT-1 (veículo teste em estrada) e MT-2 (dinamômetro), como pode ser observado na Figura 4.141a. A região analisada neste trabalho está identificada na Figura 4.141b como “superfície de contato”.

Figura 4.141 – (a) Válvula à esquerda e sede, à direita; (b); contato entre a válvula e sede.

Inicialmente, foram realizadas análises na superfície de contato de válvulas novas dos motores MT-1 e MT-2, de maneira a auxiliar na identificação dos mecanismos de desgaste após ensaios. Na Figura 4.142 podem-se observar as marcas características da usinagem da operação final de fabricação das válvulas.

Figura 4.142 - Superfície das válvulas novas (MT-1) obtidas por MEV a) admissão b) escape.

A Figura 4.143 a seguir apresenta a superfície de contato das válvulas de admissão e escape obtidas no MO e no MEV, com as suas respectivas características de marcas de usinagem distribuídas radialmente em toda a sua área. Este tipo de acabamento foi o ponto inicial da superfície para a caracterização após ensaio no motor do veículo de teste em estrada.

Figura 4.143 - Superfície das válvulas novas (MT-1).

Admissão a) MO b) detector BSE. Escape c) MO d) detector BSE.

A caracterização da microestrutura do material das válvulas é apresentada na Figura 4.144. Para o material da válvula de admissão, o aço martensítico X45CrSi9-3 (SAE HNV 3) e para a válvula de escape, o aço austenítico X50CrMnNiNbN21-9 (SAE XEV-F).

Figura 4.144 - Microestrutura das válvulas obtidas por MO (MT-1) a) admissão b) escape.

A Figura 4.145 a seguir mostra o estado do cabeçote do motor MT-1, suas válvulas e sedes. Na Figura 4.146 é apresentado o cilindro 1, com as suas respectivas válvulas de admissão e escape.

Figura 4.145 - Vista da face de contato do cabeçote do motor MT-1 e seus respectivos cilindros identificados. As válvulas com maior diâmetro são de admissão.

Cabeçote 8 válvulas - Motor *flex-fuel*.

Figura 4.146 - 1^{er} Cilindro motor MT-1 a) válvula de admissão b) sedes c) válvula de escape.

A Figura 4.147 mostra a superfície da válvula de admissão do motor MT-1. A superfície de contato foi dividida em duas regiões, com características distintas, denominadas 1 e 2 e apresentadas na Figura 4.147a, quando utilizado MO. A região 1 apresenta uma superfície com riscos circunferenciais mais pronunciados e a região 2 apresenta um aspecto mais homogêneo com coloração acinzentada.

Na Figura 4.147b, utilizando o MEV, é possível observar riscos circunferenciais provenientes de usinagem (similar ao que foi observado nas Figuras 4.142 e 4.143) e regiões escuras, que através de uma análise detalhada, conclui-se que as mesmas são provenientes de deposição de material, já que abaixo do material aderido existem riscos de usinagem descontínuos (Figura 4.148).

Figura 4.147 - Imagem da superfície de contato da válvula de admissão do motor MT-1.

Figura 4.148 - Detalhe da superfície de contato da válvula de admissão do motor MT-1.

a) MO com aumento de 2x b) MEV com aumento de 120x.

Por outra parte, a Figura 4.149 mostra a presença de riscos circunferenciais, sulcos e valas circunferenciais, além de depósitos (região escura) permitindo identificar as duas regiões na superfície de contato, como mencionado anteriormente.

Figura 4.149 - Imagens obtidas no MEV da válvula de admissão do motor MT-1.

a) superfície de contato b) depósito.

A superfície de contato da válvula de escape do motor MT-1, mostrada na Figura 4.150, pode-se dividir em três regiões, que apresentam diferentes colorações e aspectos indicando que o desgaste ocorreu de forma distinta.

Figura 4.150 - Superfície da válvula de escape (MT-1) obtida por a) MO com aumento de 3x e b) MEV com aumento de 120x.

A região 1 apresentou depósitos, regiões escuras e riscos circunferenciais de usinagem, que podem ser melhor observados na Figura 4.151a. A região 2 apresentou uma característica de transição entre as regiões 1 e 3. Já a região 3 apresentou uma superfície lisa com deposição desorganizada de material, o que pode indicar, como citado anteriormente, um maior desgaste nesta região.

Figura 4.151 - Região 1 da válvula de escape (MT-1) obtida por a) MEV com aumento de 500x utilizando detector BSE b)EDS para análise do ponto 001.

Uma análise de espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDS) na região escura (Figura 4.151b) mostrou a presença de elementos como: Fe, C, Si, P, K, S, Mn, Ni e Cr, todos os elementos constituintes das válvulas e sedes, porém foi observado um pico de oxigênio que indica existir oxidação neste local. A presença de Na e Zn, podem indicar que talvez seja um depósito proveniente do óleo lubrificante.

Verificou-se a presença do elemento químico S na superfície de contato de válvula de escape do motor MT-1, que é um elemento constituinte da sede de válvula (AR 16 FS), indicando a possibilidade de material transferência de sede para a superfície da válvula, como observado por Chun [Chun, Kim & Hong, 2007] e Ramalho [Ramalho, et al. 2009].

Uma análise de espectroscopia Raman na superfície da válvula de escape do motor MT-1, apresentado na Figura 4.152 mostrou a combinação de hematite (Fe_2O_3) picos (223, 289, 404 e 1310 cm^{-1}) e magnetita (Fe_3O_4) picos (670 cm^{-1}), valores similares como obtidos por CHICOT [Chicot, et al. 2011]. Após várias medições, foi possível determinar que a presença de magnetita é superior a hematita; o pico mais alto é cerca de 670 cm^{-1} .

Figura 4.152 - Análise por espectrometria Raman no ponto 001 (MT-1).

Em outra região da sede, identificada na Figura 4.153, pode-se observar uma coloração diferente. No entanto, esta não representa uma mudança no desgaste da superfície e sim uma deposição de algum material, como verificado na imagem obtida por MEV.

