DINECIO DOS SANTOS FILHO

ALTERAÇÕES METALÚRGICAS E TOPOGRÁFICAS DO CILINDRO DE
BLOCO DE MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA *FLEX-FUEL*

São Paulo

2013

DINECIO DOS SANTOS FILHO

ALTERAÇÕES METALÚRGICAS E TOPOGRÁFICAS DO CILINDRO DE
BLOCO DE MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA *FLEX-FUEL*

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

Área de Concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Hélio Goldenstein

São Paulo
2013

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, 23 de janeiro de 2014.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos Filho, Dinecio dos

Alterações metalúrgicas e topográficas do cilindro de bloco de motor de combustão interna flex-fuel / D. dos Santos Filho. – versão corr. -- São Paulo, 2014.

140 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

**1.Motores de combustão interna 2.Elementos de máquinas
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.**

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho ao meu
grande amigo, meu mestre,
meu espelho, meu herói.*

Meu querido e amado pai,

DINECIO DOS SANTOS.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, aos meus pais, meus avós, minha família e meus antepassados.

Ao professor Doutor Hélio Goldenstein pela preciosa orientação, amizade, confiança e apoio em todos os momentos.

Aos professores Doutor Amilton Sinatora e Doutor Jan Vatauvuk, pelas importantes e essenciais contribuições.

Aos amigos do laboratório de transformação de fases do departamento de engenharia metalúrgica da escola politécnica da USP.

Aos amigos integrantes do grupo de engenharia de desenvolvimento de motores e do laboratório metalúrgico da General Motors.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, que é o resultado do esforço de incontáveis e importantes pessoas.

RESUMO

O presente estudo descreve as alterações metalúrgicas e topográficas do cilindro de blocos de motor de combustão interna fabricados em ferro fundido cinzento, após a realização de testes de durabilidade em dinamômetro. O motor testado tem tecnologia “*Flex-Fuel*”, e pode ser operado com qualquer proporção de mistura gasolina comum/etanol. Um motor foi testado com combustível etanol e o outro com gasolina comum, buscando-se assim representar duas condições extremas de trabalho em termos de combustível. A pesquisa constituiu-se da revisão bibliográfica e da parte prática que envolveu: a realização de testes de durabilidade de motor em dinamômetro; a caracterização metalúrgica e topográfica do cilindro após teste com ambos os combustíveis, utilizando técnicas de microscopia eletrônica de varredura, metalografia por microscopia óptica, perfilometria e quantificação de parâmetros de rugosidade, entre outros; a análise crítica, discussão dos resultados e apresentação da conclusão.

Palavras chave: Motor de combustão interna. Bloco de motor. Cilindro. *Flex-Fuel*. Desgaste. Tribologia. Ferro fundido. Anéis de pistão.

ABSTRACT

The present study approaches the metallurgical and topographical alterations on the cylinder of an internal combustion engine block made of gray cast iron, after durability dynamometer tests. The tested engine has flexible fuel technology (*Flex-Fuel*), and is capable to work with both gasoline/ethanol fuels, in any mixture proportion. One engine has been tested with ethanol and another one tested with gasoline, and so representing two extreme conditions on which the engine may work in terms of fuel. The research has been developed basically through the conceptual approach by the bibliographic review and the experimental steps that involved: general engine durability test at dynamometer bench; metallurgical and topographic characterization analysis at laboratory, after the test with both fuels, applying Scanning Electronic Microscopy SEM, optical microscopy metallography, profilometer and roughness parameters quantification, and so forth; critical analysis on the results, discussion and final conclusion.

Key words: Internal combustion engine. Engine cylinder block. Cylinder. *Flexible-Fuel*. Wear. Tribology. Cast iron. Piston rings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Chevrolet Six, fabricado em 1911 e (b) Chevrolet Camaro, fabricado em 2011. Ambos utilizam motor de combustão interna ciclo Otto. [2].....	19
Figura 2 – Ciclo de trabalho de um motor Otto. Adaptado de [12]	27
Figura 3 – Alguns componentes do motor de combustão interna. A) Vista em corte; B) Vista explodida.	29
Figura 4 - Desmembramento de consumo de energia em um veículo de passeio. Adaptado de [15]	31
Figura 5 – Perdas por atrito em um motor de combustão interna ciclo Otto, 2.0L, condição de marcha lenta e trânsito urbano. Segundo Taylor, 2002. [17]	32
Figura 6 – Representação esquemática do sistema <i>Flex-Fuel</i> . [18].....	35
Figura 7 – Conjunto bloco em alumínio (A) e bloco em ferro fundido (B).....	39
Figura 8 – Velocidades presentes no brunimento e formação do ângulo de cruzamento. [23].....	41
Figura 9 - Em ampliação um exemplo típico de brunimento como novo. Pequena parcela de material dobrado é admissível. [24]	42
Figura 10 – Curva de Abbott e os parâmetros Rpk, Rk e Rvk, segundo ISO 13565-2. [26]	43
Figura 11 – A condutividade térmica é significativamente maior no ferro fundido cinzento em relação ao nodular e ao aço. [31], [32], [33].....	45
Figura 12 – Secção próxima ao ponto eutético, no diagrama de equilíbrio do sistema Fe-C. [35]	46
Figura 13 – Influência de elementos químicos nas temperaturas de equilíbrio dos eutéticos. [39], [40]	46
Figura 14 – Classificação da grafita em termos de a) forma e b) distribuição, segundo ISO 945-1. [43]	49
Figura 15 – Regime de operação de componentes do motor de combustão interna. [51]	54
Figura 16 – Relação entre área real de contato e carga aplicada. Linha cheia, área nominal = 10 cm ² e linha tracejada, área nominal = 1 cm ² [55].....	57
Figura 17 – Trincas de fadiga de contato com crescimento em direção à superfície. [47]	59

Figura 18 – Superfície que sofreu dano por fadiga de contato, com provável associação com aspectos microestruturais: carbonetos, flocos de grafita ou inclusões. [58]	60
Figura 19 - Mecanismos presentes na operação do anel de pistão no cilindro. Adaptado de [51]	61
Figura 20 – Pressão dos gases na região dos anéis em função do ângulo do virabrequim (zero grau equivale ao pistão em PMS). Adaptado de [51].....	62
Figura 21 – Espessura do filme de lubrificante entre o primeiro anel e a parede do cilindro, em função do curso do pistão. [59], [51]	63
Figura 22 - Espessura do filme de lubrificante entre o anel de compressão e a parede do cilindro, em função do curso do pistão. Motor 2.0L ciclo Otto, mostrando também influência do raio do cilindro. [17]	63
Figura 23 – Exemplo de célula de dinamômetro de motor. [61]	65
Figura 24 – Exemplo de montagem de molde horizontal. [62]	67
Figura 25 - Forças atuantes no pistão, na direção normal ao pino. (TS = lado Thrust, ATS = lado Anti-Thrust). [63].....	70
Figura 26 - Ilustra a região de retirada da amostra do cilindro.	71
Figura 27 – Exemplo de perfil primário, região do Ponto Morto Superior, após teste de durabilidade em motor diesel. Adaptado de [64], [65].	72
Figura 28 – Aspecto visual do cilindro como observado a olho nu. a) Estado inicial. b) Após teste de durabilidade com gasolina. c) Após teste de durabilidade com etanol.	75
Figura 29 – Aspecto visual do conjunto pistão-anéis como observado a olho nu. a) Estado inicial. b) Após teste de durabilidade com gasolina. c) Após teste de durabilidade com etanol.	76
Figura 30 - Perfil Primário, região do PMS. Combustível gasolina.....	78
Figura 31 – Perfil primário, região do PMS. Combustível Etanol.....	79
Figura 32 - Perfil primário, região do PMI, GASOLINA.....	81
Figura 33 - Perfil primário, região do PMI, ETANOL.	82
Figura 34 – Imagem reconstruída dos cilindros, após teste de durabilidade com combustível gasolina comum e etanol hidratado combustível, como observado por microscópio estereoscópico.	85

Figura 35 – Superfície de desgaste do cilindro na região I (fim de curso do pistão no PMS) a) Após teste de durabilidade com gasolina. b) Após teste de durabilidade com Etanol. (6,5x)	87
Figura 36 – Transição entre regimes de lubrificação. Parâmetro λ (adimensional) em função do ângulo do virabrequim (graus). Elaborado a partir de [74].	88
Figura 37 - Superfície de desgaste do cilindro na região III (fim de curso do pistão no PMI) a) Após teste de durabilidade com gasolina. b) Após teste de durabilidade com Etanol. (6,5x)	89
Figura 38 – Perfil de rugosidade e Curva de Abbott. Estado inicial (sem uso).....	91
Figura 39 - Perfil de rugosidade e Curva de Abbott. Região I, PMS. a) Gasolina. b) Etanol.	93
Figura 40 - Perfil de rugosidade e Curva de Abbott. Região II, Meio. a) Gasolina. b) Etanol.	95
Figura 41 - Perfil de rugosidade e Curva de Abbott. Região III, PMI. a) Gasolina. b) Etanol.	96
Figura 42 - Parâmetros de rugosidade em diferentes regiões do cilindro. a) Gasolina. b) Etanol.....	98
Figura 43 - Resultados de rugosidade em diferentes regiões do cilindro. a) Gasolina. b) Etanol.....	99
Figura 44 – Micrografia da secção transversal dos anéis de pistão. Estado inicial (sem uso).	100
Figura 45 – Anel de pistão de primeiro canaleta. Metalografia da secção transversal, camada de revestimento pós-teste. a) Estado inicial. b) Gasolina. c) Etanol.....	101
Figura 46 - Gráfico comparativo do desgaste do anel de pistão de primeiro canaleta.	102
Figura 47 – Desgaste produzido na região I, próximo ao Ponto Morto Superior (região de fim de curso do anel de 1º canaleta), no bloco testado com Etanol. (200x)	103
Figura 48 – Detalhe da figura anterior, em maior ampliação mostrando aspectos da região de fim de curso do anel de 1º canaleta, no bloco testado com Etanol. (500x)	104
Figura 49 - Detalhe da figura anterior, em maior ampliação, 1000x. Motor testado com etanol.....	105

Figura 50 – Desgaste produzido na região II, MEIO de curso, no bloco testado com Etanol. (1000x)	106
Figura 51 - Superfície de desgaste do cilindro na região III (fim de curso do pistão no PMI), após teste de durabilidade com Etanol, detalhando desgaste produzido pelo anel de óleo. (200x).....	108
Figura 52 - Superfície de desgaste do cilindro na região III (fim de curso do pistão no PMI), após teste de durabilidade com Etanol, detalhando fronteira de transição na inversão do movimento. (200x)	109
Figura 53 - Desgaste produzido na região I, próximo ao Ponto Morto Superior (região de fim de curso do anel de 1º canaleta), no bloco testado com Gasolina. (500x) ...	111
Figura 54 - Desgaste produzido na região I, próximo ao Ponto Morto Superior (região de fim de curso do anel de 1º canaleta), no bloco testado com Gasolina. (1000x) .	112
Figura 55 - Desgaste produzido na região I, próximo ao Ponto Morto Superior (região de fim de curso do anel de 1º canaleta), no bloco testado com Gasolina. (1000x) .	113
Figura 56 – Amostra no estado novo, ilustrando exposição da grafita e acabamento de usinagem.....	114
Figura 57 – Amostra no estado novo, ilustrando grafita na superfície brunida.....	115
Figura 58 - Região da zona de desgaste preferencial, onde foram observadas microtrincas e compressão da lamela de grafita. Motor testado com Etanol.....	115
Figura 59 – A) Região da zona de desgaste preferencial, onde foram observadas microtrincas e compressão da lamela de grafita. Imagem de MEV. B) Mesma região da figura anterior, detalhando em maior ampliação a descontinuidade com a superfície. Motor testado com Etanol.	116
Figura 60 – A) Região da zona de desgaste preferencial. Partículas finas na eminência do destacamento. B) Com dimensões da partícula. Motor testado com Etanol.	116
Figura 61 - Região da zona de desgaste preferencial, onde foram observadas microtrincas próximas à superfície. Motor testado com Gasolina.	117
Figura 62 - Região da zona de desgaste preferencial, onde foram observadas microtrincas próximas à superfície. Imagem de MEV. Motor testado com Gasolina.	118
Figura 63 – Resultado de trabalho de 1978, relatando a ocorrência de desgaste por delaminação em cilindro de bloco de motor em ferro fundido cinzento. [86]	119

Figura 64 - Mesma região da Figura 62 anterior, detalhando em maior ampliação as microtrincas da superfície. Imagem de MEV. Motor testado com Gasolina.	119
Figura 65 – A) Detalhe da microtrinca na superfície do cilindro. Ampliação de 10000x. B) Detalhe da microtrinca na superfície do cilindro. Ampliação de 15000x.	120
Figura 66 - Região da zona de desgaste preferencial. Partícula na eminência do destacamento. A imagem da esquerda apresenta as dimensões da partícula. Motor testado com Gasolina.....	120
Figura 67 - Partícula na eminência do destacamento. Imagem de MEV. Motor testado com Gasolina.....	121
Figura 68 - Cavidade gerada pelo desprendimento de partícula. Região do PMS. Motor testado com Gasolina.....	121
Figura 69 - Cavidade gerada pelo desprendimento de partícula. Imagem de MEV em alta ampliação. Motor testado com Gasolina.....	122
Figura 70 – A) Destacamento de pequena partícula de ferro fundido, indicada como “ponto D1” em Figura 69. B) Espectro de energia de partícula indicada na Figura 70.Motor testado com Gasolina.....	122
Figura 71 – Esquema proposto para o desgaste por fadiga de contato (fadiga de superfície ou delaminação), em cilindro de bloco de motor de combustão interna.	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação do etanol anidro combustível (EAC) e do etanol hidratado combustível (EHC). Padrões para ensaios de consumo e emissões. Adaptado de [4]	21
Tabela 2 – Especificações da gasolina comum brasileira. Padrão para ensaios de consumo e emissões. Adaptado de [4].	23
Tabela 3 – Propriedades do Etanol Anidro, Etanol Hidratado e Gasolina. [7]; [8]	25
Tabela 4 – Alguns componentes do motor de combustão interna e materiais típicos.	29
Tabela 5 – Perdas por atrito em função da classe de viscosidade do lubrificante. Motor 2.0L Europeu, condições urbanas de operação. [17].	32
Tabela 6 – Composição química básica da liga do bloco de motor.	68
Tabela 7 - Tabela de Desgaste do Cilindro. Região do PMS e PMI. Combustível Gasolina e Etanol.	82
Tabela 8 - Desgaste do anel de pistão de primeiro canaleta.	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
Al	Alumínio.
ANP	Agência Nacional do Petróleo.
As	Arsênio.
ATS	Lado <i>Anti-Thrust</i> do pistão.
C	Carbono.
CE	Carbono equivalente.
cm	Centímetro (10^{-2} m).
CO	Monóxido de carbon.
Cr	Cromo.
Cu	Cobre.
E100	Combustível composto por 100% de Etanol Hidratado Combustível.
E25	Combustível composto basicamente por gasolina, contendo entre 20% e 25% de Etanol diluído no mesmo. (varia conforme a legislação vigente).
EAC	Etanol Anidro Combustível.
ECU	Unidade electronica de commando.
EHC	Etanol Hidratado Combustível.
Fe	Ferro.
F_{KN}	Vetor presente na direção normal ao pino do pistão, no lado TS.
GED	<i>Global engine durability</i> . Durabilidade global de motor.
h	Espessura do filme de lubrificante.
h	hora.
HC	Hidrocarbonetos.
I	Região de fim de curso do pistão no PMS.
ICC	Interface câmara de combustão.
ICC	Interface camara de combustão.
II	Região central, meio de curso do pistão.
III	Região de fim de curso do pistão no PMI.
INPM	Instituto Nacional de Pesos e Medidas.
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização internacional para normalização).
km	Quilômetro (10^3 m).
m	Metro.
M85	Combustível composto por 85% de metanol.
MCI	Motor de combustão interna.
MEV	Microscópio eletrônico de varredura.
mm	Milímetro (10^{-3} m).

Mn	Manganês.
Mo	Molibdênio.
MON	<i>Motor Octane Number</i> (avalia o quanto o combustível resiste à detonação quando o motor está em regime é de plena carga em altas rotações).
NBR	Norma Brasileira.
Ni	Níquel.
nm	Nanômetro (10^{-9} m).
NOx	Óxidos de nitrogênio.
P	Fósforo.
<i>P</i>	Carga aplicada (equação de Stribeck).
pH	Potencial hidrogeniônico.
PMI	Ponto morto inferior. Posição mais baixa do pistão dentro do cilindro.
PMS	Ponto morto superior. Posição mais alta do pistão dentro do cilindro.
Poli	Escola politécnica.
PSINT	Região do cilindro abaixo de PMI.
Rk	Rugosidade do núcleo do perfil.
RON	<i>Research Octane Number</i> (avalia o quanto o combustível resiste à detonação quando o motor está em regime de plena carga, em baixas rotações).
Rpk	Rugosidade media dos picos que estão acima da área de rugosidade de núcleo Rk.
Rvk	Rugosidade media dos vales que estão abaixo da área de rugosidade de núcleo Rk.
S	Enxofre.
<i>S</i>	Parâmetro de lubrificação (equação de Stribeck).
Si	Silício.
SO ₂	Óxidos de enxofre.
TEE	Temperatura do eutético estável.
TEM	Temperatura do eutético metaestável.
TS	Lado <i>Thrust</i> do pistão.
<i>U</i>	Velocidade (equação de Stribeck).
USP	Universidade de São Paulo.
V	Vanádio.
W	Watt (unidade de potência).
W	Tungstênio.
XIX	Século dezenove.
XXI	Século vinte e um.
μ	Viscosidade (equação de Stribeck); micron (prefixo de micrômetro).
μm	Micrômetro (10^{-6} m).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	CENÁRIO HISTÓRICO - AUTOMÓVEL E INDÚSTRIA BRASILEIRA.....	19
2.2	COMBUSTÍVEL	21
2.3	MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA E PERDAS POR ATRITO	27
2.4	SISTEMA <i>FLEX-FUEL</i>	34
2.5	BLOCO DE MOTOR	37
2.6	BRUNIMENTO E RUGOSIDADE.....	41
2.7	FERRO FUNDIDO CINZENTO	44
2.8	TRIBOLOGIA DO SISTEMA CILINDRO-ANEL DE PISTÃO	51
3	MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1	ENSAIO DE DURABILIDADE	64
3.2	BLOCO DE MOTOR DE FERRO FUNDIDO	67
3.3	CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA E METALÚRGICA	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1	EXAME VISUAL DO CILINDRO E CONJUNTO PISTÃO-ANÉIS	75
4.2	ANÁLISE DO PERFIL PRIMÁRIO DA SUPERFÍCIE DO CILINDRO.....	78
4.3	EXAME DA SUPERFÍCIE POR MICROSCÓPIO ESTEREOSCÓPICO	84
4.4	ANÁLISE DE RUGOSIDADE EM TRÊS ALTURAS	91
4.5	ANÁLISE DO DESGASTE DA CONTRA-PEÇA.....	100
4.6	CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE ATRAVÉS DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV).....	103
4.7	CARACTERIZAÇÃO DA SECÇÃO PRÓXIMA À SUPERFÍCIE ATRAVÉS DE METALOGRAFIA E MICROSCOPIA ELETRÔNICA.....	114
5	CONCLUSÕES.....	128
6	REFERÊNCIAS	131

1 INTRODUÇÃO

O motor com tecnologia *Flex-Fuel*, o qual pode ser operado em qualquer proporção de mistura gasolina comum/etanol, é produzido e presente hoje quase que na totalidade dos veículos de passeio comercializados no Brasil. Além disso, crescente é a demanda para adaptação e otimização de motores desenvolvidos em outros países e continentes, visando sua aplicação em veículos brasileiros operando em regime *Flex-Fuel*.

