LEONARDO ANDRIOLI THIODORO

**Caracterização do desgaste do par válvula e sede de válvula de
motores a combustão interna ciclo Otto *flex-fuel***

São Paulo

2017

LEONARDO ANDRIOLI THIODORO

**Caracterização do desgaste do par válvula e sede de válvula de motores a
combustão interna ciclo Otto *flex-fuel***

Versão Corrigida

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

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**Orientador:
Deniol Katsuki Tanaka**

São Paulo

2017

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: _____

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Thiodoro, Leonardo Andrioli

Caracterização do desgaste do par válvula e sede de válvula de motores a combustão interna ciclo Otto *flex-fuel* / L. A. Thiodoro -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

151 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Motor de combustão interna 2.Flex-Fuel 3.Válvula 4.Sede de válvula 5.Desgaste I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

Nome: THIODORO, Leonardo Andrioli
Título: Caracterização do desgaste do par válvula e sede de válvula de motores a combustão interna ciclo Otto *flex-fuel*

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Aprovado em: 11 de setembro de 2017

Banca Examinadora

Prof. Dr. Deniol Katsuki Tanaka

Instituição: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo-PME

Julgamento: Aprovado com revisão

Prof. Dr. Marco Antonio Colosio

Instituição: General Motors do Brasil

Julgamento: Aprovado com revisão

Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin

Instituição: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo-PMT

Julgamento: Aprovado com revisão

Dedico este trabalho a minha esposa, pais, irmãs, família, amigos e professores pela
compreensão, apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a meu orientador, professor Dr. Deniol K. Tanaka, pela orientação, compreensão, compartilhamento de seu vasto conhecimento e todo auxílio prestado durante o trabalho, ao professor Dr. Amilton Sinatora pelos ensinamentos e apoio, ao Dr. Alexander Zuleta, que durante todo o trabalho me auxiliou e compartilhou seu conhecimentos, ao Dr. Clayton Zabeu, Renato Romio e Luciano Caldeira que estavam presentes desde o primeiro momento em que pensei iniciar este trabalho e o tornaram possível, me auxiliaram com ideias, ensinamentos e boas conversas, ao Paulo Netto que através de sua incansável persistência contribuiu para tornar possível a realização dos ensaios em dinamômetro, à FAPESP e ao “Consórcio de P&D e Desafios Tribológicos em Motores Flex-Fuel” com a participação da FIAT Chrysler Automóveis LTDA, que colaborou com componentes de motor e o Centro de Pesquisas-Laboratório de Motores do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT) que disponibilizou um banco de dinamômetro para execução dos ensaios. Agradeço a todo o time de pesquisa do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) que desde meu ingresso foram extremamente receptivos, sempre dispostos a ajudar e ensinar.

Agradeço também a minha esposa, pais, irmãs, família e amigos que foram essenciais no desenvolvimento do meu trabalho, me apoiando e incentivando, principalmente nos momentos mais difíceis desta jornada. Por fim agradeço também aos meus amigos e colegas de trabalho, que através da sua flexibilidade e incentivo permitiram minha dedicação neste estudo.

RESUMO

Desde a sua invenção, o motor a combustão interna sofreu significantes evoluções, como redução do consumo de combustível, aumento da sua potência e durabilidade a um menor custo. Outros setores também evoluíram, como a busca por alternativas de combustível, tendo como exemplo o etanol hidratado combustível, que trouxe vantagens tais como maior desempenho e menor emissão de poluentes, porém com solicitações mecânicas, térmicas e termomecânicas mais severas. Sua menor lubricidade, quando comparada a da gasolina tipo C também intensificou o desgaste no par tribológico válvula e sede de válvula. Neste trabalho foram analisados diversos pares de válvulas e sedes de válvulas provenientes de quatro motores pós teste, sendo dois deles de mesma especificação técnica e submetidos às mesmas condições de ensaio, variando somente o combustível utilizado (etanol hidratado combustível e gasolina comum tipo C). A topografia da superfície de contato foi avaliada através de exames das superfícies com lupa estereoscópica, microscópio eletrônico de varredura e perfilômetro óptico a fim de identificar os danos encontrados. Ao término das análises foi realizada a comparação dos danos encontrados entre a superfície de contato das válvulas e sedes do motor que operou com etanol hidratado combustível e gasolina comum tipo C, de forma a evidenciar as diferenças proporcionadas pelos combustíveis. Este trabalho faz parte do “*Consórcio de P&D e Desafios Tribológicos em Motores Flex-Fuel*” patrocinado pela FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) com participação da indústria automotiva, para identificar os modos de desgaste atuantes.

Palavras-chave: Motor de combustão interna. “*Flex-Fuel*”. Válvula. Sede de válvula. Desgaste.

ABSTRACT

Since its invention the internal combustion engine presented significant improvements like lower fuel consumption, higher power and durability increase at reduced costs. Other industries sectors did also improve as the search for new alternative fuels such as hydrated ethanol fuel which brought advantages like higher performance with lower pollutant emissions, although with it came more severe mechanical, thermal and thermo-mechanic stresses. Ethanol lower lubricity when compared to type C gasolines did also increase the valve/ valve seat insert wear. This study presents the results of contact surface analysis of several pairs valve/ valve seat insert from four engines after test being two of them of same technical specification and submitted to the same test cycle with only difference their fuel (hydrated ethanol and regular type C gasoline). The contact surface topography was evaluated through surface exams using optical microscopy, scanning electron microscope and non-contact profiler, to evaluate damages. At the end of analysis, a comparison between valves and valve seats from the engines that operated with hydrated ethanol and regular type C gasoline in order to put in evidence the damage difference provided by the fuels. This study is part of “*Consórcio de P&D e Desafios Tribológicos em Motores Flex-Fuel*”, sponsored by FAPESP (“*Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo*”) with participation of automotive industries, to characterize the existent wear.

Keywords: Internal combustion engine. Flex-Fuel. Valve. Valve seat. Wear.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução da frota Brasileira por combustível.	23
Figura 2 - Motor de um Corvette ZR-1, 8 cilindros, 6.2L com 638HP e em vista explodida.	24
Figura 3 - Representação dos quatro tempos de um MCI ciclo Otto.	25
Figura 4 - Injeção direta (a) e injeção indireta (b).	27
Figura 5 - Diagrama de Stribeck, ilustrando as regiões de lubrificação e coeficiente de atrito, como função no número de Sommerfeld.	29
Figura 6 - Válvula, sede de válvula e guia de válvula.	31
Figura 7 - Identificação das partes de uma válvula.	31
Figura 8 - Câmara de combustão com um par válvula e sede de admissão e um par de escape.	32
Figura 9 - Tipos de válvulas utilizadas em MCI.	33
Figura 10 - Vista das válvulas e sedes em corte.	34
Figura 11 - Distribuição de temperatura (°C) nas válvulas de admissão (a) e escape (b) para MCI ciclo Diesel e Otto.	35
Figura 12 - Ângulo de contato entre a válvula e sede de válvula de projeto.	38
Figura 13 - Fonte das perdas por atrito em um MCI.	40
Figura 14 - Recessão de válvula com sede fundida de aço ferramenta com aumento de: (a) Velocidade de fechamento da válvula, (b) Carga na combustão e (c) Desalinhamento da válvula.	42
Figura 15 - Flexão da válvula no instante da combustão.	43
Figura 16 - Recessão de válvula.	44
Figura 17 - Válvulas de admissão (a) e escape (b) do motor MT-3.	50
Figura 18 - Sedes de válvula montadas no cabeçote do motor MT-3.	51
Figura 19 - Banco de dinamômetro no Instituto Mauá de Tecnologia - Laboratório de Motores.	52
Figura 20 - Ciclo de amaciamento do ensaio em dinamômetro.	57
Figura 21 - Ciclo de ensaio dos motores MT-3 e MT-4 em dinamômetro.	58
Figura 22 - Representação da folga de válvula em um sistema de trem de válvulas com tucho mecânico.	58
Figura 23 - Região examinada da válvula (a) e sede de válvula (b), indicadas pela linha vermelha.	61

Figura 24 - Imagens obtida por LE de uma válvula de admissão nova do motor MT-1 com diferentes ângulos de iluminação: (a) 90° (b) 20°.....	62
Figura 25 - Imagem obtida por MEV dos riscos circunferenciais de usinagem na superfície de contato da válvula de admissão nova, do motor MT-1.....	62
Figura 26 - Imagens obtidas por MEV dos riscos circunferenciais de usinagem na superfície de contato da válvula de escape nova do motor MT-1	63
Figura 27 - Imagens obtidas por MEV de válvulas novas de admissão (a) e de escape (b), do motor MT-2 (DURANGO, THIODORO, et al., 2015).	63
Figura 28 - Imagem obtida por LE da válvula de admissão do motor MT-1.....	64
Figura 29 - Imagens obtidas por LE da válvula de admissão do motor MT-1 com diferentes ângulos de iluminação: (a) 90° (b) 20°.....	65
Figura 30 - Imagens obtidas por MEV da válvula de admissão do motor MT-1 (DURANGO, THIODORO, et al., 2015).....	65
Figura 31 - Imagens obtidas por LE da válvula de admissão do motor MT-1.	66
Figura 32 - Imagens obtidas por MEV (a) e MEV-BSE (b) da válvula de admissão do motor MT-1.....	66
Figura 33 - Análise EDS do ponto X (depósito) na Região 2 da superfície de contato.	67
Figura 34 - Análise EDS do ponto Y na Região 2 da superfície de contato.	67
Figura 35 - Imagens obtidas por LE (a) e MEV (b) da válvula de admissão do motor MT-2.....	68
Figura 36 - Sulcos encontrados na superfície de contato da válvula de admissão do motor MT-2.....	69
Figura 37 - Endentação e sulcos inclinados na superfície de contato da válvula de admissão do motor MT-2.	69
Figura 38 - Imagem obtida por LE da sede de válvula de admissão do motor MT-1.....	70
Figura 39 - Superfície de contato da sede de válvula de admissão do motor MT-1 com diferentes ângulos de iluminação.	70
Figura 40 - Riscos circunferenciais pronunciados na região superior da sede de admissão do motor MT-1.	71
Figura 41 - Riscos circunferenciais na região central da sede de admissão do motor MT-1 com diferente ângulo de iluminação.	71
Figura 42 - Imagens obtidas por LE da sede de válvula de admissão do motor MT-1 Regiões distintas.	72

Figura 43 - Comparação das características superficiais entre a superfície de contato da sede de válvula (esquerda) e válvula (direita) de admissão.....	72
Figura 44 - Depósito e marcação na região 2 da superfície de contato da sede de válvula.	73
Figura 45 - Depósitos e corrosão na superfície de contato da sede de válvula de admissão do motor MT-1.	74
Figura 46 - Imagens obtidas por MEV da superfície de contato da sede de válvula de admissão do motor MT-1, com grande quantidade de depósitos provenientes da mistura ar/combustível/vapor de óleo utilizando detector SE (a) e utilizando o detector BSE (b).....	75
Figura 47 - Imagem obtida por MEV da superfície de contato da sede de válvula do motor MT-2, utilizando detector SE (a) e (b) e detector BSE (c).	76
Figura 48 - Superfície de contato de uma válvula de escape do motor MT-1.	77
Figura 49 - Imagens da superfície de contato da válvula de escape do motor MT-1, obtidas por LE (a) e MEV (b) (DURANGO, THIODORO, et al., 2015).	78
Figura 50 - Superfície de contato da válvula de escape do motor MT-1 obtida por MEV.	78
Figura 51 - Mancha escura presente na Região 1 da válvula de escape do motor MT-1 obtida por MEV, utilizando o detector BSE (DURANGO, THIODORO, et al., 2015).	79
Figura 52 - Análise EDS do depósito apresentado na Figura 51 (DURANGO, THIODORO, et al., 2015).	79
Figura 53 - Superfície de contato da válvula de escape do motor MT-1 obtida por LE.	80
Figura 54 - Sulcos e depósito na superfície de contato da válvula de escape do motor MT-1.....	80
Figura 55 - Oxidação na superfície de contato da válvula de escape do motor MT-2.	81
Figura 56 - Superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-1.....	82
Figura 57 - Superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-1 (DURANGO, 2015).....	82
Figura 58 - Região 1 da superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-1 obtida por LE (a) e MEV (b e c).	83

Figura 59 - Região 2 da superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-1.....	84
Figura 60 - Imagens das manchas arredondadas na superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-1 obtidas por MEV.....	84
Figura 61 - Região 3 da superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-1.....	85
Figura 62 - Superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-1, obtida por LE (a) e MEV (b).....	85
Figura 63 - Análise EDS da região X (a) e depósito Y (b).	86
Figura 64 - Mancha escura na superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-1 obtida por LE (a) e MEV (b) da mancha escura localizada na Região 3.	87
Figura 65 - Análise EDS da mancha escura encontrada na Região 3 da sede de válvula de escape do motor MT-1.	87
Figura 66 - Superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-2.....	88
Figura 67 - Depósitos na superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-2 obtido por LE (a) e MEV (b).	88
Figura 68 - Superfície de contato da válvula de admissão (a), válvula de escape (b), sede de válvula de admissão (c) e sede de válvula de escape (d), obtidas por LE.	89
Figura 69 - Superfície de contato da válvula de admissão (a), válvula de escape (b), sede de válvula de admissão (c) e sede de válvula de escape (d), obtidas por PO..	90
Figura 70 - Válvulas de admissão do motor MT-3.....	91
Figura 71 - Depósitos na válvula de admissão do quarto cilindro (seta amarela) e região com destacamento parcial dos depósitos (seta vermelha), do motor MT-3.	92
Figura 72 - Superfície de contato das válvulas de admissão dos cilindros 1 a 4 do motor MT-3, obtidas por LE.....	92
Figura 73 - Câmaras de combustão dos cilindros 1 a 4, do motor MT-3.....	93
Figura 74 - Superfície de contato das sedes de válvula de admissão do motor MT-3, obtidas por LE.	93
Figura 75 - Válvulas de admissão do motor MT-4.....	94
Figura 76 - Superfície de contato das válvulas de admissão dos cilindros 1 a 4 do motor MT-4, obtidas por LE.....	94
Figura 77 - Câmaras de combustão dos cilindros 1 a 4, do motor MT-4.....	95

Figura 78 - Superfície de contato das sedes de válvula de admissão dos cilindros 1 a 4 do motor MT-4, obtidas por LE.....	95
Figura 79 - Imagens obtidas por LE da superfície de contato, dividida em 2 regiões, da válvula e sede de válvula, ambas de admissão do cilindro 1, do motor MT-3.....	96
Figura 80 - Comparativo entre as larguras máxima e mínima da superfície de contato medidas nas válvulas de admissão do motor MT-3, obtidos por PO.....	97
Figura 81 - Comparativo entre as larguras máxima e mínima da superfície de contato medidas nas sedes de válvula de admissão do motor MT-3, obtidos por PO.....	97
Figura 82 - Recessão de válvulas de admissão, por cilindro, dos motores MT-3 e MT-4.	98
Figura 83 - Válvulas de escape pós teste, do motor MT-3.	99
Figura 84 - Temperatura média dos gases de escape por cilindro do motor MT-3.	100
Figura 85 - Superfície de contato das válvulas de escape do motor MT-3, obtidas por LE.....	101
Figura 86 - Superfície de contato das sedes de válvulas de escape do motor MT-3, obtidas por LE.	101
Figura 87 - Válvulas de escape pós teste, do motor MT-4.	101
Figura 88 - Temperatura média dos gases de escape por cilindro do motor MT-4.	102
Figura 89 - Superfície de contato das válvulas de escape do motor MT-4, obtidas por LE.....	103
Figura 90 - Superfície de contato das sedes de válvula de escape do motor MT-4, obtidas por LE.	103
Figura 91 - Imagens obtidas por LE da superfície de contato, dividida em 3 regiões, da válvula e sede de válvula, ambas de escape do cilindro 1, do motor MT-3.	103
Figura 92 - Comparativo entre as larguras máxima e mínima da superfície de contato medidas nas válvulas de escape do motor MT-3, obtidos por PO.	104
Figura 93 - Comparativo entre as larguras máxima e mínima da superfície de contato medidas nas sedes de válvula de escape do motor MT-3, obtidos por PO.....	104
Figura 94 - Recessão de válvulas de escape, por cilindro, dos motores MT-3 e MT-4.	106
Figura 95 - Depósitos na superfície de contato da válvula de admissão do motor MT-3, do cilindro 1 (a), cilindro 2 com diferente ângulo de iluminação (b) e cilindro 3 (c), obtidas por LE.	107

Figura 96 - Comparativo da quantidade de depósitos existentes na superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 2 do motor MT-3, antes (a) e após (b) limpeza por ultrassom, obtidas por LE.	107
Figura 97 - Depósito na superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 1 (motor MT-3), obtida por LE.	108
Figura 98 - Depósito sobre os riscos circunferenciais de usinagem na região 1 da válvula de admissão do cilindro 4 (motor MT-3).....	108
Figura 99 - Superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 4, do motor MT-3, obtida por LE (a) e MEV (b).....	109
Figura 100 - Depósito na superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 3 do motor MT-3, obtidas por LE (a e b), MEV (c) e MEV-BSE (d).	109
Figura 101 - Depósitos na região 2 da superfície de contato das sedes de válvula de admissão, do motor MT-3, no cilindro 1 (a) e no cilindro 3 (b), obtidas por LE.	110
Figura 102 - Depósitos na superfície de contato da sede de válvula de admissão do cilindro 3 obtidas por MEV (a) e MEV-detector BSE (b).....	111
Figura 103 - Resultados da análise EDS dos pontos #1 e #2.	112
Figura 104 - Depósitos na superfície de contato da válvula de escape do cilindro 1 (a), obtida por LE e do cilindro 2 (b), obtida por MEV, ambas do motor MT-3	113
Figura 105 - Partículas soltas (seta amarela) e depósitos na superfície de contato das válvulas de escape do cilindro 1 (a), obtida por LE, e do cilindro 4 (b), obtida por MEV.	113
Figura 106 - Depósitos na superfície de contato da sede de válvula de escape do cilindro 3, obtida por LE e do cilindro 4 (b), obtida por MEV.....	114
Figura 107 - Depósitos na superfície de contato das válvulas de admissão do motor MT-4, dos cilindros 3 (a) e 4 (b), obtidas por LE.	115
Figura 108 - Depósitos na Região 1 da superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 4, do motor MT-4, obtida por PO.....	116
Figura 109 - Espessura da camada de depósito na região 1 da superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 4, do motor MT-4, obtida por PO.	116
Figura 110 - Depósitos na superfície de contato da válvula de escape do cilindro 1, obtidas por LE (a) e MEV (b).....	117
Figura 111 - Superfície de contato da válvula de escape do cilindro 3, obtida por MEV (a) e MEV-BSE (b).....	117

Figura 112 – Resultados da análise EDS da superfície de contato da válvula de escape do cilindro 3 do motor MT-4.	118
Figura 113 - Depósitos nas Regiões 1 e 2 da superfície de contato da sede de escape do cilindro 4 (a) e cilindro 3 (b), ambas do motor MT-4, obtidas por LE.	118
Figura 114 - Riscos circunferenciais de usinagem na superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 3 obtida por LE (a) e PO (b).....	120
Figura 115 - Riscos circunferenciais sob depósitos na superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 4 (a), obtida por LE e no cilindro 2 (b), obtida por MEV.	121
Figura 116 - Superfície de contato da sede de válvula de admissão do cilindro 3, obtida por MEV.....	121
Figura 117 - Riscos circunferenciais de usinagem na região 1 das sedes de válvula dos cilindros 2 (a) e 4 (b), do motor MT-3.	122
Figura 118 - Riscos circunferenciais de usinagem na válvula de admissão dos cilindros 1 (a) e 4 (b) do motor MT-4, obtidos por MEV.....	123
Figura 119 - Riscos circunferenciais na superfície de contato da sede de válvula de admissão do cilindro 1, do motor MT-4 obtida por PO.	123
Figura 120 - Riscos circunferenciais de usinagem nas regiões 1 e 2 da superfície de contato da sede de válvula de escape do cilindro 3, do motor MT-4.....	124
Figura 121 - Comparação da região 2 da superfície de contato das válvulas de admissão do motor MT-3, obtidas por PO.....	125
Figura 122 - Superfície lisa na região 2 das válvulas de admissão do motor MT-3, do cilindro 4, obtida por LE (a), obtida por PO (b) e cilindro 2 obtida por MEV (c).	126
Figura 123 - Superfície lisa na região 2 das sedes de válvula de admissão do motor MT-3 dos cilindros 1 (a) e 2 (b), obtidas por PO.....	127
Figura 124 - Superfície lisa nas regiões 1, 2 e 3 da válvula de escape do cilindro 1 do motor MT-3.....	128
Figura 125 - Superfície lisa nas Regiões 1, 2 e 3 das sedes de válvula de escape do motor MT-3, nos cilindros 1 (a) e 2 (b).	128
Figura 126 - Superfície lisa da válvula do cilindro 3 (a) e sede de válvula do cilindro 4 (b), ambas de escape, do motor MT-4.	129
Figura 127 - Superfície lisa em diferentes locais da região 2, da válvula de admissão do cilindro 1, motor MT-4, obtidas por LE (a) e PO (b).....	129