Figura 4.153 - Superfície da sede de admissão (MT-1) obtida por
a) MO com aumento 3x b) MEV com aumento 150x.

A superfície da sede de escape do motor MT-1, mostrada na Figura 4.154, apresentou três regiões com diferentes características e cores. A Região 1 é mais suave do que outras regiões e depósitos e arranhões circunferenciais de usinagem podem ser observados na região 3. A Região 2 é uma transição entre as regiões 1 e 3.

Figura 4.154 - Superfície da sede de escape (MT-1) obtida por a) MO com aumento 3x
b) MEV com aumento 120x.

Um desgaste maior foi observado na região externa (região 1) e pode ser atribuído à alta pressão de contato, e o desgaste diminuindo para a região interna de contato, provavelmente devido à recomendação do projeto, a fim de garantir a vedação, como mostrado na Figura 2.13 [MAHLE GmbH, 2013]. Como a superfície está mais desgastada, a área de contato aumenta e a superfície da sede tornou-se mais danificada.

Na Figura 4.155 é possível observar as marcas de usinagem das válvulas do motor MT-2 nas imagens obtidas por MO e MEV. A superfície de contato é similar às válvulas do motor MT-1, devido ao mesmo processo final de fabricação. A principal diferença entre a superfície de contato das válvulas se deve ao tipo de camada superficial (nitretação).

Figura 4.155 - Superfície das válvulas novas (MT-2).
Admissão a) MO b) detector SE. Escape c) MO d) detector SE.

O material da válvula de admissão do motor MT-2 foi aço martensítico AISI HNV 3 e da válvula de escape, a haste de aço martensítico X45CrSi9-3 (AISI HNV 3) e cabeça da válvula de aço austenítico X50CrMnNiNbN21-9 (AISI XEV-F) com nitretação. As sedes das válvulas de material sinterizado de dupla camada NOVOFER AR 20.

A microestrutura das válvulas e sedes do motor MT-2 são apresentadas nas Figuras 4.156 e 4.157.

Figura 4.156 - Microestrutura do aço martensítico AISI HNV 3.

a) MO b) MEV com detector BSE indicando os pontos 001 até 004.

Figura 4.157 - Microestrutura do aço austenítico AISI XEV-F. a) MO b) MEV com detector BSE.

A microestrutura NOVOFER AR 20, material da sede é apresentada na Figura 4.158, indica martensita temperada com carbonetos finos distribuídos e fases intermetálicas uniformemente dispersas. Os lubrificantes sólidos estão uniformemente distribuídos e a maioria dos poros é preenchida com Cu, em conformidade com informação do fornecedor.

Figura 4.158 - Microestrutura de AR 20 para sede de admissão e de escape do motor MT-2.

A Figura 4.159 a seguir mostra o estado do cabeçote do motor MT-2, suas válvulas e sedes. Na Figura 4.160 é apresentado o cilindro 1, com as suas respectivas válvulas de admissão e escape.

Figura 4.159 - Vista da face de contato do cabeçote do motor MT-2 e seus respectivos cilindros identificados. As válvulas com maior diâmetro são de admissão.

Cabeçote 8 válvulas. Motor *flex-fuel*.

Figura 4.160 - 1^{er}. Cilindro motor MT-2 a) válvula de admissão b) sedes c) válvula de escape.

As Figuras 4.161a e 4.161b mostram a superfície da válvula de admissão do motor MT-2. É possível distinguir duas regiões com características diferentes, apontadas como 1 e 2. A região 1, ambas as fronteiras do contato (interior e exterior) caracteriza-se por riscos de usinagem circunferenciais e a presença de depósitos. A região 2 é uma superfície lisa e polida.

A Figura 4.161b mostra vários aspectos, indicando que o desgaste ocorreu em condições diferentes. A região externa (1) tem depósitos, regiões escuras, sulcos circunferenciais e

valas, e no resto da superfície de contato, as mesmas características mencionadas anteriormente.

Figura 4.161 - Superfície da válvula de admissão (MT-2).

A topografia da superfície da válvula obtida por perfilometria 3D sem contato é apresentada na Figura 4.162.

Figura 4.162 - Topografia da superfície de contato da válvula de admissão obtida por WLI (MT-2).

Foi encontrada um vale com uma profundidade de aproximadamente 3,5 µm na região 2, mostrando um desgaste maior, indicando que o primeiro contato entre a válvula e a sede da válvula ocorreu lá. A rugosidade da região 1 mostrou valores de rugosidade média (S_a) de 0,0206 µm para ambas as extremidades. Para a região 2, é revelada uma superfície grosseira, apresentando uma região mais clara no centro e superfície áspera,

com valor de rugosidade S_a de $0,0538 \mu\text{m}$, aproximadamente 2,6 maior do que o obtido na região I.

Outros danos, tais como riscos radiais e inclinados, também foram observados, como mostrado na figura 4.163.

Figura 4.163 - Superfície de contato da válvula de admissão (MT-2).

a) riscos radiais b) riscos oblíquos.

Em outra região da válvula de escape do motor MT-2 foi encontrado uma marca circular no meio da superfície de contato, como apresentada na Figura 4.164a. Observou-se possível desprendimento de material e/ou deformação plástica na parte externa e nas regiões mais escuras, destacada na Figura 4.164b. Isso pode ser um resultado da erosão devido ao fluxo de gás de exaustão quente após a combustão do motor.

Figura 4.164 - a) superfície de contato da válvula de escape (MT-2) b) marca circular 350x.

Na Figura 4.165a pode-se observar uma banda central e deposição de material na superfície. Este depósito pode ser consequência da interação entre o material da sede e os compostos da mistura ar-combustível & *blow-by*. Também pode se observar sulcos circunferenciais como mostrado na Figura 4.165b. Os sulcos foram causados por pequenas partículas que também deixaram um material de depósito, como observa-se na imagem de MEV.