Uma vez que o Brasil é o país que reconhecidamente desenvolveu, testou e implantou tecnologias para a utilização de etanol na fração de 100% (E100), a engenharia brasileira é atualmente uma das mais capacitadas para o desenvolvimento de tais motores, assim como a adaptação daqueles importados, para aplicação em veículos nacionais.

As alterações metalúrgicas e de superfície do par cilindro-anel ocorridas durante o uso do veículo têm influência direta na vedação da câmara de combustão, nas perdas por atrito, na medida de consumo de combustível e na emissão de poluentes. Com a constante busca pelo aumento de desempenho e redução de consumo, decorre a necessidade de estudar a fundo o comportamento dos cilindros de bloco de motor em funcionamento com ambos os combustíveis: gasolina e etanol.

O ferro fundido cinzento continua sendo o material mais utilizado em cilindros de bloco de motor no Brasil, presente tanto em blocos do tipo monolítico ou naqueles produzidos em alumínio com camisas em ferro fundido.

Em um mercado dinâmico, diversos são os fatores que influenciam na escolha do combustível. Por essa razão, veículos são desenvolvidos no Brasil de forma a oferecer o máximo em desempenho e durabilidade com qualquer que seja a proporção da mistura etanol/gasolina, em linha com o compromisso de minimizar o impacto ao meio-ambiente.

A potência por cilindro em motores de combustão interna tem aumentado consideravelmente ao longo dos anos, resultando em inevitável

incremento de solicitações mecânicas e térmicas. Acréscimos ainda maiores são esperados para as próximas gerações, em um futuro muito próximo.

Com o aumento da potência, e consequentemente pressão de combustão, torna-se mais difícil manter a espessura adequada de filme de óleo entre a superfície do cilindro e do anel. Em condições de lubrificação marginal, como nas regiões do ponto morto superior e inferior, pode ocorrer o contato metal-metal, e logo a metalurgia da superfície é de suma importância em tais condições.

Para que soluções aos problemas de desgaste e atrito possam ser desenvolvidas, assim como para orientar a pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias neste campo, é necessário primeiramente estudar o problema e entender as principais características do desgaste e eventuais contrastes decorrentes do uso de diferentes combustíveis. Para tanto, é preciso analisar a topografia e metalurgia dos cilindros após uso, tendo estes sido testados abusivamente em condições devidamente controladas e normalizadas.

A tentativa de abordagem, observação, busca do entendimento e descrição do comportamento metalúrgico e tribológico do cilindro de um motor de combustão interna com bloco de ferro fundido cinzento, após ser submetido a condições extremas de trabalho, seja com combustível etanol (álcool) e com combustível gasolina, é o objetivo do estudo.

O motor de combustão interna 04 cilindros em linha utilizado na presente pesquisa é o mesmo tipo que equipa nos dias de hoje grande parte dos veículos do segmento leve (ou popular) da nossa frota brasileira.

A metodologia da pesquisa constituiu-se basicamente de uma abordagem conceitual através da revisão bibliográfica e da parte prática que envolveu: a realização de testes de durabilidade de motor em dinamômetro segundo os padrões globais de validação dos fabricantes de veículos; a caracterização metalúrgica e topográfica do cilindro após teste com ambos os combustíveis, utilizando técnicas de microscopia eletrônica de varredura, metalografia por microscopia óptica, perfilometria e quantificação de parâmetros de rugosidade, medição de propriedades mecânicas e composição química, entre outros; a análise crítica, discussão dos resultados e apresentação da conclusão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CENÁRIO HISTÓRICO - AUTOMÓVEL E INDÚSTRIA BRASILEIRA

A história do automóvel de passeio com autopropulsão movido por motor de combustão interna data de anos ou décadas anteriores ao final do século XIX, época na qual o engenheiro Nikolaus Otto desenvolveu o motor com ciclo quatro tempos, então batizado de ciclo Otto.

Mas conforme relatado em 1954 por Alfred Sloan Junior, foi no ano de 1908 que dois eventos de importância duradoura para a indústria automotiva teriam ocorrido: William C. Durant formou a *General Motors Company* a partir da *Buick Motor Company*, e Henry Ford anunciou o Modelo “T”. Considerando os 1,6 milhão de veículos produzidos em 1916, mais de meio milhão de unidades eram do modelo Ford “T”. Não obstante seu declínio em anos posteriores, esse modelo teve um papel importante na história da produção do automóvel em larga escala. [1]

Por maiores que tenham sido os avanços na engenharia desde então, temos nos dias de hoje basicamente a mesma espécie de máquina que foi criada nos primeiros vinte anos da indústria automotiva. O coração do motor ainda é um pistão em um cilindro, movido pela queima de uma mistura de combustível e ar, a qual é inflamada a intervalos regulares. A força resultante do impulso do pistão faz girar um eixo de manivela que, por meio de um mecanismo de transmissão, faz girar as rodas.

Figura 1 - (a) Chevrolet Six, fabricado em 1911 e (b) Chevrolet Camaro, fabricado em 2011. Ambos utilizam motor de combustão interna ciclo Otto. [2]

O Automóvel ou carro de passeio movido por motor de combustão interna é um dos principais bens de consumo no Brasil e no mundo.

Com uma frota superior a 23 milhões de veículos no país, a indústria automotiva brasileira atualmente contribui com mais de 23% do PIB industrial brasileiro, gera 35,7 Bilhões de Reais (cerca de US\$ 21 Bilhões de dólares) em impostos e emprega 1,5 milhão de trabalhadores. Está entre os cinco primeiros países no ranking mundial de vendas de automóveis e também é o sexto em termos de produção. [3]

Neste cenário, praticamente 100% dos veículos de passeio são providos de um motor de combustão interna movido pela queima da gasolina (E25), etanol (E100), ou uma mistura de ambos¹.

Obviamente não se pode deixar de fazer menção às recentes iniciativas para o desenvolvimento de veículos alimentados por fontes de energia alternativa, sejam aqueles movidos a eletricidade, células de hidrogênio ou híbridos, os quais serão aos poucos introduzidos ao mercado em um futuro de médio ou longo prazo. Ao que tudo indica isso deve acontecer à medida que a tecnologia para produção em escala seja viabilizada.

O presente trabalho abordará tão somente os motores de combustão interna movidos à gasolina, etanol, ou uma mistura de ambos – versão conhecida como *Flex-Fuel*.

¹ Definições, especificações e peculiaridades referentes ao combustível e ao sistema *Flex-Fuel* serão objetos de atenção específica nos capítulos seguintes.

2.2 COMBUSTÍVEL

No Brasil, quando popularmente diz-se que o carro é movido a “álcool”, ou que se deseja abastecer com álcool, significa então que o veículo receberá etanol hidratado, o qual possuirá 93,2% de álcool e poderá conter aldeídos e ésteres nas quantidades listadas na Tabela 1, conforme normalizado pela Agência Nacional do Petróleo (ANP). Esse é o combustível etanol hidratado combustível (EHC).

Tabela 1 – Especificação do etanol anidro combustível (EAC) e do etanol hidratado combustível (EHC). Padrões para ensaios de consumo e emissões. Adaptado de [4]

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	Etanol Anidro Combustível (EAC)	Etanol Hidratado Combustível (EHC)	MÉTODO ABNT NBR
Aspecto	-	Límpida e isenta de água ou material em suspensão.		14954
Cor	-	Incolor		Visual
Acidez total, máx	mg/L	30,0	30,0	9866
Conduktiv.elétrica a 20°C, máx	μS/m	500	500	10547
Massa específica a 20°C	kg/m ³	790,9 ±0,6	809,3 ±1,1	5992
Teor alcoólico (°INPN) ²	% massa	99,5 ±0,2	93,2 ±0,4	5992
Potencial hidrogeniônico (pH)	-	-	6,0 a 8,0	10891
Resíduo por evaporação, máx	mg/100mL	5	5	8644
Teor de Íon Sulfato, máx	mg/kg	2	2	10894/12120
Teor de Sódio, máx	mg/kg	2	2	10422
Teor de Cobre, máx	mg/kg	0,03	-	10893
Teor de Aldeídos, máx	mg/L	-	60	Cromatografia gasosa
Teor de Ésteres, máx	mg/L	-	100	Cromatografia gasosa
Álcoois Superiores, máx ³	mg/L	-	500	Cromatografia gasosa

² °INPM é a unidade utilizada pelo Instituto de Pesos e Medidas (INPM), para informar a quantidade álcool etílico contido em cada litro de combustível.

³ Álcoois superiores são álcoois com três, quatro e cinco carbonos (n-propanol, isobutanol e isoamílico, são exemplos respectivos), que se formam no processo de produção do álcool combustível. Têm odores intensos, irritantes aos olhos e às membranas mucosas, podendo causar depressão. [60]

Já no caso do combustível gasolina comum, na verdade refere-se à gasolina do tipo “C”, a qual contém etanol anidro (teor alcoólico 99,5%) misturado à gasolina comercialmente pura, em uma proporção que vai de 20 a 25% de acordo com a situação política e econômica vigente, no que tange o preço do etanol. Diz-se “situação econômica vigente” porque existe uma flexibilidade para estabelecer a quantidade de etanol anidro diluído na gasolina de acordo com a legislação em vigor, conforme determinado pela ANP. Esse é o combustível que vamos generalizar como gasolina E25, pois pode conter até 25% de etanol anidro combustível (EAC).

A gasolina pura, proveniente do processo do craqueamento e refino do petróleo, é uma mistura de vários hidrocarbonetos. Essa composição determina sua qualidade. Quanto maior o número de hidrocarbonetos de cadeia ramificada e de pequeno peso molecular na composição da gasolina, maior será sua resistência à compressão antes de sua autoignição.

Considerando o iso-octano como composição ideal da gasolina, a equação teórica da combustão completa do combustível é dada por:

Na maioria dos casos o processo de combustão não ocorre na sua forma ideal, seja devido à composição da mistura ar-combustível, por ineficiência do motor ou por outro motivo qualquer. Dessa forma, a gasolina também gera como produtos dessa reação não ideal de combustão, além de água e gás carbônico, substâncias poluentes, como o monóxido de carbono (CO), os óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (HC) não queimados, material particulado, e mesmo óxidos de enxofre (SO₂), devido ao enxofre presente na gasolina. Outra substância originada na combustão da gasolina é o benzeno, que também é um agente cancerígeno. [5]

Tabela 2 – Especificações da gasolina comum brasileira. Padrão para ensaios de consumo e emissões. Adaptado de [4]

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	Gasolina A	Gasolina C	MÉTODO ABNT NBR
Aspecto	-	Límpida e isenta de água ou material em suspensão.		14954
Teor de Etanol Anidro Combustível (EAC)	% volume	zero	22 ±1 ⁴	13992
Massa específica a 20°C	kg/m ³	719,5 a 757,9	735,0 a 765,0	7148/14065
DESTILAÇÃO				
Ponto Inicial de Ebulição PIE	°C	30,0 a 40,0	-	9619
10% volume, evaporados	°C	45,0 a 60,0	-	9619
50% volume, evaporados	°C	90,0 a 110,0	-	9619
90% volume, evaporados	°C	160,0 a 190,0	-	9619
Ponto Final de Ebulição PFE	°C	195,0 a 215,0	-	9619
Resíduo, máx	% volume	2,0	-	9619
Número de Octano ⁵ RON	-	-	93,0 a 98,0	MB 457
Número de Octano MON	-	-	82,0 a 85,0	MB 457
Pressão de vapor a 37,8 °C	kPa	-	54,0 a 64,0	14149/14156
Goma atual lavada, máx	mg/100 mL	5,0	5,0	14525
Período de indução ⁶ a 100 °C, mín	minutos	-	1000	14478
Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, máx	-	1,0	1,0	14359
Teor de enxofre, máx	% massa	0,05	0,04	6563/14533
Teor de chumbo, máx	g/L	0,005	0,005	ASTM 3237
Hidrocarbonetos aromáticos, máx	% volume	51,3	40,0	14932
Hidrocarbonetos olefínicos, máx	% volume	25,7	20,0	14932

⁴ Este é o valor padrão para ensaios de consumo e emissões. O combustível vendido nos postos pode conter EAC em uma proporção que varia entre 20 e 25% de acordo a legislação em vigor.

⁵ Número de Octano é uma medida da capacidade da gasolina em resistir à detonação (pré-ignição). Um combustível com octanagem 92 significa que sua performance é compatível com uma mistura contendo 92% de iso-octano (C₈H₁₈) e 8% de n-heptano. No método RON (*Research Octane Number*) se avalia o quanto o combustível resiste à detonação quando o motor está em regime de plena carga, em baixas rotações. No método MON (*Motor Octane Number*) o regime é de plena carga em altas rotações. [61]

⁶ Controle realizado para verificar a tendência à formação de goma durante a armazenagem, conforme NBR 14478.

Dessa forma, o veículo *Flex-Fuel* brasileiro é aquele que deve funcionar perfeitamente em qualquer situação de mistura de:

- Mistura de Gasolina + Etanol Anidro Combustível (E25)
- (Mistura de Gasolina + Etanol Anidro Combustível) + Etanol Hidratado Combustível, ou seja, gasolina comum + Etanol
- Etanol Hidratado Combustível somente (E100)

Em outras palavras, gasolina comum E25 é a mistura que contém entre 20 e 25% de etanol anidro combustível (EAC) diluído na gasolina pura, e é popularmente conhecida simplesmente como “gasolina” nos postos. Etanol E100 é o álcool etílico hidratado combustível (EHC), conhecido popularmente como “álcool” ou “etanol”. A partir de agora usaremos o termo “etanol” para fazer referência simplificada ao EHC E100 e “gasolina” para fazer referência simplificada à mistura de gasolina e EAC (E25).

No momento de abastecer, o consumidor geralmente decide sobre o combustível a utilizar levando em consideração o fator preço e consumo. Uma forma prática de decidir é dividindo-se o preço do etanol pelo da gasolina, se o resultado for inferior a 0,70 então vale a pena abastecer com álcool, caso contrário utilizar gasolina. A razão disso é que o veículo popular abastecido com álcool consome mais combustível e entrega mais potência em comparação àquele abastecido com gasolina. Os aspectos técnicos relacionados à potência e consumo serão abordados nos próximos capítulos.

Sendo assim, obviamente o veículo deve ser capaz de operar perfeitamente em qualquer que seja a mistura escolhida, e ainda, ser robusto o suficiente para superar as variações de qualidade dos combustíveis dos postos brasileiros, haja vista que a fiscalização não seria capaz de manter a qualidade assegurada em todo o território.

No ano de 1911 Sterling [6] descreveu algumas considerações gerais que governariam a seleção do combustível de motores a combustão interna como sendo: acessibilidade, preço, reserva disponível, propriedades de combustão e valor térmico. O combustível dever ainda ter a capacidade de combinar-se com o ar de forma a constituir uma mistura de gás ou vapor, e gerar o mínimo de resíduos sólidos após a combustão. Além disso, deve possuir características termoquímicas

apropriadas para o uso, como é o caso da taxa de propagação de chama. Sterling adiciona ainda que, elevado poder calorífico é fator desejável, no entanto não seria necessariamente um limitador para o uso em motores de combustão interna, como de fato ocorre com o etanol em comparação à gasolina.

O baixo poder calorífico do etanol em relação à gasolina (Tabela 3) é compensado pelo elevado calor latente de vaporização e índice octano equivalente. Portanto permite operar com maiores taxas de compressão, e gerar maiores potências, produzindo ainda menor quantidade de emissões na fase de aquecimento do motor. Por outro lado, é evidente que o consumo de etanol é sempre maior em relação à gasolina, e existe uma dificuldade na partida a frio, principalmente quando a temperatura ambiente é baixa, devido à limitação do etanol hidratado em vaporizar.

Tabela 3 – Propriedades do Etanol Anidro, Etanol Hidratado e Gasolina. [7]; [8]

PROPRIEDADE/ CARACTERÍSTICA	UNIDADE	Gasolina A	Etanol Anidro Combustível (EAC)	Etanol Hidratado Combustível (EHC)
Poder calorífico inferior	kcal/kg	10500	6400	5952
Temperatura de autoignição	°C	367	550	580
Relação estequiométrica ar/combustível (típica)	-	15 / 1	9 / 1	8 / 1
% Carbono (aprox)	% peso	84,0	52,0	49,0 ⁷
% Hidrogênio (aprox)	% peso	16,0	13,0	14,0 ⁶
% Oxigênio (aprox)	% peso	-	35,0	37,0 ⁶
Calor latente de vaporização	kcal/kg	90	216	237

Segundo relatado por BERGSTRÖM [9], além da dificuldade de partida a frio, corrosão e compatibilidade com materiais são também pontos cruciais no desenvolvimento de veículos *Flex-Fuel*. O veículo deve ser desenvolvido e calibrado especificamente para operar com etanol ou gasolina, ou a mistura de ambos. As adequações de projeto incluem bomba de combustível, injetores, válvula

⁷ Valores aproximados, variam em função da quantidade real de água presente no etanol.

e inserto de sede, pistões, anéis, cilindros, sistema de exaustão e catalisador, entre outros. Além do Brasil outros países já aplicam a tecnologia *Flex-Fuel*, por exemplo a Suécia. Todavia, nesse caso o combustível é no máximo E85 (15% gasolina diluída no Etanol), diferentemente do Brasil que utiliza combustível composto por 100% de Etanol (E100).