Figura 128 - Superfície lisa na região 2, da sede de válvula de admissão do cilindro 3 (a) e do cilindro 2 (b), ambas do motor MT-4, obtidas por LE e PO.	129
Figura 129 - Endentação na região 2 da superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 4, obtida por LE (a e b), PO (c) e MEV (d), do motor MT-3. ..	130
Figura 130 - Endentação na região 2 da superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 2, do motor MT-3.	131
Figura 131 – Endentações na superfície de contato da sede de válvula de admissão do cilindro 1, obtidas por PO.	131
Figura 132 – Porosidade da superfície de contato da sede de válvula de admissão do cilindro 3.	132
Figura 133 - Endentação na Região 1 da superfície de contato da válvula de escape do cilindro 1, obtida por LE com ângulo de iluminação próximo de 10° com relação a superfície.	132
Figura 134 - Endentações na região 2 da superfície de contato da válvula de escape do cilindro 4 obtidas por LE (a), MEV-BSE (b) e MEV (c).	133
Figura 135 - Endentação na Região 2 da superfície de contato da válvula de escape do cilindro 2, obtidas por PO (a) e LE (b).	134
Figura 136 - Endentação na Região 2 da superfície de contato da válvula de escape do cilindro 2, motor MT-4, obtida por LE com ângulos de iluminação de 90 ° (a) e próximo de 20 ° (b).	134
Figura 137 - Sulco na superfície de contato das válvulas do cilindro 1 (a), 2 (b) e 3 (c), obtidas por PO e valas na superfície de contato da válvula do cilindro 3 obtida por LE.	135
Figura 138 - Valas na região 1 das sedes de válvula de admissão dos cilindros 1 (a) e 2 (b), do motor MT-3.	135
Figura 139 - Sulco na superfície de contato da válvula de escape do cilindro 1 (a), e sulcos (seta vermelha) e vala (seta preta) na válvula de escape do cilindro 4, ambas do motor MT-3, obtidos por PO.	136
Figura 140 - Valas na Região 1 da superfície de contato da sede de válvula de admissão do cilindro 4, motor MT-4, obtidas por LE.	136
Figura 141 - Valas nas Regiões 1 e 2 da superfície de contato da sede de válvula de escape do cilindro 3, motor MT-4.	137

Figura 142 - Risco radial na Região 1 da superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 1 (a) e na Região 1 da superfície de contato do cilindro 4 (b), obtidas por LE.	138
Figura 143 - Riscos inclinados na superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 4, do motor MT-4, obtida por LE.	139
Figura 144 - Riscos radiais observados na Região 1 da superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 1 (a) e Região 2 do cilindro 2 (b).	139
Figura 145 - Corrosão na Região 2 da superfície de contato da sede de válvula de admissão do cilindro 1 (a) e na Região 1 do cilindro 2 (b).	140
Figura 146 - Oxidação na superfície de contato da válvula de escape do cilindro 1, Região 2 (a) e cilindro 4, Região 1 (b).....	140
Figura 147 - Oxidação observada na Região 1 da superfície de contato da sede de escape do cilindro 3, motor MT-4, obtidas por LE.....	141
Figura 148 - Degrau na Região 3 da válvula de escape do cilindro 1, motor MT-4, obtida por PO.	142
Figura 149 - Recessão medida por PO, da válvula de escape do cilindro 1 do motor MT-4.....	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais utilizados em válvulas de admissão de escape de motores à gasolina.....	36
Tabela 2 - Exemplos de combinação de material de válvulas e sedes de válvula.	37
Tabela 3 – Lubricidade da gasolina comum E20 e etanol E100 (AGUDELO, DELGADO e BENJUMEA, 2011)	46
Tabela 4 - Motores utilizados na caracterização do desgaste do par válvula e sede de válvula.	49
Tabela 5 - Material das válvulas e sedes de válvula dos motores MT-1 e MT-2.....	50
Tabela 6 - Material das válvulas e sedes de válvula dos motores MT-3 e MT-4.....	51
Tabela 7 - Ciclo de amaciamento do ensaio em dinamômetro.....	56
Tabela 8 - Ciclo do ensaio de durabilidade.	58
Tabela 9 - Revisão a ser realizada durante o ciclo de ensaio.	59
Tabela 10 - Curva de desempenho.	59
Tabela 11 - Mapeamento de “blow-by”	59
Tabela 12 - Resumo dos ensaios realizados por motor.	60
Tabela 13 - Elementos constituintes do par válvula e sede de válvula de admissão do motor MT-1.....	68
Tabela 14 - Temperatura média, mínima e máxima dos gases de escape por cilindro, do motor MT-3.....	99
Tabela 15 - Temperatura média, mínima e máxima dos gases de escape por cilindro, do motor MT-4.....	102
Tabela 16 - Larguras mínimas e máximas da superfície de contato (L) por válvula de escape, do motor MT-3.	105
Tabela 17 - Larguras mínimas e máximas da superfície de contato (L) por sede de válvula de escape, do motor MT-3.	105
Tabela 18 - Comparação dos elementos existentes na válvula (condição nova) com os elementos medidos através da análise EDS.	110
Tabela 19 - Comparação dos elementos existentes na sede de válvula de admissão, condição nova, com os elementos medidos na sede pós teste, através da análise EDS.....	111
Tabela 20 - Danos encontrados nas válvulas e sedes de válvulas dos motores MT-1, MT-2, MT-3 e MT-4.	145

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BSE	- Elétrons retroespalhados
EDS	- Espectroscopia por dispersão de energia de Raios-X
EHC	- Etanol hidratado combustível
FAPESP	- Fundação de Amparo À Pesquisa do Estado de São Paulo
LE	- Lupa estereoscópica
MCI	- Motor à combustão interna
MEV	- Microscópio eletrônico de varredura
MWSD	- <i>Mean Wear Scar Diameter</i> (Diâmetro médio da marca de desgaste)
PMI	- Ponto morto inferior
PMS	- Ponto morto superior
PO	- Perfilômetro ótico
PVC	- Policloreto de vinila
S _a	- Rugosidade média da superfície
τ	- Viscosidade do lubrificante
v	- Velocidade das partes móveis
p	- Pressão ou carga entre as partes móveis
σ	- Desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	REVISÃO DA LITERATURA	23
1.1.1.	Motor a combustão interna ciclo Otto	23
1.1.2.	Válvula e sede de válvula	31
1.1.3.	Desgaste em válvulas e sedes	40
1.1.4.	Tribologia	47
2	MATERIAIS E MÉTODOS	49
2.1	MATERIAIS	49
2.1.1.	Motores MT-1 e MT-2.....	49
2.1.2.	Motores MT-3 e MT-4.....	50
2.1.3.	Equipamentos.....	52
2.2	MÉTODOS	53
2.2.1.	Análise pré-teste.....	53
2.2.2.	Análises pós teste	54
2.2.3.	Ensaio dos motores MT-1 e MT-2.....	55
2.2.4.	Ensaio dos motores MT-3 e MT-4.....	56
2.2.4.1.	Ciclo de amaciamento	56
2.2.4.2.	Ciclo de ensaio	57
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO PREELIMINAR.....	61
3.1	EXAME DAS VÁLVULAS E SEDES DE VÁLVULA DOS MOTORES MT-1 E MT-2.....	61
3.1.1.	Válvulas novas.....	61
3.1.2.	Válvulas de admissão	64
3.1.3.	Sede de válvula de admissão	70
3.1.4.	Válvulas de escape.....	77
3.1.5.	Sede de válvula de escape	82
3.2	EXAME DAS VÁLVULAS E SEDES DE VÁLVULA DOS MOTORES MT-3 E MT-4.....	89
3.2.1.	Válvulas e sedes de válvula novas (Antes do ensaio em dinamômetro).....	89
3.2.2.	Válvulas e sedes de válvula de admissão após ensaio em dinamômetro.....	91

3.2.3.	Válvulas e sedes de válvula de escape	99
3.2.4.	Exames dos danos superficiais pós teste	107
3.2.4.1.	Depósitos	107
3.2.4.2.	Riscos circunferenciais de usinagem	120
3.2.4.3.	Superfície polida (lisa)	125
3.2.4.4.	Endentação	130
3.2.4.5.	Sulcos e valas	135
3.2.4.6.	Riscos inclinados e radiais	138
3.2.4.7.	Oxidação e Corrosão.....	140
3.2.4.8.	Degrau.....	142
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	143
4	CONCLUSÕES	146
4.1	CONCLUSÕES GERAIS.....	146
4.2	CONCLUSÕES DOS MOTORES MT-3 E MT-4.....	147
5	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	148
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	149

1 INTRODUÇÃO

Os motores a combustão interna (MCI) são amplamente utilizados devido a sua viabilidade técnica e econômica. Apesar de apresentar um rendimento global de aproximadamente 30 %, muito inferior a, por exemplo, um motor elétrico (que pode obter rendimento global de até aproximadamente 95 %), seu custo e sua autonomia o tornam de grande importância.

O primeiro MCI construído com sucesso foi produzido em 1876, por Nikolaus August Otto. No início de sua produção em larga escala eram construídos motores com potência de aproximadamente 4,5 kW com rendimento global em torno de 11 % (PULKRABEK, 1997). Desde então, significantes evoluções tecnológicas ocorreram até o motor que hoje é utilizado nos automóveis. Estas evoluções ocorreram visando os seguintes objetivos:

- Redução do consumo de combustível;
- Aumento da potência específica;
- Redução da emissão de poluentes;
- Combustíveis alternativos.

Dentre as melhorias desenvolvidas nos MCI, pode-se citar: o desenvolvimento de materiais novos e mais leves, que permitem a construção de motores capazes de suportar maiores pressões de combustão; lubrificantes que proporcionam maior longevidade dos componentes, reduzindo perda de potência e o desgaste de componentes móveis e combustíveis alternativos, com melhor qualidade.

As maiores solicitações mecânicas, térmicas e termomecânicas, tornaram necessário um profundo conhecimento do modo de operação e a natureza destas solicitações em cada componente do MCI, de forma a permitir estas evoluções tecnológicas.

Frente a estas evoluções, diversas pesquisas foram realizadas e novas teorias se comprovaram. O MCI ciclo Otto, “*flex-fuel*”, que opera com etanol hidratado combustível (EHC), gasolina comum tipo C ou uma mistura dos dois combustíveis em quaisquer proporções, foi uma destas inovações, impulsionada pela necessidade de novas alternativas de combustível.

O EHC passou a ser utilizado como combustível independente a partir de 1975, quando houve a crise do petróleo e diversos países buscaram alternativas para a gasolina e Diesel. Neste momento foi criado no Brasil o Programa Nacional do Álcool (Proálcool).

Como a utilização do EHC, seja ele puro ou misturado em qualquer proporção com a gasolina comum tipo C (*“flex-fuel”*), é relativamente recente, ainda são necessários muitos estudos sobre seus efeitos no desempenho dos componentes do motor. É o caso do desgaste no par tribológico válvula e sede de válvula.

O desgaste dos componentes válvula e sede de válvula, representa um grande desafio, pois ainda utilizam materiais nobres e de alto custo. No entanto, a demanda por motores com maior potência faz com que sejam necessários materiais ainda mais resistentes ao desgaste.

Este trabalho tem como Objetivo analisar e caracterizar os danos atuantes nas superfícies de contato da válvula e sede de válvula tanto de admissão quanto de escape de MCI ciclo Otto, operando com EHC e gasolina comum tipo C. A análise destes danos será realizada visualmente com lupa estereoscópica (LE), microscópio eletrônico de varredura (MEV) e perfilômetro óptico (PO).

Este trabalho integra o “*Consórcio de P&D e Desafios Tribológicos em Motores Flex-Fuel*” patrocinado pela FAPESP, projeto Nº 2009/54891-8, visando contribuir com dados que permitam:

- Seleção de materiais que se adequem melhor ao modo de funcionamento / desgaste;
- Identificação dos fenômenos atuantes durante a operação do motor;
- Adequação dos aditivos de combustível a fim de reduzir o desgaste;
- Adequação dos aditivos do óleo lubrificante a fim de reduzir o desgaste;
- Estudar os mecanismos de desgaste apresentados.

1.1 REVISÃO DA LITERATURA

Para entender os fatores envolvidos no desgaste do par tribológico válvula e sede de válvula faz-se necessário um conhecimento prévio do funcionamento do MCI.

1.1.1. Motor a combustão interna ciclo Otto

O princípio de funcionamento de um motor a combustão interna (MCI) ciclo Otto é converter energia química, contida no combustível, em energia mecânica. Isto ocorre através da queima da mistura ar / combustível. Neste tipo de motor, os combustíveis utilizados podem ser gasolina tipo C, utilizada no Brasil, contendo em sua composição uma porcentagem de etanol anidro (atualmente 27 %), EHC, gasolina pura do tipo R95 ou R91, utilizadas por exemplo, na Argentina e no México respectivamente, gás natural, entre outros. Os diferentes tipos de combustível se devem à facilidade e custo de produção de cada país, assim como sua disponibilidade local. Os MCI ciclo Otto, capazes de operar com gasolina comum tipo C e EHC, em quaisquer proporções, foram denominados motores “*flex-fuel*”.

O MCI é amplamente utilizado no transporte de cargas e pessoas. O número de veículos equipados com motor “*flex-fuel*” aumenta a cada ano, como pode-se verificar na Figura 1, que demonstra a elevação da utilização de tal motor na frota brasileira nos últimos 11 anos (período de 2006 à 2016), conforme dados obtidos no Relatório da Frota Circulante 2017, realizado pelo Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores - Sindipeças.

Figura 1 - Evolução da frota Brasileira por combustível.

Fonte: http://www.sindipeças.org.br/sindinews/Economia/2017/R_Frota_Circulante_2017.pdf

Devido à sua grande utilização e complexidade, o estudo destes motores se torna cada dia mais importante, de forma a se enquadrar nas novas legislações e coexistir com a natureza de forma sustentável.

Na Figura 2 pode-se observar os componentes de um MCI:

Figura 2 - Motor de um Corvette ZR-1, 8 cilindros, 6.2L com 638HP e em vista explodida.

Os principais componentes de um MCI ciclo Otto estão classificados e listados abaixo:

- **Trem de força:**
 - Cilindro
 - Pistão / Anéis
 - Biela
 - Bronzina
 - Mancal
 - Retentor
 - Eixo virabrequim
 - Polia / Correia / Corrente
 - Embreagem
 - Volante
 - Platô
- **Alto motor:**
 - Cabeçote
 - Junta do cabeçote
 - Válvulas
 - Molas / Pratos / Travas
 - Tucho / Balancim
 - Eixo comando de válvulas
 - Tampa de válvulas
 - Válvula termostática
 - Velas de ignição / Bobina
 - Retentor
 - Polia do eixo comando

- **Baixo motor:**
 - Bloco
 - Cárter
 - Bomba de óleo
 - Filtro de óleo
 - Bomba de água
- **Sistema de alimentação:**
 - Conjunto do filtro de ar
 - Corpo de borboleta
 - Coletor de admissão
 - Rampa de injeção
 - Bicos injetores
 - Circuito de “*blow-by*”
- **Sistema elétrico:**
 - Chicote elétrico
 - Unidade de controle motor
(ECU - *Electronic control unit*)
 - Sensores
 - Atuadores
- **Sistema de escape:**
 - Coletor de escape
 - Junta do coletor
 - Catalisador
 - Silencioso intermediário
 - Silenciador traseiro

Por se tratar de um estudo de desgaste de válvula e sede de válvula, será enfatizada a análise do sistema do alto motor.

O MCI é classificado quanto ao seu ciclo de operação, que pode ser dois tempos ou quatro tempos. Nos motores dois tempos, um ciclo completo de combustão ocorre com uma revolução do eixo virabrequim e nos motores quatro tempos, um ciclo de combustão ocorre após duas revoluções completas.

A forma construtiva dos motores dois tempos é distinta dos motores quatro tempos. Os motores que serão abordados neste estudo são os motores quatro tempos.

Na Figura 3 estão representados os quatro tempos do MCI ciclo Otto.

Figura 3 - Representação dos quatro tempos de um MCI ciclo Otto.

Fonte: <https://shaikmoin.wordpress.com/tag/four-stroke-engine/>

Os quatro tempos do MCI estão descritos abaixo:

1- Admissão;

Nesta etapa, o pistão está em transição do ponto morto superior (PMS) para o ponto morto inferior (PMI), somente as válvulas de admissão estão abertas e é admitido ar misturado com combustível, no caso dos motores com injeção indireta ou somente ar, nos motores com injeção direta. Nesta etapa existe também a admissão de vapor de óleo (também chamado de gases de “*blow-by*”), através de dutos que interligam a região do cárter à tampa de válvulas, que por sua vez são conectadas ao duto de admissão e consequentemente promovem a admissão destes gases.

O arraste deste vapor de óleo é de suma importância para o desgaste das válvulas de admissão pois eles, em conjunto com o combustível, lubrificam o contato entre a válvula e sede de válvula, reduzindo assim seu desgaste. Em contrapartida, o consumo de óleo é algo indesejado para o projeto de um MCI, e consequentemente, a vazão de vapor de óleo deve ser cuidadosamente analisada durante as fases de projeto, a fim de encontrar um correto balanceamento entre estas características.

2- Compressão;

Durante a compressão, a mistura formada na admissão do MCI é comprimida através do movimento do pistão do PMI ao PMS. As válvulas de admissão e escape estão fechadas.

3- Combustão;

Na combustão a vela de ignição gera uma centelha para iniciar a combustão da mistura comprimida. Durante esta fase, as válvulas de admissão e escape estão fechadas e o pistão inicia seu movimento do PMS ao PMI, devido à expansão dos gases. Este é um momento crítico, quando levado em consideração as solicitações mecânicas e térmicas dos componentes do MCI, pois ocorre o aumento abrupto da pressão e temperatura dentro do cilindro (por exemplo, na condição de 5.000 rpm, o movimento do PMS ao PMI tem duração de 6 ms).

4- Exaustão.

Após a combustão, os gases queimados são empurrados para fora do cilindro passando pelas válvulas de escape que estão abertas. Neste momento o cilindro é “lavado” através do cruzamento de válvulas, ou seja, no fim da exaustão a válvula de admissão inicia sua abertura antes do completo fechamento da válvula de escape, permitindo assim, um ambiente com menor resíduo de gases queimados, preparando o ambiente para o início do próximo ciclo.

Os motores também são classificados quanto ao tipo de injeção de combustível, podendo ser injeção direta ou indireta. Na injeção indireta, o combustível é introduzido através do duto de admissão juntamente com o ar. Já na injeção direta, o combustível é injetado diretamente dentro do cilindro. Os dois tipos de injeção podem ser observados na Figura 4.

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

Uma vantagem da injeção direta é o fato de que não há perda de combustível por condensação nas paredes do duto de admissão e cabeça da válvula, como normalmente ocorre no sistema com injeção indireta, 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.

Apesar das vantagens apresentadas, o sistema de injeção direta possui alto custo quando comparado com sistema de injeção indireta, devido às altas pressões necessárias do sistema de injeção, já que os bicos injetores necessitam de pressões de injeção suficientemente altas para introduzir combustível dentro da câmara de combustão, que, no momento da injeção, tem pressões relativamente elevadas.

Os motores também são classificados quanto a sua admissão, podendo ser aspirados ou sobrealimentados. Nos motores aspirados a admissão do ar atmosférico é promovida pela sucção gerada durante o movimento do pistão do PMS ao PMI, quando a pressão dentro do cilindro passa a ser menor do que a pressão atmosférica. Nos motores sobrealimentados, utiliza-se um compressor de forma que este comprima o ar atmosférico após passagem pelas suas pás de forma a promover uma pressão positiva no coletor de admissão e, desta forma, permitindo uma maior massa de ar dentro do cilindro.

Todas as válvulas e sedes de válvulas, que serão analisadas neste trabalho, provêm de MCI aspirado, com o sistema de injeção indireta.

O MCI possui um sistema de arrefecimento composto pela galeria de água, bomba de água, válvula termostática, mangueiras e radiador. O componente responsável pelo controle do fluxo de água do motor é a válvula termostática que tem sua abertura controlada em função da variação da temperatura do líquido de arrefecimento. Quanto maior a temperatura do líquido, maior a abertura da válvula e o inverso vale quando a temperatura diminui.

O líquido de arrefecimento do motor é composto por uma mistura de água e um aditivo, mais comumente utilizado o etileno glicol, podendo variar sua proporção entre os fluidos, normalmente entre 30 e 50 % (SAE INTERNATIONAL, 2004), de acordo com as necessidades de projeto. Este aditivo tem diversas finalidades, dentre elas a melhora da condutividade térmica, o aumento da resistência à corrosão do bloco do motor (no caso dos blocos de ferro fundido, quando em contato com a água), o anticongelamento em países com temperatura ambiente abaixo de zero grau, e o aumento da temperatura de ebulição da água, evitando assim a ocorrência de cavitação no circuito de água do motor e posterior falha de algum componente.

Atualmente, existem estudos sobre nanofluidos utilizados no sistema de arrefecimento do motor. Nanofluido é o nome dado a fluidos que contém partículas

sólidas de tamanho nanométrico (CHE SIDIK, NOOR AFIQ WITRI MOHD YAZID e MAMAT, 2017), as quais têm como finalidade melhorar a eficiência da troca térmica promovida pelo líquido de arrefecimento.

Em geral, a temperatura média de água do motor em funcionamento varia entre 80 e 110 °C, podendo em casos extremos atingir temperaturas de até 120 °C.