Figura 4.165 - Superfície de contato da sede de admissão (MT-2).

Na Figura 4.166 pode se observar a presença de depósitos em quase toda superfície de contato. Nesta imagem, obtida por MO, percebe-se que o depósito tem cor laranja típico da ferrugem, indicada pela seta. Na imagem de MEV pode ser observado que o depósito não tem nenhum padrão de distribuição, mostrando que este depósito não está relacionado com o desgaste causado pelo contato entre a válvula e a sede, mas pela interação com os gases quentes da combustão.

Figura 4.166 - Superfície da sede de escape (MT-2) obtida por
a) MO com aumento 2x b) MEV com aumento 80x.

Com base nas análises realizadas e a observação visual de válvulas e sedes de admissão e escape de motores de 8 válvulas foram reveladas a ocorrência de danos superficiais produzidos não só pelos fenômenos tribológicos, mas também pela condição de funcionamento do motor e pelo processo de corrosão, como a presença de produtos de oxidação, além de riscos de usinagem circunferenciais devido ao processo de fabricação.

Muitos dos danos observados estavam presentes em ambas as válvulas e sedes de admissão e escape; no entanto, a oxidação ocorreu apenas nas válvulas de escape dos motores examinados, provavelmente produzido pela alta temperatura durante a operação do motor. Devido à severidade das condições de funcionamento das válvulas e sedes de escape, o desgaste foi mais pronunciado quando comparado com as válvulas e sedes de admissão.

As alterações mais significativas ocorreram na superfície das sedes. Dadas às especificações de projeto (Figura 2.13) o desgaste deveria ser 2/3 do total na sede e 1/3 na válvula.

A falha da superfície cônica da válvula é causada principalmente pela deformação elástica e plástica, além de fadiga. Como discutido acima, as válvulas de escape operam em temperatura mais elevada, resultando na formação de uma superfície corroída nas válvulas promovida pelos gases da combustão. Metais em serviço, sempre tiveram material removido na sua superfície como resultado da erosão por colisão de partículas pequenas e

sólidas. Na maioria dos ambientes de erosão em alta temperatura, a superfície erodida também é corroída.

O desgaste ocorreu principalmente devido a dois fatores: primeiro pela força do impacto entre a face da válvula e da sede, e o segundo pela válvula escorregar na superfície da sede durante o funcionamento do motor. As válvulas e sedes analisadas revelaram que alguns dos mecanismos desgaste puderam ter acontecido devido a deslizamento (Figura 4.163), bem como a ação de impacto (região 2 da Figura 4.162).

O presente trabalho desenvolveu técnicas que melhoravam a análise da superfície de contato, dividindo a superfície em várias regiões de desgaste. Estas regiões identificadas em superfícies de válvulas e sedes permitiram analisar diferentes rugosidades e padrões sobre o desenvolvimento do desgaste destas peças em motores *flex-fuel*. Esta característica converge com a literatura existente que prevê através de plano de projeto (Figura 2.13) que o desgaste deve começar na primeira linha de contato entre a válvula e a sede próximo ao diâmetro exterior, e este estudo evidenciou-se esta premissa de projeto, permitindo a identificação e caracterização dos mecanismos de desgaste em cada região.

Os danos morfológicos como banda central, risco radial e oblíquo foram encontrados somente nas válvulas e sedes de admissão do motor MT-2. Isto provavelmente ocorreu devido ao ciclo de teste de choque térmico, causando distorção da cabeça de cilindro, influenciando no desgaste de válvulas e sedes. Outra causa possível é o projeto dos componentes que afetam diretamente a distribuição de forças sobre a superfície de contato.

A Tabela 4.2 resume os danos observados nas válvulas e sedes de admissão e de escape de ambos os motores MT-1 e MT-2. Pode-se observar que muitos danos ocorreram em ambos: válvulas e sedes de admissão e escape, no entanto, alguns dos danos foram observados somente na válvula e sede de admissão do motor MT-2, tais como banda central, riscos radiais e oblíquos.

Tabela 4.2 - Resumo dos danos encontrados nos pares tribológicos.

Dano	Motor							
	MT-1				MT-2			
	Válvula		Sede		Válvula		Sede	
	Adm	Esc	Adm	Esc	Adm	Esc	Adm	Esc
Depósito	X	X	X	X	X	X	X	X
Oxidação	X	X	X	X	X	X	X	X
Riscos Circunferenciais	X	X	X	X	X	X	X	X
Sulcos e Valas Circunferenciais		X		X	X	X	X	X
Banda Central					X		X	
Riscos Radiais					X		X	
Riscos Oblíquos					X		X	

5. CONCLUSÕES

Quando comparados os resultados obtidos nos ensaio de laboratório deste trabalho de pesquisa com as diferentes fontes da literatura, é possível perceber que existem semelhanças diretamente ligadas ao uso dos muitos materiais empregados na indústria automobilística tanto nas válvulas quanto nas sedes. Sintetizando, foram encontrados nos trabalhos citados anteriormente, resultados de coeficiente de atrito e taxa de desgaste, causados pelo efeito da variação da carga, temperatura e velocidade de deslizamento.

Como resultados mais relevantes, podem ser mencionados:

- ✓ Transferência de material entre as superfícies em contato durante o ensaio, possivelmente produto de uma reação triboquímica.
- ✓ Enquanto à formação do tribofilme “*glaze layer*” nas superfícies podem se apresentar diminuições nos valores do coeficiente de atrito depois um tempo determinado de ensaio, resultando em uma mudança no regime de desgaste de severo para moderado.
- ✓ A formação de tribofilmes pode favorecer a proteção das superfícies enquanto ao desgaste e coeficiente de atrito menor. Além dessas vantagens pode resultar em ganhos de massa devido à formação de algum tipo de óxido nas superfícies quando realizados os ensaios a altas temperaturas.
- ✓ Encontrou-se uma relação direta enquanto a influência da carga aplicada durante o ensaio, para valores de carga entre 15 e 600 N, a taxa de desgaste aumentou progressivamente com o incremento da mesma.