Através de testes de emissões realizados em dinamômetro de chassi utilizando um veículo *Flex-Fuel* com motor 1243 cm³ alimentado por etanol hidratado (E100), gasolina (E22) e uma mistura dos dois combustíveis em igual proporção (F50), Sodre e Pinto [10] realizaram uma análise comparativa de emissão de gás carbônico, monóxido de carbono e óxido nitroso em função do teor de etanol hidratado. A análise dos gases de exaustão realizada segundo a norma NBR 6601 [11] mostrou que a emissão de monóxido de carbono (CO) foi maior para o combustível gasolina, devido à menor presença de oxigênio no primeiro, em segundo lugar veio o combustível E100, e o melhor resultado para a mistura F50. Ainda segundo o mesmo autor, a menor temperatura de exaustão produzida por etanol hidratado puro em relação à mistura F50 desacelera as reações de oxidação de CO em CO₂ no catalisador. Neste caso, a influência da menor temperatura de exaustão na emissão de CO suplanta o efeito contrário produzido pela maior presença de oxigênio no combustível E100 em relação ao combustível F50. [10]

No estudo não foram observadas variações nas emissões de hidrocarbonetos proporcionadas pelos três combustíveis testados e as emissões de NOx foram maiores quando o motor foi alimentado pelo combustível E100 em comparação aos demais combustíveis testados, fato atribuído à maior temperatura de combustão proporcionada pela maior velocidade da chama do etanol em relação à gasolina. [10]

Conforme se aumenta a quantidade de etanol hidratado presente na mistura com a gasolina também se eleva o consumo de combustível, haja visto que é necessário injetar maior quantidade de etanol na câmara de combustão, pois o etanol tem menor poder calorífico em relação à gasolina, e também menor razão estequiométrica ar/combustível, como comentado anteriormente (Tabela 3).

2.3 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA E PERDAS POR ATRITO

Motores a combustão Interna convertem a energia obtida pela queima de um determinado combustível em energia mecânica. A combustão da mistura ar-combustível ocorre no interior dos cilindros do bloco do motor, sendo que no caso do motor a ciclo Otto, a mistura é admitida através do sistema de admissão, seguido pela etapa de compressão, conforme esquematizado na Figura 2 a seguir.

Figura 2 – Ciclo de trabalho de um motor Otto. Adaptado de [12]

Quando o pistão atinge o ponto morto superior (PMS), ou encontra-se próximo de, ocorre então a ignição por centelha, através de uma faísca gerada pela vela de ignição, daí o terceiro tempo, conhecido como explosão ou expansão, o qual produz energia mecânica a partir da expansão obtida da queima da mistura, logo movimentando o virabrequim (conversão do movimento alternativo do pistão em movimento rotativo do virabrequim). O quarto tempo é o de escape, quando as válvulas de exaustão se abrem, e os gases ou produtos de combustão são então eliminados através do sistema de exaustão.

A maioria dos veículos leves do Brasil, e talvez no mundo todo, são equipados com motor de combustão interna de ignição por faísca (*Spark ignition*)

abastecido com gasolina, etanol ou gás natural, sendo o primeiro de maior predominância. Diversas tecnologias têm sido desenvolvidas para melhorar a eficiência destes motores e reduzir o consumo de combustível. Mas as tecnologias mais atraentes e de real valor agregado para o consumidor são aquelas que reduzem o consumo de combustível sem impactar negativamente a satisfação do cliente, por exemplo, potência, torque, aceleração, velocidade e conforto.

O motor de combustão interna destes automóveis é uma máquina cuja arquitetura base desenvolvida a mais de um século atrás se mantém atual e funcional nos modernos veículos do século XXI. Os componentes básicos desta máquina são: conjunto virabrequim, pistões, volante, bloco, cabeçote, cárter, eixo comando de válvulas, sistema de molas e acionamento das válvulas, entre outros.

A evolução da pesquisa em engenharia metalúrgica, mecânica e eletrônica permitiu avanços significativos em termos de desempenho e rendimento do motor de combustão interna dos veículos populares, haja visto que pequenos incrementos em densidade de potência representam maiores solicitações mecânicas dos componentes, exigindo muito mais robustez em termos de materiais e projeto. Aspectos como a microestrutura de cada material, desenho detalhado dos componentes e programação do chamado computador de bordo são estudados e testados exaustivamente durante o desenvolvimento de um novo veículo/motor, de forma a garantir que o carro a ser comercializado ofereça o máximo em durabilidade e desempenho para o consumidor final.

Os principais componentes do motor de combustão interna de ignição por faísca de um veículo popular da indústria brasileira e respectivos exemplos de materiais utilizados em suas construções típicas são ilustrados a seguir, através da Figura 3 e da Tabela 4 .

Figura 3 – Alguns componentes do motor de combustão interna. A) Vista em corte; B) Vista explodida.

Tabela 4 – Alguns componentes do motor de combustão interna e materiais típicos.

COMPONENTE/ SISTEMA		EXEMPLOS DE ALGUNS MATERIAIS TÍPICOS UTILIZADOS	OBSERVAÇÕES
1	Eixo comando de válvulas	Ferro fundido cinzento; Ferro fundido nodular temperado por indução; Cames em aço sinterizado montados em eixo de aço tubular [13]; Aço forjado.	Ferro fundido cinzento: cames endurecidos por coquilhamento/refusão.
2	Cabeçote	Alumínio fundido; Ferro fundido	Motores de baixa cilindrada: alumínio
3	Pistão	Alumínio fundido por gravidade ou sob pressão	Pacote anéis específico para cada aplicação
4	Biela	Aço forjado; Ferro fundido; Aço sinterizado	-
5	Bloco do motor	Ferro fundido cinzento <i>one-piece</i> ; Ferro fundido vermicular (Grafita compacta) <i>one-piece</i> ; Conjunto bloco em Alumínio fundido com camisas em ferro fundido centrifugado e base virabrequim em alumínio com insertos em ferro fundido nodular	Ferro fundido cinzento ou ferro fundido vermicular: bloco monolítico, em peça única (<i>one-piece cylinder block</i>)
6	Virabrequim	Ferro fundido nodular; Aço forjado	-
7	Cárter	Aço baixo carbono estampado; Alumínio fundido	-
8	Volante	Ferro fundido cinzento	-
9	Sistema admissão	Termoplásticos, Poliamida com fibra de vidro entre 20 a 40% (coletor); Alumínio fundido	-
10	Sistema exaustão	Aço inoxidável	-

Recente trabalho publicado pela *National Academy of Sciences* [14] explica que é prática comum agrupar os fatores relacionados à eficiência do motor de acordo com seus respectivos processos fundamentais, isto é, fatores termodinâmicos, perdas por atrito, e assim por diante. Podemos considerar os estágios básicos do ciclo do motor que contribuem para o trabalho positivo: calor liberado durante a combustão, expansão volumétrica, e a transferência de calor. Estes são os componentes termodinâmicos. Adicionalmente, existem diversos processos dentro do motor que mitigam o trabalho positivo produzido; estes podem ser agrupados em perdas bombeamento de gases (*pumping losses*) e/ou perdas por atrito. [14] Além disso, a arquitetura do motor e o sistema de periféricos ou acessórios (bomba de direção hidráulica, compressor de ar condicionado, alternador) são fontes de consumo de energia.

Segundo o mesmo autor, os mancais de virabrequim e eixo comando de válvulas, assim como o sistema pistão-cilindro são exemplos de fontes de perdas por atrito no motor. Os anéis de controle de óleo (terceiro canaleta) exercem considerável força contra o cilindro durante os quatro tempos, ao passo que o anel de primeiro canaleta exerceria uma carga de mola menor, porém é solicitado pelas pressões de combustão, a cada tempo de explosão.

Dado o pressuposto pode-se então concluir que o sistema cilindro-pistão está em constante transição de regimes de lubrificação, sendo o regime hidrodinâmico predominante no meio do curso e o regime limítrofe no ponto morto superior. Estas considerações são de suma importância para o presente trabalho, e serão portanto abordadas em maiores detalhes nos próximos capítulos.

Importante constar que o motor de combustão interna é uma máquina relativamente ineficiente por natureza, isto é, de baixo rendimento. Conforme trabalho de revisão publicado por Holmberg [15], em carros de passeio apenas cerca de 21,5% da energia contida no combustível é utilizada efetivamente para movimentar o veículo. A maior parcela do combustível (62%) é consumido na forma de calor, enquanto as perdas por atrito no conjunto powertrain seriam estimadas em 5% para o sistema de transmissão e 11,5% para o motor de combustão interna, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Desmembramento de consumo de energia em um veículo de passeio. Adaptado de [15]

Pequena quantidade da energia contida no combustível é realmente transformada em trabalho útil, o restante é perdido em forma de calor e atrito. Os esforços para melhorar o rendimento global de um sistema convencional tipo biela-manivela estão atualmente concentrados na melhoria do sistema termodinâmico, no entanto as perdas mecânicas associadas com o atrito também têm sido alvo de estudos e melhorias através dos materiais e controle de acabamento superficial das peças em movimento relativo. [16]

A partir de dados do motor tais como número total de pistões, bielas, mancais, condições de operação e tipo de lubrificante utilizado é possível calcular a perda total por atrito de um MCI.

Taylor [17] estudou as perdas por atrito de um típico motor ciclo Otto 2.0L, detalhando os resultados em ambas as condições de marcha lenta e ciclo urbano. Os resultados mostraram que o sistema de *Valvetrain* (trem de comando de válvulas) e conjunto pistão-anéis contribuíram com a maior parcela para as perdas totais por atrito.

Figura 5 – Perdas por atrito em um motor de combustão interna ciclo Otto, 2.0L, condição de marcha lenta e trânsito urbano. Segundo Taylor, 2002. [17]

A viscosidade do óleo lubrificante também exerce papel importante no atrito em mancais hidrodinâmicos e sistema pistão-cilindro, em geral no regime de lubrificação hidrodinâmico, haja visto que em regimes limítrofes, onde o contato metal-metal é inevitável o pacote de aditivos é crucial.

A tabela a seguir identifica numericamente potenciais ganhos em termos de redução de atrito em função da viscosidade do lubrificante em estudo específico realizado na Europa, em veículo popular. A redução da viscosidade em geral reduziu as perdas totais, mas aumentou ligeiramente as perdas no trem de válvulas, para a condição de menor viscosidade.

Tabela 5 – Perdas por atrito em função da classe de viscosidade do lubrificante. Motor 2.0L Europeu, condições urbanas de operação. [17]

CLASSE DO ÓLEO	TREM DE VÁLVULAS	MANCAIS	CONJUNTO PISTÃO	TOTAL
SAE 20W/50	588,5 W	610,1 W	743,9 W	1942,5 W
SAE 15W/40	599,8 W	567,5 W	677,6 W	1844,9 W
SAE 10W/30	625,4 W	467,5 W	554,2 W	1647,1 W

Importante observar que, variadas classes de lubrificante são amplamente comercializadas no mercado brasileiro e em postos de gasolina em

geral, produzidas por diversos fabricantes, a diversos preços/litro. No entanto, vale chamar a atenção ao fato de que, o uso de um lubrificante em desacordo com o manual do proprietário, pode gerar consequências negativas, como: maior consumo de combustível do veículo, comprometimento prematuro de componentes e elementos filtrantes.

2.4 SISTEMA *FLEX-FUEL*

Além da adequação de hardware (projeto e materiais de componentes do veículo), a principal diferença do motor bicomcombustível conhecido como *Flex-Fuel* em relação aos motores tradicionais é o sistema de gerenciamento via software, a partir da unidade eletrônica de comando (ECU). Este é alimentado com dados provenientes do sensor de gases que analisa a proporção dos componentes na mistura, ajustando instantaneamente os parâmetros do motor para funcionamento ideal com a composição atual de mistura de combustível presente no tanque.

O princípio de funcionamento básico foi descrito pela Bosch [18], uma das empresas pioneiras no desenvolvimento do sistema. Através de um sensor de oxigênio é feito o reconhecimento do etanol presente no combustível e esta informação é enviada para a unidade de comando que realiza de forma automática a auto adaptação de todas as funções de gerenciamento do motor, como injeção, ignição, regulagem de detonação e controle da mistura ar / combustível para qualquer proporção de etanol e gasolina. A preocupação dos engenheiros era verificar se, ao misturar álcool com gasolina, não haveria o risco de ocorrer o mesmo fenômeno que acontece na junção de água com óleo, isto é, por mais que se tente misturar, as duas substâncias ficam separadas. Após uma série de testes, que comprovaram a viabilidade da mistura, a empresa iniciou o desenvolvimento do sistema.

A principal mudança ocorreu na programação da memória (igual à de computador) da unidade de controle eletrônica: no sistema *Flex-Fuel* há um maior número de informações sobre o funcionamento do motor com os dois combustíveis. Além disso, foram desenvolvidas velas de ignição que se adaptam tanto à gasolina quanto ao álcool. O módulo de combustível também exigiu proteção extra para resistir à maior corrosão do álcool. Com o projeto concluído, a Bosch passou a testar o sistema em veículos especiais, já totalmente adaptados para funcionar com qualquer mistura de etanol e gasolina. [18]

Figura 6 – Representação esquemática do sistema *Flex-Fuel*. [18]

Mas a tecnologia *Flex-Fuel* já era conhecida há pelo menos 20 anos. O trabalho de Suga e Hamazaki [19] é um dos pioneiros no que se refere ao desenvolvimento de veículos com tal tecnologia. No estudo realizado em um veículo adaptado para operar tanto com gasolina quanto metanol (M85), o ganho em torque e potência foi de 8% com metanol. No entanto, diversas modificações em componentes e sistemas foram necessárias, tais como: vela de ignição, tipo de óleo, anéis de pistão, válvula e inserto de sede de válvulas e injetores de combustível.

Ainda segundo o mesmo autor, foram necessários testes para determinar o melhor revestimento para o anel de pistão, sendo que no caso

estudado, o revestimento de cromo foi superior tanto com gasolina quanto com metanol, ao passo que, o anel nitretado teve o pior resultado. [19]

A durabilidade dos componentes de um motor é sensível ao tipo de combustível utilizado, então o projeto deve ser específico para cada aplicação, sendo que no caso de um motor bicomcombustível existe a necessidade de se testar exaustivamente os novos componentes e sistemas, com ambos os combustíveis, antes de liberação do veículo para produção.

Finalmente, a necessidade de se trabalhar com taxa de compressão única exige um trabalho de calibração exclusivo para cada carro em desenvolvimento, que por sua vez tem interação direta com o hardware e com as características do mercado de destino do novo veículo, haja visto que combustível e condições climáticas são únicos em cada região. Este trabalho tem início com a calibração do motor, e segue no veículo, passando por diversas etapas de avaliação e aprovação (“*gates* de avaliação”), até a liberação final, chegando a durar de um a dois anos dependendo da magnitude do projeto.

2.5 BLOCO DE MOTOR

O bloco do motor é um dos principais componentes do sistema de propulsão de veículos movidos a motor de combustão interna. Ele é o “corpo do motor”, e possui como principais funções entre outras: suportar o cabeçote (o qual contém o eixo comando de válvulas e o conjunto de *valvetrain*: válvulas de admissão e escape, molas, pratos de válvula superior e inferior, tuchos, travas de válvula). O cabeçote é o sistema que permite que o motor seja “alimentado” com a mistura ar-combustível, “respire”, e tão logo realize seu trabalho, para então “expirar” os gases gerados na queima, através do sistema de escape.

O bloco tem ainda a função de suportar o conjunto pistão, biela e virabrequim, transportar fluídos, suportar as cargas provenientes dos parafusos torquados ao mesmo, localizar e suportar os mancais principais, garantir a condição de estanqueidade ideal para os anéis de pistão e juntas, assim como manter a reserva de óleo necessária para a lubrificação do sistema anel-cilindro, através do brunimento projetado para cada aplicação, permitindo o trabalho com o menor atrito possível.

Diversas máquinas importantes para o veículo são então fixadas ao bloco do motor, como por exemplo: o alternador, a bomba de direção hidráulica, o compressor de ar condicionado, o tensionador automático de correia e as polias de desvio. A posição e relação de transmissão de cada uma destas máquinas é calculada de forma a garantir a máxima eficiência para redução do consumo de combustível. O projeto dos suportes, polias de transmissão, correia e tensionador automático é realizado pelo engenheiro de motor.

O bloco de motor suporta também o cárter (que é o reservatório de óleo), e também recebe circulação contínua de óleo para lubrificação das partes móveis, e água para o arrefecimento.

Inúmeros outros componentes são localizados e suportados pelo bloco, tais como: coletor de escape, coletor de admissão, válvula termostática, transmissão, motor de arranque, sensores e chicotes.

Dessa forma, é extremamente necessário que o material do bloco tenha propriedades físicas e mecânicas satisfatórias para garantir a rigidez e

resistência apropriada para uma longa durabilidade, baixo custo e facilidade de obtenção no seu país de fabricação, além da manutenção dos requisitos relacionados a atrito, lubrificação e desgaste.

O bloco deve ser fácil de fabricar, com tempos de usinagem curtos, trocas de ferramenta a intervalos longos, e de projeto simples, eficiente e robusto, tal como é o próprio motor de combustão interna ciclo Otto.

Conceitos de projeto de bloco de motor têm sido desenvolvidos de forma a considerar as solicitações locais nas diversas regiões do mesmo e aproveitando as superiores propriedades mecânicas dos ferros fundidos. [20], [21]

Também para motores ciclo Otto antecipa-se um aumento da pressão interna, com a utilização crescente das técnicas voltadas para rendimento, incluindo-se nesse contexto a injeção direta e o turbo. Tal incremento de pressão pode dificultar a utilização do alumínio em determinadas aplicações. [22], [21]

Duas construções básicas de bloco de motor dominam o mercado automotivo: bloco de motor monolítico (peça-única) em ferro fundido cinzento e bloco de motor conjunto em alumínio com insertos em ferro fundido. Uma breve revisão das duas tecnologias é dada a seguir.

O chamado “Bloco de Alumínio” na verdade é um conjunto, composto geralmente por: Bloco base, camisas (cilindros) em ferro fundido centrifugado e suporte virabrequim (*bedplate*) em alumínio com insertos de mancal em ferro fundido nodular.

Algumas características do conjunto bloco em alumínio e componentes são apresentadas abaixo:

- O conjunto tem massa aproximadamente 20 % inferior ao bloco de ferro fundido.
- Elevada porosidade inerente ao processo de fundição sob pressão.
- Módulo de elasticidade do alumínio é aproximadamente metade em relação ao do ferro fundido.
- Requisitos especiais de fabricação e usinagem.
- Para maior capacidade do processo, a usinagem preferencialmente é realizada com o *bedplate* fixado e torquado ao bloco.

- Durante a usinagem, a amplitude de temperatura entre bloco e *bedplate* deve ser mantida abaixo de um valor mínimo.
- Devido à porosidade, parte da produção pode necessitar retrabalho (impregnação) após teste de estanqueidade, ou é sucateada/reciclada diretamente.
- Variação dimensional de posição real das camisas sobre ejetadas e diferenças de contração entre o ferro fundido (camisa) e o alumínio (bloco base) exigem controles especiais de processo para manutenção das tolerâncias dimensionais.
- Pontos de rosca (“bossas”) são maiores para compensar a resistência mecânica inferior em relação ao ferro fundido.

Figura 7 – Conjunto bloco em alumínio (A) e bloco em ferro fundido (B).