O sistema de lubrificação do MCI é composto pelo cárter, local onde é armazenado o óleo lubrificante, bomba de óleo, filtro de óleo, galeria e circuito de “*blow-by*”. Este sistema tem como função prover óleo lubrificante para todos os componentes móveis do motor.

Os regimes de lubrificação em um MCI variam de acordo com as limitações físicas e necessidades funcionais de cada componente. Na Figura 5 pode-se observar o regime de lubrificação dos componentes mais críticos do motor através do diagrama de Stribeck. Nele, o coeficiente de atrito está apresentado em função do número de Sommerfeld, que é determinado pela relação entre a viscosidade do lubrificante (τ), velocidade das partes móveis (v) e a pressão de contato (p). O número de Sommerfeld está relacionado diretamente à espessura do filme de óleo e inversamente ao coeficiente de atrito (WANG, 2007).

Figura 5 - Diagrama de Stribeck, ilustrando as regiões de lubrificação e coeficiente de atrito, como função no número de Sommerfeld.

Fonte: Introduction to Engine Valvetrain, WANG.

No caso das válvulas e sedes de válvula, não existe uma lubrificação direta. A lubrificação das válvulas e sedes de admissão é proveniente do vapor de óleo que flui pelo circuito de “*blow-by*” e do combustível, somente nos casos de MCI com injeção indireta, conforme citado anteriormente. As válvulas e sedes de escape trabalham em um meio mais agressivo, pois sua lubrificação é escassa, restringindo-se aos resíduos da combustão e uma possível formação de filme de óxido (que em alguns casos pode ser benéfico, atuando como um lubrificante sólido). Devido às altas temperaturas de trabalho, o lubrificante é predominantemente sólido (PYLE e SMRCKA, 1993).

O sistema de alimentação de combustível é composto pelo regulador de pressão, tubulação de combustível, rampa de injeção e bicos injetores. Ele tem como função, prover todo o combustível necessário, na quantidade desejada, de forma a permitir uma melhor combustão.

Nos dias atuais, grandes esforços vêm sendo realizados de maneira a reduzir o consumo de combustível. Os principais ganhos com esta redução são uma melhor autonomia do veículo e menor quantidade de emissões de poluentes.

O EHC, combustível produzido e utilizado no Brasil, obtido da cana de açúcar, vem ganhando espaço pela sua emissão reduzida de poluentes na combustão, quando comparado à gasolina.

1.1.2. Válvula e sede de válvula

O MCI ciclo Otto, tem seu fluxo de gases dentro do cilindro controlado pelo par válvula e sede de válvula (Figura 6). Sua função é promover a vedação do cilindro durante a combustão, em conjunto com os anéis do pistão, e controlar o fluxo de gases pelos dutos de admissão e escape, permitindo que ocorra a combustão dentro do cilindro e a energia produzida seja utilizada para movimentar o trem de força composto pelo pistão, biela, eixo virabrequim, volante, embreagem e platô.

Figura 6 - Válvula, sede de válvula e guia de válvula.

Fonte: <http://www.mahle-aftermarket.com/eu/es/products-and-services/engine-components/valve-train-components/#consejosparalasustituci&o>

As válvulas de admissão controlam a entrada da mistura ar combustível (em motores de injeção indireta) ou somente ar (em motores de injeção direta) e as válvulas de escape controlam a exaustão dos gases já queimados, que pelo movimento do pistão do PMI ao PMS promovem sua expulsão.

As nomenclaturas das partes da válvula estão apresentadas na Figura 7:

Figura 7 - Identificação das partes de uma válvula.

Fonte: Catálogo de válvulas TRW 2011

Existem diversas configurações do sistema válvula e sede de válvula no MCI ciclo Otto, podendo ser desenvolvido com 2, 3, 4 ou 5 válvulas por cilindro, dependendo de seu projeto. As configurações mais utilizadas são 2 e 4 válvulas por cilindro.

Na Figura 8, está representada uma câmara de combustão com um conjunto válvula e sede de válvula de admissão e um de escape montados. Não é possível ver as sedes de válvula já que as válvulas estão fechadas.

Figura 8 - Câmara de combustão com um par válvula e sede de admissão e um par de escape.

Nota-se que o diâmetro da válvula de admissão é maior que o da válvula de escape. Isto se deve ao fato que durante a admissão do motor, a pressão dentro do cilindro é inferior à pressão atmosférica (devido ao movimento do pistão do PMS ao PMI), promovendo assim a sucção do ar atmosférico. Logo, a restrição na admissão deve ser a menor possível, de maneira a promover um melhor enchimento do cilindro. Vale ressaltar que a limitação de potência de um MCI está associada, basicamente, à sua capacidade de admissão (considerando que o motor seja corretamente dimensionado para suportar esta potência).

No caso da exaustão, existem dois fatores que permitem um menor diâmetro da cabeça da válvula. O primeiro fator está associado a pressão positiva no instante do tempo de exaustão, existente por consequência da expansão dos gases da combustão, que aumentam significativamente a pressão dentro do cilindro. O segundo fator está associado ao movimento do pistão, que está em transição do PMI ao PMS,

empurrando os gases queimados para fora do cilindro e aumentando a pressão positiva.

Uma vantagem da utilização de válvulas menores é a necessidade de menor quantidade de material e, portanto, menor custo, especialmente para as válvulas de escape, que necessitam de materiais mais nobres, como aço austenítico, devido às altas temperaturas.

Vale ressaltar que, a dimensão das válvulas de admissão e escape é limitada pelo espaço físico disponível na câmara de combustão, que por sua vez é função do projeto do motor. Consequentemente é necessário estabelecer uma relação de compromisso entre as dimensões das válvulas de admissão e escape de forma a obter a melhor eficiência de enchimento e exaustão do motor.

A força distribuída na superfície de contato das válvulas e sedes, durante a combustão (válvulas fechadas) dependerá do projeto da válvula e da sede de válvula. Diversos fatores influenciam na força exercida, como:

- Área de contato;
- Ângulo da face de contato;
- Diferença de ângulo entre a superfície de contato da válvula e da sede;
- Pressão de combustão.

Existem também diversas formas construtivas de válvulas visando uma melhor adaptação para cada tipo de projeto como mostrada na Figura 9.

Fonte: Automotive Engine Valve Recession, 2002.

Numa válvula, as partes que interagem com outros componentes do MCI são a haste, o topo, o canal e a superfície de contato (ver Figura 7). A haste é montada na guia de válvulas, que tem como função alinhar a válvula com a sede e restringir o movimento da válvula na direção perpendicular ao plano da cabeça da válvula.

O topo da válvula tem contato com o tucho ou balancim, dependendo do tipo de projeto do motor. É no topo da válvula que é aplicada a força necessária para a abertura da mesma. No canal é montada a trava da válvula (também conhecida por semicone), que por sua vez trava o prato superior da mola, impedindo a queda da válvula dentro da câmara de combustão. Por fim, a superfície de contato da cabeça da válvula é pressionada contra a superfície de contato da sede de válvula, promovendo a vedação do cilindro durante a combustão.

A Figura 10 mostra a montagem das válvulas no cabeçote e a identificação de cada um dos componentes, em um sistema de acionamento de válvulas por tucho.

Figura 10-Vista das válvulas e sedes em corte.

Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DOHC-Zylinderkopf-Schnitt.jpg>

1- Cabeçote;	8- Mola;
2- Galeria de água do motor;	9- Tucho;
3- Duto de admissão;	10- Came;
4- Válvula de admissão;	11- Câmara de combustão;
5- Guia de válvula;	12- Sede de válvula admissão;
6- Duto de escape;	13- Sede de válvula escape;
7- Válvula de escape;	14- Galeria de óleo (alta pressão)

Além de diferentes esforços mecânicos, as válvulas trabalham sob diferentes temperaturas. As de admissão operam a temperaturas de até aproximadamente 550 °C, enquanto que as de escape operam a temperaturas mais altas, até aproximadamente 850 °C (MAHLE GMBH, 2013), já que através delas ocorre a exaustão dos gases provenientes da combustão.

As temperaturas de trabalho variam conforme a aplicação, tipo de motor e combustível utilizado. Devido à tendência de “*downsizing*” do MCI, espera-se que as temperaturas de funcionamento do par aumentem ainda mais, principalmente com a implementação de motores com turbo-compressor. Na Figura 11, pode-se observar uma distribuição típica de temperatura das válvulas em motores ciclo Otto e Diesel.

Figura 11 - Distribuição de temperatura (°C) nas válvulas de admissão (a) e escape (b) para MCI ciclo Diesel e Otto.

Fonte: *Introduction to Engine Valvetrain*, WANG (2007)

O calor transferido para as 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 e sede de válvula, devem ser consideradas as propriedades dos materiais de forma a obter uma melhor compatibilidade entre eles, isto é, propriedades térmicas que favoreçam a troca de calor, dureza e resistência ao desgaste suficientes para evitar desgaste excessivo,

resistência mecânica à alta temperatura (principalmente no par de escape), entre outras.

Os materiais das válvulas de admissão e escape diferem entre si, devido às distintas solicitações mecânicas e térmicas durante o funcionamento do MCI, conforme citado anteriormente. As válvulas de admissão normalmente são construídas de aço martensítico e as válvulas de escape de aço austenítico. O aço martensítico possui boa resistência abaixo de 500 °C. Já o aço austenítico é utilizado em temperaturas acima de 500 °C (YAMAGATA, 2005). Na Tabela 1, estão listados alguns materiais comumente utilizados em válvulas de MCI à gasolina:

Tabela 1 - Materiais utilizados em válvulas de admissão de escape de motores à gasolina.

Nome Comercial	Aplicação	Porcentagem do peso média dos elementos químicos [%]								
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	W	Fe	Outros
1541H	Admissão	0,41	1,50	0,25	-	-	-	-	Bal.	
1547	Admissão	0,47	1,50	0,25	-	-	-	-	Bal	
5150H	Admissão	0,50	0,80	0,25	0,80	-	-	-	Bal	
4140H	Admissão	0,40	0,90	0,25	1,0	-	-	-	Bal	Mo: 0,20
Sil 1	Admissão	0,45	<0,8	3,0	9,0	-	-	-	Bal	
Sil XB	Admissão	0,85	<0,8	2,2	20,0	-	-	-	Bal	
8645	Admissão	0,45	0,90	0,25	0,50	0,55	-	-	Bal	Mo: 0,20
SUH3	Admissão	0,40	<0,6	2,2	10	<0,6	-	-	Bal	Mo: 1,0
SUH 11M	Admissão	0,51	<0,6	1,5	8,5	<0,6	-	-	Bal	
422 SS	Admissão	0,22	<1,0	<0,75	11,8	0,75	1,0	-	Bal	Mo:1,0 V:0,23 Cu<0,5
21-4N	Escape	0,53	9,0	<0,25	21,0	4,0	-	-	Bal	N:0,20
21-2N	Escape	0,55	8,5	<0,25	21,0	2,1	-	-	Bal	N:0,30
SUH 35	Escape	0,53	9,0	<0,35	21,0	4,0	-	-	Bal	N:0,43
Ni30	Escape	0,06	0,5	0,5	14,0	30,0	-	-	Bal	Ti:2,6 Al:1,9
Mod.21-4N	Escape	0,50	9,0	<0,45	21,0	4,5	-	2,2	Bal	N:0,50 Nb+Ta:2,20
Inconel 751	Escape	0,07	<0,5	<0,5	15,5	Bal	<0,1	-	7,0	Ti:2,3 Al:1,2 Nb+Ta:1,0 Mo<0,5
Nimonic 80A	Escape	0,07	<1,0	<1,0	19,5	Bal	<2,0	-	<3,0	Ti:2,3 Al:1,4 Zr:0,07 Cu:<0,2
Pyromet 31V	Escape	0,05	<0,2	<0,2	22,5	Bal	<1,0	-	17,0	Ti:2,3 Al:1,3 Nb:0,9 Mo:2,0

Fonte: Introduction to Engine Valvetrains, WANG (2007)

As sedes de válvula são normalmente sinterizadas, um processo proveniente da metalurgia do pó. Atualmente, aproximadamente 90 % das sedes de válvula produzidas são provenientes do processo de sinterização (MATSUMOTO e SASAKI, 2016). O aumento da utilização deste tipo de processo ocorre devido sua vantagem quanto ao custo e resistência ao desgaste, quando comparado aos outros processos. Na produção das sedes de válvula, os poros provenientes do processo de sinterização são preenchidos com lubrificantes sólidos, como cobre por exemplo, de forma a reduzir o desgaste (KAWATA e MAKI, 2007).

Geralmente as sedes de válvula são formadas por ligas a base de ferro, contendo em sua composição Ni, Co, Cr, W e Cu. Uma grande quantidade de Cr e W aumentam a dispersão de carbonetos. Cobre pode ser utilizado como lubrificante sólido (YAMAGATA, 2005).

Um fator de grande importância na definição do material da sede de válvula é sua compatibilidade com o material da válvula. A Tabela 2 exemplifica possíveis combinações de materiais para as válvulas e sedes de válvula de admissão e escape, já conhecidas para MCI que operam com gasolina, as quais apresentam menor desgaste.

Tabela 2 - Exemplos de combinação de material de válvulas e sedes de válvula.

Admissão		Escape	
Válvula	Sede de Válvula	Válvula	Sede de Válvula
Sil 1 (HNV3) 1541 (NV1)	Sil XB (W90)	21-2N (EV12)	W70V W90

Fonte: Introduction to Engine Valvetrains, Wang (2007)

É comum utilizar um recobrimento sobre a superfície de contato do par válvula e sede de válvula. Esta camada visa reduzir o desgaste através da utilização de materiais com boa resistência mecânica, resistência ao desgaste e em alguns casos com características lubrificantes. Elas podem ser classificadas em quatro grupos principais (WANG, 2007):

- Ligas a base de cobalto: Co-Cr-C-W (ex.: Stellite 6);
- Ligas a base de cobalto: Co-Mo-Cr (ex.: Tribaloy);
- Ligas a base de níquel: Ni-C-W ou Mo ou Co (ex.: Eatonite 5);
- Ligas a base de ferro: Fe-Cr-Ni-C-Mo (ex.: Eatonite 6).

As formas 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 MCI ciclo Otto aspirados, tem ângulo de contato de 45° . Este ângulo apresenta melhor relação 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 e aumentam a probabilidade de retenção de partículas residuais da combustão.

Outra característica de grande importância é a diferença entre o ângulo da superfície de contato da válvula e da sede de válvula que, por recomendação de projeto, deve ser, aproximadamente, entre $0,5^\circ$ e $1,5^\circ$ (WANG, 2007) criando uma primeira linha de contato, garantindo uma melhor vedação do par durante o funcionamento do motor (MAHLE GMBH, 2013). Esta diferença pode ser observada no esquema da Figura 12. Ao longo da vida útil do motor, a tendência é que esta linha de contato tenha sua área aumentada conforme o aumento do desgaste do par válvula e sede de válvula.

Figura 12 - Ângulo de contato entre a válvula e sede de válvula de projeto.

Fonte: Valve trains system and components, MAHLE.

Existem três razões para esta diferença de ângulo (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 da válvula e sede de válvula 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.

1.1.3. Desgaste em válvulas e sedes

É estimada que aproximadamente 15 % da energia disponível em um MCI seja perdida por atrito, e que um terço desta perda seja de responsabilidade do trem de válvulas (WANG, 2007). Na Figura 13 estão indicadas as fontes de perda por atrito em um MCI.

Figura 13 - Fonte das perdas por atrito em um MCI.

Fonte: *Introduction to Engine Valvetrain*, WANG (2007). p. 437

O desgaste no par tribológico válvula e sede de válvula tem grande importância na durabilidade e desempenho de um MCI. Muitos estudos foram realizados sobre o desgaste de válvulas e sedes de válvulas de motores Diesel, talvez devido a sua condição mais severa de operação, quando comparando com os MCI ciclo Otto (LEWIS e DWYER-JOYCE, 2002).

No caso dos motores a gasolina, também existem estudos sobre os modos e mecanismos de desgaste, porém no caso de motores *Flex-Fuel*, por se tratar de uma tecnologia relativamente recente, estes ainda não são conhecidos. O desgaste do par válvula e sede de válvula promove a chamada recessão de válvula, ilustrada na Figura 16.

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 oxisulfatos preveniam a oxidação do ferro à alta temperatura das válvulas de escape, além de prevenir contra a adesão, transferência de material e micro soldagem da sede na válvula (PYLE e SMRCKA, 1993).

Nos motores que utilizavam combustíveis livres de chumbo, o ferro existente nas 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 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). Em estudos recentes realizados por Cavalieri *et al.*, 2016, o mecanismo adesão foi analisado detalhadamente no desgaste da superfície de contato da válvula e sede de válvula, testadas em bancada, assim como foi desenvolvido um modelo numérico para determinação do desgaste.

Outro mecanismo de desgaste observado principalmente em motores que operam com combustível que possuem menor poder de lubrificação (como gás natural) é o desgaste por pequenas cavidades (“*pitting*”), que está associado com a formação de micro trincas abaixo da superfície (LIANG, STRONG, *et al.*, 1999).

Oxidação e corrosão foram identificadas 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, onde 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 consequentemente maior quantidade de partículas duras, promovendo o desgaste por abrasão, conforme relatado no trabalho realizado por X. Liang *et al*, 1999, em sedes de válvula de escape de motores Diesel.

O desgaste do par tribológico depende, além dos parâmetros de projeto e produção, da combinação de diversos fatores existentes durante o funcionamento do MCI. Analisando o funcionamento deste par, conclui-se que os fatores envolvidos no desgaste são: o impacto da superfície de contato da válvula na sede de válvula 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.

No desenvolvimento de um sistema válvula e sede de válvula, é importante garantir que a superfície de contato da válvula tenha maior resistência que a superfície da sede de válvula. Isto é necessário para garantir uma proporção de desgaste de 1/3 do desgaste na válvula e 2/3 de desgaste na sede de válvula. Isto se deve ao fato de que no caso de uma falha na válvula, a mesma pode cair dentro do cilindro proporcionando graves danos ao motor (SAE INTERNATIONAL, 2004).

De acordo com o trabalho de Lewis e Dwyer-Joyce, 2003, verificou-se forte influência da velocidade de fechamento da válvula, da pressão de combustão e do desalinhamento da válvula com relação à sede, na recessão das válvulas, conforme pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 - Recessão de válvula com sede fundida de aço ferramenta com aumento de: (a) Velocidade de fechamento da válvula, (b) Carga na combustão e (c) Desalinhamento da válvula.

Fonte: *Combating Automotive Engine Valve Recession*, Lewis e Dwyer-Joyce.

Abaixo segue uma análise de cada uma das condições acima citadas:

- 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 à 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 da válvula exercida sobre a sede de válvula, 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 (MCI ciclo Otto “*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 de válvula 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 *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). A Figura 15 mostra de forma esquemática a pressão exercida na cabeça da válvula durante a combustão.

Fonte: Valve train System and Components, MAHLE

- 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 excessivo do par válvula e sede de válvula pode prejudicar o funcionamento do motor, promovendo:

- Redução do desempenho do MCI;

Segundo Forsberg e colaboradores, o desgaste acentuado do par tribológico altera o 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 abaixo:

Fonte: Combustion Valve Wear – A Tribological Study of Combustion Valve Sealing Interfaces, Forsberg.

O desgaste do par válvula e 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, e a folga entre tucho e came do eixo comando de válvulas é zero, a válvula pode não fechar completamente quando na posição de repouso (mola descomprimida), permitindo a passagem de gases quentes provenientes da combustão e consequente quebra da válvula e posterior quebra do motor.

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

As válvulas podem falhar 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;

Os motores *Flex-Fuel* que operam com EHC têm o agravante de sua baixa lubricidade quando comparado à gasolina, como pode ser observado na Tabela 3. Consequentemente, o desgaste do par tribológico é mais severo.

Tabela 3 – Lubricidade da gasolina comum E20 e etanol E100 (AGUDELO, DELGADO e BENJUMEA, 2011)

	Gasolina (E20)	Etanol hidratado (E100)
Lubricidade MWSD (μm)	515	605

A lubricidade dos combustíveis, utilizada para comparação na tabela acima, é determinada pelo parâmetro MWSD (“*Mean Wear Scar Diameter*”), obtido pela norma ASTM D 6079-04. Quanto maior o valor de lubricidade WSD, menor a lubricidade do combustível (MENDES DE FARIAS, SILVA DE SANTANA, *et al.*, 2010).

1.1.4. Tribologia

A *tribologia* é definida como “a ciência e tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo” (HUTCHINGS, 1992). A tribologia está presente em qualquer componente móvel. No movimento relativo entre dois corpos, pode ou não haver desgaste, dependendo do meio interfacial, das propriedades dos materiais e as solicitações mecânicas e térmicas. O *desgaste* é definido como “a perda progressiva de substância da superfície em operação de um corpo, ocorrendo como resultado do movimento relativo na superfície” (GAHR, 1987)

No MCI, o estudo da tribologia tem um papel fundamental para o correto funcionamento e vida útil de cada componente. O controle do desgaste das válvulas e sedes discutidas no item 1.1.2 é dimensionado de acordo com o estudo da tribologia.

Existe divergência entre os diversos autores sobre a classificação dos modos e mecanismos de desgaste. A seguir serão apresentados os modos de desgaste de acordo com a terminologia e classificação utilizadas pelo autor Ian M. Hutchings (HUTCHINGS, 1992):

- Deslizamento

O desgaste por deslizamento pode ocorrer em meio lubrificado ou a seco. Neste tipo de desgaste não existe nenhum corpo entre as superfícies deslizantes, eventualmente com lubrificante, quando aplicável.