FREQUÊNCIA

AISI 52100 - AISI H13

- ✚ Dada as diferenças nos valores de perda de massa obtidos entre 4 e 80 Hz para o par tribológico pode se concluir que houve mudanças nos regimes de desgaste, passando do regime moderado (4 Hz) para o regime severo (20-40 e 80 Hz).
- ✚ Encontraram-se diferenças entre os mecanismos de desgaste que predominaram durante os ensaios no tribômetro, além de uma correlação com as variações no coeficiente de atrito.
- ✚ Os mecanismos de desgaste que predominaram nos ensaios são uma combinação entre desgaste abrasivo, adesivo e oxidativo atuando juntos em ambos os corpos de prova.
- ✚ Encontrou-se um comportamento da área de desgaste do material de ambos os corpos de prova (esfera-disco) com uma tendência similar à obtida com o coeficiente de atrito em função do tempo, quando aumentada a frequência de 4 para 80 Hz.

AISI 52100 - AISI M2-1

- ✚ Foi desenvolvida uma metodologia de acompanhamento para o coeficiente de atrito em função do tempo, com o objetivo de perceber as mudanças nos mecanismos de desgaste do par tribológico.
- ✚ Encontrou-se que nas marcas de desgaste para ambos os tempos de ensaio (1.350 e 2.700 s) na condição de 4 Hz, apresentaram riscos uniformes de desgaste por deslizamento que indicam que não houve alteração no mecanismo de desgaste ao longo do ensaio. Também foi possível observar oxidações nos entornos das marcas.

- ✚ Foi identificada para a condição de 80 Hz uma diferença entre os mecanismos de desgaste no material da esfera, pois no ensaio de 1.350 s existe a predominância de riscos enquanto que no ensaio de 2.700 s existem riscos pouco uniformes e regiões polidas, indicando que os ensaios de 80 Hz possuem desgaste misto (deslizamento + abrasão).

AISI 52100 - AISI M2-2

- ✚ Encontrou-se que nas marcas de desgaste para ambos os tempos de ensaio (1.350 e 2.700 s) na condição de 4 Hz, apresentaram riscos uniformes de desgaste por deslizamento que indicam que não houve alteração no mecanismo de desgaste ao longo do ensaio.
- ✚ Ensaios com durações menores para avaliar a evolução das marcas de desgaste e a posterior caracterização dos mecanismos de desgaste atuando nos corpos de prova, ajudaram na identificação das alterações superficiais (riscos, camadas de óxido, deposição de *debris*) e ao entendimento do comportamento do coeficiente de atrito em função do tempo.
- ✚ Confirmou-se a hipótese da formação de óxido e da deposição de *debris* com as análises de MEV-EDS nas marcas de desgaste, logo depois com análise de espectroscopia Raman, foram identificados os tipos de óxidos presentes nas marcas de desgaste, dando como resultado a presença de hematita e magnetita.
- ✚ O recurso da medida da resistência de contato entre a esfera e o disco no tribômetro SRV-4, pode ser utilizado como uma alternativa para verificar os tempos nos quais acontece a formação e/ou quebra de camadas de óxido durante o ensaio *reciprocating*.

CARGA

AISI 52100 - AISI H13

- ✚ Encontrou-se que a variação de massa e de taxa de desgaste do disco foi de (maior - menor) enquanto que a variação da massa e da taxa de desgaste da esfera foi de (menor - maior). Com base nesta variação é possível que não tenha ocorrido variação de regime, sendo que todos os ensaios geraram resultados no regime severo.
- ✚ Mediante as análises de MEV para as marcas de desgaste (150, 300 e 600 N), determinou-se que houve deformação plástica, acúmulo de material e regiões escuras (oxidação), tanto no disco quanto na esfera para as três cargas relacionadas, ajudando ao entendimento das variações nos coeficientes de atrito ao longo dos ensaios.
- ✚ Confirmou-se a hipótese da formação de óxido com as análises de MEV-EDS nas marcas de desgaste, além da transferência de material entre ambos os corpos, após identificarem-se elementos constituintes dos aços do par tribológico AISI 52100-AISI H13.

AISI H13 - AISI M2 - Ligas Intermetálicas de Nb

- ✚ Encontrou-se para as duas cargas estudadas (150 e 600 N) que a maior perda de massa da esfera ocorreu quando ela foi esfregada contra o aço AISI H13 e a menor quando o contracorpo foi de NbC_{0,88}-12Co, com uma redução percentual do maior para o menor foi de 86,92 para 150 N % e de 90,75% para 600 N.
- ✚ Para as duas forças estudadas os contracorpos metálicos, os aços AISI H13, AISI M2-1 e M2-2 apresentaram maiores perdas de massas das esferas do que os contracorpos de ligas intermetálicas de Nb.
- ✚ Com o aumento da força normal de 150 para 600N, sempre houve um aumento nas perdas de massa da esfera para todos os materiais de contracorpo estudados.