O “Bloco em Ferro Fundido Cinzento” por sua vez é geralmente fabricado em peça única, em ferro fundido cinzento de grafita lamelar, por isso é também conhecido como bloco monolítico. Possui as seguintes características:

- Elevada Rigidez, modulo de elasticidade do ferro fundido é aproximadamente o dobro em relação ao alumínio.
- Alto poder de Amortecimento, em função da microestrutura.
- Satisfatória condutividade térmica promovida pela grafita lamelar.
- Boa usinabilidade e linha de fabricação simplificada, usinagem de apenas um tipo de material.
- Grafita é lubrificante sólido (baixo atrito).
- Elevada resistência da Matriz, predominantemente perlítica.
- Elevado peso específico, cerca de 2 vezes e meia maior que o alumínio.
- Superiores propriedades mecânicas, em especial resistência a compressão, limite de escoamento e limite de fadiga.
- Dilatação e contração homogênea (peça única), resultando em menores níveis de distorção.
- Suporta maiores carregamentos e pressões internas.

Finalmente, uma das principais propriedades que favorece a utilização do bloco em ferro fundido é sua elevada capacidade e estabilidade dimensional, em especial em termos do diâmetro e posição real dos cilindros, batimento circular, cilindricidade e rugosidade gerada pelo processo de brunimento, que será comentado a seguir.

2.6 BRUNIMENTO E RUGOSIDADE

Em um processo típico de usinagem de cilindros, as características finais de posição e perpendicularidade são definidas pela operação de mandrilamento de acabamento, enquanto as demais características de forma e textura são definidas pelo brunimento. Notadamente o brunimento sofre influência da condição do cilindro gerado pelo mandrilamento de acabamento, em relação ao erro de forma, diâmetro e rugosidade. [23]

O brunimento é um processo mecânico de usinagem de corte, cujo objetivo é gerar acabamento de superfície com elevada precisão dimensional e com textura específica, visando minimização do atrito, retenção de lubrificante, controle de consumo de óleo e da vazão de gases. Para tanto, uma ferramenta abrasiva descreve na usinagem trajetórias helicoidais formando traços entrelaçados, através do movimento de giro e deslocamento axial com movimento alternativo.

Figura 8 – Velocidades presentes no brunimento e formação do ângulo de cruzamento. [23]

As ranhuras geradas pelo processo de brunimento têm a importante função de retenção de óleo na parede do cilindro e o ângulo de cruzamento das ranhuras é especificado a fim de garantir a correta lubrificação do sistema pistão-anéis-cilindro. O ângulo de cruzamento, indicado na Figura 8, é definido pela composição de velocidades axial e tangencial da ferramenta de brunir, que possui

três movimentos simultâneos: simultâneos: oscilação axial, rotação e expansão radial dos segmentos abrasivos de brunimento. [23]

As tolerâncias dimensionais e as especificações de rugosidade são atingidas mediante dois ou três estágios, definidos em virtude das exigências do produto e características do processo. Um exemplo é o brunimento de “platô” realizado em três etapas: desbaste, semi-acabamento e acabamento.

A literatura apresenta um exemplo típico de brunimento em seu estado inicial, ilustrado pela Figura 9. [24] Esta imagem obtida em MEV mostra em ampliação as ranhuras em ângulo geradas pelo processo de brunimento, que têm a função principal de retenção de óleo.

Figura 9 - Em ampliação um exemplo típico de brunimento como novo. Pequena parcela de material dobrado é admissível. [24]

O material escoado na borda dos sulcos é inerente ao processo de usinagem, que já foi descrito anteriormente como um processo de remoção de material pelo efeito de abrasão da ferramenta de brunir. O “*ploughing*” ou pranchamento explicado por Tkaya et. al [25] é um efeito do processo na transição para o corte, onde o material é “empurrado” para os lados da ranhura. Estes processos estão relacionados ao ângulo de ataque e a carga normal.

No entanto, esta quantidade de material escoado ou dobrado deve ser controlada e mantida a níveis mínimos, pois tende a elevar o tempo de amaciamento (“*running-in* ou *breaking-in*”) e aumenta o atrito no motor. A análise dos parâmetros

de rugosidade [26] e a inspeção por imagem [27] da aparência e orientação homogênea dos traços são algumas formas utilizadas para controlar a qualidade de usinagem através de exame não-destrutivo.

O tamanho dos abrasivos utilizados, etapas de corte, parâmetros de processo, e a avaliação da qualidade nos diversos estágios de produção em massa são alguns dos importantes fatores inumerados pela literatura [28] para obtenção de sucesso na operação de usinagem de brunimento.

A norma ISO 13565-2 [26] especifica o processo de determinação dos parâmetros R_k , R_{pk} , R_{vk} a partir da curva de Abbott, a qual descreve o incremento da porção de material da superfície conforme a profundidade do perfil de rugosidade. É uma técnica amplamente utilizada para avaliação da topografia gerada pelo processo de brunimento do cilindro, pois permite quantificar picos, vales e região central ou núcleo (*core roughness*) de rugosidade separadamente. Em outras palavras, a curva de Abbott é uma distribuição de alturas das asperezas.

É importante portanto, primeiramente apresentar a definição de cada um dos parâmetros de rugosidade obtidos pela análise da curva de Abbott, segundo a norma ISO 13565-2:

Figura 10 – Curva de Abbott e os parâmetros R_{pk} , R_k e R_{vk} , segundo ISO 13565-2. [26]

Perfil do núcleo de rugosidade é o perfil de rugosidade excluídos os maiores picos e os vales mais profundos, isto é, R_k é o valor da rugosidade do núcleo do perfil. R_{pk} é o valor da rugosidade média dos picos que estão acima da área de rugosidade núcleo e R_{vk} é o valor da rugosidade média dos vales que estão abaixo da área da rugosidade do núcleo do perfil.

2.7 FERRO FUNDIDO CINZENTO

Segundo definição de Guesser, 2009 [21], os ferros fundidos são ligas Fe-C-Si, contendo ainda Mn, S e P, podendo adicionalmente apresentar elementos de liga diversos. São ligas que apresentam na solidificação geralmente uma fase pró-eutética (austenita, grafita) e que se completa com uma solidificação eutética (austenita + grafita ou austenita + carbonetos).

Nos ferros fundidos com grafita, a microestrutura apresenta-se como uma matriz similar a dos aços e partículas ou um esqueleto de grafita. A grafita por sua vez possui resistência mecânica baixa, de modo que, sob situações específicas o formato agudo de sua terminação pode então exercer um efeito de concentração de tensões. Por outro lado, outras propriedades são influenciadas favoravelmente pela forma da grafita em veios, como a condutibilidade, redução do atrito, amortecimento de vibrações, condutividade térmica e usinabilidade. A matriz metálica, constituída em geral por uma mistura de perlita, ferrita e carbonetos em imensuráveis possíveis combinações, também influenciará de modo decisivo as propriedades mecânicas e desempenho.

Dessa forma, através da engenharia metalúrgica é possível combinar, desenvolver e fabricar diferentes tipos de ferros fundido, com propriedades específicas para cada aplicação. Indo por exemplo, de um ferro fundido nodular com matriz ferrítica para aplicações onde tenacidade é fator importante, ferro fundido branco com tratamento de superfície por laser para casos de elevadas pressões hertzianas e altíssimo desgaste e o ferro fundido cinzento lamelar de matriz perlítica, cuja microestrutura garante excelente condutividade térmica e capacidade de amortecimento, além de satisfatória resistência mecânica. [29], [30]

O ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar possui excelente condutividade térmica, em função da estrutura contínua da grafita que permite maior eficiência na dissipação do calor em comparação com o ferro fundido nodular, pois o formato de grafita que maximiza a condução de calor ao longo do plano basal resulta em máxima condutividade térmica, pois a condutividade paralela ao plano basal da grafita em veios é cerca de 4,5 vezes maior em relação àquela do ferro fundido nodular, onde a grafita é em nódulos e a condutividade ocorre perpendicularmente

seu plano prismático, como relatado por [31], [32], [33] e [34]. Este é apenas mais um dos diversos fatores que justificam o extenso uso do ferro fundido cinzento em bloco de motor.

Figura 11 – A condutividade térmica é significativamente maior no ferro fundido cinzento em relação ao nodular e ao aço. [31], [32], [33]

No que diz respeito à solidificação do ferro fundido e formação da estrutura lamelar, é necessário primeiramente mencionar a existência de dois eutéticos apresentados no sistema Fe-C, provenientes da existência de dois equilíbrios: estável e metaestável. O eutético estável é formado por austenita e grafita e o metaestável é constituído por austenita e carbonetos. [35] O diagrama para o sistema ferro-carbono apresenta uma diferença de aproximadamente 7° entre as temperaturas de equilíbrio do eutético estável e do metaestável, e sendo os ferros fundidos comerciais basicamente ligas Fe-C-Si, o estudo da solidificação está ligado ao exame do diagrama ternário Fe-C-Si. [36]

Na presença de silício, em teores de até 3% aproximadamente, as secções binárias Fe-C do diagrama ternário Fe-C-Si são similares às do diagrama binário Fe-C, sendo que a solidificação se processaria de maneira muito similar a das ligas puras Fe-C. Ocorre, no entanto, uma diminuição da porcentagem de carbono de eutético e uma alteração nas linhas do diagrama que representam o equilíbrio entre as fases. Assim, a diferença entre as temperaturas dos eutéticos

pode ser alterada por variações da porcentagem de silício. Isto também é verificado quando se tem presença de outros elementos de liga. [36], [35], [37], [38]

Figura 12 – Secção próxima ao ponto eutético, no diagrama de equilíbrio do sistema Fe-C. [35]

Os elementos de liga presentes no ferro fundido podem então ser denominados grafitizantes quando têm a propriedade de ampliar a faixa entre as temperaturas dos eutéticos, ou formadores de carbonetos, quando tornam essa faixa mais estreita. [37], [35], [38]

- Grafitizantes: Silício, Alumínio, Níquel, Cobre
- Formadores de Carbonetos: Cromo, Vanádio, Molibdênio, Manganês, Tungstênio

Figura 13 – Influência de elementos químicos nas temperaturas de equilíbrio dos eutéticos. [39], [40]

Utiliza-se, para levar em conta o efeito da presença de outros elementos na composição dos ferros fundidos comerciais, um diagrama binário em

que o eixo das abcissas representa a variação de uma grandeza denominada carbono equivalente (CE), a qual considera não só a quantidade dos elementos químicos presentes no material, mas também o poder grafitizante de cada um deles. Elementos como o silício e fósforo exercem grande influência no ponto eutético, deslocando-o para a esquerda. [35], [41]

A expressão simplificada para o carbono equivalente amplamente conhecida e utilizada tanto no campo acadêmico quanto industrial dada sua praticidade e funcionalidade dada a seguir. [35]

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3}$$

(Equação 2)

A finalidade desta grandeza é determinar a proximidade de uma liga em relação ao eutético, além da construção de um diagrama Fe-CE, que pode então ser utilizado para se entender a sequência de solidificação dos ferros fundidos e nodulares. A seguir apresenta-se um resumo da sequência de solidificação dos ferros fundidos cinzentos, adaptado de [35], [37], [42]

- Solidificação: processo de nucleação e crescimento das fases austenita, grafita e cementita.
- Nucleação é um processo termicamente ativado, sendo portanto necessário um super-resfriamento em relação à temperatura de equilíbrio para que os primeiros núcleos sejam formados.
- A solidificação de um ferro fundido hipoeutético se inicia com a nucleação de dendritas de austenita, e conforme a temperatura decresce o crescimento das dendritas continua, havendo um enriquecimento progressivo de carbono no líquido remanescente.
- Na temperatura de equilíbrio do eutético estável o CE é aproximadamente igual ao do eutético, ocorrendo separação simultânea de austenita e grafita após um segundo super-resfriamento, quando aumenta o número de núcleos necessários ao processo.
- O eutético cresce a partir desses núcleos, e cada unidade de crescimento é chamado célula eutética e é um agregado de austenita e grafita lamelar.

- Após a recalescência (fenômeno ligado a um balanço entre o calor extraído pelo molde e calor liberado ao meio pela reação de solidificação), as células começam a colidir umas com as outras, até que a solidificação se completa.
- Nos ferros fundidos cinzentos hipereutéticos, a primeira fase a precipitar é a grafita hipereutética na forma de lamelas longas, retas e ramificadas. O processo de solidificação que se segue é similar ao dos ferros fundidos hipoeutéticos, com formação de células eutéticas. A grafita primária pode ser, em geral, facilmente distinguida daquela proveniente da transformação eutética por possuir lamelas mais grossas e retilíneas, em decorrência do maior tempo para seu crescimento.

A morfologia da grafita definida no processo de solidificação varia em geral em termos de forma, distribuição e tamanho, sendo dependente do processo de solidificação e resfriamento, cujas variáveis são definidas de acordo com a composição química, geometria do produto e propriedades finais almejadas.

A norma ISO 945-1 [43] define um sistema para classificação e análise da grafita em termos de: sua forma, designada através de algarismos romanos de I a VI (Figura 14); distribuição, designada por letras maiúsculas de "A" a "E" (Figura 14); e tamanho para a grafita tipo I - lamelar, na numeração de 1 a 8, indo do tamanho maior para o menor.

Os termos traduzidos podem variar, especialmente por características regionais ou área industrial. Por isso, é difícil definir um termo único para traduzir cada forma normalizada pela ISO 945. Abaixo se encontram alguns termos usuais no Brasil.

Quanto à forma:

- Forma I: Grafita lamelar; Grafita em veios
- Forma II: Grafita em flocos; Grafita esborroada
- Forma III: Grafita compacta; Grafita vermicular
- Forma IV: Grafita semi-flocada; Grafita maleável
- Forma V: Grafita explodida
- Forma VI: Grafita nodular; Grafita esferoidal

Figura 14 – Classificação da grafita em termos de a) forma e b) distribuição, segundo ISO 945-1. [43]

Quanto à distribuição:

- Tipo A: Padrão irregular de orientação aleatória
- Tipo B: Em roseta, caracterizado por partículas vermiformes, circundadas por veios em disposição aproximadamente radial, dando ao conjunto um aspecto de roseta.
- Tipo C: Desigual irregular, característico dos ferros fundidos hipereutéticos, mostram veios muito maiores.
- Tipo D: Interdendrítica de orientação aleatória.
- Tipo E: Interdendrítica orientada.

As formas e tamanhos da grafita estão relacionados com o super-resfriamento da solidificação. O super-resfriamento próximo à diferença entre as temperaturas eutéticas estável e metaestável, favorece a formação de grafitas finas dos tipos D e E de localização interdendrítica. A diminuição gradativa do super-resfriamento promove a formação de grafitas maiores, dos tipos A e B. [44]

O bloco de motor estudado neste trabalho, fabricado em ferro fundido cinzento, contém microestrutura composta predominantemente por grafita I tipo A e B, contendo necessariamente uma fração mínima de 70% de grafita tipo A – lamelar com orientação aleatória, com tamanho variando entre 4 e 8, e máximo de 5% de grafita tipo D – interdendrítica aleatória. A matriz é composta por perlita, podendo conter no máximo 5% de ferrita livre.

2.8 TRIBOLOGIA DO SISTEMA CILINDRO-ANEL DE PISTÃO

O termo tribologia foi cunhado em 1966 como "a ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo e assuntos e práticas relacionados" (*"the science and technology of interacting surfaces in relative motion and of related subjects and practices"*). A palavra se forma do radical grego *"tribos"* que significa atritar, esfregar, friccionar, e do sufixo *"logos"* que significa estudo. [45], [46]

A tribologia se dedica, ao estudo do desgaste, do atrito e, por conseguinte, da lubrificação, como forma tradicional de minimizar aqueles dois fenômenos. A tribologia apóia-se na mecânica, física, química e ciências dos materiais, não trazendo, portanto, nenhum conhecimento novo. O que se fez em 1966 foi conferir um foco, um fator unificador, que é a aplicação dos conhecimentos básicos para prever o comportamento de sistemas físicos, ou seja, de tribo-elementos que são utilizados em sistemas mecânicos. [45]

Sinatora [45] explica ainda que, não são os princípios básicos que unificam a tribologia, como na física, por exemplo, mas sim a área de aplicação. Assim, como os campos do conhecimento que formam a tribologia existiam antes dela, os estudos dos fenômenos de lubrificação, atrito e desgaste antecedem de muito a 1966. A ocorrência e utilização tecnológica dos fenômenos de atrito, desgaste e lubrificação podem, por exemplo, ser observadas nos trabalhos de Leonardo da Vinci, e até mesmo com o desenvolvimento da capacidade de furar, polir, cortar, ou seja, de trabalhar (usinar) madeira ou rochas pelo homem nos períodos mais antigos da pré-história.

O desgaste é um processo de remoção de material de uma ou mais superfícies sólidas em contato, devido a uma ação mecânica. Isto ocorre quando as superfícies estão em movimento relativo de deslizamento ou rolamento (unidirecional ou recíproco). Em determinados sistemas tribológicos, a remoção de material usualmente é um processo muito lento, mas muito estável e contínuo. [47] apud [48]. De qualquer forma, o desgaste é um problema caro, tendo aspectos positivos e negativos como: reposição de peças e os recursos utilizados para melhorar as condições de desgaste. Por outro lado, se todo o desgaste pudesse ser eliminado, a

repercussão na economia seria notória. Por exemplo, se fosse possível o uso de produtos permanentes que não apresentem problemas de desgaste não haveria a necessidade de reposição no mercado e grande parte dos negócios seria comprometida nas indústrias e fornecedores de roupas, sapatos, pneus, automóveis, etc. [48].

Na grande maioria dos casos, o nível de deterioração devido ao desgaste pode ser minimizado por um projeto adequado, incluindo características de geometria, tolerâncias dimensionais, material, microestrutura, processamento térmico, propriedades mecânicas, acabamento superficial e lubrificação.

Através de estudos em Tribologia, é conhecido que o coeficiente de atrito no deslizamento para metais secos, diversos materiais cerâmicos e alguns polímeros, é raramente menor que 0,5 e em muitos casos é um tanto quanto maior. Tais valores elevados de μ em aplicações de engenharia, geralmente implicariam em elevadas e intoleráveis forças de atrito e perdas de energia por atrito. Por essa razão, na maioria das aplicações práticas, lubrificantes são utilizados com a finalidade de reduzir a força de atrito entre as superfícies. Uma enorme variedade de materiais, gases, líquidos ou sólidos, podem ser utilizados como lubrificantes. Na discussão do assunto, é conveniente distinguir os diversos tipos de regime de lubrificação. São eles: lubrificação hidrodinâmica (*hydrodynamic lubrication*), Lubrificação Elastohidrodinâmica (*elastohydrodynamic lubrication*) e Lubrificação Limite ou limítrofe (*boundary lubrication*). [49]

Convém ressaltar que outros termos podem ainda ser encontrados na literatura, para definir tais regimes de lubrificação, como por exemplo: lubrificação fluído-filme ou filme espesso (*fluid-film lubrication*), lubrificação filme-fino (*thin-film lubrication*) e lubrificação limítrofe (*boundary lubrication*). [50]

Na lubrificação hidrodinâmica, as superfícies estão separadas por um filme de fluido, o qual é geralmente espesso em relação às alturas das asperezas. A pressão de contato no filme causa somente uma pequena distorção nas superfícies, as quais, em uma primeira aproximação, podem ser consideradas rígidas. Em regime de lubrificação elastohidrodinâmica, as pressões locais são muito altas e o filme lubrificante bem fino, a ponto que a deformação elástica das superfícies não é mais desprezível, ao invés, é um fator vital neste regime de lubrificação. Se o contato é não-conforme (*counterformal*), então as pressões locais na zona de

contato serão geralmente muito maiores que aquelas encontradas na lubrificação hidrodinâmica. Nestas condições, a dependência da viscosidade do lubrificante na pressão é notória, assim como a ocorrência da deformação elásticas nas superfícies. No regime de lubrificação limítrofe, as superfícies estão separadas por filmes adsorvidos em escala molecular, em geral depositados a partir de um óleo ou graxa contendo um lubrificante limítrofe apropriado. Todavia, apreciável contato entre asperezas e formação de junção pode ocorrer. [49]

Em uma explicação simplificada, quando duas superfícies estão em contato entre si, a carga aplicada é transferida para os pontos de contato em elevação, ou asperezas, nas superfícies. Durante o deslizamento, a força tangencial total requerida para cisalhar tais junções ásperas é geralmente alto, causando elevado atrito, desgaste, e danos à superfície. Para reduzir a força de atrito e então permitir um deslizamento mais fácil, um lubrificante é propositalmente adicionado para manter as asperezas separadas totalmente ou parcialmente.