No desgaste por deslizamento, os mecanismos podem ser dominados pela plasticidade, onde envolve deformação plástica de pelo menos um dos materiais em deslizamento ou por oxidação, que pode ocorrer pelas altas velocidades de deslizamento entre os corpos, onde a temperatura localizada na ponta das asperezas eleva-se até a formação de óxido ou devido às altas temperaturas do ambiente (por exemplo na superfície de contato das válvulas e sedes de escape durante o funcionamento do MCI). Dentro de uma faixa de espessura, a camada de óxido pode reduzir e até eliminar a deformação plástica reduzindo a resistência ao cisalhamento na superfície.

O deslizamento pode ser por movimento oscilatório de pequena amplitude, normalmente entre 1 e 100 μm , também conhecido pelo termo em inglês “*fretting*”.

- Abrasão

O desgaste abrasivo pode ocorrer de duas formas distintas, por dois ou três corpos. Na abrasão a dois corpos, o contra corpo possui protuberâncias duras que causam a abrasão. Na abrasão a três corpos, existem partículas entre o corpo e contra corpo que são livres para deslizar ou rolar. A abrasão pode ocorrer por deformação plástica ou fratura frágil.

- Erosão

No processo de erosão, pequenas partículas duras atingem a superfície do corpo. A energia liberada no impacto pode causar deformação plástica ou fratura frágil.

Os produtos sólidos da combustão podem atingir a superfície de contato da válvula e/ou sede de válvula com alta velocidade, durante o tempo de exaustão, onde os gases são expulsos do cilindro.

- Adesão

A adesão é um fenômeno que resulta em forças atrativas entre duas superfícies que estão em contato. As ligações na adesão são favorecidas pela deformação plástica e limpeza. A adesão ocorre normalmente nos contatos das asperezas das superfícies.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Este trabalho foi desenvolvido com base na análise das válvulas e sedes de válvula de quatro MCI, ciclo Otto, Flex-Fuel, com sistema de injeção indireta. A denominação, respectivas montadoras e cilindrada (volume da câmara de combustão) de cada um deles estão identificadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Motores utilizados na caracterização do desgaste do par válvula e sede de válvula.

Denominação	Montadora	Cilindrada	Condição
MT-1	X	1.4 L	Usado
MT-2	Y	1.6 L	Usado
MT-3	Z	1.4 L	Novo
MT-4	Z	1.4 L	Novo

2.1.1. Motores MT-1 e MT-2

As análises iniciais deste trabalho foram realizadas em válvulas e sedes de válvula provenientes dos cabeçotes dos motores MT-1 e MT-2, já ensaiados (motores “usados”) sem foco no desgaste do par tribológico e cedido à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. Desta forma não foi possível realizar a caracterização inicial (antes dos ensaios dinamométricos) dos componentes.

A fim de contornar esta situação, foram obtidas válvulas novas, em revendas autorizadas dos respectivos motores e foi assumido que os desvios de produção (variações de dimensões e material) não têm efeitos significativos no modo de desgaste, nem nas características da superfície de contato nova, a qual sofre desgaste.

No caso das sedes de válvula, elas não foram analisadas na condição nova devido à dificuldade de obtenção, já que o processo final de usinagem das sedes é realizado após a montagem das mesmas no cabeçote.

O ângulo da face de contato das válvulas dos dois motores é de 45°.

Os materiais das válvulas e sedes de válvula dos motores MT-1 e MT-2 estão identificados na Tabela 5.

Tabela 5 - Material das válvulas e sedes de válvula dos motores MT-1 e MT-2.

Componente	Motor MT-1	Motor MT-2
Válvulas de admissão	Tipo: Peça única Material: X45CrSi9-3 Recobrimento: Stellite	Tipo: Peça única Material: X45CrSi9 Camada: Nitretação
Válvulas de escape	Tipo: Peça única Material: EM X50CrMnNiNbN219 Recobrimento: Stellite	Tipo: Duas peças Material: X45CrSi9 (haste) / X50CrNiNbN21-9 (cabeça) Camada: Nitretação
Sedes de válvula de admissão	COMO 12-06FS	AR 20 D
Sedes de válvula de escape	AR16FS	AR 20 D

2.1.2. Motores MT-3 e MT-4

Os motores MT-3 e MT-4 são MCI de mesmo modelo, especificação técnica, e foram fornecidos na condição nova, para posterior realização de ensaio em dinamômetro de motor, cujo ciclo de ensaio será descrito mais adiante neste Trabalho.

Estes motores foram fruto de doação de um parceiro integrante do “Consórcio de P&D e Desafios Tribológicos em Motores Flex-Fuel”.

As válvulas de admissão e escape do motor MT-3 são mostradas na Figura 17.

Figura 17 - Válvulas de admissão (a) e escape (b) do motor MT-3.

O ângulo da face de contato das válvulas é de 30°.

As sedes de válvula de admissão e escape do motor MT-3, estão montadas no cabeçote e são mostradas na Figura 18.

Figura 18 - Sedes de válvula montadas no cabeçote do motor MT-3.

Os materiais das válvulas e sedes de válvula dos motores MT-3 e MT-4 estão identificados na Tabela 6.

Tabela 6 - Material das válvulas e sedes de válvula dos motores MT-3 e MT-4.

Componente	Motor MT-3	Motor MT-4
Válvulas de admissão	Tipo: Peça única Material: HNV 3 Camada: Eatonite 6	
Válvulas de escape	Tipo: Duas peças Material: EV-12 (cabeça) / HNV 3 (haste) Camada: Eatonite 6	
Sedes de válvula de admissão	S-I39	
Sedes de válvula de escape	S-I39	

2.1.3. Equipamentos

Os equipamentos utilizados para exame dos modos de desgaste e ensaios em dinamômetro foram:

- Lupa estereoscópica (LE)
 - Marca: Nikon
 - Modelo: SMZ800
 - Câmera: Câmera digital Nikon 1200F
 - Software: ECT-1
- Microscópio eletrônico de varredura (MEV)
 - Marca: Philips
 - Modelo: XL-30
 - Microsonda: EDAX para análise espectrométrica de Raios X com detector de elementos leves
 - Câmera: EBSD para difração de elétrons retro espalhados
 - Software: TSL para medida de textura e mapeamento de orientações de grãos;
- Perfilômetro ótico 3D sem contato (PO)
 - Marca: Taylor Hobson
 - Modelo: CCI MP
 - Software: Talysurf e Talymap
- Dinamômetro passivo (ver Figura 19)
 - Marca: General Electric (GE)

Figura 19 - Banco de dinamômetro no Instituto Mauá de Tecnologia - Laboratório de Motores.

2.2 MÉTODOS

As análises deste trabalho foram realizadas sem referência de posição geométrica da válvula relativa à sede, já que, devido ao movimento de rotação da válvula durante o funcionamento do motor, não é possível estabelecer qualquer correlação entre suas posições relativas.

Na metodologia de análise das válvulas e sedes de válvulas não se levou em consideração posições fixas da superfície de contato, como por exemplo, dividir os 360° da superfície em 8 posições, e sempre analisar os mesmos locais, conforme descritos em outros trabalhos. Toda a superfície de todas as válvulas e sedes de válvulas foram examinadas visualmente, sendo registrados somente os eventos de relevância.

2.2.1. Análise pré-teste

Estas análises foram realizadas somente no caso dos motores MT-3 e MT-4, os quais foram fornecidos na condição nova.

Inicialmente foram numeradas as válvulas de 1 a 4, conforme o número do cilindro em que elas foram montadas (ver Figura 17). A seguir foi analisada a superfície de contato de todas as válvulas de admissão e escape novas, utilizando LE e PO.

Após este exame, as válvulas foram montadas nos cabeçotes dos motores MT-3 e MT-4, previamente identificados como A e B.

Os motores foram montados seguindo todas as referências de torque e sequência de aperto dos parafusos e as folgas de válvula reguladas conforme orientações da montadora.

Uma válvula adicional de admissão e outra de escape foram analisadas no MEV. Para isto foi necessária a remoção de suas hastes, através de um processo de corte, já que as dimensões da câmara de vácuo do MEV eram menores que as das válvulas.

As sedes de válvula dos cabeçotes ensaiados em dinamômetro não foram analisadas na condição nova devido à necessidade de removê-las do cabeçote para possibilitar análise nos equipamentos citados. A fim de contornar esta situação, foram analisadas sedes de válvula provenientes de um cabeçote adicional, removidas

através de uma sequência de operações de corte para posterior análise na LE, PO e MEV.

Com base nas restrições existentes e análises realizadas nos componentes novos, foi possível considerar que todas as superfícies de contato novas, das válvulas e sedes de válvula, de admissão e escape têm mesmas características, ou seja, seguem um padrão de topografia e foram consideradas insignificantes as variações de geometria e de composição do material.

No caso dos motores MT-1 e MT-2, foram analisadas somente uma válvula de admissão e uma válvula de escape na condição nova, seguindo a mesma metodologia citada para as válvulas dos motores MT-3 e MT-4.

2.2.2. Análises pós teste

A preparação das válvulas e sedes de válvula assim como a sequência de análises estão descritas abaixo:

- 1- Remoção do cabeçote do motor;
- 2- Desmontagem das válvulas do cabeçote;
- 3- Identificação de todas as válvulas e cilindros do cabeçote;
- 4- Análise da superfície de contato das válvulas na LE;
- 5- Proteção da superfície de contato das válvulas com filme de PVC e preparação para corte;
- 6- Remoção da haste de todas as válvulas por processo de corte;
- 7- Limpeza das válvulas por ultrassom, com imersão e álcool etílico;
- 8- Secagem das válvulas com ar comprimido;
- 9- Proteção da superfície de contato das sedes de válvula com papel toalha e preparação para corte;
- 10- Corte do cabeçote para remoção das sedes de válvula;
- 11- Limpeza das sedes de válvula por ultrassom, com imersão e álcool etílico;
- 12- Secagem das sedes de válvula com ar comprimido;
- 13- Análise da superfície de contato das sedes de válvula na LE;
- 14- Análise da superfície de contato das sedes de válvula na MEV;
- 15- Análise da superfície de contato das sedes de válvula na PO;

As válvulas foram examinadas na LE antes de sua limpeza a fim de não perder nenhuma evidência de eventuais alterações superficiais e presença de depósitos, provenientes do funcionamento do motor durante o ensaio. No caso das sedes, não foi possível examinar a superfície antes da limpeza devido à necessidade de remoção das mesmas do cabeçote. Para tanto, foram protegidas suas superfícies com filme PVC e fita adesiva reduzindo, porém, não eliminando a possibilidade de contaminação, devido à dificuldade de isolamento da região de complexa geometria e espaço reduzido.

A limpeza das peças por ultrassom com imersão em álcool etílico tem por finalidade proteger o detector de elétrons do MEV assim como todo ambiente de medição (a utilização de álcool reduz a possibilidade de corrosão das peças).

Na sequência foram examinadas toda a superfície de contato das válvulas e sedes de válvula no MEV. Por fim, os cinco principais eventos observados nas superfícies de contato de cada uma das válvulas e sedes foram selecionados e examinados no PO, totalizando cento e sessenta medições de superfície.

2.2.3. Ensaio dos motores MT-1 e MT-2

Conforme citado no item 2.1.1, os motores MT-1 e MT-2 foram ensaiados sem foco no desgaste do par válvula e sede de válvula. As condições exatas de funcionamento do motor não foram disponibilizadas. Segue abaixo uma breve descrição dos ensaios realizados:

- Ensaio do motor MT-1:
O motor foi submetido a um ensaio em veículo para análise do sistema de injeção eletrônica, com um ciclo de rodagem em tráfego urbano com temperaturas de funcionamento padrões, conforme projeto do motor.
- Ensaio do motor MT-2:
Este motor realizou um ensaio de choque térmico em banco dinamômetro. O ciclo de rodagem consiste na variação da rotação do motor da condição de marcha lenta (aproximadamente 850 rpm com torque zero) à de rotação máxima, assim como variação da carga do motor aplicada, de 0 % a 100 %. A temperatura de água do motor foi controlada entre 40 e 100 °C, de acordo com o ciclo de ensaio.

2.2.4. Ensaio dos motores MT-3 e MT-4

Os ensaios dinamométricos foram realizados no Laboratório de Motores do Instituto Mauá de Tecnologia, parceiro do “Consórcio de P&D e Desafios Tribológicos em Motores Flex-Fuel” dentro do Projeto Nº 2009/54891-8, da Fundação de Amparo À Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP. Neste banco foram realizados dois ensaios, o primeiro com o motor MT-4, utilizando EHC e o segundo, realizado com o motor MT-3, utilizando combustível gasolina comum (composição de 27% de etanol anidro na gasolina comum - E27).

Antes da realização dos ensaios dinamométricos com os motores, foi realizado o amaciamento, com o objetivo de estabilizar o atrito de seus componentes.

2.2.4.1. Ciclo de amaciamento

O ciclo de amaciamento foi realizado com temperatura de saída de água controlada a 97 ± 2 °C e temperatura máxima do óleo lubrificante a 130 °C, com aumento progressivo da rotação e torque do motor, a fim de estabilizar a força de atrito entre seus componentes. O ciclo está descrito na Tabela 7 e ilustrado na Figura 20.

Tabela 7 - Ciclo de amaciamento do ensaio em dinamômetro.

Rotação [rpm]	Torque [N.m]	Tempo passo [min]	Tempo acumulado [horas]
Marcha Lenta	-	20	0,33
1000	5	20	0,66
1500	15	40	1,33
2000	30	40	2,00
2500	40	60	3,00
3000	50	60	4,00
3500	60	60	5,00
4000	70	60	6,00
4500	80	60	7,00
5000	90	60	8,00
5500	110	60	9,00
5500	WOT	60	10,00

Figura 20 - Ciclo de amaciamento do ensaio em dinamômetro.

2.2.4.2. Ciclo de ensaio

O ciclo de ensaio foi definido seguindo dois conceitos principais. O primeiro relacionado a quantidade de ciclos de abertura e fechamento das válvulas que são proporcionais à rotação do motor (lembrando que a cada duas rotações do eixo virabrequim, tem-se uma rotação do eixo comando de válvulas) e desta forma, quanto maior a rotação, maior a quantidade de impactos da face de contato da válvula contra a face de contato da sede de válvula.

O segundo conceito está relacionado a pressão exercida pela válvula na sede de válvula. Desta forma foi analisada a pressão de combustão, pois quanto maior a pressão de combustão, maior o deslizamento entre a superfície de contato da válvula e sede de válvula e maior a quantidade de energia liberada na forma de calor (maiores temperaturas dos gases de exaustão e maior quantidade de energia transferida para o líquido de arrefecimento e óleo do motor na forma de calor).

Com base nos critérios acima, definiu-se o ciclo de ensaio na condição de potência máxima do motor, conforme descrito na Tabela 8 e ilustrado na

Figura 21.

Tabela 8 - Ciclo do ensaio de durabilidade.

Rotação do Motor	Carga do Motor	Duração	Temp. saída de água	Temp. Máx. de Óleo	Potência
5500 rpm	100 %	125 h	97 ±2 °C	130 °C	85 kW (Gasolina) 88 kW (Etanol)

Figura 21 - Ciclo de ensaio dos motores MT-3 e MT-4 em dinamômetro.

Foram definidas verificações parciais a serem realizadas durante o ensaio, chamadas de revisões. As revisões têm por finalidade garantir a integridade do motor, assim como medir a possível recessão de válvulas durante as 125 h de teste através da medição de folga de válvula.

A folga de válvula é determinada pela distância entre a região cilíndrica do came e a face superior do tucho mecânico, conforme esquematizado na Figura 22, para

Figura 22 - Representação da folga de válvula em um sistema de trem de válvulas com tucho mecânico.

As medições e verificações do motor e alguns de seus componentes foram realizadas conforme indicado na Tabela 9.

Tabela 9 - Revisão a ser realizada durante o ciclo de ensaio.

Atividade	Tempo de Teste [h]					
	0	25	50	75	100	125
Medição de consumo de óleo / Massa final	X			X		X
Trocar óleo e filtro de óleo	X					
Medição de compressão de cilindros	X	X	X	X	X	X
Medição de folga de eletrodo de velas	X	X	X	X	X	X
Medição da folga de válvulas	X	X	X	X	X	X
Massa inicial de óleo (PRÉ CURVA DE DESEMPENHO)	X			X		X
Curva de desempenho	X					X
Mapeamento de blow-by	X					X
Massa inicial de óleo (PRÉ ENSAIO)	X			X		

O instante 0 h (início dos ensaios) definido na Tabela de revisão, representa o motor após amaciamento e antes dos ensaios propriamente ditos. Neste momento são realizadas diversas medições, dentre elas uma curva de desempenho e um mapeamento de “*blow-by*”. A curva de desempenho tem como finalidade registrar e garantir a qualidade do motor antes do início do ensaio, assim como sua integridade após teste. O mesmo vale para o mapeamento de “*blow-by*”, porém neste, o foco de medição é a vazão do vapor de óleo no circuito de “*blow-by*” do motor. As condições de operação do motor na curva de desempenho e mapeamento de “*blow-by*” estão apresentadas nas Tabela 10 e Tabela 11.

Tabela 10 - Curva de desempenho.

Rotação	Carga do Motor	Tempo passo	Tempo total	Temp. Saída de Água	Temp. Máx. de Óleo
1000 a 6250 rpm (Passos de 250 rpm)	100 %	3,0 min	69 min	97 ±2 °C	130 °C

Tabela 11 - Mapeamento de “blow-by”.

Rotação	Carga do Motor	Tempo passo	Tempo total	Temp. Saída de Água	Temp. Máx. de Óleo
1000 a 6250 rpm (Passos de 500 rpm)	25, 50, 75 e 100 %	3,0 min	144 min	97 ±2 °C	130 °C

Na Tabela 12 está apresentado o resumo dos motores, respectivos ensaios e combustíveis utilizados:

Tabela 12 - Resumo dos ensaios realizados por motor.

Motor	Combustível	Ensaio
MT-1	EHC	Injeção eletrônica. Rotação e carga variadas Temperaturas de água e óleo: Variadas (não conhecidas)
MT-2	Gasolina Comum (E22) - 2012 ¹	Choque térmico. Rotação e carga variadas Temperaturas de água e óleo: Variadas entre 40 e 100 °C
MT-3	EHC	Máxima potência. Rotação de potência máxima e 100 % de carga. Temperaturas de água e óleo: Constantes
MT-4	Gasolina Comum (E27) - 2016 ¹	Máxima potência. Rotação de potência máxima e 100 % de carga. Temperaturas de água e óleo: Constantes

¹ A porcentagem de etanol anidro contido na gasolina comum tipo C brasileira é regulamentada pela Agência Nacional do Petróleo - ANP

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO PREELIMINAR

As regiões das válvulas e sedes de válvula, as quais serão examinadas e discutidas ao longo deste Trabalho, estão delimitadas pelas linhas vermelhas, indicadas na Figura 23.

Figura 23 - Região examinada da válvula (a) e sede de válvula (b), indicadas pela linha vermelha.

3.1 EXAME DAS VÁLVULAS E SEDES DE VÁLVULA DOS MOTORES MT-1 E MT-2

A primeira etapa deste Trabalho constituiu no exame dos pares tribológicos (válvula e sede de válvula) dos motores MT-1 e MT-2.

Foram realizadas análises qualitativas do desgaste das válvulas e sedes de válvula destes motores, com o objetivo de coletar informações sobre os mecanismos de desgaste existentes, para posterior comparação e possível correlação com os mecanismos encontrados nos pares provenientes dos motores MT-3 e MT-4, ensaiados de forma controlada em dinamômetro.

3.1.1. Válvulas novas

Antes do exame das válvulas e sedes de válvula desgastadas, determinou-se as características das válvulas novas, a fim de obter um parâmetro de referência. Não foram realizadas análises em sedes de válvula novas, pois não foi possível obter amostras das mesmas. Os componentes novos estão indicados na Figura 24, em imagens obtidas por LE.

Figura 24 - Imagens obtida por LE de uma válvula de admissão nova do motor MT-1 com diferentes ângulos de iluminação: (a) 90° (b) 20°.

Numa válvula de admissão nova do motor MT-1, a superfície de contato, destacada pelo contorno vermelho na Figura 24 a, possui coloração homogênea e refletora de luz devido ao metal utilizado e a ausência de impurezas ou contaminantes na superfície. Alterando o ângulo de iluminação são evidenciados os riscos circunferenciais de usinagem e aparente depressões na superfície, conforme mostrado na Figura 24 b.

Em exames no MEV, os riscos de usinagem se destacam, conforme indicado na Figura 25.

Figura 25 - Imagem obtida por MEV dos riscos circunferenciais de usinagem na superfície de contato da válvula de admissão nova, do motor MT-1.

Estes riscos de usinagem são provenientes do processo de fabricação das válvulas, que neste caso, foi a retífica.

A mesma análise foi realizada para uma válvula de escape nova do motor MT-1, onde se observou uma superfície similar, com a presença de riscos de usinagem, conforme pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 - Imagens obtidas por MEV dos riscos circunferenciais de usinagem na superfície de contato da válvula de escape nova do motor MT-1

Na Figura 27 são mostrados detalhes das válvulas de admissão e escape do motor MT-2. Observa-se que a superfície possui um aspecto diferente das verificadas nas válvulas do motor MT-1. Isto deve ser decorrente da diferença no projeto de motor (montadora X, do motor MT-1 e montadora Y, do motor MT-2, conforme Tabela 4), onde existe uma camada superficial, a fim de aumentar a resistência ao desgaste durante o funcionamento.