- ✚ No caso dos discos, encontrou-se que para 150 N a maior perda de massa ocorreu para o aço AISI M2-1 e a menor quando o ensaio foi realizado com o disco da liga sinterizada de NbC-12Fe₃Al com uma redução percentual do maior para o menor foi de 96,08%.
- ✚ Nos ensaios de 600 N a maior perda de massa do disco ocorreu nos ensaios realizados com o aço AISI H13 e a menor com a liga sinterizada NbC-12Co com uma redução percentual da maior para a menor perda de massa foi 99,31%.
- ✚ Com o aumento da força normal de 150 para 600N, houve tanto aumento como redução nas perdas de massa para todos os materiais de disco estudados. Os aços AISI H13 e AISI M2-2 e as ligas sinterizadas de NbC_{0,88}-12Co e NbC-12Fe₃Al aumentaram a perda de massa.
- ✚ Entre todos os materiais, o aço AISI M2 (na designação M2-1) apresentou o melhor comportamento em função do aumento da carga de 150 para 600 N, com um decréscimo de 69,3% na sua perda de massa e uma redução no valor médio do coeficiente de atrito de 0,84 para 0,44. Já a liga sinterizada de Hot-Pressed NbC apresentou a melhor relação com um incremento de 4,8% na sua perda de massa e uma redução no valor médio do coeficiente de atrito de 0,77 para 0,45.
- ✚ Para as distintas ligas intermetálicas de Nb ensaiadas com esfera de aço AISI 52100, encontrou-se que os mecanismos de desgaste nas superfícies após uma análise de MEV-EDS foram particularmente abrasão, adesão e oxidação, fenômenos que também foram observados em outros trabalhos reportados na literatura usada no desenvolvimento deste estudo.
- ✚ Os distintos mecanismos de desgaste observados neste trabalho reportados como abrasão, adesão e oxidação, assim como a transferência de material entre ambos os corpos do par tribológico, também foram observados como indicado na literatura.

TEMPERATURA

AISI 52100 - AISI H13

- ✚ O estudo realizado em função da temperatura para o par tribológico mostrou que 30 min de ensaio, não são tempo suficiente para obter dois regimes de atrito como reportado na literatura.
- ✚ Nos ensaios de 30 min para o material do disco (aço AISI H13), ainda sem os dois regimes de atrito observou-se que acima de 350 °C a perda de massa passava a ser negativa (ganho de massa), enquanto que para o material da esfera (aço AISI 52100) a perda de massa sempre foi positiva.
- ✚ Para o tempo de 30 min e na temperatura ambiente o mecanismo de desgaste atuante foi abrasão. Já para 400 °C o principal mecanismo é oxidação.
- ✚ 4 h de ensaio já é tempo suficiente para observar os dois regimes de atrito como reportado pelo Stott, mas só para a maior das temperaturas estudadas (500°C).
- ✚ No caso particular de 8 h de ensaio, tanto para o coeficiente de atrito como para a temperatura de 350 °C encontraram-se os dois regimes de atrito e uma perda de massa negativa (ganho de massa) para o material do disco. Este fato confirma o apresentado na literatura: quanto maior a temperatura de ensaio, menor o tempo para acontecer a transição no regime de atrito (350 °C $\approx$ 16.800 s e 500 °C $\approx$ 4.000 s) e um aumento na massa, produto da formação de filmes de óxido.
- ✚ Confirmou-se a hipótese da formação de filmes óxido com as análises de MEV-EDS nas marcas de desgaste para temperaturas acima de 350°C, logo depois com análise de espectroscopia Raman, foram identificados os tipos de óxidos presentes nas marcas de desgaste, dando como resultado a presença de hematita e magnetita. Estes filmes de óxido também foram reportados em outros realizados da literatura com a variação de temperatura em distintos tipos de materiais.

- ✚ Considerando que os ensaios foram realizados com temperaturas até 500 °C, o material de disco (AISI H13) apresentou um bom comportamento enquanto a sua estabilidade na dureza após 8 h de ensaio, após ser medida tanto na superfície quanto na marca de desgaste.
- ✚ Considerando os resultados obtidos com o par tribológico apresentado nas temperaturas de 700 e 800 °C, é muito provável que o problema de ter valores de coeficiente de atrito iguais a zero, seja mais uma limitação do tribômetro SRV-4, do que uma resposta tribológica nessas temperaturas.

ANALISE DOS MECANISMOS DE DESGASTE DE VÁLVULAS E SEDES

- ✚ O exame visual tanto do cabeçote do motor gasolina quanto o *flex-fuel*, permitiu encontrar uma serie de danos e irregularidades nas superfícies das válvulas que podem ajudar ao entendimento dos mecanismos de desgaste quando a troca de combustível, evitando chegar a uma falha catastrófica na qual o motor seja prejudicado no seu funcionamento.
- ✚ Enquanto aos danos encontrados, foram vários os tipos observados tanto nas válvulas de admissão quanto as de escape. Desde a região do assento da válvula desgastada, fissuras, faixas irregular de assentamento, até contaminação com óleo lubrificante e formação de depósitos na cabeça e presença de óleo formando uma borra na haste nas válvulas de admissão e diferentes níveis de depósitos produto da alta temperatura tanto na haste quanto na cabeça das válvulas de escape.
- ✚ Válvulas de admissão de motores de combustão interna parecem sofrer um problema de longa data com os retentores, a literatura pesquisada menciona a presença de óleo na haste da válvula e esse fenômeno foi encontrado nos cabeçotes dos motores testados.
- ✚ As válvulas de escape tendem a ter uma menor variação na quantidade de depósitos quando comparados com os outros cilindros do mesmo tipo de motor.

- ✚ A área de contato entre a válvula e a sede do motor gasolina parece ter sofrido um desgaste maior, já que pequenas marcas foram encontradas nas superfícies, quando comparado com o motor *flex-fuel*.
- ✚ Na caracterização dos mecanismos de desgaste de válvulas e sedes de escape, encontraram-se três regiões distintas, apresentando diferentes colorações e aspectos indicando que o desgaste ocorreu de forma distinta. Este fato foi verificado com a literatura, quando por condições de projeto existe a chamada primeira linha de contato entre o par válvula-sede, o que justifica ter encontrado as distintas regiões.
- ✚ Mediante análises de MEV-EDS nas válvulas de escape, confirmou-se a presença do O e de elementos constituintes do aço válvula, além do Na e Zn provenientes do óleo lubrificante e até a presença de elementos da sede de válvula. Este fato indica que além do desgaste do material, existe a formação tribofilmes na cabeça da válvula e a transferência de material, como reportado na literatura.
- ✚ Confirmou-se a hipótese da formação de tribofilmes com as análises de espectroscopia Raman, na qual foi identificada uma combinação de hematita e magnetita.
- ✚ Entre os distintos mecanismos de desgaste observados nas válvulas e sedes analisadas, encontraram-se riscos circunferências (abrasão), depósitos (oxidação) e transferência de material entre o par tribológico (adesão), além de muitos outros danos dependendo do tipo de função no motor. O fato de ter encontrado esta combinação de mecanismos de desgaste em válvulas e sedes de motores, leva a considerar que o uso do tribômetro SRV-4 pode ser uma ferramenta útil e mais simples para avaliar o comportamento frente ao coeficiente de atrito, a perda de massa e os mecanismos de desgaste envolvidos nos materiais do par válvula-sede.
- ✚ Cabe ressaltar que o tribômetro SRV-4 ainda com suas limitações enquanto à geometria dos corpos de prova e suas variáveis operacionais (temperatura, carga, amplitude, etc) apresentou um bom comportamento quando realizados