Assim, segundo [50], o uso de líquidos ou gases lubrificantes é conhecido como lubrificação fluído-filme (*fluid-film lubrication*), lubrificação filme-espesso (*thick-film lubrication*) refere-se à separação total das asperezas pela utilização de um filme lubrificante cuja espessura é muitas vezes maior que o tamanho das moléculas do lubrificante, e se esta condição ocorre somente parcialmente, isto é, se parte da carga é sustentada pela pressão do fluído e o resto pelas asperezas separadas por um filme muito fino de lubrificante (*molecularly thin lubricant film*), então o termo lubrificação filme-fino (*thin-film lubrication*) ou simplesmente lubrificação mista (*mixed lubrication*) é utilizado.

Mas reforçando o que foi já definido anteriormente, na condição mais severa de lubrificação filme-fino, a carga total é sustentada pelas asperezas lubrificadas por filmes de líquidos, gases ou sólidos extremamente finos, em escala molecular (*molecularly thin*), no caso do motor, por exemplo, quem dita as regras nesse regime é o pacote de aditivos e não mais a macro-viscosidade do óleo.

É sabido agora que a lubrificação entre duas superfícies em deslizamento, uma em relação à outra, pode mudar de um regime para outro, dependendo de um ou mais dos seguintes fatores:

- Carga
- Velocidade
- Viscosidade
- Rugosidade, entre outros.

Esta dependência foi verificada por STRIBECK em, 1902, que observou a variação do coeficiente de atrito com o parâmetro de lubrificação dado por: [50]

$$S = \mu \frac{U}{P}$$

(Equação 3)

A Figura 15 proposta por [51] apresenta uma curva de Stribeck típica modificada com os componentes do motor. Do lado direito, onde o atrito aumenta levemente com o parâmetro de lubrificação, o regime de lubrificação é do tipo hidrodinâmico ou filme-espesso, do lado esquerdo, onde o atrito é quase constante, o regime de lubrificação é do tipo limítrofe. No meio, o regime de lubrificação é do tipo misto.

Figura 15 – Regime de operação de componentes do motor de combustão interna. [51]

Por isso, faz-se necessário entender a influência da velocidade “ U ” e carga aplicada “ P ”, e também a viscosidade “ μ ” do lubrificante. O aumento da velocidade desloca o regime para a direita, tal qual deve ocorrer no meio do curso do

pistão, quando a velocidade do movimento recíproco tende ao máximo. Ao contrário, no ponto morto superior e inferior a velocidade deve tender a zero na inversão do movimento.

Geralmente, o desgaste é classificado em quatro mecanismos principais (dados a seguir). Todavia, é evidente que, tratando-se de um fenômeno ao menos físico, químico, térmico, mecânico, metalúrgico e termoquímico, a descrição dos mecanismos pode ir muito mais além. Outro fato a considerar é o de que dificilmente um mecanismo ocorre sozinho, ou seja, as interações estão presentes em todos os momentos nos mecanismos simultâneos.

- Desgaste por deslizamento (*sliding wear*)
- Desgaste abrasivo
- Desgaste corrosivo
- Desgaste por fadiga de contato

O desgaste por deslizamento como proposto por Hutchings [49] a partir da teoria de Archard [52], é explicado como um processo através do qual deslizamento contínuo leva à contínua formação e destruição de contatos individuais de asperezas. O desgaste é associado à separação de fragmentos do material das asperezas, sendo o volume de cada fragmento de desgaste dependente do tamanho da junção que o originou. No presente trabalho optaremos em utilizar o termo geral desgaste por deslizamento levando em consideração que, adesão exerce importante papel no desgaste por deslizamento, mas é somente um dos diversos processos físicos e químicos envolvidos. [49] Em outras palavras, optou-se por não utilizar o termo desgaste adesivo como um mecanismo separado.

Importante ressaltar ainda que, em determinadas condições o desgaste por deslizamento pode gerar debris que então implicarão em desgaste abrasivo. [49] Neste caso, o mecanismo desgaste abrasivo é tratado separadamente.

O termo adesão refere-se à habilidade de estruturas atômicas formarem ligações superficiais com outros átomos ou superfície, com os quais se estabelece uma junção interfacial. A resistência à adesão entre duas superfícies depende de propriedades metalúrgicas, como dureza, estrutura cristalina, capacidade de deformação, encruamento, entre outras. Tais fatores, associados com a carga normal, afetam a área real de contato a uma dada temperatura. [53]

Importante revisão sobre desgaste em deslizamento envolvendo adesão foi realizada por Vatauvuk em 1994. [54] Quando duas superfícies estão em contato, a área real é muito menor do que a área aparente, sendo que na realidade uma quantidade relativamente pequena de protuberâncias chega a interagir efetivamente. Ao aplicar uma carga normal estaticamente, a pressão local nas asperezas torna-se extremamente elevada. O limite de escoamento é excedido, estas se deformam plasticamente, até que a área real de contato aumente o suficiente para suportar o carregamento elasticamente. [54], [49]

Greenwood & Willianson em 1966 [55] apresenta um modelo detalhado de contato entre superfícies, no qual assumindo algumas hipóteses iniciais, como por exemplo: asperezas esféricas na região dos picos, todos os picos com mesmo raio, variação aleatória da altura das asperezas, uma das superfícies planas, ele então propõe uma teoria para indicar se o contato será elástico ou plástico. Não obstante a necessidade das inúmeras hipóteses simplificadoras, este modelo tem-se demonstrado muito eficiente para casos práticos de problemas envolvendo contato entre superfícies, como ocorre com o par anel-cilindro.

Uma das muitas observações obtidas pelo estudo do modelo de Greenwood é a de que a área real de contato nas asperezas pode ser ordens de grandeza menor que a área nominal ou área aparente, pois depende da carga exercida. E de fato a dependência com a área nominal no modelo proposto é mínima para área aparente de até 10 cm^2 de área, como ilustrado na Figura 16. [55] [56]

O conceito de densidade de contatos discutido por McCool em 1985 [57] permite o cálculo da fração real de contato, chegando-se a valores inferiores a 0,3% utilizando o modelo de Greenwood.

Figura 16 – Relação entre área real de contato e carga aplicada. Linha cheia, área nominal = 10 cm² e linha tracejada, área nominal = 1 cm² [55]

O índice de plasticidade proposto por Greenwood & Willianson [55] promove uma indicação de ocorrência ou não de deformação plástica no contato, utilizando o módulo de elasticidade combinado dos dois materiais, dureza superficial do material mais mole, distribuição de asperezas e raio do pico das mesmas.

No deslizamento se as protuberâncias aderirem, e caso a resistência ao cisalhamento das "soldas" formadas seja alta, poderá ocorrer deformação plástica dentro de um dos materiais ou ambos. A ruptura na região das "soldas" geralmente transfere material de uma superfície para outra. Essa transferência não produz uma partícula instantaneamente, mas pode ser removida da superfície em movimentos relativos subsequentes. Se tal fenômeno atingir proporções exageradas em determinados locais do cilindro, o resultado será um dano de superfície denominado "scuffing", causado por adesão e deformação plástica sem reconstituição do filme de óxido, com acentuado aumento do atrito. [37] Esse dano pode invalidar o teste do motor por completo, pois um dos efeitos possíveis é o travamento do sistema pistão-biela no cilindro do motor de combustão interna. Em regime moderado essa forma de desgaste é esperada, e inclusive contribui no processo de amaciamento do motor.

Uma hipótese plausível sobre os mecanismos de desgaste do sistema pistão-cilindro é que partículas geradas pelo desgaste, seja do cilindro ou do anel,

ficam em suspensão no óleo e com o movimento recíproco do pistão devem gerar riscos finos na direção do movimento.

Por isso, vamos abordar o desgaste abrasivo na sequência daquele por deslizamento (o qual envolve adesão).

Segundo Vatauvuk [54], o desgaste abrasivo pode ocorrer em duas situações: por perda de material por parte de uma superfície, quando atritada com outra de maior dureza; partículas duras com movimento relativo em relação a duas superfícies atritantes, gerando maior remoção de material na de menor dureza. Nesse caso, as partículas podem ser incrustadas em uma das superfícies, gerando abrasão na outra.

O desgaste abrasivo gerado por partículas soltas pode ocorrer em virtude de partículas de metal duro deslocadas de um componente de maior dureza, como a superfície do anel nitretado ou cromado e de partículas oriundas do desgaste por deslizamento e/ou por fadiga de contato. Pode ainda ocorrer devido à ação de minúsculas partículas de fontes externas, na forma de pó ou areia, quando não são capturadas pelos filtros.

Desgaste corrosivo ocorre quando uma reação química ou eletroquímica do material com o meio contribui para o aumento da taxa de desgaste. Isso deve também ser esperado em motores *Flex-Fuel* operando com volumes de gasolina e etanol aleatórios, e com oscilações de temperatura na câmara. Em alguns casos, as reações químicas ocorrem primeiramente em uma ou ambas as superfícies atritantes, sendo de fácil remoção por ação mecânica. No caso de um anel cromado deslizando sobre um cilindro de ferro fundido, o processo corrosivo será preferencial no ferro fundido, dada a natureza química dos elementos presentes nas superfícies.

Adicionalmente, Vatauvuk [54] explica que quando a formação de substâncias corrosivas (resíduos ácidos de combustão) ultrapassa um determinado volume, a alcalinidade do óleo pode não ser mais capaz de neutralizá-la. Nessas condições, os valores médios de desgaste podem duplicar em relação ao desgaste em regime moderado, com picos a 10% do curso do pistão partindo do ponto morto superior.

Fadiga de contato ou de superfície como definido por Ludema [47] ocorre em superfícies sob pressão ou contato compressivo cíclico, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Trincas de fadiga de contato com crescimento em direção à superfície. [47]

No caso de um processo de deslizamento recíproco, com carregamento cíclico, uma contínua sequência de deformações elásticas e plásticas pode ocorrer na superfície do contra-corpo, no nosso estudo, o cilindro de ferro fundido cinzento. Nas proximidades do limite da superfície com o meio interfacial, uma estrutura formada por micro-camadas deformadas plasticamente podem então ocorrer. Os debris de desgaste destacam-se quando ocorre a ruptura do material deformado, em geral associado com um ponto concentrador de tensão, gerando os debris de desgaste por fadiga de contato.

Glaeser [58] aborda que o mecanismo de fadiga de contato difere da fadiga estrutural clássica pelo estado de tensões gerado pelo contato Hertziano. O estado de tensões localizado é observado quando uma ou mais superfícies de curvatura estão em contato sobre carga normal. Um exemplo de dano é a superfície de um came de eixo comando. Ainda segundo o mesmo autor, as trincas de fadiga poderiam ser associadas a fatores como carbonetos, flocos de grafita, e inclusões. E, portanto, uma oportunidade para futuros estudos.

Figura 18 – Superfície que sofreu dano por fadiga de contato, com provável associação com aspectos microestruturais: carbonetos, flocos de grafita ou inclusões. [58]

No caso de um sistema anel-cilindro, a superfície curva será o anel, cujo perfil é curvo no ponto de interface. Vislumbra-se que, o movimento alternativo do anel contra o cilindro poderia também implicar em tensões de cisalhamento sub-superficiais, e com o decorrer da ciclagem, fatias de espessura micrométricas deformadas plasticamente destacar-se-iam, precedidas por trincas nucleadas a partir de pontos preferenciais concentradores de tensão.

No que tange o desgaste lubrificado no sistema, contribuições de grande importância têm sido desenvolvidas objetivando descrever o regime de lubrificação ao longo do curso do pistão.

O cálculo da espessura do filme de óleo entre o anel de pistão e o cilindro implica na resolução da equação de Reynolds, aplicando de maneira precisa o perfil de anel utilizado, assim como levando sempre em consideração a variável de velocidade do anel do pistão, haja vista que o pistão se move do ponto morto inferior até o ponto morto superior. É também extremamente relevante conhecer a pressão dos gases exercida nos anéis de pistão, assim como a temperatura do anel e do cilindro nas diferentes alturas. Se todos esses parâmetros fossem conhecidos, então a espessura do filme de óleo e as perdas por atrito do anel de pistão poderiam ser calculadas. O problema é que existe uma interação entre os três ou mais anéis do conjunto pistão-anéis, (apesar de que os mais diversos estudos são focados no anel

de primeiro canaleta). Em geral, o conjunto anel de óleo (anel de terceiro canaleta) é projetado de forma a restringir a passagem de óleo aos anéis superiores. [17]

Rosenberg [51] aborda o tema de atrito entre o pistão e o cilindro de motores de combustão interna em 1983, explicando que os elementos do conjunto que contribuem para o atrito incluem não somente o anel de primeiro canaleta, mas também o segundo anel, o conjunto anel de óleo (anel de terceiro canaleta), e a saia do pistão.⁸

Figura 19 - Mecanismos presentes na operação do anel de pistão no cilindro. Adaptado de [51]

Ainda segundo o mesmo autor, diversos métodos de análise teriam sido desenvolvidos até então (1983) para prever o comportamento dos anéis ao atrito. As análises assumem que existe um filme de lubrificante entre a face do anel e a parede do cilindro.

As forças atuando em um anel típico, lubricado por um filme de óleo, são apresentadas na Figura 19. A análise do contato hidrodinâmico é complexa, pois as forças agindo no anel variam com o tempo, e mudanças de pequena magnitude

⁸ A partir deste ponto os anéis de pistão serão designados preferencialmente por: anel de primeiro canaleta ou primeiro anel; anel de segundo canaleta, segundo anel ou anel de estanqueidade; anel de terceiro canaleta, terceiro anel ou conjunto anel de óleo.

na geometria da face do anel pode ter significativos efeitos nos resultados de cálculo.

As forças dos gases atuante nos anéis é uma função do ângulo do virabrequim. Adicionalmente, a pressão entre os anéis é dependente do *blow-by* de gases, como mostra a Figura 20. Geralmente, a espessura mínima de óleo é uma resposta à pressão aplicada e velocidade do anel. Nas posições de ponto morto superior e ponto morto inferior, onde a velocidade é zero, a espessura de filme é mínima (regime limítrofe).

Figura 20 – Pressão dos gases na região dos anéis em função do ângulo do virabrequim (zero grau equivale ao pistão em PMS). Adaptado de [51]

A máxima espessura de filme de óleo ocorre na região de meio de curso onde a velocidade do anel é máxima. As mudanças na espessura do filme de máximo a zero, em cada único tempo do motor, é o motivo pelo qual o regime está constantemente mudando de limítrofe para hidrodinâmico. [51]

Figura 21 – Espessura do filme de lubrificante entre o primeiro anel e a parede do cilindro, em função do curso do pistão. [59], [51]

Quando a espessura do filme de óleo decresce para valores inferiores a 1 (um) micrômetro (regime elasto-hidrodinâmico ou misto), o contato entre asperezas tem início. [51] A análise realizada na Figura 21 diz respeito a um motor ciclo Otto movido à gasolina, onde a mínima espessura de óleo é observada no ponto morto superior no ponto de explosão e no ponto morto inferior. Trabalhos posteriores de grande importância, em motor 2.0L ciclo Otto [17], e Diesel 6 cilindros turbo [60] apresentam resultados similares, que suportariam tal afirmação.

Figura 22 - Espessura do filme de lubrificante entre o anel de compressão e a parede do cilindro, em função do curso do pistão. Motor 2.0L ciclo Otto, mostrando também influência do raio do cilindro. [17]

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ENSAIO DE DURABILIDADE

Dois motores 4 cilindros em linha, 1.4 litros, 8 válvulas, ciclo Otto, foram montados utilizando blocos em ferro fundido cinzento oriundos de mesmo lote de fundição e sequencia de usinagem (regime de produção). Após realização do processo completo de controle de qualidade da fábrica, os motores seguiram para o laboratório de testes de motores, onde foram submetidos ao ensaio de durabilidade em célula de dinamômetro, segundo o ciclo GED (*Global Engine Durability*) completo, sendo que um motor foi alimentado com combustível gasolina comum padrão (Tabela 2) e outro com etanol hidratado combustível padrão (Tabela 1). Ambos os motores foram testados no mesmo dinamômetro, cada teste teve duração de 450 horas, cujos detalhes são dados a seguir.

O teste de GED (*Global Engine Durability*), ou de Durabilidade Global do Motor tem como objetivo primário validar a durabilidade do conjunto motor sob condições severas de trabalho. O teste é realizado seguindo ciclos que abrangem principalmente o regime de alta rotação e plena carga (*wide open throttle*) por centenas de horas. Dessa forma, os componentes do motor são solicitados em condições de máxima de: pressão e temperatura de gases, carregamentos inerciais, cargas de impacto, vibrações, assim como máximo número de revoluções por minuto do motor. É possível efetivamente avaliar e validar o conjunto e seus componentes em termos de tensões mecânicas, solicitações em fadiga, resistência ao desgaste e solicitações térmicas provenientes da combustão e escape. Tratando-se de um teste de durabilidade do tipo abusivo e acelerado, ele não reproduz as condições exatas de uso do cliente (mais amenas), ao invés, tem como objetivo promover o acúmulo de tensões e desgaste que ocorreria durante toda a vida do veículo, considerando condições adversas de uso. Por essa razão, uma vez que o motor é validado em teste de durabilidade global ele pode ser liberado para os testes de durabilidade em veículo e conseqüentemente para produção, pois dada a sua severidade, a aprovação no teste GED garante a superior durabilidade dos

componentes em regime de uso, com total confiabilidade dado o elevado coeficiente de segurança que o regime severo de teste impõe.

Apesar de seguir um mesmo princípio básico, o ciclo GED geralmente é normalizado por cada montadora, segundo os compromissos e objetivos de durabilidade do motor no veículo, que por sua vez está intimamente ligado à confiabilidade da marca. O teste foi aperfeiçoado ao longo dos anos e contempla décadas de experiência e retroalimentação de dados resultante do desenvolvimento de motores e veículos a nível mundial.