Figura 27 - Imagens obtidas por MEV de válvulas novas de admissão (a) e de escape (b), do motor MT-2 (DURANGO, THIODORO, et al., 2015).

3.1.2. Válvulas de admissão

Os exames iniciais foram realizados em LE e MEV, de forma a identificar as regiões com diferentes características morfológicas.

Na Figura 28 observa-se a válvula de admissão do primeiro cilindro do motor MT-1. A região da válvula foi dividida da seguinte forma:

- A- Face inferior: Região coberta com resíduos da mistura ar / combustível / óleo lubrificante. Este resíduo é proveniente da passagem do ar de admissão do motor misturado com o combustível, por se tratar de um motor de injeção indireta (conforme citado no item 1.1.1), juntamente com o arraste de vapor de óleo advindo do sistema de “*blow-by*”;
- B- Superfície de contato: Região onde ocorre o contato com a sede de válvula e posterior desgaste;
- C- Borda da cabeça: Região estrutural da cabeça da válvula onde não há contato com nenhum outro componente do motor.

Figura 28 - Imagem obtida por LE da válvula de admissão do motor MT-1.

Neste Trabalho são analisadas somente as regiões da superfície de contato da válvula com a sede de válvula.

A superfície de contato da válvula de admissão do motor MT-1 pode ser dividida em duas regiões, visto que apresentam características visuais distintas. Estas regiões foram denominadas Regiões 1 e 2, conforme indicado na Figura 29.

Figura 29 - Imagens obtidas por LE da válvula de admissão do motor MT-1 com diferentes ângulos de iluminação: (a) 90° (b) 20°.

As Figura 29 a e Figura 29 b foram registradas com ângulos de iluminações diferentes. Através deste artifício é possível observar diferentes detalhes na superfície devido à interação da luz com a superfície, como por exemplo alguns riscos circunferenciais e depósitos que aparecem somente na Figura 29 b.

A Região 1 apresenta riscos circunferenciais melhores definidos, depósitos e de forma geral, um aspecto similar ao da superfície da válvula nova. A Região 2 é definida por uma superfície lisa e aspecto mais homogêneo. Com as imagens obtidas por MEV, mostradas na Figura 30, é possível identificar claramente os riscos circunferenciais de usinagem, superfície lisa e depósitos sobre a superfície de contato.

Figura 30 - Imagens obtidas por MEV da válvula de admissão do motor MT-1 (DURANGO, THIODORO, et al., 2015).

A superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 4 do motor MT-1, registrada na LE, foi dividida em 2 regiões e apresentou maior quantidade de depósitos na Região 1 (ver Figura 29 a) como indicado na Figura 31 a.

Figura 31 - Imagens obtidas por LE da válvula de admissão do motor MT-1.

A região em destaque na Figura 31 b, delimitada pelo retângulo vermelho, foi analisada no MEV, utilizando detector de elétrons retroespalhados - BSE, como pode ser observado na Figura 32 b. Pela diferença de contraste, é possível identificar diferente composição do depósito (X) comparado a superfície com presença de riscos (Y). Esta diferença de contraste ocorre em função do número atômico dos elementos presentes na amostra.

Figura 32 - Imagens obtidas por MEV (a) e MEV-BSE (b) da válvula de admissão do motor MT-1.

Com base nestas informações, foi realizada uma análise nos pontos X e Y indicados na Figura 32 b, utilizando o MEV com detector de espectroscopia de energia de raios-X – EDS. Seus resultados estão registrados na Figura 33 e Figura 34 respectivamente. As linhas de raios-X características são específicas do número atômico da amostra e, o seu comprimento de onda ou sua energia são utilizados para identificar o elemento que está emitindo a radiação.

Figura 33 - Análise EDS do ponto X (depósito) na Região 2 da superfície de contato.

Figura 34 - Análise EDS do ponto Y na Região 2 da superfície de contato.

Conhecendo a composição química da válvula e sede de válvula de admissão (ver Tabela 13), pode-se concluir que o depósito é proveniente do óleo lubrificante, pois este, apresenta carbono (C), sódio (Na) e cálcio (Ca), elementos contidos no óleo lubrificante.

Tabela 13 - Elementos constituintes do par válvula e sede de válvula de admissão do motor MT-1.

Componente	Fe	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Co	W	Mo
Válvula de admissão	X	X	X	X	X	X	X			
Sede de válvula de admissão	X	X		X	X		X	X		X
Camada (Stellite 6)	X		X	X			X	X	X	X

O pico de oxigênio pode indicar início de oxidação na superfície.

Analisando a válvula de admissão do motor MT-2, na Figura 35, observa-se uma característica diferente da observada na válvula de admissão do motor MT-1. Isto pode estar associado à diferença de projeto entre os dois motores e / ou ao tipo de material e resistência ao desgaste de cada par tribológico.

A superfície de contato desta válvula foi dividida também em 2 regiões. Devido às características semelhantes encontradas nas extremidades, elas foram denominadas de Região 1. A região central, foi identificada como Região 2.

A análise da Região 1 revelou riscos circunferenciais de usinagem e maior quantidade de depósitos. Já na Região 2, observou-se uma faixa clara com aspecto liso e polido. Esta foi a região de maior desgaste.

Figura 35 - Imagens obtidas por LE (a) e MEV (b) da válvula de admissão do motor MT-2.

Foram encontrados sulcos na Região 1 da válvula de admissão do motor MT-2, conforme indicado na Figura 36 a e b, indicados pelas setas.

Figura 36 - Sulcos encontrados na superfície de contato da válvula de admissão do motor MT-2.

Observou-se também endentação e sulcos inclinados, produzidos por riscamento, na superfície de contato da válvula, conforme mostrado na Figura 37.

Figura 37 - Endentação e sulcos inclinados na superfície de contato da válvula de admissão do motor MT-2.

3.1.3. Sede de válvula de admissão

A superfície de contato da sede de válvula de admissão é apresentada na Figura 38.

Figura 38 - Imagem obtida por LE da sede de válvula de admissão do motor MT-1.

As válvulas e sedes de válvula de admissão, do motor MT-1, apresentaram características distintas a ponto de permitir uma divisão em regiões. Na Figura 39 observa-se a superfície de contato da sede de válvula de admissão do motor MT-1. São observados riscos circunferenciais em toda a superfície e depósitos.

Figura 39 - Superfície de contato da sede de válvula de admissão do motor MT-1 com diferentes ângulos de iluminação.

Quando analisado em detalhe, observam-se riscos mais pronunciados na região superior da sede (diâmetro maior), conforme mostrado na Figura 40.

Figura 40 - Riscos circunferenciais pronunciados na região superior da sede de admissão do motor MT-1.

Alterando o ângulo de iluminação destacam-se riscos na região central da sede de admissão, conforme indicado na Figura 41. Estes riscos podem ser provenientes do desgaste do par válvula e sede, pois em alguns pontos os mesmos são descontínuos, indicando que não foram produzidos no processo de usinagem. Os riscos menos acentuados provavelmente são devido à usinagem na construção da válvula.

Figura 41 - Riscos circunferenciais na região central da sede de admissão do motor MT-1 com diferente ângulo de iluminação.

Estas regiões observadas coincidem com a definição de projeto do par válvula e sede de válvula citada anteriormente, onde a região próxima do maior diâmetro é o local em que a válvula tem seu contato inicial, quando os componentes estão novos.

A Região central passa a ter contato conforme vai ocorrendo o assentamento da válvula na sede.

Ao analisar os 360° desta mesma sede, foi observada uma distinção entre duas regiões, conforme indicado na Figura 42.

Figura 42 - Imagens obtidas por LE da sede de válvula de admissão do motor MT-1 Regiões distintas.

As regiões foram denominadas como 2 (diâmetro maior) e 1 (diâmetro menor), de forma a coincidir com a real posição de montagem da válvula na sede, conforme representação na Figura 43.

Figura 43 - Comparação das características superficiais entre a superfície de contato da sede de válvula (esquerda) e válvula (direita) de admissão.

A Região 2 apresenta riscos mais pronunciados que na Região 1. É observada uma diferença de coloração entre as regiões 2 e 1, onde existem manchas de coloração cinza e marrom. Isto talvez possa ser explicado pela presença de depósitos provenientes da mistura ar / combustível e vapor de óleo lubrificante (“*blow-by*”).

Em outro local da sede de válvula, indicado na Figura 44, região 2, foi observado depósito de material sobre a superfície. Nas imediações deste depósito foram observadas endentações na direção circunferencial, possivelmente causadas pelo próprio depósito encontrado ou fragmentos dele, durante o funcionamento do motor. Estas endentações, muito próximas umas das outras, podem ter ocorrido no momento do fechamento da válvula, quando existe um rebatimento da mesma contra a sede de válvula, antes do pleno fechamento.

Figura 44 - Depósito e marcação na região 2 da superfície de contato da sede de válvula.

Na superfície da sede de válvula de outro cilindro do motor MT-1, indicada na Figura 45, observaram-se depósitos em praticamente toda a circunferência da sede. Estes são provenientes do óleo lubrificante, similar ao que foi encontrado na superfície da válvula de admissão.

Esta maior quantidade de depósitos pode estar associada à diferente distribuição da mistura admitida pelos cilindros do motor, sugerindo que no cilindro em questão, houve maior passagem de vapor de óleo.

As manchas de óleo estão presentes, predominantemente, na Região 1 (com menor desgaste), provavelmente devido à proximidade dos depósitos existentes na

cabeça da válvula. As regiões mais “limpas” coincidem com as regiões destacadas na Figura 40 e Figura 41 da sede de válvula de outro cilindro.

Na Região 2 também foi observada corrosão, com uma coloração marrom alaranjada, característica deste tipo de fenômeno, conforme mostrado na Figura 45.

Figura 45 - Depósitos e corrosão na superfície de contato da sede de válvula de admissão do motor MT-1.

Através de imagens obtidas por MEV, mostradas na Figura 46, foram identificadas regiões na sede de válvula onde existe grande quantidade de deposição de material, diferentemente de outros locais analisados desta mesma sede. Isto pode ocorrer, pois além da diferente distribuição da mistura ar / combustível / vapor de óleo entre cilindros, também há uma diferença na forma como ocorre a passagem da mistura pela válvula e sede. Devido à forma geométrica do duto de admissão no cabeçote e a posição da válvula e sede, há uma maior incidência desta mistura em locais específicos da sede de válvula, causando assim regiões com maior deposição de material que em outras.

Na Figura 46 a, a superfície de contato está destacada e novamente observam-se duas regiões com características distintas. Na Região 1, uma grande quantidade de depósitos está presente e, através de uma análise no MEV, utilizando o detector BSE (Figura 46 b), conclui-se que as manchas escuras na superfície de contato

(indicadas pelas setas vermelhas) têm mesma composição das manchas existentes fora da superfície de contato, localizada na cabeça da válvula, comprovando que estes depósitos são provenientes da mistura formada na admissão do motor.

Figura 46 - Imagens obtidas por MEV da superfície de contato da sede de válvula de admissão do motor MT-1, com grande quantidade de depósitos provenientes da mistura ar/combustível/vapor de óleo utilizando detector SE (a) e utilizando o detector BSE (b).

Na superfície de contato da sede de válvula de admissão do motor MT-2, também foram encontrados depósitos. Esta superfície possui diferentes características, quando comparadas com as sedes do motor MT-1. Isto se deve à diferente construção e diferentes materiais destas sedes. A sede de admissão do motor MT-2 apresenta uma superfície predominantemente lisa, conforme indicado na Figura 47 a. Na Figura 47 b, são observados depósitos sobre a superfície (indicados pelas setas) e possível destacamento de material (indicado pelo círculo). Através de uma análise pelo detector BSE do MEV (Figura 47 c), conclui-se que a composição dos depósitos difere da composição da sede, podendo ser proveniente da mistura admitida pelo motor.

Na região onde existe o destacamento de material existem duas composições distintas, uma coincidente com o material da sede (mesmo contraste da superfície de contato) e outro coincidente com o material dos depósitos (mesmo contraste dos depósitos). Isto talvez possa ser explicado pois durante o funcionamento do motor houve o destacamento e posteriormente deposição de material.

Figura 47 - Imagem obtida por MEV da superfície de contato da sede de válvula do motor MT-2, utilizando detector SE (a) e (b) e detector BSE (c).

3.1.4. Válvulas de escape

Na Figura 48 está representada a superfície de contato de uma das válvulas de escape analisada do motor MT-1. A primeira diferença observada foi pequena quantidade dos depósitos de coloração escura identificados nas válvulas e sedes de válvulas. Esta diferença está associada à composição e ao estado dos gases que passam pelas válvulas e sedes de admissão e dos gases que passam pelas válvulas e sedes de escape.

Os gases que passam pelas válvulas de escape são provenientes da combustão. Estes gases são resultados da queima da mistura ar / combustível / vapor de óleo e devido as altas temperaturas, a maior parte, senão toda a parte líquida do óleo lubrificante é evaporada, restando apenas partículas sólidas. O mesmo ocorre com o combustível. A parcela de evaporação dependerá da eficiência da combustão e tipo de combustível.

Figura 48 - Superfície de contato de uma válvula de escape do motor MT-1.

A superfície de contato da válvula de escape foi dividida em 3 regiões distintas, conforme indicado na Figura 49. A Região 1 apresenta depósitos superficiais na direção circunferencial, manchas escuras e poucos riscos circunferenciais. A Região 2 apresenta depósitos de forma desorganizada e foi chamada de zona de transição. A Região 3 possui superfície lisa, também com depósitos dispostos de forma desorganizada. Aparentemente o desgaste foi mais acentuado nesta região.

Figura 49 - Imagens da superfície de contato da válvula de escape do motor MT-1, obtidas por LE (a) e MEV (b) (DURANGO, THIODORO, et al., 2015).

Analisando outra região da superfície de contato da válvula (Figura 50), pode-se observar com maior clareza os riscos circunferenciais provenientes de usinagem (indicados por setas vermelhas) e os depósitos (indicados por setas amarelas) na Região 1.

Figura 50 - Superfície de contato da válvula de escape do motor MT-1 obtida por MEV.

O depósito indicado na Figura 51 foi analisado no MEV, utilizando detector BSE. Pela diferença de contraste constatou-se que o depósito possui diferente composição do material da válvula e então, foi realizada uma análise EDS, cujos resultados estão indicados na Figura 52.

Figura 51 - Mancha escura presente na Região 1 da válvula de escape do motor MT-1 obtida por MEV, utilizando o detector BSE (DURANGO, THIODORO, et al., 2015).

Figura 52 - Análise EDS do depósito apresentado na Figura 51 (DURANGO, THIODORO, et al., 2015).

Com exceção dos elementos O (oxigênio), P (fósforo), Zn (zinco) e Na (sódio), todos os outros fazem parte da composição da válvula. O pico de oxigênio indica a presença de oxidação nesta mancha e os elementos P, Zn e Na são constituintes do óleo lubrificante.

Na válvula de escape de outro cilindro, foram também observadas 3 regiões de desgaste, porém as características de cada região diferiram do que foi observado anteriormente. Isto talvez ocorra pelo diferente assentamento entre cada uma das válvulas e sedes do cabeçote, da diferente distribuição da mistura admitida, combustão, distorção do cabeçote devido a sua diferente distribuição de temperatura, entre outros. A superfície de contato citada está indicada na Figura 53. No caso desta válvula, a região com maior desgaste foi a Região 2.

Figura 53 - Superfície de contato da válvula de escape do motor MT-1 obtida por LE.

A Região 1 possui depósitos de materiais, manchas escuras e sulcos, talvez produzidos por alguma partícula dura livre ou embutida na sede de escape. Na Figura 54 os sulcos (indicado pela seta vermelha) e depósitos (indicado pela seta amarela) podem ser observados em maior detalhe, através da análise da imagem obtida por MEV.

Figura 54 - Sulcos e depósito na superfície de contato da válvula de escape do motor MT-1.

No motor MT-2, foram observadas características de desgaste diferentes das encontradas no motor MT-1.

A superfície de contato das válvulas do motor MT-2 foi dividida em 2 regiões, conforme indicado na Figura 55 a. A Região 1 apresentou sulcos, oxidação e

depósitos, enquanto que a Região 2 apresentou superfície lisa com depósitos e oxidação.

Figura 55 - Oxidação na superfície de contato da válvula de escape do motor MT-2.

Foi observada oxidação na superfície de contato da válvula de escape, conforme indicado na Figura 55b, com iluminação com ângulo de incidência inferior ao ângulo de Brewster. O ângulo de Brewster ocorre quando os ângulos dos raios refletidos e refratados formam 90° entre si. Nesta condição, a componente cuja polarização é paralela ao plano de incidência é completamente transmitida, de modo que a luz refletida tem apenas a componente perpendicular, não ocorrendo reflexão da luz (HALLIDAY, 2009).

Desta forma, é possível observar as manchas escuras de oxidação devido à interação da luz com a camada de óxido presente na superfície de contato, onde ocorre menor reflexão da luz, proporcionando maior contraste entre a superfície com e sem camada de óxido.

3.1.5. Sede de válvula de escape

A superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-1 está apresentada na Figura 56.

Figura 56 - Superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-1.

As superfícies de contato das sedes de válvula de escape, do motor MT-1, foram divididas em 3 regiões, similar ao realizado na superfície de contato das válvulas de escape. A Figura 57 mostra a superfície de contato da sede de válvula dividida em três regiões.

Figura 57 - Superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-1 (DURANGO, 2015).

Explorando a superfície de contato indicada na Figura 57, cada região foi examinada separadamente. A Região 1, mostrada na Figura 58 a, apresenta coloração escura devido a presença de depósitos na superfície. Na Figura 58 c é possível observar diversos pequenos depósitos em torno de um de maior tamanho. A presença de depósitos mais acentuada nesta região, talvez seja explicada pela grande quantidade de depósitos na região adjacente à superfície de contato, por onde passam os gases de escape para então acessar o duto de escape do cabeçote. Neste caso, estes depósitos na região adjacente podem se desprender da superfície, caindo na região de contato, sendo posteriormente esmagados no fechamento da válvula.

É possível observar também riscos circunferenciais de usinagem, que ficam evidentes quando examinada esta região no MEV (Figura 58 b e c). Esta região apresentou menor desgaste quando comparada às outras duas.

Figura 58 - Região 1 da superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-1 obtida por LE (a) e MEV (b e c).

A Região 2 apresenta um desgaste médio entre as Regiões 1 e 3. São observados riscos circunferenciais no lado mais próximo da Região 1 e uma superfície mais lisa no lado mais próximo da Região 3. No centro desta região, são observadas

faixas escuras e marcas de forma arredondada, obedecendo a certo padrão de forma e espaçamento, conforme indicado na Figura 59.

Figura 59 - Região 2 da superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-1.

Através de exame desta região no MEV, observa-se que estas marcas arredondadas são regiões lisas, conforme indicado na Figura 60. Isto pode estar associado a deformação plástica na região, devido a esmagamento de depósitos.

Figura 60 - Imagens das manchas arredondadas na superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-1 obtidas por MEV.

Em todo o comprimento circunferencial da sede de válvula de escape, encontrou-se faixas escuras e manchas arredondadas, porém em alguns locais observou-se menor quantidade de depósitos.

A Região 3, mostrada na Figura 61, é caracterizada por uma superfície lisa, com a presença de depósitos incrustados (indicada pela seta azul), possível oxidação (indicada pela seta vermelha) e manchas escuras (indicada pela seta amarela). Sabendo-se que o processo final na produção da sede é a usinagem da superfície, conclui-se que esta região é a que apresenta maior desgaste (superfície lisa). Vale

lembrar que conforme citado anteriormente, a Região 3 coincide com a recomendação de projeto em que a primeira linha de contato deve ocorrer na região próxima do maior diâmetro (Figura 12).

Figura 61 - Região 3 da superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-1.

Em um exame no MEV, utilizando o detector EDS, obtêm-se dois distintos espectrogramas das regiões X e Y indicadas na Figura 62 b.

Na região X foi encontrada basicamente elementos constituintes da válvula e um pequeno pico de oxigênio, indicando a existência de uma fina camada de óxido na superfície.

Figura 62 - Superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-1, obtida por LE (a) e MEV (b).

No depósito Y, foi encontrada a presença apenas dos elementos constituintes do material da válvula e da sede de válvula, podendo ser consequência de transferência de material por adesão ou algum cavaco proveniente do desgaste do sistema que foi incrustado na superfície da sede. Um pequeno pico de alumínio foi encontrado, porém este provavelmente é proveniente do material do cabeçote que se

depositou na superfície durante o trabalho de remoção da sede de válvula do cabeçote.

Figura 63 - Análise EDS da região X (a) e depósito Y (b).

A mancha escura mostrada na Figura 64 foi analisada no MEV, utilizando o detector EDS, e além dos elementos já encontrados nas análises anteriores, foi

encontrado um pico de carbono (C), como mostrado na Figura 65, indicando que esta mancha talvez seja proveniente dos resíduos da queima do vapor óleo lubrificante.

Figura 64 - Mancha escura na superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-1 obtida por LE (a) e MEV (b) da mancha escura localizada na Região 3.