os ensaios, mantendo a repetitividade e reprodutibilidade nas curvas de coeficiente de atrito, além de reproduzir em boa parte alguns dos mecanismos de desgaste e os tipos de óxidos que foram encontradas no par válvula-sede de motores em campo.

“Não vou morrer na praia. Já cheguei”

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo de um sistema tribológico pode ser tão difícil como apresentado na Figura 6.1 no qual aparecem os distintos níveis ou categorias para a abstração de um tribossistema. O nível I apresenta um veículo em estrada como um todo, já nos níveis II e III é apresentado sistemas específicos, como o caso do motor no dinamômetro (isolando as outras componentes do veículo). Nos níveis IV, V e VI, opções de tribossistemas simplificados para estudo em ensaios de laboratório, sempre procurando uma relação direta com os componentes em grande escala [ZUM-GAHR, 1987].

Figura 6.1- Categorias para um tribossistema.

Dada a importância de alguns aspectos como as novas tendências em motores, com características como injeção direta, turbocompressores, maior potência com menor

consumo de combustível e emissões contaminantes, além dos novos óleos lubrificantes e biocombustíveis, e reforçando os resultados obtidos no trabalho de pesquisa ilustrado anteriormente, consideram-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros e especificamente no par tribológico válvula-sede de motores *flex-fuel*.

- ✚ Realizar ensaios no tribômetro SRV-4 usando a metodologia desenvolvida neste trabalho de pesquisa para avaliar o efeito da carga e a temperatura com os novos materiais que estão sendo desenvolvidos para o par válvula-sede de motores de combustão interna do tipo *flex-fuel*, visando acompanhar o seu comportamento frente ao atrito e a perda de massa, assim como os mecanismos de desgaste envolvidos no ensaio.
- ✚ Aprofundar na fase intermediária da Figura 6.1 a fim de conseguir isolar alguns dos danos morfológicos encontrados tanto na caracterização das distintas válvulas e sedes de motores e no tribômetro SRV-4 com os distintos materiais. No marco do Projeto Triboflex, com a bancada de válvulas apresentada na Figura 6.2 é possível realizar ensaios sem combustão, mantendo-se as rpm e a dinâmica de um motor de combustão interna.

Figura 6.2- Bancada para teste de válvulas e sedes.

- ✚ Realizar ensaios na bancada para teste de válvulas e sedes (Figura 6.2) na temperatura ambiente e em alta temperatura por indução (sem combustão) a fim de avaliar os danos morfológicos apresentados em válvulas e sedes, e aprofundar no entendimento dos fatores que influenciam no desgaste do par tribológico.

TRABALHOS APRESENTADOS EM CONGRESSO

ANÁLISE DE DANOS MORFOLÓGICOS OBSERVADOS EM VÁLVULAS E SEDES APÓS DIFERENTES ENSAIOS DE MOTOR.

8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF.

Salvador, Bahia, Brasil. 2015.

8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação
18 a 22 de maio de 2015, Salvador, Bahia, Brasil
Copyright © 2015 ABCM

ANÁLISE DE DANOS MORFOLOGICOS OBSERVADOS EM VÁLVULAS E SEDES APÓS DIFERENTES ENSAIOS DE MOTOR. COF-2015-0256

Alexander Zuleta Durango, alexanderzuleta12@usp.br¹
Leonardo Andrioli Thiodoro, leothiodoro@usp.br¹
Felipe Mazuco, felipe.mazuco@usp.br¹
Deniol K. Tanaka, dktanaka@usp.br¹
Amilton Sinatora, sinatora@usp.br¹

¹ Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes 2231, São Paulo, SP, Brazil

ANALYSIS OF VALVE AND VALVE SEAT INSERT DAMAGE MORPHOLOGY OBSERVED AFTER DIFFERENT ENGINE TEST.

VIII Iberian Conference on Tribology - IBERTRIB 2015.

Cartagena, Espanha. 2015.

Ibertrib 2015. VIII Iberian Conference on Tribology

ANALYSIS OF VALVE AND VALVE SEAT INSERT DAMAGE MORPHOLOGY OBSERVED AFTER DIFFERENT ENGINE TEST

A. Zuleta Durango^{1(*)}, F. Mazuco¹, A. Sinatora¹, D.K. Tanaka¹

¹ Surface Phenomena Laboratory, Mechanical Engineering Department, University of Sao Paulo, Sao Paulo, SP, Brazil

- ✚ Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de graduação em engenharia mecânica:

**CARACTERIZAÇÃO DOS MECANISMOS DE DESGASTE DE VÁLVULAS E
SEDES DE MOTORES FLEX-FUEL UTILIZANDO ENSAIOS EM
TRIBÔMETRO DE MOVIMENTO ALTERNADO.**

Aluno: Felipe de Sousa Mazuco

Orientador: Prof. Dr. Amilton Sinatora.

Co-orientador: MSc. Alexander Zuleta Durango.