É realizado em um laboratório de motores certificado, em uma célula de dinamômetro de motor equipada com computadores de monitoramento e equipamentos de monitoramento auxiliares, como por exemplo, medidores de temperatura e vazão. Um exemplo de célula de dinamômetro com o motor instalado é dado a seguir, na Figura 23. [61]

Figura 23 – Exemplo de célula de dinamômetro de motor. [61]

Para realizar a programação e *set-up* do teste, são considerados diversos dados do veículo e motor, tais como:

- Especificações técnicas do veículo
- "*Life Goal*" do veículo (cálculo de projeto para o requisito de durabilidade mínima do veículo em km)
- Relação de transmissão final (par final)
- Tipo de transmissão
- Temperatura de abertura da válvula termostática
- Mínima rotação de projeto do motor em marcha lenta (*idle-speed*)
- Máxima rotação de projeto do motor - rotação de corte (*cut-off speed*)
- Outros conforme norma da montadora e requisitos do software de programação.

No que tange as características de veículo, adotou-se como base um veículo popular de passeio do mercado brasileiro, o qual utiliza motor com a mesma configuração do utilizado no estudo. O teste teve duração de 450 horas para cada um dos motores.

3.2 BLOCO DE MOTOR DE FERRO FUNDIDO

As amostras de bloco de motor de ferro fundido utilizadas no presente estudo foram produzidas pelo processo convencional de fundição por gravidade em molde de areia horizontal. Este é um processo de conformação no estado líquido, que consiste basicamente da elaboração da liga metálica fundida e na composição química desejada, a qual por sua vez preencherá completamente um molde de areia dando forma ao bloco de motor.

Utilizou-se para tanto o molde do tipo "não-permanente", o qual é destruído após a solidificação da peça. São produzidas duas peças por cada molde, dispostas horizontalmente, como ilustra a Figura 24.

Figura 24 – Exemplo de montagem de molde horizontal. [62]

A etapa de fabricação dos machos de areia (*sand cores*) ocorreu no setor de macharia (*core room*), onde areia de granulometria fina e controlada é misturada à resina e compactada na caixa de macho, gerando o formato desejado de geometria. A caixa é então gaseificada promovendo a catalisação da resina e garantindo a rigidez necessária dos machos de fundição. Por esse motivo, o equipamento de fabricação de machos é conhecido como sopradora de macho ou *core shooter*. São necessários diversos tipos de macho com suas respectivas

geometrias para compor o formato do bloco de motor na montagem da caixa de moldagem.

Para a fabricação do molde, areia verde de fundição de granulometria controlada foi misturada com a resina e então transferida para as linhas de moldagem após aprovação do controle de qualidade. A caixa de moldagem bipartida é composta pela parte inferior (*drag mould*) e superior (*cope mold*). Primeiramente a caixa inferior é moldada pela prensa automática de moldagem, em seguida o conjunto de machos pré-dispostos é posicionado no mesmo. O próximo passo é a prensagem da caixa superior, de forma análoga à inferior, finalizando com o fechamento da caixa de moldagem. Este fechamento deve ser preciso para garantir a continuidade da superfície e paredes do bloco, e por isso também é automatizado.

Nos canais de vazamento foram montados filtros cuja função é a eliminação de resíduos de impurezas do metal líquido, assim como reduzir a turbulência durante o vazamento do metal fundido.

Para a etapa de fusão da liga, lingotes de composição conhecida, sucata de ferro e componentes de liga foram levados ao forno de fusão. Em seguida, ocorreu o refino e inoculação da liga. Uma amostra foi retirada para a confirmação da composição química através de espectrômetro de emissão óptica, sendo então a liga fundida liberada para vazamento na linha de moldagem.

A composição química nominal básica da liga de ferro fundido do bloco de motor estudado é dada a seguir, na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição química básica da liga do bloco de motor.

ELEMENTO	C	Si	Mn	Cu	Cr	S	P
% em peso	3,30	2,20	0,70	0,40	0,40	0,16 (máx.)	0,10 (máx.)

O tempo de espera para resfriamento e solidificação foi de 60 minutos. Após realização do processo de extração, limpeza, rebarbação e controle de qualidade (dimensional, químico e metalúrgico), o lote de blocos foi liberado e encaminhado para a linha de usinagem completa.

3.3 CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA E METALÚRGICA

A caracterização topográfica e metalúrgica consistiu em uma série de análises cuidadosamente planejadas de forma a garantir a preservação das amostras até o término desta etapa, conforme detalhado a seguir.

Após término do teste, e tendo sido efetuado a coleta e processamento dos dados de saída do ensaio GED, como levantamento das curvas de performance e consumo, é então autorizada a desmontagem do motor para análise dos componentes de fim de teste (*tear-down*). Tanto o bloco quanto os componentes adjacentes foram imediatamente disponibilizados para análise pós-teste, iniciando-se com o exame do aspecto do cilindro.

Portanto, para cada um dos motores testados, a técnica experimental de caracterização dos componentes pós-teste de durabilidade foi composta por:

- Exame visual e registro fotográfico do aspecto do cilindro e pistão;
- Análise do perfil primário da superfície do cilindro em perfilômetro 2D Taylor Hobson, quantificando-se o desgaste observado ao longo do comprimento;
- Exame da superfície do cilindro em microscópio estereoscópico ZEISS, e realização de técnica de reconstrução de imagem, apresentando-se com fidelidade o aspecto final da superfície do cilindro ao longo de todo o comprimento;
- Análise de rugosidade em rugosímetro 2D Taylor Hobson, quantificando-se os parâmetros R_k , R_{pk} e R_{vk} em três alturas, e obtendo-se as curvas de Abbott;
- Caracterização da superfície do cilindro através de microscópio eletrônico de varredura (MEV) em três alturas, apresentando-se o aspecto final nas diferentes regiões do cilindro;
- Análise metalográfica da secção do cilindro em região de desgaste preferencial, através de microscopia óptica, apresentando-se o aspecto final próximo e imediatamente abaixo da superfície.
- Análise da secção do cilindro em região de desgaste preferencial, através de microscópio eletrônico de varredura (MEV), apresentando-se o aspecto final imediatamente abaixo da superfície;

- Análise metalográfica dos anéis de pistão, medindo-se o desgaste ocorrido nos mesmos.

Uma vez concluído o exame visual do aspecto dos cilindros e pistão, procedeu-se o corte do cilindro. A região selecionada foi aquela na direção longitudinal ao bloco (sentido do pino do pistão), no primeiro cilindro.

Este procedimento adotado para a definição da região de retirada da amostra para análises de cilindro tem como objetivo principal evitar influência direta dos componentes vetores de força do pistão na direção transversal ao bloco, na interpretação dos resultados. Pois nesta direção (transversal ao bloco / normal ao pino do pistão), a magnitude do vetor de força é conhecidamente [63] maior em um dos lados, denominado na literatura como “TS” (*Thrust Side*) e menor no lado denominado como “ATS” (*Anti-Thrust Side*) conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25 - Forças atuantes no pistão, na direção normal ao pino. (TS = lado Thrust, ATS = lado Anti-Thrust). [63]

Quando objetiva-se estudar tribologia no movimento recíproco ao longo do curso de atuação dos anéis, escolhe-se tal região justamente pelo fato da mesma

não estar sujeita aos “efeitos diretos” do vetor F_{KN} (Figura 25) presente na direção normal ao pino, sendo então considerada uma região onde este tipo de componente de força exercida pelo anel é menor, pois se existir terá sido um efeito indireto do vetor principal F_{KN} . Dessa forma, ilustra-se na vista superior do bloco a região de retirada da amostra para caracterização, através da Figura 26.

Figura 26 - Ilustra a região de retirada da amostra do cilindro.

As análises de perfil primário, rugosidade e curva de Abbott foram realizadas com o uso de equipamento perfilômetro 2D modelo Form Talysurf Series 2, da empresa Taylor Hobson Ltd.

A leitura do perfil primário em antecipação ao levantamento dos parâmetros de rugosidade é uma técnica que permite a determinação e quantificação de desgaste preferencial localizado em função da altura do cilindro, e foi utilizada com sucesso em trabalhos anteriores.

Um exemplo é mostrado a Figura 27, publicada por Priest em sua tese de doutorado e em artigo internacional de Priest e Taylor [64] [65], onde o desgaste na parede do cilindro de um motor diesel após teste de durabilidade de 628 horas foi

avaliado. Neste trabalho, o desgaste preferencial localizado na região do ponto morto superior foi caracterizado pelo perfil primário, sendo possível identificar as marcas ou “calotas” geradas pelos anéis de pistão no ponto de inversão do movimento alternativo do pistão.

Figura 27 – Exemplo de perfil primário, região do Ponto Morto Superior, após teste de durabilidade em motor diesel. Adaptado de [64], [65].

Análise similar na região do ponto morto superior foi objeto de estudo no presente trabalho, adicionando-se, porém, a realização da leitura do perfil primário na região do ponto morto inferior, para ambas as situações de combustível, onde também ocorre a inversão do movimento após decida do pistão.

A preparação das amostras para metalografia foi efetuada nos laboratórios de transformação de fases e de metalografia do departamento de engenharia metalúrgica da Escola Politécnica da USP.

Para garantir a preservação do estado da superfície do cilindro, as amostras foram previamente revestidas com filme de alumínio, para então prosseguir com o embutimento em baquelite, lixamento e polimento sequenciado em

pasta de diamante. Com o auxílio de integrantes do laboratório de transformação de fases do departamento de metalurgia da USP [66], procedimento especial de polimento foi realizado utilizando a técnica de ataques químicos intermediários, o que evitou que o fenômeno indesejável de espalhamento da grafita ocorresse em níveis que comprometessem a análise.

A caracterização por microscopia óptica foi realizada em secções no sentido do comprimento do cilindro, utilizando microscópio óptico Olympus, modelo BX60M, equipado com câmera *Micrometrics*. Para as análises de microscopia eletrônica de varredura utilizou-se o equipamento Philips modelo XL30, ambos do departamento de engenharia metalúrgica da Poli-USP.

A análise em MEV foi realizada em duas etapas. A primeira foi efetuada diretamente na superfície da parede do cilindro, após limpeza prévia em ultrassom, com o objetivo de verificar o estado geral do brunimento, assim como o aspecto do desgaste em três alturas do cilindro, isto é, ponto morto superior (PMS), meio e ponto morto inferior (PMI).

A segunda etapa da análise em MEV teve como objetivo caracterizar e documentar em maior ampliação e alta definição a metalurgia da secção imediatamente abaixo da superfície do cilindro. Para tanto, as amostras embutidas foram levadas ao MEV, selecionando-se zonas de desgaste preferencial da região do ponto morto superior, para verificação da condição da forma da grafita, eventuais microtrincas e estado geral da superfície. Estas regiões foram previamente analisadas por metalografia em microscópio óptico, porém em menores ampliações e definição de imagem limitada pela tecnologia da câmera.

Finalmente, secções transversais dos anéis de pistão de primeiro e segundo canaleta foram analisadas por microscopia óptica, sendo possível avaliar o perfil o desgaste ocorrido em cada condição de teste. Para viabilizar o embutimento com a manutenção da perpendicularidade da secção em relação à espessura, o corte foi realizado utilizando-se um disco diamantado acoplado a uma cortadora de precisão da marca Isomet. O lixamento e polimento com pasta de diamante foi realizado em politriz automática da marca Struers, com o cuidado especial de evitar ou minimizar o abaulamento das bordas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de consumo de óleo e *blow-by* de gases em ambas as condições testadas mantiveram-se dentro do especificado e consideravelmente abaixo do limite especificado para este motor durante todo o decorrer do ensaio. O consumo de óleo médio em geral decresceu com a evolução do teste, em especial nos primeiros 10% do período de avaliação. Essa é uma característica típica do período de amaciamento do motor.

As medidas de consumo de óleo, *blow-by* de gases e consumo de combustível diminuíram após o regime de amaciamento, foram estáveis até o fim do teste, estiveram dentro dos limites esperados para estes ensaios e não apresentaram diferenças significativas entre os dois motores testados.

A manutenção do desempenho até o término do teste de durabilidade demonstra a capacidade do motor em suportar as condições adversas de uso no veículo, cujas solicitações em vida real são muito inferiores que as impostas pelo teste em dinamômetro. Assim, no que tange este teste em específico, o motor é aprovado perante a norma técnica correspondente e a legislação vigente.

O resultado de potência e torque medido no motor testado com etanol foi superior em comparação ao testado com gasolina. Por outro lado, o consumo de combustível do motor testado com gasolina foi menor. Ambos os resultados condizem com o esperado e são explicados pelas características dos combustíveis. Conforme abordado anteriormente no capítulo específico sobre combustível, a pressão de combustão obtida com a queima do etanol é maior, gerando maior potência, enquanto que o poder calorífico da gasolina é superior ao do etanol, justificando o menor consumo de combustível do motor operando com este combustível.

4.1 EXAME VISUAL DO CILINDRO E CONJUNTO PISTÃO-ANÉIS

O exame visual do aspecto do cilindro e pistão após teste de durabilidade revelou em um primeiro momento a influência do combustível na condição de aparência final dos componentes. Uma amostra no estado inicial e sem uso foi também observada e fotografada para favorecer a verificação do contraste em relação ao estado final ao término do teste.

Inicialmente nota-se acúmulo de resíduos de combustão na região do ponto morto superior, acima da área de atuação máxima do anel de primeiro canaleta, na zona de interface com a câmara de combustão, observando-se quantidade superior de resíduo carbonizado para o cilindro que operou no motor alimentado com gasolina (Figura 28b).

Figura 28 – Aspecto visual do cilindro como observado a olho nu. a) Estado inicial. b) Após teste de durabilidade com gasolina. c) Após teste de durabilidade com etanol.

Nítidas marcas de desgaste nas alturas correspondentes à posição dos anéis no fim de curso do pistão, em ponto morto superior, sendo mais evidente para o ponto de parada do anel de primeiro canaleta e anéis de óleo (marcas visuais de “polimento”), estão presentes tanto no cilindro do motor testado com gasolina (Figura 28b) quanto para aquele que funcionou com etanol (Figura 28c).

Na região imediatamente abaixo à faixa de desgaste do anel de terceiro canaleta (anel de óleo) em porto morto superior verifica-se visualmente a continuidade de textura do brunimento, porém com maior brilho em relação à condição sem uso. Este brilho pode ser atribuído principalmente à quebra dos picos de rugosidade R_{pk} definindo o amaciamento ou *break-in*, acentuando-se com o decorrer do uso do motor.

De forma análoga ao exame do cilindro, a análise dos pistões evidenciou nítidas diferenças no aspecto final entre as duas condições testadas, e em comparação a uma amostra em estado sem uso, como mostra a Figura 29.

Figura 29 – Aspecto visual do conjunto pistão-anéis como observado a olho nu. a) Estado inicial. b) Após teste de durabilidade com gasolina. c) Após teste de durabilidade com etanol.

Observa-se na Figura 29b maior quantidade de resíduos de combustão na cabeça do pistão do motor testado com combustível gasolina, assim como nas regiões intermediárias entre os canaletes.

A razão principal desta diferença em relação ao observado no pistão testado com etanol (Figura 29c) é o efeito da natureza do combustível gasolina, que é uma poliolefina, de longa cadeia carbônica, em contraste com o combustível etanol que contém apenas dois carbonos e uma hidroxila, além de ser hidratado (5% de água).

Esse depósito de resíduos escuros ou carbonização estava aderido ao pistão, com aspecto rígido e de difícil remoção manual. Os traços verticais e irregulares notadas na região acima do primeiro canaleta indicam possível desprendimento de pequenas partículas destes resíduos influenciados pelo movimento recíproco do conjunto durante o funcionamento.

A quantidade significativa de depósitos carbonizados presentes entre os anéis de primeiro e segundo canaleta, da mesma forma que acima do conjunto anel de óleo, é uma evidência de que estas partículas são carregadas ao longo do curso do pistão no cilindro, podendo de alguma forma influenciar no processo de desgaste.

As peculiaridades relacionadas à composição química e características físico-químicas dos combustíveis, previamente discutidas na revisão bibliográfica, associadas à condição do fluido lubrificante, são alguns dos fatores que podem ter influência na formação de resíduos de combustão.

4.2 ANÁLISE DO PERFIL PRIMÁRIO DA SUPERFÍCIE DO CILINDRO

A leitura do perfil primário realizada pelo deslocamento da agulha do apalpador mecânico ocorreu tomando-se a direção do comprimento do cilindro no eixo das abscissas, e a direção da altura da topografia (variação da altura da agulha do perfilômetro) no eixo das ordenadas, e é apresentada nos gráficos a seguir, gerados por computador a partir dos dados coletados pelo perfilômetro.

A Figura 30 mostra o resultado do perfil do cilindro do bloco de motor no ensaio com gasolina comum. A escala do eixo das ordenadas do perfil foi estabelecido em micrômetros (direção radial do cilindro), e a do eixo das abscissas em milímetros (direção de movimento recíproco do pistão). Através deste gráfico com escalas ajustadas e fixas, tornou-se viável a leitura do desgaste ocorrido ao longo da superfície, permitindo estabelecer um comparativo entre ambas as condições de testes.

Figura 30 - Perfil Primário, região do PMS. Combustível gasolina.

Este método é preferível à simples medição de diâmetros do cilindro, uma vez que possibilita observar a alteração topográfica ao longo de um comprimento em torno de 20 milímetros, permitindo com sucesso diferenciar o desgaste localizado (“calota”) gerado pelo primeiro anel na inversão do sentido de movimento (indicado na Figura 30), da zona de desgaste moderado, que é indicado pela linha média na mesma figura, onde a variação de topografia ocorre de maneira relativamente mais homogênea. A escala das abscissas começa na região de

interface com o cabeçote (câmara de combustão) e cresce no sentido do lado inferior do bloco (interface com virabrequim), ou seja, o primeiro milímetro do perfil refere-se à região acima do ponto máximo de atuação do anel, estabelecendo-se a região de interface da cabeça do pistão com a câmara, onde não há desgaste por atrito do anel.

Ainda na mesma Figura 30 observa-se de forma mais sutil o desgaste localizado gerado pelos segmentos do anel de terceiro canaleta ou “de óleo” na região do PMS. Estes pontos são observáveis em dimensão similar na Figura 31, que apresenta o resultado do perfil na região do PMS do cilindro do bloco de motor que foi alimentado com etanol.

Figura 31 – Perfil primário, região do PMS. Combustível Etanol.

O desgaste localizado foi estimado com base na profundidade dos vales (“calotas”) de desgaste do cilindro, gerados pelos anéis, em relação à região representativa da condição inicial, isto é, região fora da interface com os anéis de pistão.

Lembrando-se do fato de que esta pesquisa restringe-se a uma abordagem de estudo de caso, os resultados de quantificação de desgaste limitam-se tão somente a descrever e reportar o resultado do experimento, não havendo embasamento estatístico para concluir sobre o comportamento ao desgaste representaria um padrão dependente do tipo de combustível.