Figura 65 - Análise EDS da mancha escura encontrada na Região 3 da sede de válvula de escape do motor MT-1.

A superfície de contato da sede de válvula do motor MT-2 foi dividida em duas regiões, conforme mostrado na Figura 66. A Região 1, similar ao observado na Região 1 da sede do motor MT-1, é observada coloração escura devido a presença de depósitos na superfície. São observadas faixas claras ao longo de praticamente toda a região, indicando um possível contato da válvula nesta região e não foi observado

um padrão na distribuição dos depósitos. A Região 2 apresenta um aspecto mais de coloração mais clara e algumas manchas escuras na superfície.

Figura 66 - Superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-2.

Em outro local da superfície da sede de válvula é possível observar depósitos ocupando grande parte da superfície de contato, conforme mostrado na Figura 67. A região de coloração marrom alaranjada mais intensa (indicada com uma seta) indica corrosão na superfície dos depósitos.

Figura 67 - Depósitos na superfície de contato da sede de válvula de escape do motor MT-2 obtido por LE (a) e MEV (b).

3.2 EXAME DAS VÁLVULAS E SEDES DE VÁLVULA DOS MOTORES MT-3 E MT-4

As válvulas e sedes de válvula dos motores MT-3 e MT-4 foram analisadas seguindo a mesma metodologia utilizada nas análises dos motores MT-1 e MT-2. Adicionalmente, as superfícies de contato foram examinadas no PO.

3.2.1. Válvulas e sedes de válvula novas (Antes do ensaio em dinamômetro)

As válvulas e sedes de válvula novas possuem sua superfície de contato com características similares, apresentando um aspecto plano e homogêneo, conforme identificado na Figura 68. Riscos circunferenciais de usinagem são predominantes em todas as superfícies.

As válvulas de escape apresentam uma superfície de coloração escura devido ao seu processo final de fabricação, a nitretação, como se observa na Figura 68 b.

Figura 68 - Superfície de contato da válvula de admissão (a), válvula de escape (b), sede de válvula de admissão (c) e sede de válvula de escape (d), obtidas por LE.

Através das medições obtidas por PO, é possível evidenciar os riscos circunferenciais de usinagem, conforme mostrado na Figura 69.

Figura 69 - Superfície de contato da válvula de admissão (a), válvula de escape (b), sede de válvula de admissão (c) e sede de válvula de escape (d), obtidas por PO.

3.2.2. Válvulas e sedes de válvula de admissão após ensaio em dinamômetro

Após remoção das válvulas de admissão do cabeçote, foi inicialmente observada a quantidade de depósito existente na região da cabeça das válvulas. As válvulas de admissão do motor MT-3 são mostradas na Figura 70.

Figura 70 - Válvulas de admissão do motor MT-3.

As válvulas dos cilindros 1 e 4 apresentaram maior quantidade de depósito pegajoso, de coloração escura, conforme observado na Figura 70.

Estes depósitos são provenientes pirólise da mistura ar / combustível / vapor de óleo que aderem às superfícies da cabeça da válvula e parte de sua haste.

Na região da cabeça da válvula de admissão do cilindro 4 do motor MT-3, é possível observar que houve maior destacamento de parte do depósito existente comparado com as válvulas dos demais cilindros, conforme mostrado em detalhe na Figura 71. Este depósito, quando solto, passa pelas válvulas, é admitido no cilindro do motor, sendo queimado no processo de combustão e depois eliminado juntamente com os gases de escape. No momento da passagem pelas válvulas de admissão, assim como no instante da passagem pelas válvulas de escape, existe a possibilidade do esmagamento destes depósitos entre a superfície de contato da válvula e sede, durante o fechamento das válvulas, podendo influenciar nos modos de desgaste da superfície.

Figura 71 - Depósitos na válvula de admissão do quarto cilindro (seta amarela) e região com destacamento parcial dos depósitos (seta vermelha), do motor MT-3.

Esta diferença na quantidade de depósitos existente nas válvulas dos quatro cilindros do motor se deve à diferente distribuição da mistura ar / combustível / vapor de óleo entre os cilindros, promovido pela geometria do coletor de admissão, assim como a dinâmica dos gases e temperatura de cada cilindro durante a admissão. A diferença de temperatura em cada uma das válvulas é resultado da eficiência da combustão de cada cilindro assim como do sistema de arrefecimento, influenciando na formação destes depósitos.

Após análise da superfície de contato das válvulas na LE, foram observadas algumas características similares entre superfícies de contato das válvulas dos quatro cilindros do motor, conforme identificado na Figura 72.

Figura 72 - Superfície de contato das válvulas de admissão dos cilindros 1 a 4 do motor MT-3, obtidas por LE.

De forma geral, a região próxima do diâmetro menor da superfície de contato apresentou maior quantidade de depósitos de coloração escura, provavelmente devido a sua proximidade dos depósitos existentes na cabeça da válvula. Próximo do diâmetro maior da superfície de contato, foi observada uma superfície de coloração mais clara, acinzentada e menor quantidade de depósitos.

Ao término da remoção das válvulas do cabeçote do motor MT-3, foi observado o aspecto visual das câmaras de combustão dos 4 cilindros, assim como das sedes de válvula e todos apresentaram aspectos similares, conforme indicado na Figura 73.

Figura 73 - Câmaras de combustão dos cilindros 1 a 4, do motor MT-3.

Apesar de observada maior quantidade de depósitos na superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 4, não foram observadas diferenças significativas em sua câmara de combustão.

Depósitos de coloração escura, similares aos observados na cabeça da válvula também foram encontrados nos dutos de admissão assim como na sede de válvula.

As superfícies de contato das sedes de válvula do motor MT-3 apresentaram aspectos similares entre si, conforme identificado na Figura 74.

Figura 74 - Superfície de contato das sedes de válvula de admissão do motor MT-3, obtidas por LE.

As válvulas de admissão do motor MT-4 são mostradas na Figura 75, e também apresentaram depósitos pegajosos de coloração escura, porém em quantidade significativamente menor que nas válvulas do motor MT-3. Como os motores MT-3 e MT-4 são da mesma montadora e mesmo projeto, atribui-se esta diferença na quantidade de deposição de material na cabeça das válvulas ao diferente combustível utilizado, já que o motor MT-3 operou com EHC e o motor MT-4 com gasolina tipo C.

As cabeças das válvulas de admissão 1 e 4 do motor MT-4 apresentaram menor quantidade de depósitos comparadas com as válvulas dos cilindros 2 e 3, aparentemente devido a destacamento de depósitos, ocorrido durante o funcionamento do motor.

Figura 75 - Válvulas de admissão do motor MT-4.

As superfícies de contato das válvulas de admissão do motor MT-4 foram examinadas na LE, e observaram-se aspectos similares entre si, conforme identificado na Figura 76. A quantidade de depósitos de coloração escura, na região próxima do diâmetro menor, foi maior nas válvulas de admissão do motor MT-4 comparada com as do motor MT-3.

Figura 76 - Superfície de contato das válvulas de admissão dos cilindros 1 a 4 do motor MT-4, obtidas por LE.

A câmara de combustão do motor MT-4 apresentou coloração mais escura que do motor MT-3, devido aos diferentes produtos de combustão obtidos por razão dos diferentes combustíveis. Estes diferentes produtos podem influenciar no desgaste devido aos distintos meios interfaciais.

Não houve diferenças visuais significativas entre os cilindros do motor MT-4, conforme mostrado na Figura 77.

Figura 77 - Câmaras de combustão dos cilindros 1 a 4, do motor MT-4.

As superfícies de contato das sedes de válvula de admissão do motor MT-4 apresentaram aspectos similares entre si, apresentando menor quantidade de depósitos em suas superfícies, conforme mostrado na Figura 78.

Figura 78 - Superfície de contato das sedes de válvula de admissão dos cilindros 1 a 4 do motor MT-4, obtidas por LE.

A superfície de contato das válvulas e sedes de válvula de admissão de ambos motores (MT-3 e MT-4) pôde ser dividida em 2 regiões, de acordo com suas características visuais, conforme indicado na Figura 79. Isto coincide com o que já havia sido observado nas análises preliminares das válvulas de admissão dos motores MT-1 e MT-2.

Figura 79 - Imagens obtidas por LE da superfície de contato, dividida em 2 regiões, da válvula e sede de válvula, ambas de admissão do cilindro 1, do motor MT-3.

A Região 1 apresentou maior quantidade de depósitos e riscos circunferenciais, enquanto que a Região 2 apresentou uma superfície mais “limpa” e com aspecto de polimento.

As larguras da superfície de contato das válvulas e sedes de válvula de admissão dos quatro cilindros do motor MT-3 foram medidas e comparadas no PO. Dentre as medições realizadas, houve uma variação máxima de aproximadamente 100 μm para as válvulas e 50 μm para as sedes, indicando que a área de contato entre os pares dos quatro cilindros do motor foi similar.

Em razão das áreas de contato serem próximas entre as válvulas e sedes de válvula, espera-se que não sejam observadas diferenças significativas no modo de desgaste entre os pares, causadas pela força exercida na válvula durante a combustão, pois neste caso, as pressões de contato são próximas umas das outras.

Na Figura 80 estão representadas as medições das larguras máxima e mínima da superfície de contato das válvulas e na Figura 81, as larguras referentes às sedes de válvula.

Figura 80 - Comparativo entre as larguras máxima e mínima da superfície de contato medidas nas válvulas de admissão do motor MT-3, obtidos por PO.

Figura 81 - Comparativo entre as larguras máxima e mínima da superfície de contato medidas nas sedes de válvula de admissão do motor MT-3, obtidos por PO.

Foi observada pequena recessão das válvulas de admissão dos quatro cilindros dos motores MT-3 e MT4 ao longo das 125 h de ensaio, como mostrado na Figura 82. A recessão das válvulas foi medida a cada 25 h de ensaio, com o auxílio de um calibre de lâminas com resolução de 0,005 mm.

Figura 82 - Recessão de válvulas de admissão, por cilindro, dos motores MT-3 e MT-4.

A válvula de admissão do cilindro 2 apresentou maior recessão (ver Figura 16) em ambos os motores, e com base nos valores de recessão de cada válvula, pode-se dizer que todas as válvulas apresentaram pequena recessão.

3.2.3. Válvulas e sedes de válvula de escape

As válvulas de escape dos cilindros 1 e 3, do motor MT-3 apresentaram depósitos de coloração mais clara na cabeça da válvula, comparados com os depósitos nas válvulas dos cilindros 2 e 4 como mostrado na Figura 83. Isto se deve às diferenças da quantidade de massa de ar / combustível / vapor de óleo admitida, diferenças na qualidade da combustão de cada cilindro (combustão incompleta), resultando em diferentes produtos da combustão que passam pelas válvulas e diferentes temperaturas atingidas durante o pico de pressão dentro do cilindro. A eficiência do resfriamento de cada uma das válvulas também influencia a formação destes depósitos.

Figura 83 - Válvulas de escape pós teste, do motor MT-3.

Os valores de temperatura dos gases de escape foram medidos no centro de cada duto do coletor de escape (instrumentação com termopar, tipo K, para cada cilindro), ao longo de todo ensaio. Seus valores médios, desvio padrão, mínimos e máximos estão indicados na Tabela 14 e, foram obtidos de um total de 2.500 medições por cilindro.

Tabela 14 - Temperatura média, mínima e máxima dos gases de escape por cilindro, do motor MT-3.

Cilindro	Motor MT-3: Temperatura dos gases de escape [°C]			
	Mínima	Média	Máxima	Desvio Padrão
1	716	741	767	9
2	746	778	795	5
3	768	782	799	7
4	705	730	746	5

Vale ressaltar que a temperatura dos gases não representa diretamente a temperatura das válvulas e sedes de válvula. Isto se deve ao fato de que durante o funcionamento do motor são alternados ciclos de aquecimento (expulsão dos gases da combustão, quando as válvulas estão abertas) e resfriamento das válvulas (obtido pelo contato das válvulas com as sedes, quando as válvulas estão fechadas, conforme explicado no item 1.1.2). Consequentemente a temperatura das válvulas acaba sendo inferior à temperatura dos gases de combustão.

As temperaturas dos gases de escape indicam se houve variação significativa de temperatura dos pares válvula e sede de válvula de cada cilindro. A máxima temperatura foi registrada ocorreu no cilindro 3, atingindo 799 °C.

Com base na Figura 84, pode-se afirmar que as temperaturas dos cilindros 1 e 4 são estatisticamente iguais, assim como as temperaturas dos cilindros 2 e 3, com índice de confiança de 99,7%, considerando o valor médio mais ou menos três vezes o valor de desvio padrão. Esta diferença de temperatura normalmente ocorre devido à eficiência do sistema de arrefecimento do motor, assim como o fato dos cilindros das extremidades tenderem a ser mais “frios”. Os cilindros centrais estão cercados sempre por 2 cilindros, como fontes de calor (por exemplo, o cilindro 2 têm ao seu lado os cilindros 1 e 3 gerando calor) enquanto que os cilindros das extremidades (1 e 4) têm ao seu lado somente 1 cilindro (uma única fonte de calor).

Figura 84 - Temperatura média dos gases de escape por cilindro do motor MT-3.

Na Figura 85 observa-se a superfície de contato das válvulas de escape dos quatro cilindros, onde é possível identificar algumas diferenças entre as superfícies.

Figura 85 - Superfície de contato das válvulas de escape do motor MT-3, obtidas por LE.

As superfícies de contato das sedes de válvula do motor MT-3 apresentaram aspecto similar entre si, com depósitos distribuídos na direção circunferencial, conforme mostrado na Figura 86, apresentando menor quantidade de depósitos quando comparadas com as superfícies de contato das válvulas de escape.

Figura 86 - Superfície de contato das sedes de válvulas de escape do motor MT-3, obtidas por LE.

De forma geral, as válvulas de escape do motor MT-4 apresentaram aspecto similar entre si, com depósitos de coloração clara na cabeça da válvula, conforme mostrado na Figura 87. A cabeça da válvula do cilindro 3 apresentou marcação escura na direção radial, indicando que possivelmente houve vazamento dos gases da combustão em algum instante, durante o funcionamento do motor, porém ainda no princípio de uma possível falha, já que não foi evidenciada queda na compressão dos cilindros ao longo das 125 h.

Figura 87 - Válvulas de escape pós teste, do motor MT-4.

As temperaturas dos gases de escape, por cilindro do motor MT-4 também foram medidas ao longo do ensaio. Seus valores médios, máximo, mínimo e respectivos desvios padrão, são mostrados na Tabela 15 e, foram obtidos de um total de 2.500 medições por cilindro. A máxima temperatura foi registrada também ocorreu no cilindro 3, atingindo 821 °C.

Tabela 15 - Temperatura média, mínima e máxima dos gases de escape por cilindro, do motor MT-4.

Cilindro	Motor MT-4: Temperatura dos gases de escape [°C]			
	Mínima	Média	Máxima	Desvio Padrão
1	721	743	769	8
2	757	779	801	8
3	776	797	821	8
4	745	768	792	8

Os valores das temperaturas médias mais ou menos três vezes o desvio padrão, são mostrados na Figura 88.

Comparando as médias das temperaturas somadas aos desvios padrão entre os motores MT-3 e MT-4, podemos afirmar que as temperaturas dos cilindros 1 e 2 foram as mesmas, enquanto que as temperaturas dos cilindros 3 e 4 foram superiores no motor MT-4.

Figura 88 - Temperatura média dos gases de escape por cilindro do motor MT-4.

Na Figura 89 observa-se a superfície de contato das válvulas de escape dos quatro cilindros, onde é possível identificar algumas diferenças entre elas.

Figura 89 - Superfície de contato das válvulas de escape do motor MT-4, obtidas por LE.

As superfícies das sedes de válvula de escape do motor MT-4 apresentaram aspectos similares entre si, conforme mostrado na Figura 90.

Quando comparadas com as sedes de válvulas de escape do motor MT-3, observa-se maior quantidade de depósitos, coincidindo com a maior quantidade também encontrada nas válvulas de admissão do motor MT-4.

Figura 90 - Superfície de contato das sedes de válvula de escape do motor MT-4, obtidas por LE.

A superfície de contato das válvulas e sedes de válvula de escape foi dividida em 3 regiões, devido as características visuais observadas. A Figura 91 mostra a superfície de contato da válvula e sede de válvula de escape do cilindro 1, do motor MT-3, dividida em três regiões.

Figura 91 - Imagens obtidas por LE da superfície de contato, dividida em 3 regiões, da válvula e sede de válvula, ambas de escape do cilindro 1, do motor MT-3.

As larguras da superfície de contato das válvulas e sedes de válvula de escape dos quatro cilindros do motor MT-3 foram medidas e comparadas no PO. Dentre as medições realizadas, foi observada uma variação significativa da largura da superfície de contato, registrando uma variação máxima de aproximadamente 700 μm para as válvulas e 350 μm para as sedes, indicando que a área de contato entre os pares dos quatro cilindros do motor apresentou variação, podendo influenciar na força de contato e, conseqüentemente, interferir no modo de desgaste atuante. Na Figura 92, estão apresentadas as medições das larguras máxima e mínima da superfície de contato das válvulas e na Figura 93, as larguras referentes às sedes de válvula.

Figura 92 - Comparativo entre as larguras máxima e mínima da superfície de contato medidas nas válvulas de escape do motor MT-3, obtidos por PO.

Figura 93 - Comparativo entre as larguras máxima e mínima da superfície de contato medidas nas sedes de válvula de escape do motor MT-3, obtidos por PO.

Também foi observada variação significativa da largura da superfície de contato na mesma válvula, indicando que houve desalinhamento da válvula com relação a sede, de forma a promover diferentes áreas de contato ao longo do comprimento circunferencial da superfície de contato. A Tabela 16 apresenta os valores medidos mínimos e máximos da largura da superfície de contato das válvulas de escape, por cilindro e a Tabela 17 apresenta os valores de largura das sedes de válvula de escape, referentes ao motor MT-3.

Tabela 16 - Larguras mínimas e máximas da superfície de contato (L) por válvula de escape, do motor MT-3.

Cilindro	Largura L [μm]		Variação [μm] ($L_{\text{máx}} - L_{\text{mín}}$)
		Mínimo	Máximo	
	1	1897	2383	486
	2	1845	2279	434
	3	1695	1803	108
	4	1736	2248	512

Tabela 17 - Larguras mínimas e máximas da superfície de contato (L) por sede de válvula de escape, do motor MT-3.

Cilindro	Largura L [μm]		Variação [μm] ($L_{\text{máx}} - L_{\text{mín}}$)
		Mínimo	Máximo	
	1	2051	2117	66
	2	1955	2023	68
	3	1766	1799	33
	4	2033	2106	73

Nota-se que as larguras das superfícies de contato encontrados na válvula e sede de válvula de escape do cilindro 3 foram as menores e também apresentaram a menor variação. Desta forma, conclui-se que as forças atuantes nesta superfície de contato foram maiores, devido à menor área de contato (considerando pressão de combustão similar entre os cilindros). As máximas variações ocorreram na válvula e sede de válvula de escape do cilindro 4.

Foi observada maior recessão das válvulas de escape comparadas com as de admissão, porém ainda consideradas como pequena recessão, ao longo das 125 h de ensaio, como mostrado na Figura 82. A recessão das válvulas foi medida a cada 25 h de ensaio, com o auxílio de um calibre de lâminas com resolução de 0,005 mm.

Figura 94 - Recessão de válvulas de escape, por cilindro, dos motores MT-3 e MT-4.

A válvula de escape do cilindro 2, do motor MT-3, apresentou maior recessão e no caso do motor MT-4, a válvula de escape do cilindro 3 apresentou maior recessão.

3.2.4. Exames dos danos superficiais pós teste

3.2.4.1. Depósitos

Depósitos foram observados em todas as válvulas e sedes de válvula, de admissão e de escape, em sua grande maioria, sem padrão de distribuição definido. Estes foram encontrados em duas formas distintas: sendo o primeiro, encontrado em maior quantidade, de coloração escura, aderido à superfície (ver Figura 95 a e c) e o segundo, na forma de partículas soltas, com coloração mais clara e de forma arredondada (ver Figura 95 b).

Figura 95 - Depósitos na superfície de contato da válvula de admissão do motor MT-3, do cilindro 1 (a), cilindro 2 com diferente ângulo de iluminação (b) e cilindro 3 (c), obtidas por LE.

O segundo tipo de depósito encontrado foi nomeado de partículas soltas pois, comparando a mesma superfície de contato, por exemplo da válvula de admissão do cilindro 2, antes e após sua limpeza por ultrassom, estas partículas foram removidas da superfície enquanto que os depósitos de coloração escura permaneceram, com uma pequena redução de sua quantidade, conforme mostrado na Figura 96.

Figura 96 - Comparativo da quantidade de depósitos existentes na superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 2 do motor MT-3, antes (a) e após (b) limpeza por ultrassom, obtidas por LE.

Na Figura 95 a, é possível observar a presença de depósitos seguindo uma forma circular progressiva na direção circunferencial, sugerindo que uma partícula foi esmagada no fechamento da válvula e, pelo seu movimento de rotação relativamente à sede, esta partícula foi transladada e esmagada repetidamente até o instante de sua completa passagem pelo espaço entre a válvula / sede ou esmagamento até redução significativa de seu tamanho. Pela forma e maior quantidade de depósitos presentes no lado direito da imagem, pode-se sugerir que o movimento de rotação da válvula ocorreu da esquerda para a direita, conforme mostrado na Figura 97.