Universidade de São Paulo - 2015.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, L. DE PAULA JR, G. *Investigation of valve recession mechanism in Flex Fuel Engines*, SAE 2011-36-0340.
- ASM HANDBOOK – Vol. 18: *Friction, Lubrication and Wear Technology*. ASM International. 1992.
- ASTM D7421-11. *Standard Test Method for Determining Extreme Pressure Properties of Lubricating Oils Using High-Frequency, Linear-Oscillation (SRV) Test Machine*. ASTM International. 2011.
- BELINCANTA, J. SILVA, K. M. *Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação Analítica da Formação de Depósitos em Válvulas de Admissão*. 2009. XVII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva da AEA. São Paulo. 11p.
- BLAU, P. J. *Friction Science and Technology*. [S.l.]: Taylor & Francis Group, 2009.
- BOUAESHI, W. E LI, D. *Effects of Y_2O_3 addition on microstructure, mechanical properties, electrochemical behavior, and resistance to corrosive wear of aluminum*. Tribology International, 40(2 SPEC ISS), (2007), 188 – 199.
- BOWDEN, F.P. TABOR, D. *Friction and Lubrication*. Methuen, London. 1956.
- BRÊDA, L. A. GOMES, J. CIMATEC-ITA. *Estudo e teste de novos materiais para válvulas e sedes para motores diesel*. 2001.
- CAIRNS, A. et al. *A Study of gasoline-alcohol blended fuels in an advanced turbocharged DISI engine*. Paper SAE 2009-01-0138. ISSN 0148-7191.
- CAUDRON, E. et al. *Identification of hematite particles in sealed glass containers for pharmaceutical uses by Raman microspectroscopy*. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis 54 (2011) 866-868.
- CHICOT, D. et al. *Mechanical properties of magnetite (Fe_3O_4), hematite ($\alpha-Fe_2O_3$) and goethite ($\alpha-FeO.OH$) by instrumented indentation and molecular dynamics analysis*. Material Chemistry and Physics 129 (2011) 862-870.
- CHUN, K.J. KIM, J.H. HONG, J.S. *A study of exhaust valve and seat insert wear depending on cycle numbers*, Wear 263 (2007) 1147–1157.
- DANESHGARI, P. BORGMANN, K. JOB, H. *The influence of Temperature upon Gasoline Deposit Build-up on the Intake Valves*, 1989. SAE Technical Paper Series, 890215.
- DELGADO, R. C. O. B. ARAÚJO, A. S. FERNANDES JR. V. J. *Properties of Brazilian gasoline mixed with hydrated ethanol for flex-fuel technology*. Fuel Processing Technology, 88 (4) : 365-368, 2007.
- DOWSON, D. *History of tribology*. Longman. 1979.

- ELO, R. & JACOBSON, S. *Intake valve system in heavy duty combustion engines - a wear mechanism study*. Proceedings of the Asiatrib Conference. - 2014.
- ELO, R. & JACOBSON S. *Formation and breakdown of oil residue tribofilms protecting the valves of diesel engines*. Wear 330-331 (2015) 193-198.
- FONTALVO, G. A. MITTERER, C. *The effect of oxide-forming alloying elements on the high temperature wear of a hot work steel*. Wear, 258 (2005) 1491-1499.
- FORSBERG, P. HOLLMAN, P. JACOBSON S. *Wear mechanism study of exhaust valve system in modern heavy duty combustion engines*. Wear, 271 (2011) 2477-2484.
- FORSBERG, P. et al. *Comparison and analysis of protective tribofilms found on heavy duty exhaust valves from field service and made in a test rig*. Wear, 302 (2013) 1351 - 1359.
- FORSBERG P., DEBORD D. e JACOBSON S. *Quantification of combustion valve sealing interface sliding - a novel experimental technique and simulations*. Tribology International, 69 (2014) 150 - 155.
- FORSBERG, P., ELO, R. e JACOBSON, S. *The importance of oil and particle flow for exhaust valve wear - an experimental study*. Tribology International, 69 (2014) 176 - 183.
- FRICKE, R.W. AND ALLEN, C. *Repetitive impact-wear of steels*. Wear, 163 (1993) 837-847.
- GODFREY, D. COURTNEY, R. L. *Investigation of the mechanism of exhaust valve seat wear in engines run on unleaded gasoline*. SAE Technical Paper 710356, 1971.
- HIRUMA, M. AND FURUHAMA, S. *A study on valve recession caused by non-leaded gasoline – measurement by means of R.I.*, *Bullet. JSME*, 21(1978) 147–160.
- HUTCHESON, R. C. *Valve Seat Recession – An Independent Review of Existing Data*. SAE International, Paris, 19-22 June 2000. II.
- HUTCHINGS, I. M. *Tribology Friction and Wear of Engineering Materials*. Ed Edward Arnold, Great Britain, 1992. 269p.
- INMAN IA, ROSE SR, DUTTA PK. Tribology International. 2006; 39:1361.
- KIMIHIKO, A. AKIRA M. AKIO, Y. *Hardfaced valve and P/M valve seat system for CNG and LPG fuel engines*. SAE Technical Paper 2005-01-0718, 2005.
- LEITE, M.V. FIGUEROA, C.A. GALLO, S. CORUJEIRA ROVANI, A.C. BASSO, R.L.O. MEI, P.R. BAUMVOL, I.J.R. SINATORA, A. *Wear mechanisms and microstructure of pulsed plasma nitrided AISI H13 tool steel*. Wear (Lausanne), 269 (2010) 466-472.
- LEWIS, R. DWYER-JOYCE, R.S. JOSEY, G. *Investigation of wear mechanisms occurring in passenger car diesel engine inlet valves and seat inserts*. SAE Paper 1999-01-1216.