Dado o pressuposto, o desgaste localizado máximo observado na região do PMS foi equivalente a $1,7\text{ }\mu\text{m}$ para o motor alimentado com gasolina e $1,5\text{ }\mu\text{m}$ para o caso do etanol.

Em termos de taxa de desgaste, no pior caso o desgaste localizado foi inferior a $3,8\text{ nm/h}$. Estes resultados mostraram-se compatíveis e relativamente inferiores ao encontrado na literatura pesquisada [67], [68], onde pesquisas anteriores realizadas com motor de combustão interna por ignição à faísca indicaram desgaste similar ou superior ao encontrado no presente estudo.

Schneider e Blossfeld [67] realizaram em 2004 testes de durabilidade em dinamômetro de motor de ignição por faísca à gasolina, medindo a taxa de desgaste em nanômetros por hora. O desgaste geral na região do anel de primeiro canaleta, após a ocorrência do amaciamento, foi em média 4 nm/h e, portanto, próximo ao encontrado neste estudo.

Gangopadhyay [68], realizou no ano 2000, medições da calota de desgaste localizado máximo em cilindros de motores de automóveis 3.0L e 4.6L utilizados como táxi, que percorreram entre 80 e 240 mil quilômetros nos Estados Unidos. O mesmo reportou, por exemplo, o caso de um motor cuja calota medida foi de $10\text{ }\mu\text{m}$, retirado de um veículo ao atingir 110 mil quilômetros. Em outro caso, ao atingir 219 mil quilômetros, o desgaste localizado máximo do cilindro na região do anel de primeiro canaleta em PMS foi de $16\text{ }\mu\text{m}$.

Observa-se ainda nesta fonte da literatura [68], que houve uma elevada dispersão nos dados coletados em campo nos veículos táxi, ainda que o tipo de combustível não tenha variado (veículo mono-combustível movido à gasolina). Esta dispersão estaria possivelmente ligada a fatores externos, por exemplo, relacionados ao uso e manutenção do veículo pelo usuário.

Constam ainda na literatura, dados de desgaste localizado em cilindro de ferro fundido cinzento de motor diesel na ordem de 10 vezes o valor medido no presente estudo. [69] Para um motor diesel esses números estão dentro da normalidade. Não obstante, uma pesquisa de otimização foi realizada no sentido de adicionar elementos químicos formadores de partículas duras, como Nb, V, Ti, através da qual Vatauvuk mostrou ser possível reduzir o desgaste nesse cilindro pela

metade via adição de tais elementos, apesar do detrimento na propriedade de usinabilidade. [69]

A leitura do perfil primário mostrou que o desgaste localizado máximo na região do ponto morto inferior (PMI) foi equivalente a $1,8\text{ }\mu\text{m}$ para o motor alimentado com gasolina (Figura 32) e $2,7\text{ }\mu\text{m}$ para o caso do etanol. (Figura 33).

Figura 32 - Perfil primário, região do PMI, GASOLINA.

O registro do perfil primário em região de PMI tornou possível a identificação e documentação de uma transição muito importante, que é o fim de curso do anel de terceiro canaleta e inversão do movimento, indicado na Figura 32 e Figura 33 pela seta no ponto de atuação do segmento 2 do terceiro anel. Esta é a região de maior desgaste localizado em todo o cilindro, sendo que imediatamente à direita deste ponto no gráfico, se observa o padrão de perfil primário da superfície abaixo de PMI, cuja textura é conservada com o aspecto gerado pela usinagem de brunimento, isto é, sem ocorrência de desgaste notável.

Figura 33 - Perfil primário, região do PMI, ETANOL.

Estes dados foram consolidados na Tabela 7, de forma a promover uma síntese dos resultados, juntamente à quantificação do desgaste na região do PMS. É possível antecipar que entre os fatores responsáveis pelo desgaste localizado estão: a lubrificação limítrofe, velocidade mínima nos pontos de inversão de movimento, e a carga tangencial do anel de primeiro e terceiro canaleta, proposital para viabilizar a vedação.

Tabela 7 - Tabela de Desgaste do Cilindro. Região do PMS e PMI. Combustível Gasolina e Etanol.

REGIÃO	DESGASTE	GASOLINA (μm)	ETANOL (μm)
Região do Ponto Morto Superior (PMS)	Desgaste localizado máximo (anel primeiro canaleta)	1,7	1,5
Região do Ponto Morto Inferior (PMI)	Desgaste localizado máximo (anel de óleo terceiro canaleta)	1,8	2,7

Na região próxima ao ponto morto inferior, o desgaste do motor alimentado com etanol foi definitivamente maior em relação ao teste com gasolina, e a calota formada pelos segmentos do anel de terceiro canaleta é nítida e de geometria perfeitamente definida para ambos os casos (Figura 32, Figura 33).

4.3 EXAME DA SUPERFÍCIE POR MICROSCÓPIO ESTEREOSCÓPICO

Cerca de 50 imagens foram capturadas manualmente, varrendo-se os cilindros ao longo do comprimento, na forma de fatias, com o uso do microscópio estereoscópico ZEISS do laboratório de metalografia do departamento de engenharia metalúrgica da Poli-USP, como descrito no capítulo materiais e métodos.

Com a utilização do computador as fotos foram montadas e ajustadas uma a uma, manualmente, de forma a “reconstruir” a imagem do cilindro. O resultado é mostrado na Figura 34, com a imagem reconstruída dos cilindros, após teste de durabilidade com combustível gasolina comum e etanol hidratado combustível.

A imagem reconstruída apresenta o aspecto final da superfície do cilindro como um todo, ao longo do comprimento, como observado através das lentes do estereoscópio. Uma das vantagens da utilização desta técnica foi a obtenção de uma imagem com maior fidelidade, evitando a influência do reflexo do flash da máquina fotográfica convencional.

O filtro de lente do estereoscópio utilizado foi exatamente o mesmo para ambos os cilindros, permitindo uma primeira constatação: o tipo de combustível usado na queima afeta a coloração final da superfície do cilindro.

Três regiões de interesses foram destacadas na figura, possibilitando um maior entendimento e organização nas caracterizações que se seguem. Sendo elas:

- REGIÃO I Região de fim de curso do pistão no ponto morto superior.
- REGIÃO II Região central do cilindro, correspondente ao meio de curso.
- REGIÃO III Região de fim de curso do pistão no ponto morto inferior.

Adicionalmente, a zona imediatamente acima do ponto de parada do anel de primeiro canaleta em PMS foi identificada como região de interface câmara de combustão (ICC) na Figura 34. Esta zona está fora do range de atuação dos anéis, e é fortemente influenciada pelas reações químicas provocadas pela combustão, e pelos depósitos de resíduos carbonizados.

Figura 34 – Imagem reconstruída dos cilindros, após teste de durabilidade com combustível gasolina comum e etanol hidratado combustível, como observado por microscópio estereoscópico.

Todavia, é possível notar na região ICC duas características específicas do trabalho com cada combustível: na amostra testada com gasolina a elevada quantidade de depósitos carbonizados, e com etanol um aspecto de superfície atacada por corrosividade.

A região abaixo do final de curso do anel de terceiro canaleta (anel de óleo) conserva características do brunimento com desgaste desprezível por estar fora do range de atuação dos anéis, indicada como região “PSINT” na Figura 34.

O detalhamento das superfícies de desgaste observadas por estereoscopia indicadas na Figura 34 é discutido a seguir.

A região de fim de curso do pistão no ponto morto superior (Região I) é caracterizada por ser o ponto de mínima velocidade do pistão e máxima aceleração (inversão do sentido do movimento), cujo regime de lubrificação é limítrofe. Nesta região, o desgaste observado pelo microscópio estereoscópico é aparentemente similar entre ambas as condições de teste. É necessário fazer correlação com os resultados de rugosidade para apreciação das mudanças de topografia localizadas.

Observa-se na região I (Figura 35), um acúmulo de resíduos de combustão na região do ponto morto superior, acima da área de atuação máxima do anel de primeiro canaleta, na zona de interface com a câmara de combustão, em ambos os casos, contudo quantidade superior de resíduo carbonizado para o cilindro que operou no motor alimentado com gasolina. (Figura 35a)

Pouca quantidade de riscos verticais característicos de abrasão pôde ser observada na região I pela técnica de estereoscopia em alta definição, considerando-se a ampliação utilizada em relação à espessura dos riscos. Para esta análise, deveremos então buscar recursos na microscopia por varredura.

Os sinais de corrosão na zona de interface com a câmara (acima do primeiro anel), para o cilindro que operou no motor alimentado com etanol é evidenciado em maior ampliação na Figura 35b.

Trabalho específico sobre mecanismos de desgaste em cilindros de ferro fundido publicado por Sudarshan e Bhaduri em 1983 [70] alerta quanto à influência do desgaste corrosivo na região do ponto morto superior, além daquela dos já então disseminados mecanismos de desgaste por deslizamento e por abrasão. No caso do etanol, essa influência deve ser consideravelmente maior, dada

a maior corrosividade do etanol, como também relatado por Moreira [71], Lino dos Santos [72] e Amaral [73] em trabalhos anteriores de grande relevância para o estudo do efeito do etanol na corrosão de produtos metálicos.

Figura 35 – Superfície de desgaste do cilindro na região I (fim de curso do pistão no PMS) a) Após teste de durabilidade com gasolina. b) Após teste de durabilidade com Etanol. (6,5x)

Significativa redução de ranhuras angulares de brunimento, especialmente no ponto de parada do anel de primeiro canaleta é verificada na Figura 35. Esta diminuição é devido ao desgaste gerado pelos anéis e está coerente com os resultados da análise de perfil primário apresentados anteriormente (Figura 30 e Figura 31). Os impactos em termos de parâmetros de rugosidade serão apresentados em capítulo a seguir.

A região central do cilindro, indicada na Figura 34 como Região II, corresponde ao meio de curso do pistão, onde o mesmo atinge a máxima velocidade. Por esse motivo, e como já antecipado por diversos autores (Rhode, 1980 [59]; Rosenberg, 1983 [51]; Priest e Taylor, 2000 [64]), é naturalmente esperado nesta região a operação do regime de lubrificação hidrodinâmica.

É importante, contudo, nesse momento relembrar também a forte influência da carga na transição entre os regimes. Uma vez que o sistema anel-cilindro está sujeito a extensivas variações de carga gerada pela pressão de combustão, dependendo do tempo de operação do ciclo Otto a lubrificação pode

Figura 37 - Superfície de desgaste do cilindro na região III (fim de curso do pistão no PMI) a) Após teste de durabilidade com gasolina. b) Após teste de durabilidade com Etanol. (6,5x)

O conjunto anel de terceiro canaleta (anel de óleo) fez o maior dano em termos de desgaste localizado. Adicionalmente, riscos de desgaste abrasivo foram observados e mitigados na linha de testemunho do primeiro segmento do conjunto anel de óleo (Figura 37).

É importante observar que as marcas de desgaste localizado deixadas pelos segmentos do conjunto anel de óleo foram maiores e mais nítidas para o caso do cilindro do motor testado com etanol, como indicado pelas setas na Figura 37b. Estas marcas são coerentes com o que foi observado na análise de perfil primário (Figura 33), que caracterizou a alteração topográfica desta região, ao passo que a técnica de microscopia por microscópio estereoscópico de alta definição permitiu a caracterização em vista de topo.

Abaixo da linha de transição do segundo segmento do anel de óleo, observa-se o aspecto do brunimento como usinado, isto é, sem desgaste observável, pois está fora da região de atuação dos anéis.

Não encontrou-se na literatura pesquisada trabalho anterior abordando a caracterização do desgaste nesta região em específico. Por outro lado, os resultados destas análises mostram que o conjunto anel de óleo contruibuiu com considerável desgaste localizado e portanto elevado atrito no sistema. Por essa razão, não obstante eventual impacto desprezível em termos de durabiidade do motor e performance percebida do veículo, a interface com este conjunto anel de terceiro canaleta (composto por dois finos segmentos de anel em aço) representa um importante item de atenção no que tange redução de perdas por atrito em motor de combustão interna e diminuição do consumo de combustível.

4.4 ANÁLISE DE RUGOSIDADE EM TRÊS ALTURAS

Medições de perfil de rugosidade, quantificação de parâmetros R_k , R_{vk} , R_{pk} , e curva de Abbott e Firestone [75], anteriormente abordados na revisão bibliográfica (Figura 10), foram realizadas em três alturas do cilindro.

Como o objetivo foi a execução de uma análise comparativa, tomou-se o cuidado especial de coletar a medição no cilindro do motor alimentado com gasolina exatamente na mesma altura correspondente àquele do motor alimentado com etanol, e vice-versa. Dessa forma, foi possível obter a leitura comparativa do efeito do combustível na condição final de topografia em termos de perfil de rugosidade.

Através da manutenção da escala dos gráficos de perfil de rugosidade exatamente idêntica independentemente da amostra, é possível obter um comparativo da real alteração topográfica ocorrida no cilindro do motor de combustão interna *flex-fuel* após teste de durabilidade, quando alimentado por etanol ou por gasolina. O perfil de rugosidade na condição inicial e sem uso é apresentada na Figura 38, em leitura realizada pelo rugosímetro em um comprimento dentro da faixa de quatro milímetros.

Figura 38 – Perfil de rugosidade e Curva de Abbott. Estado inicial (sem uso).

O cilindro do bloco de motor utilizado neste trabalho apresenta em estado inicial parâmetros de rugosidade de pico R_{pk} na ordem de $0,42 \mu\text{m}$, de rugosidade de vale na ordem de $1,24 \mu\text{m}$, e de núcleo na ordem de $1,17 \mu\text{m}$. Estes valores foram obtidos a partir da medição de uma amostra produzida no mesmo lote

de usinagem dos componentes testados, e são utilizados como referência de base, pois conforme abordado anteriormente um dos objetivos no escopo da pesquisa é a realização de uma leitura comparativa da alteração da condição das superfícies após teste com combustível gasolina e etanol. Para atingir esta meta de entendimento a avaliação da alteração dos parâmetros de rugosidade é uma ferramenta utilizada.

Este tipo de avaliação da alteração de rugosidade de cilindros de bloco de motor de combustão interna, e seu uso para entendimento do processo de desgaste tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores ao longo de décadas. Especificamente sobre rugosidade de cilindros de motor, o assunto já estava muito avançado pelo menos desde os anos 70, conforme referências estudadas. [76] [77], [78], [79]

Esta técnica de leitura bidimensional (rugosidade 2D) conjugada com o processamento dos dados e análise dos parâmetros obtidos a partir da distribuição de alturas das asperezas demonstrou ser um método eficaz e bem sucedido, tendo sido utilizado não somente para o controle de qualidade da fabricação mas também em inúmeras pesquisas científicas, como verifica-se no trabalho de K. J. Stout e E. J. Davis publicado no ano de 1984. [80]

A Figura 39a mostra o resultado do perfil de rugosidade do cilindro do bloco de motor que foi alimentado com gasolina, na região do ponto morto superior, onde a escala do eixo das ordenadas do perfil foi estabelecido em micrômetros (direção radial do cilindro), e a do eixo das abscissas em milímetros (direção de movimento recíproco do pistão). O comprimento de amostra é o mesmo para todas as condições avaliadas e está dentro da faixa de quatro milímetros, no eixo das abscissas.

Através deste gráfico com escalas ajustadas e fixas, e realizando-se a medição exatamente no mesmo ponto para o motor testado com gasolina e aquele com etanol (Figura 39b), tornou-se viável a visualização da alteração de rugosidade real ocorrida, permitindo estabelecer um comparativo entre ambas as condições de teste.

Observa-se inicialmente pelos valores do parâmetro R_{pk} , que a alteração da rugosidade de picos em PMS foi aproximadamente a mesma para os dois motores testados, cuja diferença encontra-se na casa dos milésimos de

micrômetros e, portanto, pode ser considerada desprezível. A quebra dos picos pode de fato ser notada comparando-se os perfis de rugosidade da Figura 39 ao perfil do cilindro em estado inicial (Figura 38), observando-se a diminuição deste parâmetro pela metade.

Figura 39 - Perfil de rugosidade e Curva de Abbott. Região I, PMS. a) Gasolina. b) Etanol.

A quebra dos picos das asperezas representa a passagem pelo estágio de amaciamento, e a entrada para um regime de desgaste moderado. Este aspecto do amaciamento foi discutido por Sreenath e Raman em 1976 [76], e atribuído ao então chamado primeiro estágio do amaciamento, que consistiria basicamente na remoção do material dos picos pela ação do mecanismo de desgaste por deslizamento (o qual inclui adesão). O mesmo autor comenta que em um segundo estágio inclui o preenchimento parcial de vales por debris e também a formação de um determinado filme na superfície.

A formação de um filme de óxido, ou filme triboquímico pode explicar a estabilização da taxa de desgaste e manutenção da rugosidade média de picos, uma vez que quanto mais lisa for a superfície mais fácil será a formação do filme de óxidos em um regime de lubrificação limítrofe, que é o caso do ponto morto superior. Além disso, à medida que os picos ou topos das asperezas são quebrados, a área

real de contato tende a aumentar, o que diminui drasticamente a pressão real de contato local.

A verificação prática em cilindro de ferro fundido, sobre este efeito da rugosidade em regime limítrofe foi realizada por Keller, Fridici, Kapsa e Huard [81], sendo possível constatar que superfícies mais “lisas” realmente desgastam menos em condição de lubrificação limítrofe, pois superfícies com maior espaçamento entre ranhuras de brunimento apresentaram menor desgaste.

Redução significativa da rugosidade de núcleo R_k foi observada nos dois casos em região do PMS. Isso de certa forma já era esperado, considerando-se os dados da análise de desgaste pontual (calota) do perfil de primário. Os processos que contribuem para este elevado desgaste pontual na região de atuação do anel de primeiro canaleta serão abordados a seguir.

Por outro lado, a maior redução de rugosidade de núcleo para o caso do motor testado com gasolina, com parâmetro R_k de $0,27 \mu\text{m}$ em relação ao etanol (R_k de $0,47 \mu\text{m}$) chamou a atenção. Uma possível explicação para este fato é a influência de resíduos carbonizados no desgaste abrasivo em região de primeiro anel em PMS para o caso da gasolina, muito embora isso não tenha sido evidenciado pela análise em microscópio estereoscópico. Outras hipóteses (que não são foco deste estudo) seriam: variação dimensional do cilindro e/ou do anel inerente ao processo de fabricação, variações de força tangencial do anel de primeiro canaleta também oriundas da fabricação.

O parâmetro R_{vk} , o qual descreve a rugosidade dos vales, seguiu a mesma tendência, isto é, a redução em PMS foi maior para o motor testado com gasolina em relação ao testado com etanol. No entanto, não é possível considerar necessariamente um contraste, pois em geral a rugosidade de vales apresenta alta variação oriunda da usinagem, e sua função é basicamente a retenção de lubrificante e não a de material de consumo (desgaste).