Figura 97 - Depósito na superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 1 (motor MT-3), obtida por LE.

Nota-se na Figura 98, que os depósitos de coloração escura estão presentes acima da superfície de contato da válvula de admissão, criando um tribofilme, preservando os riscos circunferenciais de usinagem e desta forma auxiliando na resistência ao desgaste nestas regiões. Este é um dos motivos pelo qual o desgaste no par válvula e sede de admissão é normalmente menor do que no par de escape.

Figura 98 - Depósito sobre os riscos circunferenciais de usinagem na região 1 da válvula de admissão do cilindro 4 (motor MT-3)

A superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 4, do motor MT-3, apresentou a Região 1 com largura maior do que o observado nas válvulas dos demais cilindros. Nas Figura 99 a e b, é possível identificar uma grande quantidade de depósitos de coloração escura, presentes em toda a circunferência da válvula.

Figura 99 - Superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 4, do motor MT-3, obtida por LE (a) e MEV (b).

A fim de obter um melhor detalhamento do tipo de depósito existente na superfície de contato das válvulas de admissão, foi realizada uma análise EDS em três pontos distintos da superfície, localizados na Região 1 do cilindro 3, conforme indicado na Figura 100.

Figura 100 - Depósito na superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 3 do motor MT-3, obtidas por LE (a e b), MEV (c) e MEV-BSE (d).

Os elementos encontrados nos pontos X, Y e Z analisados estão indicados na Tabela 18, e comparados com a composição da válvula de admissão nova e seu recobrimento (EATONITE 6).

Tabela 18 - Comparação dos elementos existentes na válvula (condição nova) com os elementos medidos através da análise EDS.

Item/Elemento	Fe	C	Mn	Si	Cr	O	Cu	Zn	Mo	S	Ni	Ca
Válvula de admissão	X	X	X	X	X					X	X	
EATONITE 6		X	X	X	X				X		X	
X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X
Y	X	X			X	X	X	X	X	X		X
Z	X	X		X	X	X		X		X		X

Foram encontrados os elementos cálcio (Ca), zinco (Zn) e cobre (Cu), que fazem parte da composição dos óleos lubrificantes, somente nos pontos 1 e 2, indicando que o material depositado é proveniente da mistura de ar / combustível / vapor de óleo lubrificante aspirado pelo motor. O oxigênio encontrado indica possível oxidação na superfície.

As sedes de válvula de admissão apresentaram menor quantidade de depósitos quando comparadas com as válvulas de admissão. Depósitos de coloração escura foram observados na superfície de contato, sem um padrão de distribuição na superfície de contato, conforme mostrado na Figura 101 em imagens obtidas por LE.

Figura 101 - Depósitos na região 2 da superfície de contato das sedes de válvula de admissão, do motor MT-3, no cilindro 1 (a) e no cilindro 3 (b), obtidas por LE.

A superfície de contato da sede de válvula de admissão do cilindro 3 foi examinada no MEV, conforme mostrado na Figura 102. Inicialmente foi realizada uma análise utilizando o detector BSE e pela diferença de contraste da imagem verificou-se

a presença de distintos elementos na superfície. Em uma segunda etapa, foi realizada a análise utilizando MEV com detector EDS, em dois pontos denominados X e Y, conforme indicado no detalhe da Figura 102 b. O ponto X foi selecionado em uma região com a presença de depósitos e o ponto Y em uma região aparentemente sem depósitos. Os resultados da análise são mostrados na Figura 103 e comparados com a composição da sede de válvula de admissão nova, na Tabela 19.

Figura 102 - Depósitos na superfície de contato da sede de válvula de admissão do cilindro 3 obtidas por MEV (a) e MEV-detector BSE (b).

Tabela 19 - Comparação dos elementos existentes na sede de válvula de admissão, condição nova, com os elementos medidos na sede pós teste, através da análise EDS.

Item/Elemento	Fe	C	W	Mo	V	Cr	S	Cu	Si	Ca	Zn	P	O
Sede de Válvula de admissão	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
X	X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X
Y	X	X			X	X	X	X	X			X	X

Figura 103 - Resultados da análise EDS dos pontos #1 e #2.

No ponto X foram encontrados os elementos existentes na sede de válvula e, adicionalmente, cálcio (Ca), fósforo (P) e zinco (Zn), provenientes do óleo lubrificante. No ponto Y, além dos elementos existentes na sede, foi identificado somente o oxigênio (O), indicando a possível existência de oxidação na superfície ou ser proveniente também do óleo lubrificante.

Nas válvulas de escape do motor MT-3, diferentemente das válvulas de admissão, a distribuição de depósitos não ocorreu predominantemente em uma única região da superfície de contato. As três regiões apresentaram depósitos, variando o local de maior quantidade conforme a válvula analisada. Por exemplo, na válvula do cilindro 1, houve maior deposição de material nas regiões 1 e 2, enquanto que na válvula do cilindro 3 a maior incidência ocorreu na região 2.

Foi observado um padrão na distribuição dos depósitos na superfície de contato, formando um “anel” ao longo de praticamente toda a circunferência da válvula, conforme indicado na Figura 104. Esta forma de distribuição dos depósitos talvez tenha ocorrido devido ao movimento de rotação das válvulas.

Figura 104 - Depósitos na superfície de contato da válvula de escape do cilindro 1 (a), obtida por LE e do cilindro 2 (b), obtida por MEV, ambas do motor MT-3

Também foram encontradas partículas soltas e depósitos, de coloração similar aos depósitos encontrados na cabeça das válvulas de escape. Estes não apresentaram padrão de distribuição definido e são mostrados na Figura 105.

Figura 105 - Partículas soltas (seta amarela) e depósitos na superfície de contato das válvulas de escape do cilindro 1 (a), obtida por LE, e do cilindro 4 (b), obtida por MEV.

A diferença entre a coloração dos depósitos indicados pelas setas vermelhas nas Figura 104 e Figura 105 a, ambas obtidas por LE, pode estar associada a origem do depósito. É possível identificar a mesma coloração clara (Figura 105 a), nos depósitos existentes na cabeça das válvulas de escape, sugerindo que estes podem ser provenientes da queda de depósitos destacados da cabeça durante o impacto do

fechamento das válvulas, enquanto que os de coloração escura (Figura 104 a) podem ser provenientes por exemplo dos gases não queimados da combustão (combustão incompleta), aderindo a superfície no momento da passagem pelas válvulas.

As sedes de válvula de escape, do motor MT-3 apresentaram, em sua grande maioria, depósitos distribuídos na direção circunferencial, similar ao observado nas válvulas de escape, porém também foram observados depósitos com diferentes distribuições, conforme observado na Figura 106.

Figura 106 - Depósitos na superfície de contato da sede de válvula de escape do cilindro 3, obtida por LE e do cilindro 4 (b), obtida por MEV.

As válvulas de admissão do motor MT-4, que operou com gasolina tipo C (E27), apresentaram maior quantidade de depósitos na superfície de contato, comparadas com as válvulas de admissão do motor MT-3. Isto pode estar associado a menor quantidade de depósitos existentes na cabeça da válvula, ou seja, houve menor retenção de depósitos na cabeça das válvulas e, conseqüentemente, uma maior quantidade de depósitos passou pela superfície de contato.

A influência do combustível na menor retenção de depósitos na cabeça das válvulas pode ser explicada com base na variação da viscosidade do óleo lubrificante, quando contaminado com etanol e gasolina tipo C (afetando diretamente o vapor de óleo admitido no cilindro). Conforme dados levantados por KHUONG *et al.* a viscosidade do óleo lubrificante é afetada significativamente pela diluição de combustível no óleo, sendo reduzida em aproximadamente 30 % para gasolina E20 e reduzida em 25 % para gasolina E85 com relação ao óleo sem diluição (os estudos foram realizados com base em uma diluição de 6 % de combustível no óleo), indicando que quanto maior a quantidade de etanol anidro na gasolina, maior a viscosidade do óleo lubrificante.

Sabendo que os depósitos são provenientes da mistura admitida pelo motor, mediu-se a vazão de vapor de óleo (vazão de “blow-by”) na mesma condição em que o motor operou (potência máxima) durante as 125 h de ensaio, nos dois motores. Os valores obtidos foram de 12,5 L/min no motor MT-3 e 12,3 L/min no motor MT-4, evidenciando que a quantidade de vapor de óleo admitida pelos motores foi praticamente a mesma. Em contrapartida, as vazões de combustível dos motores, medidas ao longo das 125 h de ensaio, apresentaram uma diferença significativa, sendo 25,6 kg/h de EHC para o motor MT-3 e 17,5 kg/h de gasolina comum (E27) para o motor MT-4 (estes valores representam a média de 2.500 medições ao longo das 125 h de ensaio).

Apesar de uma maior “lavagem” da cabeça das válvulas promovida pela maior vazão de combustível do motor MT-3, pode-se concluir que o fator determinante na quantidade de depósitos na cabeça da válvula está relacionado ao tipo de combustível, sendo mais crítico quando utilizada gasolina tipo C, conforme observado na .Figura 76.

A Figura 107 mostra locais com grande quantidade de depósitos na superfície de contato das válvulas de admissão dos cilindros 3 e 4, obtidas por LE.

Figura 107 - Depósitos na superfície de contato das válvulas de admissão do motor MT-4, dos cilindros 3 (a) e 4 (b), obtidas por LE.

Através de uma análise da superfície de contato com presença de depósitos da válvula de admissão do cilindro 4, com auxílio do PO, foi possível obter uma aproximação da espessura da camada de depósitos existente na Região 1, conforme mostrado na Figura 108. Por se tratarem de depósitos provenientes do óleo lubrificante, conforme concluído anteriormente pelas análises EDS, esta camada pode ser denominada de tribofilme.

Figura 108 - Depósitos na Região 1 da superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 4, do motor MT-4, obtida por PO.

A espessura da camada de depósitos foi obtida através da análise de um perfil extraído da superfície de contato, conforme indicado na Figura 109, indicando aproximadamente 7 μm .

Figura 109 - Espessura da camada de depósito na região 1 da superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 4, do motor MT-4, obtida por PO.

As sedes de válvula de admissão do motor MT-4 apresentaram menor quantidade de depósitos, similar ao observado nas sedes de admissão do motor MT-3.

Nas válvulas de escape do motor MT-4 foi observada menor quantidade de depósitos (indicados pelas setas vermelhas) e, em sua grande maioria, com distribuição circunferencial, conforme indicado pelas linhas pontilhadas amarelas na Figura 110.

Figura 110 - Depósitos na superfície de contato da válvula de escape do cilindro 1, obtidas por LE (a) e MEV (b).

Foi realizada uma análise EDS da superfície de contato da válvula de escape do cilindro 3, do motor MT-4, indicada na Figura 111.

Figura 111 - Superfície de contato da válvula de escape do cilindro 3, obtida por MEV (a) e MEV-BSE (b).

Os elementos encontrados são mostrados na Figura 112.

Figura 112 – Resultados da análise EDS da superfície de contato da válvula de escape do cilindro 3 do motor MT-4.

Além dos elementos constituintes da válvula, foram encontrados também cobre (Cu), cálcio (Ca), fósforo (P) e zinco (Zn), concluindo que os depósitos existentes são provenientes do óleo lubrificante.

As sedes de válvula de escape do motor MT-4 apresentaram menor quantidade de depósitos comparadas com as sedes de válvula de admissão deste mesmo motor. Em sua grande maioria estes depósitos apresentaram maior concentração nas Regiões 1 e 2 da superfície de contato conforme mostrado na Figura 113.

Figura 113 - Depósitos nas Regiões 1 e 2 da superfície de contato da sede de escape do cilindro 4 (a) e cilindro 3 (b), ambas do motor MT-4, obtidas por LE.

A superfície de contato da sede de válvula do cilindro 3, do motor MT-4 (Figura 113), apresentou depósitos de forma circular na direção circunferencial, conforme observado anteriormente na válvula de admissão do cilindro 2 (Figura 97).

3.2.4.2. Riscos circunferenciais de usinagem

Riscos circunferenciais de usinagem foram observados em todas as válvulas de admissão dos dois motores (MT-3 e MT-4), com maior quantidade na Região 1, indicando que neste local o desgaste foi inferior, já que os riscos circunferenciais de usinagem são provenientes do processo de fabricação da válvula, como comentado no item 3.2.1. As sedes de válvula de admissão apresentaram riscos circunferenciais somente na Região 1. No caso das válvulas de escape dos dois motores, não foram observados riscos circunferenciais em nenhuma das superfícies de contato. As sedes de válvula do motor MT-3, que operou com EHC, não apresentou riscos circunferenciais, diferentemente do observado nas sedes do motor MT-4, que operou com gasolina, apresentando riscos circunferenciais nas Regiões 1 e 2, dependendo da sede analisada e, conseqüentemente, demonstrando menor desgaste nas sedes do motor MT-4 comparado com as do motor MT-3.

Na Figura 114, uma mesma área da superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 3, do motor MT-3, foi registrada por LE e PO. Nelas é possível identificar os riscos circunferenciais na superfície de contato.

Figura 114 - Riscos circunferenciais de usinagem na superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 3 obtida por LE (a) e PO (b).

Em diversos locais é possível identificar a presença de riscos circunferenciais sob os depósitos, como indicado na Figura 115 a, em uma imagem obtida por LE com ângulo de iluminação próximo de 20° com relação a superfície de contato, destacando os riscos de usinagem. Na Figura 115 b, obtida por MEV, é possível identificar com melhor detalhamento os riscos circunferenciais em uma região onde existe a presença de depósitos aderidos a superfície.

Figura 115 - Riscos circunferenciais sob depósitos na superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 4 (a), obtida por LE e no cilindro 2 (b), obtida por MEV.

As sedes de válvula de admissão do motor MT-3 apresentaram menor quantidade de riscos circunferenciais e também menos pronunciados, quando comparados com as válvulas. Isto está alinhado com a recomendação de projeto do par válvula e sede de válvula, em que ao longo de sua vida útil, o desgaste deve ser distribuído em aproximadamente 2/3 na sede e 1/3 na válvula, portanto, maior alteração em sua superfície original (ver item 1.1.3).

Não foram observados riscos circunferenciais na Região 2 das sedes de válvula de admissão, evidenciando que o contato entre válvula e sede ocorreu nesta região, a qual apresentou uma superfície lisa, com aspecto de polimento, conforme mostrado na Figura 116.

Figura 116 - Superfície de contato da sede de válvula de admissão do cilindro 3, obtida por MEV.

Na Figura 117 é possível observar riscos circunferenciais de usinagem na Região 1 das sedes de válvula dos cilindros 2 (a) e 4 (b). Apesar da existência de

grande quantidade de depósitos na Região 1 da sede de válvula do cilindro 4 (Figura 117 b), é possível identificar os riscos sob os depósitos.

Figura 117 - Riscos circunferenciais de usinagem na região 1 das sedes de válvula dos cilindros 2 (a) e 4 (b), do motor MT-3.

Não foram observados riscos circunferenciais de usinagem na superfície de contato das válvulas e sedes de válvula de escape do motor MT-3, indicando maior desgaste neste par comparado com o par de admissão.

Nas válvulas de admissão do motor MT-4, foram observados riscos circunferenciais de usinagem, porém em sua grande maioria, sob depósitos e, predominantemente na Região 1, conforme ocorrido nas válvulas de admissão do motor MT-3. Este riscos podem ser observados na Figura 118, obtida por MEV.

Figura 118 - Riscos circunferenciais de usinagem na válvula de admissão dos cilindros 1 (a) e 4 (b) do motor MT-4, obtidos por MEV.

As sedes de válvula de admissão do motor MT-4 apresentaram características na sua superfície de contato similares as sedes de válvula do motor MT-3, com a presença de riscos circunferenciais de usinagem somente na Região 1, conforme mostrado na Figura 119.

Figura 119 - Riscos circunferenciais na superfície de contato da sede de válvula de admissão do cilindro 1, do motor MT-4 obtida por PO.

Não foram observados riscos circunferenciais na superfície de contato das quatro válvulas de escape nem das sedes dos cilindros 1 e 2, do motor MT-4. Em contrapartida, as superfícies de contato das sedes de válvula de escape dos cilindros 3 e 4, apresentaram poucos riscos circunferenciais nas Regiões 1 e 2. Por serem observados riscos menos pronunciados, sua identificação foi possível somente nos exames realizados com PO, conforme indicado na Figura 120.

Figura 120 - Riscos circunferenciais de usinagem nas regiões 1 e 2 da superfície de contato da sede de válvula de escape do cilindro 3, do motor MT-4.

3.2.4.3. Superfície polida (lisa)

Foi definida como uma região sem a presença de riscos circunferenciais de usinagem nem sulcos ou valas.

Superfície lisa foi observada na Região 2 das válvulas e sedes de válvula de admissão dos dois motores MT-3 e MT-4.

No caso das válvulas e sedes de válvula de escape do motor MT-3 e, as válvulas de escape do motor MT-4, as três regiões da superfície de contato apresentaram superfícies lisas enquanto que as sedes de válvula de escape do motor MT-4, apresentaram superfície lisa nas Regiões 2 e 3.

Esta é uma característica comum de superfícies com maior desgaste, e conhecendo-se que na superfície de contato nova existiam riscos circunferenciais, é possível afirmar que nesta região houve maior desgaste.

A Figura 121 mostra um comparativo entre a superfície de contato das quatro válvulas de admissão do motor MT-3, indicando uma superfície predominantemente lisa na Região 2. A válvula de admissão do cilindro 1 apresentou menor área com superfície lisa, consequentemente menor desgaste com relação as outras.

Figura 121 - Comparação da região 2 da superfície de contato das válvulas de admissão do motor MT-3, obtidas por PO.

Calculando o parâmetro de rugosidade média (S_a) da Região 2, foram obtidos valores em uma faixa aproximada de 0,10 a 0,20 μm , praticamente metade dos valores encontrados na Região 1, cujos valores resultaram em uma faixa aproximada de 0,30 a 0,50 μm .

Na Figura 122, é possível observar o diferente aspecto da Região 2 em relação a Região 1 da superfície de contato das válvulas de admissão do cilindro 4 (a e b), onde é observada uma superfície lisa.

Figura 122 - Superfície lisa na região 2 das válvulas de admissão do motor MT-3, do cilindro 4, obtida por LE (a), obtida por PO (b) e cilindro 2 obtida por MEV (c).

As sedes de válvula de admissão do motor MT-3 apresentaram característica similar ao observado nas válvulas, conforme mostrado na Figura 123.

Figura 123 - Superfície lisa na região 2 das sedes de válvula de admissão do motor MT-3 dos cilindros 1 (a) e 2 (b), obtidas por PO.

As válvulas e sedes de válvula de escape do motor MT-3 apresentaram as três regiões da superfície de contato com aspecto liso, indicando desgaste nestas três regiões, diferentemente do observado nos pares de admissão, conforme mostrados nas Figura 124 e Figura 125.

Figura 124 - Superfície lisa nas regiões 1, 2 e 3 da válvula de escape do cilindro 1 do motor MT-3.

Figura 125 - Superfície lisa nas Regiões 1, 2 e 3 das sedes de válvula de escape do motor MT-3, nos cilindros 1 (a) e 2 (b).

As válvulas de escape do motor MT-4 apresentaram aspecto similar ao observado nas válvulas de escape do motor MT-3. As sedes de válvula de escape dos cilindros 1 e 2 apresentaram superfície lisa nas três regiões, porém as sedes dos cilindros 3 e 4 apresentaram superfície lisa somente nas Regiões 2 e 3, já que foram encontrados riscos circunferenciais na Região 1, conforme descrito no item 3.2.4.2.

Na Figura 126 são mostradas as superfícies de contato da válvula de escape do cilindro 3 e sede de válvula de escape do cilindro 4, ambas do motor MT-4.

Figura 126 - Superfície lisa da válvula do cilindro 3 (a) e sede de válvula do cilindro 4 (b), ambas de escape, do motor MT-4.

As válvulas e sedes de válvula de admissão do motor MT-4 apresentaram superfície lisa somente na Região 2, conforme observado na Figura 127 e Figura 128.

Figura 127 - Superfície lisa em diferentes locais da região 2, da válvula de admissão do cilindro 1, motor MT-4, obtidas por LE (a) e PO (b).

Figura 128 - Superfície lisa na região 2, da sede de válvula de admissão do cilindro 3 (a) e do cilindro 2 (b), ambas do motor MT-4, obtidas por LE e PO.

3.2.4.4. Endentação

Endentações foram observadas nas válvulas de admissão e escape dos motores MT-3 e MT-4.

Uma endentação na Região 2 da superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 4, do motor MT-3, foi registrada por LE, MEV e PO, como mostra a Figura 129, permitindo visualizar todos os detalhes de sua forma e magnitude, como por exemplo, a crista formada na periferia da endentação. Com base nas informações obtidas da análise com auxílio do PO, a profundidade da endentação é de aproximadamente 15 μm .

Figura 129 - Endentação na região 2 da superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 4, obtida por LE (a e b), PO (c) e MEV (d), do motor MT-3.

As imagens acima sugerem que a endentação ocorreu em um evento único, ou seja, a partícula foi esmagada no instante do fechamento da válvula e seus resíduos dispersaram nos demais ciclos de abertura e fechamento da válvula.

No caso da endentação da Figura 130, talvez uma mesma partícula tenha sido a causa da sequência de endentação observada, seguindo o mesmo conceito abordado na formação de depósitos, citado anteriormente.