- LEWIS, R. DWYER-JOYCE R.S. *Automotive Engine Valve Recession*. Suffolk, UK: Professional Engineering Publishing, 2002, 137p.
- LIANG, X. et al. *A Study of Valve Seat Insert Wear Mechanisms*. SAE International, Toronto, 25 out. 1999. 14.
- LIU, R. E LI, D. *Protective effect of yttrium additive in lubricants on corrosive wear*. *Wear*, (1999) 225-229 (II), 968 - 974.
- MAHLE, *Manual de falhas prematuras em pistões, anéis, camisas, bronzinas, buchas, válvulas, tuchos e turbocompressores*. MAHLE ORIGINAL, 2012.
- MAHLE GMBH. *Valve train System and components*. 1. ed. Stuttgart: Springer Vieweg, 2013.
- MERLO, A. M. *The contribution of surface engineering to the product performance in the automotive industry*. *Surface and Coatings Technology* 174-175 (2003) 21-26.
- OHSAWA, K. NOMURA, Y. MORITANI, H. OKADA, M. KATO, M. NAKADA, M. *Mechanism of Intake Valve Deposit Formation Part III: Effects of Gasoline Quality*. 1992. SAE Technical Paper Series, 922265.
- OOTANI, T. YAHATA, N. FUJIKI, A. AND EHIA, A. *Impact wear characteristics of engine valve and valve seat insert materials at high temperature (Impact wear tests of austenitic heat-resistant steel SUH36 against Fe-base sintered alloy using plane specimens)*. *Wear*, 188 (1995) 175-184.
- PAUSCHITZ A. MANISH R. FRANEK F. *Mechanism of sliding wear of metals and alloys at elevated temperatures*. *Tribology International*, 41 (2008) 584 - 602.
- PICAS, J. *Caracterización y Optimización de la Aleación Ti-O₂Pd para Aplicaciones Clínicas*. Tesis Doctoral, Universitat Politecnica de Catalunya; (2000).
- PYLE, W. R.; SMRCKA, N. R. *Effect of Lubricant Oil Additives on Valve Recession in Stationary Gaseous-Fueled Four-Cycle Engine*, 01 out. 1993. 25.
- RAMALHO, A. et al. *Effect of temperatures up to 400°C on the impact-sliding of valve-seat contacts*. *Wear*, 267 (2009) 777-780.
- SALERNO, M. S. *Panorama e Perspectivas para o Desenvolvimento da Indústria de Autopeças no Brasil: Desenvolver Sedes de Projeto de Produto para Salto Qualitativo no Panorama Mundial*. Relatório Final. 17 de Março de 2008. FIPE 79p.
- SILVA, W.M. BINDER, R. DE MELLO, J.D.B. *Abrasive wear of steam-treated sintered iron*. *Wear*, 258 (2005) 166-177.
- SINATORA, A. *Tribologia: Um resgate histórico*. 2005. Universidade de São Paulo, 2005.

- SINATORA, A. TANAKA, D. K. *Analysis of engine valves damage morphology observed after engine dynamometer test*. SAE Technical Paper 2014-36-0305, 2014.
- STACHOWIAK, G.W. Batchelor, A.W. *Engineering Tribology*, Tribology Series 24, Elsevier, Amsterdam – London – New York – Tokyo, 1993.
- STOTT FH, JORDAN MP. *Wear*, 2001; 250:391.
- STOTT, F.H. *High-temperature sliding wear of metals*. *Tribology International*, 35 (2002) 489–495
- TRW. *Catalogo Válvulas*. 2010/2011.
- TU JP, JIE XH, MAO ZY, MATSUMARA M. *Tribology International*, 1998; 31:347.
- VERLAG MODERNE INDUSTRIE. *Sistemas de comando de válvulas para motores de combustão interna*. Schaeffler Technologies Gmbh & Co. 2011.
- VILLARES METALS. *Aços e ligas especiais para componentes automotivos*. 2013.
- WALTER, A. ROSILLO-CALLE, F. DOLZAN, P. PIACENTE, E. CUNHA, K. B. *Perspectives on fuel ethanol consumption and trade*. *Biomass and Bioenergy*, 32 (8) : 730-748, 2008.
- WANG, Y.S. et al. *The effect of operating conditions on heavy duty engine valve seat wear*. *Wear*, 201 (1996) 15-25.
- WANG, Y. *Introduction to Engine Valvetrains*, SAE INTERNATIONAL. 2007.
- WELSH, N. C. *The Dry Wear of Steels I. The General Pattern of Behaviour*. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 257, n. 1077, p. 31–50, 7 jan. 1965a.
- WELSH, N. C. *The Dry Wear of Steels II. Interpretation and Special Features*. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 257, n. 1077, p. 51–70, 7 jan. 1965b.
- WHEALS, A. E. BASSO, L. C. ALVES, D. M. G. AMORIM, H. V. *Fuel ethanol after 25 years*. *Trends in Biotechnology*, 12 (1): 482-487, 1999.
- WICKER, R. B. HUTCHISON, P. A. ACOSTA, O. A. MATTHEWS, R. D. *Practical considerations for an E85-fueled vehicle conversion*. SAE, 1999-01-3517, 1999.
- YUKI HIGA H. *Estudo e proposição para redução de consumo do motor flex-fuel*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2011.
- ZHAO, R. BARBER, G.C., WANG, Y.S. & JLARSON, J.E. *Wear Mechanism Analysis of Engine Exhaust Valve Seats with a Laboratory Simulator*. *Tribology Transactions* 40:2. (1997) 209-218.

ZINNER, K. *Investigations concerning wear of inlet valves seats in diesel engines*. Proceedings of the ASME Oil Gas Power Conference. 1963.

ZUM-GAHR, K.H. *Microstructure and wear of materials*. Elsevier, 1987.

ANFAVEA *Dados relativos a exportação, produção e vendas*. ANFAVEA. - 2015. - 01 de 2015. - <http://www.anfavea.com.br/tabelas.html>.

<http://wp.ufpel.edu.br/mlaura/files/2013/01/Apostila-de-Motores-a-Combust%C3%A3o-Interna.pdf>

<http://www.anfavea.com.br/tabelas2013.html>

http://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/R_Frota_Circulante_Marco_2015.pdf