Figura 130 - Endentação na região 2 da superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 2, do motor MT-3.

Endentações foram observadas na superfície de contato das sedes de válvula de admissão, principalmente na Região 2, conforme mostrado na Figura 131.

Figura 131 – Endentações na superfície de contato da sede de válvula de admissão do cilindro 1, obtidas por PO.

Observou-se locais da superfície de contato das sedes de válvula de admissão com possível porosidade (devido à sinterização), conforme indicado na Figura 132.

Figura 132 – Porosidade da superfície de contato da sede de válvula de admissão do cilindro 3.

Foi encontrada uma quantidade maior de endentações na superfície de contato das válvulas de escape do motor MT-3 quando comparadas com as válvulas de admissão, e com maior incidência nas Regiões 1 e 2.

A Figura 133 mostra uma endentação na Região 1 da superfície de contato da válvula de escape do cilindro 1. No centro da endentação é possível observar depósito de coloração clara, similar ao depósito observado na cabeça da válvula, sugerindo que eles são, provavelmente, provenientes do depósito claro que causou a endentação.

Figura 133 - Endentação na Região 1 da superfície de contato da válvula de escape do cilindro 1, obtida por LE com ângulo de iluminação próximo de 10° com relação a superfície.

Na Figura 134 está identificada uma sequência de endentações, provavelmente causadas pela mesma partícula, já que, através da análise MEV com o detector BSE (Figura 134 b), é possível confirmar que as endentações possuem marcação com o mesmo tipo de material (mesmo contraste verificado na imagem).

Figura 134 - Endentações na região 2 da superfície de contato da válvula de escape do cilindro 4 obtidas por LE (a), MEV-BSE (b) e MEV (c).

Na Região 2 da superfície de contato da válvula de escape do cilindro 2 observou-se endentação, seguindo um padrão sequencial, com presença de depósito no centro de uma das endentações, conforme indicado na Figura 135.

Figura 135 - Endentação na Região 2 da superfície de contato da válvula de escape do cilindro 2, obtidas por PO (a) e LE (b).

Não foram encontradas endentações na superfície de contato das válvulas nem das sedes de válvula de admissão do motor MT-4. Já nas válvulas de escape observou-se endentações localizadas nas três regiões da superfície de contato.

Na Figura 136 observa-se uma endentação localizada na Região 2 da superfície de contato, próxima de depósitos na superfície, talvez, os quais tenham sido responsáveis pela endentação durante o funcionamento do motor.

Figura 136 - Endentação na Região 2 da superfície de contato da válvula de escape do cilindro 2, motor MT-4, obtida por LE com ângulos de iluminação de 90 ° (a) e próximo de 20 ° (b).

Não foram identificadas endentações na superfície de contato das sedes de válvula de escape do motor MT-4.

3.2.4.5. Sulcos e valas

Sulcos e valas foram observados na superfície de contato das válvulas de admissão do motor MT-3, conforme indicado na Figura 137.

Figura 137 - Sulco na superfície de contato das válvulas do cilindro 1 (a), 2 (b) e 3 (c), obtidas por PO e valas na superfície de contato da válvula do cilindro 3 obtida por LE.

Valas foram observadas na Região 1 da superfície de contato da sede de admissão do cilindro 2, conforme ilustrado na Figura 138. Elas não foram observadas em todo o comprimento da superfície de contato destas sedes nem nas sedes de todos os cilindros.

Figura 138 - Valas na região 1 das sedes de válvula de admissão dos cilindros 1 (a) e 2 (b), do motor MT-3.

Foi observado somente um sulco nas válvulas de escape do motor MT-3, localizado na Região 2 da superfície de contato da válvula do cilindro 1, conforme indicado na Figura 139.

Figura 139 - Sulco na superfície de contato da válvula de escape do cilindro 1 (a), e sulcos (seta vermelha) e vala (seta preta) na válvula de escape do cilindro 4, ambas do motor MT-3, obtidos por PO.

As válvulas de admissão do motor MT-4 não apresentaram sulcos ou valas em sua superfície de contato.

As sedes de válvula de admissão do motor MT-4 apresentaram valas na Região 1, similar ao observado nas sedes de válvula de admissão do motor MT-3. A Figura 140 mostra valas encontradas na sede de válvula do cilindro 4.

Figura 140 - Valas na Região 1 da superfície de contato da sede de válvula de admissão do cilindro 4, motor MT-4, obtidas por LE.

As válvulas de escape do motor MT-4 não apresentaram este tipo de dano.

Valas foram observadas nas Regiões 1 e 2 da superfície de contato da sede de válvula de escape, do motor MT-4, conforme mostrado na Figura 141.

Figura 141 - Valas nas Regiões 1 e 2 da superfície de contato da sede de válvula de escape do cilindro 3, motor MT-4.

3.2.4.6. Riscos inclinados e radiais

Foram observados riscos radiais e inclinados na Região 1 da superfície de contato das válvulas de admissão do motor MT-3 (Figura 142), talvez devido à proximidade da grande quantidade de depósitos existente na cabeça da válvula, que ao se desprenderem tem maior a probabilidade de serem esmagados nesta região no momento do fechamento da válvula e se deslocarem durante a flexão da cabeça da válvula, no instante de pico de pressão dentro da câmara.

Figura 142 - Risco radial na Região 1 da superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 1 (a) e na Região 1 da superfície de contato do cilindro 4 (b), obtidas por LE.

Não foram observados riscos nas sedes de válvula de admissão e escape assim como nas válvulas de escape do motor MT-3.

As válvulas de admissão do motor MT-4 apresentaram maior quantidade de riscos inclinados e radiais, comparados as válvulas de admissão do motor MT-3. Na Figura 143, é mostrado um risco inclinado localizado na Região 1 da superfície de contato da válvula do cilindro 4.

Figura 143 - Riscos inclinados na superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 4, do motor MT-4, obtida por LE.

Na Região 1 da superfície de contato da válvula de admissão dos cilindros 1 e 2, do motor MT-4, observou-se risco radial, conforme mostrado na Figura 144.

Figura 144 - Riscos radiais observados na Região 1 da superfície de contato da válvula de admissão do cilindro 1 (a) e Região 2 do cilindro 2 (b).

Não foram observados riscos na superfície de contato das sedes de válvula de admissão e escape nem válvulas de escape do motor MT-4.

3.2.4.7. Oxidação e Corrosão

Corrosão foi observada nas sedes de válvula dos 4 cilindros dos motores MT-3 e MT-4, conforme indicado na Figura 145, apresentando coloração marrom alaranjada quando analisada na LE.

Figura 145 - Corrosão na Região 2 da superfície de contato da sede de válvula de admissão do cilindro 1 (a) e na Região 1 do cilindro 2 (b).

As válvulas de escape de ambos motores também apresentaram corrosão em alguns locais da superfície de contato, devido as suas condições de operação, com temperaturas elevadas e fluxo dos gases provenientes da combustão, favorecendo sua formação.

Figura 146 - Oxidação na superfície de contato da válvula de escape do cilindro 1, Região 2 (a) e cilindro 4, Região 1 (b).

Oxidação foi observada nas sedes de válvula de escape do motor MT-4, conforme indicado na Figura 147, onde foi identificada oxidação através da alteração do ângulo de iluminação sobre a Região 1 da superfície de contato.

Figura 147 - Oxidação observada na Região 1 da superfície de contato da sede de escape do cilindro 3, motor MT-4, obtidas por LE.

3.2.4.8. Degrau

Degrau foi observado somente nas válvulas de escape de ambos motores MT-3 e MT-4, localizado na Região 3, conforme mostrado na Figura 148.

Figura 148 - Degrau na Região 3 da válvula de escape do cilindro 1, motor MT-4, obtida por PO.

Este degrau indica o limite da superfície de contato entre a válvula e sede de válvula e representa a recessão das válvulas, conforme ilustrado na Figura 149. O valor de recessão obtido por PO difere do valor medido com calibre de lâminas, ao longo do ensaio de durabilidade, pois no caso da medição com calibre de lâminas, além da recessão da válvula, também estão inclusos o desgaste do tucho e came devido a forma de medição (ver Figura 16).

Figura 149 - Recessão medida por PO, da válvula de escape do cilindro 1 do motor MT-4.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos exames realizados nos motores MT-1 e MT-2 estabeleceu-se a metodologia de análise e, conseqüentemente, melhor preparação para os exames nos motores MT-3 e MT-4.

O exame das válvulas e sedes de válvula dos motores MT-3 e MT-4 revelou danos na superfície de contato, evidenciou o efeito do combustível no desgaste do par, visto que, foi a única variável alterada entre os dois ensaios.

Embora os motores MT-1, MT-2 e MT-3 / MT-4 tenham operado em distintas condições de funcionamento (temperatura, rotação e torque), combustível e tempo de teste, verificou-se que a maioria dos tipos de danos foram encontrados nas superfícies de contato de todas as válvulas e sedes de válvulas, evidenciando que estes independem da especificação do motor, sua potência e materiais utilizados nas válvulas e sedes.

Assim, depósitos provenientes da mistura ar / combustível / vapor de óleo foram observados em todas as válvulas e sedes, variando apenas a intensidade encontrada ou o tipo de depósito (partículas soltas ou depósitos aderidos à superfície).

Por outro lado, verificou-se que a utilização de EHC ou da gasolina comum tipo C apresenta grande influência na formação destes depósitos, já que a quantidade foi significativamente maior nas válvulas de admissão do motor que operou com gasolina (MT-4) quando comparadas com as válvulas de admissão do motor MT-3, conforme discutido no item 3.2.4.1.

Com exceção de sulcos e valas, as válvulas e sedes de válvula dos motores MT-3 e MT-4 apresentaram os mesmos danos, indicando que para estes motores, o combustível tem maior influência na quantidade de danos encontrados e menor influência nos tipos de danos.

Oxidação e corrosão foram observadas em todas as válvulas e sedes de válvula de escape, devido principalmente a alta temperatura de trabalho durante o funcionamento.

Somente as válvulas de admissão dos motores MT-3 e MT-4 apresentaram riscos radiais e inclinados, talvez pela maior quantidade de depósitos observados na admissão destes motores assim como o ângulo da face de contato de 30 °, ante 45 ° das válvulas dos motores MT-1 e MT-2 que tendem a reter menor quantidade de depósitos (ver item 1.1.2).

Degraus foram observados somente nas válvulas de escape dos motores MT-3 e MT-4, provavelmente devido à forma de assentamento da válvula na sede, como consequência do projeto do motor.

O desgaste se mostrou maior na região 2 das válvulas e sedes de admissão e regiões 2 e 3 das válvulas e sedes de escape, devido a menor quantidade ou até ausência de riscos circunferenciais de usinagem assim como a presença de mais danos como superfície lisa, sulcos, endentações, entre outros.

O mesmo foi observado por ZHAO e colaboradores, que realizaram ensaios de válvulas e sedes de MCI ciclo Diesel, em bancada, testando diferentes tipos de materiais em mesmas condições de ensaio. Em seu trabalho foram constatados diferentes modos de desgaste entre o diâmetro maior e menor da válvula, concluindo que o desgaste mais severo ocorre no diâmetro maior.

Neste trabalho, o diâmetro maior foi descrito como região 2 para as válvulas e sedes de válvula de admissão e região 3 para as válvulas e sedes de válvula de escape.

Os tipos de danos encontrados nas superfícies de contato das válvulas e sedes de válvula dos motores estão consolidados na Tabela 20.

Tabela 20 - Danos encontrados nas válvulas e sedes de válvulas dos motores MT-1, MT-2, MT-3 e MT-4.

Danos	Motor MT-1 (EHC)				Motor MT-2 (EHC)				Motor MT-3 (EHC)				Motor MT-4 (Gasolina Tipo C)			
	Admissão		Escape		Admissão		Escape		Admissão		Escape		Admissão		Escape	
	Válvula	Sede	Válvula	Sede	Válvula	Sede	Válvula	Sede	Válvula	Sede	Válvula	Sede	Válvula	Sede	Válvula	Sede
Degrau											X				X	
Desgaste na região central			X	X		X										
Depósito	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Faixa clara central			X		X											
Endentação / Esmagamento		X		X		X			X	X	X		X		X	
Oxidação / Corrosão	X	X	X	X			X	X		X	X	X		X	X	X
Superfície polida (lisa)	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Risco Circunferencial (usinagem)	X	X	X	X	X	X			X	X			X	X		X
Riscos Radiais									X				X			
Riscos inclinados									X				X			
Sulco e/ ou Vala Circunferencial			X		X		X		X	X	X			X		X
Sulco e/ ou Vala						X			X		X					

4 CONCLUSÕES

As conclusões das análises da superfície de contato das válvulas e sedes de válvula dos quatro motores de combustão interna, pós teste, foram divididas em dois grupos, mostrados a seguir.

4.1 CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados a seguir foram comuns aos quatro motores, independente do combustível utilizado, ciclo de ensaio e tipo de motor.

1. A maioria dos danos foram encontrados em todas as válvulas e sedes, indicando que os tipos de danos são independentes do projeto do motor e do material das válvulas e sedes dos motores;
2. Independente do motor e suas condições de operação, depósitos provenientes da mistura ar / combustível / vapor de óleo foram observados em todas as válvulas e sedes, apresentando variação na quantidade encontrada ou tipo (partículas soltas ou depósitos aderidos à superfície);
3. As condições de operação influenciaram principalmente na quantidade dos danos e não nos tipos;
4. Riscos circunferenciais de usinagem foram preservados na Região 1 de todas as válvulas e sedes de válvula de admissão;
5. As válvulas e sedes de válvula de admissão de todos os motores apresentaram maior desgaste na região 2, apresentando uma superfície predominantemente lisa;
6. As válvulas e sedes de válvulas de escape de todos os motores apresentaram maior desgaste na região 3. Dependendo do motor houve desgaste também na região 1 ou 2;
7. Analisando as válvulas e sedes de válvula de escape, observou-se riscos circunferenciais somente nas do motor MT-1 e nas sedes dos cilindros 3 e 4, do motor MT-4;

4.2 CONCLUSÕES DOS MOTORES MT-3 E MT-4

1. Com exceção dos sulcos e valas, os motores MT-3 (EHC) e MT-4 (gasolina tipo C) apresentaram os mesmos tipos de danos;
2. A diferença na quantidade e tipos de danos nos motores MT-3 e MT-4 pode ser atribuída ao combustível utilizado já que estes são da mesma montadora, possuem mesmas especificações e foram submetidos às mesmas condições de ensaio;
3. A utilização de EHC ou gasolina tipo C têm grande influência na formação de depósitos na superfície de contato, apresentando maior quantidade quando utilizada de gasolina;
4. Nos locais onde se observou maior quantidade de depósitos aderidos à superfície, foi também identificada a maior quantidade de riscos circunferenciais de usinagem, ou seja, menor desgaste. Isto ocorre devido ao auxílio na lubrificação do contato pela presença de um tribofilme, reduzindo o contato metal-metal;
5. A recessão de válvulas medida nos MT-3 e MT-4 foi a mesma;
6. A recessão das válvulas de escape foi maior que a das válvulas de admissão nos motores MT-3 e MT-4;
7. A maior quantidade de endentações nas válvulas de escape do motor MT-4 pode estar associada a maior quantidade de depósitos;
8. Oxidação e corrosão foram danos encontrados principalmente nas sedes de válvula de escape dos motores MT-3 e MT-4;
9. Degraus foram encontrados somente nas válvulas de escape dos motores MT-3 e MT-4.

5 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

São sugeridos os seguintes trabalhos para complemento dos resultados obtidos:

- Análise dos tipos de óxidos presentes nas superfícies das válvulas e sedes de válvulas examinadas;
- Análise da microestrutura das válvulas e sedes de forma a procurar por evidências de possíveis micro trincas na superfície e deformação plástica do material;
- Determinar a dureza e micro dureza da superfície;
- Realizar análise físico-química do óleo lubrificante utilizado nos ensaios (foram retiradas amostras para posterior análise) para conhecimento de sua composição;
- Correlacionar os resultados deste trabalho com os de ensaios de desgaste no par válvula e sede realizados em bancada de cabeçote sem a combustão.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- AGUDELO, J.; DELGADO, ; BENJUMEA, P. The lubricity of ethanol-gasoline fuel blend. **Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia**, 9 Março 2011. 8.
- ANINA DEDAVID, B.; ISSE GOMES, C.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura - Aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- ARAUJO, L. D.; DE PAULA JR, G. A. Investigations of Valve Recession Mechanism in Flex Fuel Engines. **SAE International**, São Paulo, 4 Outubro 2011. 11.
- CAVALIERI, F. J.; ZENKLUSEN, F.; CARDONA, A. Determination of wear in internal combustion engine valves using the finite element method and experimental tests. **Mechanism and Machine Theory**, Santa Fe, 23 maio 2016. 19.
- CHE SIDIK, N. A.; NOOR AFIQ WITRI MOHD YAZID, M.; MAMAT, R. Recent advancement of nanofluids in engine cooling system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Johor, 2017. 8.
- DURANGO, A. Z. et al. ANÁLISE DE DANOS MORFOLOGICOS OBSERVADOS EM VÁLVULAS E SEDES APÓS DIFERENTES ENSAIOS DE MOTOR. **COBEF**, Salvador, 18 maio 2015. 10.
- DURANGO, A. Z. et al. ANALYSIS OF VALVE AND VALVE SEAT INSERT DAMAGE MORPHOLOGY OBSERVED AFTER DIFFERENT ENGINE TEST. **Ibertrib 2015. VIII Iberian Conference on Tribology**, Cartagena, 2015. 8.
- DURANGO, D. A. Z. **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**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 247. 2016.
- FOSBERG, P. **Combustion Valve Wear-A Tribological Study of Combustion Valve Sealing Interfaces**. ACTA UNIVERSITATIS UPSALIENSIS UPPSALA. Uppsala, p. 58. 2013. (ISSN 1651-6214 ISBN 978-91-554-8715-7 urn:nbn:se:uu:diva-204636).
- FOSBERG, P.; DEBORD, D.; JACOBSON, S. Quantification of combustion valve sealing interface sliding- A novel experimental technique and simulations. **Tribology International**, Uppsala, 2014. 150-155.
- GAHR, K.-H. Z. **Microstructure and Wear of Materials**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1987.
- HALLIDAY, D. **Fundamentos da Física**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 4, 2009.
- HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1988.
- HUTCHESON, R. C. Valve Seat Recession – An Independent Review of Existing Data. **SAE International**, Paris, 19-22 June 2000. 11.
- HUTCHINGS, I. M. **Tribology Friction and Wear of Engineering Materials**. Burlington: Butterworth-Heinemann, 1992.
- KAWATA, H.; MAKI, K. Recent Trends in Heat Resistant/Wear Resistant Sintered Alloys. **Hitachi Powdered Metals Technical Report**, Chiba 270-2295, 2007. 9.
- KHUONG, L. S. et al. Effect of gasoline–bioethanol blends on the properties and lubrication characteristics of commercial engine oil. **The Royal Society of Chemistry 2017**, 7 March 2017. 15.

LEWIS, R.; DWYER-JOYCE, R. S. **Automotive Engine Valve Recession**. [S.l.]: Duncan Dowson, 2002.

LEWIS, R.; DWYER-JOYCE, R. S. Combating Automotive Engine Valve Recession: a case study. **Tribology and Lubrication Technology**, Sheffield, 2003. 59 (10). pp. 48-51.

LIANG, X. et al. A Study of Valve Seat Insert Wear Mechanisms. **SAE International**, Toronto, 25 out. 1999. 14.

MAHLE GMBH. **Valve train System and components**. 1. ed. Stuttgart: Springer Vieweg, 2013.

MATSUMOTO, K.; SASAKI, A. Abrasion Resistant Improvement of the Valve Seat for Automobile Engines by the Oxidation and the Turn. **Society of Tribologists and Lubrication Engineers (STLE)**, Las Vegas, 15 maio 2016. 6.

MENDES DE FARIAS, A. C. et al. Lubricidade do combustível Diesel e dos biocombustíveis de soja B20 e B100. **VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA - CONEM**, Campina Grande, 18 Agosto 2010. 10.

PULKRABEK, W. W. **Engineering Fundamentals of Internal Combustion Engine**. New Jersey: Prentice Hall, 1997.

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.

SAE INTERNATIONAL. **Internal Combustion Engine Handbook**. Warrendale: SAE International, 2004.

TANAKA, D. K. Caracterização Tribológica de Válvulas e Sedes. **Desafios Tribológicos em Motores Flex Fuel**, São Paulo, 2013. 24.

THIODORO, L. A. et al. Flex-fuel engine intake and exhaust valves and valve seats wear characterization after dynamometer test bench. **IBERTRIB - Iberian Conference on Tribology**, Guimarães, 13 Junho 2017. 11.

VALVE SEAT RECESSION WORKING GROUP. **Eliminating Lead From Gasoline: Report on Valve Seat Recession**. Partnership for Clean Fuels and Vehicles, United Nations Energy Programme. [S.l.], p. 29. 2004.

WANG, Y. **Introduction to Engine Valvetrains**. Warrendale, PA: Green Press, 2007.

YAMAGATA, H. **The Science and Technology of Materials in Automotive Engines**. 1. ed. [S.l.]: Woodhead Publishing Limited , 2005.

ZHAO, R. et al. Wear Mechanisms Analysis of Engine Exhaust Valve Seats with a Laboratory Simulator. **Tribology Transactions**, London, 17 May 2013. 10.