Uma hipótese plausível para a redução deste parâmetro no presente estudo é o preenchimento parcial dos vales por resíduos ou micro debris, a exemplo de outros relatos encontrados na literatura. [76], [82]

A análise de rugosidade na região de meio do cilindro foi também realizada dentro de um comprimento de quatro milímetros, tomando-se o cuidado

para efetuar a leitura do cilindro testado com gasolina na mesma altura equivalente à do que foi testado com etanol. Os resultados são apresentados a seguir, na Figura 40a e Figura 40b.

Figura 40 - Perfil de rugosidade e Curva de Abbott. Região II, Meio. a) Gasolina. b) Etanol.

A perda de rugosidade foi razoável para ambos os cilindros analisados, evidenciado pelo parâmetro R_k igual a $0,23 \mu\text{m}$ para o motor alimentado com gasolina, e $0,15 \mu\text{m}$ para o motor alimentado com etanol. Os picos ou “*summits*” quantificáveis pelo parâmetro R_{pk} foram praticamente extintos na região de meio do cilindro do motor alimentado com etanol, como evidenciado na Figura 40. O núcleo R_k remanescente está próximo ao encontrado no motor testado com gasolina, o que indica que a taxa de desgaste neste cilindro foi maior, mas não absurda.

Estas alterações topográficas justificam o aspecto “polido” ou “espelhado” observável durante o exame visual (Figura 28). Ainda assim, é possível observar facilmente as ranhuras remanescentes do brunimento (Figura 34), que permaneceram ao longo de todo o comprimento de avaliação.

A perda de rugosidade na região central do cilindro não pode ser atribuída a um único mecanismo isolado. Porém, é possível deduzir que o mecanismo de abrasão pode estar presente de maneira significativa, considerando os resultados observados até este capítulo. Desgaste por deslizamento pode ter ocorrido, mas em escala bem menor, dado que nesta região o regime de lubrificação predominante é o hidrodinâmico, com passagens pelo regime misto (Figura 36).

É importante e indispensável nesse momento fazer menção ao fato de que a região do meio do cilindro (Figura 40) é afetada pela passagem de todos os anéis, isto é, anel de primeiro canaleta, anel de segundo canaleta e conjunto anel de óleo (terceiro canaleta), durante o movimento ascendente e descendente do pistão.

Por outro lado, em região de ponto morto superior, na zona imediatamente abaixo da câmara (onde foi realizada a medição referente à Figura 39), a interface ocorre com a passagem apenas do anel de primeiro canaleta. Este fato certamente contribuiu para a menor redução do parâmetro R_k no comprimento de amostra considerado nesta parte do cilindro em relação ao ocorrido no meio.

Figura 41 - Perfil de rugosidade e Curva de Abbott. Região III, PMI. a) Gasolina. b) Etanol.

Diferentemente do ocorrido na região I (Figura 39) do PMS, a região III (ponto morto inferior) apresentou redução mais acentuada de parâmetro R_k em relação ao meio, ainda que tenha sido afetada apenas por um anel na região

medida, isto é, pelo conjunto anel de óleo (segmentos do anel de terceiro canaleta), como pode ser observado na Figura 41.

Este é o resultado do maior dano em termos de desgaste localizado, e foi gerado pelo conjunto anel de terceiro canaleta, resultando no consumo localizado da textura de brunimento e modificando por completo a distribuição de asperezas caracterizada pela curva de Abbott para ambos os motores, porém com maior severidade para o teste realizado com etanol (Figura 41b).

Esta observação justifica a nitidez característica das marcas de desgaste pontual deste cilindro (observadas na Figura 37b).

Apresenta-se a seguir na Figura 42 o gráfico que consolida o resultado de parâmetros de rugosidade de picos (R_{pk}), de núcleo (R_k), e de vale (R_{vk}) em todas as regiões medidas, para ambos os motores testados. O gráfico foi estabelecido referenciando-se o ponto médio do valor de R_k na linha das abscissas, correspondente ao ponto zero do eixo y, a seguir plotando-se metade de R_k e a rugosidade de picos R_{pk} como positiva, e a outra metade somada à rugosidade R_{vk} como negativa.

Este tipo de gráfico é comumente utilizado em tribologia, no estudo comparativo de textura de brunimento em cilindro de bloco de motor de combustão interna. [83]

Dessa forma, foi possível resumir, quantificar e apresentar em um único gráfico a alteração topográfica em termos de distribuição de asperezas, para ambos os testes realizados, nas três regiões do cilindro.

Através da plotagem dos resultados de caracterização do cilindro em seu estado inicial, foi possível constatar comparativamente as reduções ocorridas após fim de teste de durabilidade. Visualizam-se claramente os contrastes e similaridades entre o cilindro alimentado com etanol e aquele com gasolina, em cada uma das regiões.

Figura 42 - Parâmetros de rugosidade em diferentes regiões do cilindro. a) Gasolina. b) Etanol

Finalmente, a apresentação dos resultados do gráfico da Figura 42 é complementada com a Figura 43, a qual tem a importância de fazer claro ao leitor desta contribuição técnica o local exato onde foi efetuada a medição de rugosidade no cilindro e seu respectivo resultado.

Os gráficos de perfil de rugosidade foram esquematicamente posicionados na vertical e à direita do ponto de medição, ilustrando assim o que seria uma visão “ampliada” da textura local após teste com gasolina (Figura 43a) e etanol (Figura 43b).

Figura 43 - Resultados de rugosidade em diferentes regiões do cilindro. a) Gasolina. b) Etanol.

4.5 ANÁLISE DO DESGASTE DA CONTRA-PEÇA

Apresenta-se na Figura 44 a micrografia da secção transversal de cada tipo de anel de pistão utilizado no presente estudo, em seu estado inicial e sem uso, com a indicação do material base e revestimento aplicado. O anel de terceiro canaleta é na realidade um conjunto, constituído por dois segmentos de aço inoxidável recoberto com cromo, e um espaçador.

Os segmentos 1 e 2 do anel de óleo são idênticos, portanto o embutimento foi realizado apenas em um segmento. O perfil do espaçador não foi analisado, pelo fato deste não ser um componente sujeito ao contato direto com o cilindro e ao desgaste.

Figura 44 – Micrografia da secção transversal dos anéis de pistão. Estado inicial (sem uso).

A quantificação do desgaste no anel de primeiro canaleta, através da medição da camada de cromo via metalografia em microscópio óptico, é apresentado na Figura 45, para cada uma das condições de teste. Uma amostra do anel em estado inicial (sem uso) do mesmo lote de pistões, foi analisada de forma

análoga aos demais com o objetivo de estabelecer a referência necessária para quantificação do desgaste.

Figura 45 – Anel de pistão de primeiro canaleta. Metalografia da secção transversal, camada de revestimento pós-teste. a) Estado inicial. b) Gasolina. c) Etanol.

O desgaste médio da camada de cromo do anel utilizado no motor alimentado com etanol foi de 32,2 µm, isto é, na ordem de 32% de perda de material em relação à camada em estado inicial sem uso.

No anel retirado do pistão utilizado no motor alimentado com combustível gasolina este valor foi próximo de 16,9 µm, o que equivale a 17% de perda de material em relação à camada em estado inicial. Logo, o desgaste verificado no anel do motor que rodou com etanol foi aproximadamente o dobro do verificado no motor alimentado com gasolina, como indicado na Tabela 8.

Tabela 8 - Desgaste do anel de pistão de primeiro canaleta.

CONDIÇÃO	NOVO	GASOLINA	ETANOL
Espessura Ponto 1 (μm)	98,8	83,5	68,2
Espessura Ponto 2 (μm)	105,9	91,2	69,4
Espessura Ponto 3 (μm)	97,1	76,5	67,7
Média (μm)	100,6	83,7	68,4
Desgaste (μm)	0,0	16,9	32,2
Desgaste (%)	0%	17%	32%

Não obstante o maior desgaste observado para o anel que trabalhou no motor alimentado com etanol, a considerável espessura de cromo remanescente indica que o primeiro anel ainda não teria chegado à metade de sua vida útil no que tange desgaste de camada de cromo. (Figura 46)

Figura 46 - Gráfico comparativo do desgaste do anel de pistão de primeiro canaleta.

Em geral, o desgaste final do anel de compressão pode ser classificado como normal ou moderado em ambos os casos.

4.6 CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE ATRAVÉS DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)

A partir dos dados obtidos na análise em microscópio óptico, associados aos gráficos de perfil primário da perfilometria e de rugosidade, selecionaram-se áreas de maior desgaste para observação em Microscópio Eletrônico de Varredura.

A Figura 47 apresenta o aspecto da superfície na região do ponto morto superior (região I) na faixa de máximo desgaste para o motor que rodou com etanol. O local exato de realização da análise é a região de desgaste localizado (“calota”) gerado pelo primeiro anel na região de inversão do sentido do movimento, que foi indicado na Figura 31, no capítulo que abordou a análise do perfil primário.

Figura 47 – Desgaste produzido na região I, próximo ao Ponto Morto Superior (região de fim de curso do anel de 1º canaleta), no bloco testado com Etanol. (200x)

Observa-se na imagem da Figura 47 considerável e homogênea diminuição da textura de brunimento, dado o regime de lubrificação limítrofe, em quase-ausência de lubrificante, com diversos danos localizados.

As características notáveis deste desgaste localizado, assim como os detalhes patentes ao microscópio eletrônico de varredura são discutidos a seguir, com o auxílio da indicação através de letras e setas efetuadas sobre a Figura 48.

Iniciando-se em “A”, observa-se exemplo de uma área com típico aspecto de desgaste por deslizamento, terminologia adotada neste texto para definir o processo através do qual deslizamento contínuo leva à ocorrência seguida de formação e destruição de contatos individuais que levam à separação de pequenos fragmentos do material das asperezas, baseado na literatura pesquisada. [49], [52]

Em outras palavras, e nas dimensões do campo analisado, esta seria uma área onde o desgaste é controlado por adesão em condições de deslizamento, com influência da distância de interação das asperezas proposta por Eugene Finin, no ano de 1972. [84].

Segundo Sudarshan e Bhaduri [70], ainda que seja sabido que diversos fatores operem simultaneamente, este mecanismo seria o principal responsável por governar o desgaste localizado no ponto morto superior, seguido pelos demais, como corrosão e abrasão.

Figura 48 – Detalhe da figura anterior, em maior ampliação mostrando aspectos da região de fim de curso do anel de 1º canaleta, no bloco testado com Etanol. (500x)

Ainda na região delimitada em “A” na Figura 48 (em maior definição na Figura 49), verificam-se pequenos pontos de pites sugerindo corrosão, assim como

finos traços verticais de abrasão, sendo este um aspecto geral da superfície desgastada nesta área “A”, também descrito anteriormente pela literatura. [70]

Em “B” observa-se um risco vertical pronunciado, produzido por uma partícula abrasiva, ao passo que em “C” o aspecto é de desprendimento de fina camada, sugerindo uma delaminação por fadiga de contato em região preferencial de terminação de grafita, podendo ainda ter sido agravado por corrosão localizada.

A Figura 49 apresenta detalhe da região do ponto porto superior (região I) em maior ampliação, observando-se a ocorrência de orifícios pontuais (pites) característicos de corrosão, além de finos traços de abrasão leve já descritos anteriormente.

Figura 49 - Detalhe da figura anterior, em maior ampliação, 1000x. Motor testado com etanol.

Imediatamente à esquerda do ponto que sugere desgaste por fadiga de contato (Figura 48), observa-se em “D” material dobrado evidenciando deformação plástica após provável desprendimento da partícula ou casca indicado em “C”.

O traço indicado por “E” na Figura 49 exemplifica a textura de brunimento remanescente, cuja profundidade é significativamente inferior àquela observada em estado inicial (sem uso), o que explica a notável diminuição da rugosidade R_k na região, como indicado na Figura 43b.

É interessante observar que, dependendo do local da linha por onde o apalpador do rugosímetro percorre na análise, os resultados de rugosidade de vales (R_{vk}) podem ser influenciados pelos danos localizados.

A região de meio de curso do cilindro foi marcada pela predominância de desgaste abrasivo, conforme mostra a Figura 50, com a sequência de riscos verticais e contínuos ao longo de todo o campo de observação. Este aspecto também foi verificado no cilindro testado com gasolina.

A textura de brunimento foi homogeneamente afetada, remanescendo com nitidez apenas as ranhuras mais espessas, porém ainda observáveis em todo o campo de análise.

Na amostra analisada não foi possível notar característica de destacamento de partícula na região II. Nesta região (centro do cilindro) o filme de óleo tende a ser mais espesso (Figura 36), pois a velocidade de decida do pistão é máxima.

Figura 50 – Desgaste produzido na região II, MEIO de curso, no bloco testado com Etanol. (1000x)

Também nota-se na Figura 50 o registro de material escoado. Esta deformação pode ter ocorrido tanto em passagens pelo regime de lubrificação misto (Figura 36), onde algum contato entre asperezas é factível, como pode também ser

o registro de material escoado no processo de formação da textura inicial de usinagem, demonstrado na Figura 9.

Ainda com relação à região de meio de curso, não se verificou ocorrência de pites de corrosão, como ocorrido na região de PMS. Porém, o desgaste da textura de brunimento foi significativa, comparável ou superior àquela de PMS. A principal característica é desgaste abrasivo.

Pode-se inferir que esta característica de desgaste abrasivo ao longo do comprimento do cilindro, a qual é fortemente notada em região de meio de curso, seja atribuída ao mecanismo de abrasão a três corpos, com possível passagem pelo mecanismo de abrasão a dois corpos. A provável origem das partículas é listada a seguir:

- Finas partículas predominantemente cerâmicas, oriundas de fontes externas (como ar), que não teriam sido capturadas pelo elemento filtrante, em função das suas pequenas dimensões.
- Partículas metálicas de ferro fundido ou de óxidos de ferro (“debris”), previamente removidas do cilindro via desgaste por deslizamento (inclui a quebra dos picos no amaciamento), fadiga de contato, corrosão (desgaste triboquímico) ou mesmo via abrasão prévia quando da transição de pranchamento (“*ploughing*” ou “*plowing*”) para micro corte.
- Finas partículas metálicas (Cromo) destacadas dos anéis de pistão de primeiro e terceiro canaleta, através do mecanismo de desgaste por deslizamento, as quais têm dureza cerca de três vezes maior que o cilindro.
- Outras finas partículas, tais como: debris metálicos (ferrosos e não-ferrosos), resíduos carbonizados, óxidos diversos, micro partículas cerâmicas (exemplo silicatos), oriundas de fontes diversas e que de alguma teriam permanecido por algum tempo em suspensão no lubrificante.

Khorshid e Nawwar [85] observaram em 1991 que são diversos os fatores que afetam a taxa de desgaste abrasivo em motores de combustão interna. Os principais são o tamanho da partícula, concentração e dureza da mesma. Neste estudo, partículas finas de poeira teriam contribuído com aproximadamente 50% no processo de desgaste do cilindro.

As considerações realizadas nesta pesquisa, e apresentação de resultados de ocorrência do desgaste abrasivo estão em acordo com estudos anteriores encontrados na literatura [85], [86].

Além disso, a hipótese descrita anteriormente, de possível formação de debris pelo destacamento de partículas em associação com o floco de grafita do ferro fundido, seria também coerente com importante trabalho de Riahi e Alpas de 2003 [87], assim como em recente publicação de Han, Zhanga, Ajayib, Barbera, et all [88], os quais analisaram a influência da grafita na formação de debris pelo desgaste por deslizamento em movimento recíproco, em ferro fundido. A análise metalográfica e de microscópio por varredura da secção do cilindro em região de desgaste localizado (ponto morto superior) é parte desta dissertação, com o objetivo de comprovar esta hipótese.

Na região III, em ponto morto inferior, observa-se nitidamente a transição da região de fim de curso do anel de óleo, e a faixa imediatamente abaixo, fora do range de atuação dos anéis, como mostra em ampliação a Figura 51. O ponto exato de realização da análise é aquele de desgaste localizado (“calota”) gerado pelo anel de óleo (segundo segmento), na inversão do sentido do movimento em PMI, indicado anteriormente através da Figura 33 durante a análise do perfil primário.

Figura 51 - Superfície de desgaste do cilindro na região III (fim de curso do pistão no PMI), após teste de durabilidade com Etanol, detalhando desgaste produzido pelo anel de óleo. (200x)

Na análise por microscopia de varredura, o desgaste produzido pelo conjunto anel de óleo foi o maior desgaste localizado observado em todo o curso do pistão, e acredita-se que o mesmo seja tipicamente produzido por um processo de desgaste por deslizamento em regime de lubrificação limítrofe, influenciado pela pressão de contato exercida pelos segmentos de aço que constituem o anel de terceiro canaleta.

Na área de depressão gerada pelo segundo segmento do anel de óleo (Figura 33), poucos (desprezíveis) sinais de abrasão são observáveis ao MEV. A redução da rugosidade de núcleo Rk (Figura 41b) foi tal que, neste ponto específico, o aspecto final foi de total “alisamento”. Em outras palavras, a textura local de brunimento foi totalmente consumida pelo desgaste localizado provocado pelo segmento do conjunto anel de óleo, em acordo com os resultados da leitura de rugosidade e perfil primário local.

Figura 52 - Superfície de desgaste do cilindro na região III (fim de curso do pistão no PMI), após teste de durabilidade com Etanol, detalhando fronteira de transição na inversão do movimento. (200x)

Imediatamente abaixo desta linha que delimita o desgaste produzido pelo anel de terceiro canaleta (Figura 52), a textura de brunimento remanesce com os sulcos angulares produzidos pela usinagem, uma vez que esta fora do curso de atuação dos anéis. Por essa razão, não se observa desgaste significativo, apenas uma parcela de material escoado ou deformado nas bordas dos sulcos. Esse

aspecto de ranhuras é muito similar ao que se observaria no estado inicial e sem uso do cilindro (Figura 9).

Algumas ranhuras de brunimento remanescentes são também observáveis acima da linha de transição, indicadas pelas setas na Figura 52. Todavia, estas não estão presentes em todo o campo de análise, ao contrário do que ocorreu na região de meio de curso.

A análise do estado final da superfície em microscópio eletrônico de varredura do cilindro testado com combustível etanol foi apresentada e discutida em detalhes, incluindo-se o desdobramento das características de desgaste localizado.

Entende-se a importância científica deste maior detalhamento primeiramente pelo fato do uso do combustível composto por cem por cento de etanol (E100) ser o principal diferencial do motor *Flex-Fuel* brasileiro, conforme abordado no capítulo que descreve o combustível utilizado no Brasil. Além disso, o desgaste em região de meio do cilindro, assim como em ponto morto inferior foi ligeiramente superior neste motor testado com etanol em relação ao que operou com gasolina (E25), como mostraram as análises de rugosidade e perfil primário.

Em região de ponto morto inferior e meio do cilindro, a superfície do cilindro do bloco do motor testado com gasolina resultou em aspecto muito similar ao daquele com etanol, no que tange características de desgaste, isto é, predominância de desgaste abrasivo ao longo do curso, notáveis até o fim de curso em PMI, onde se verificou com nitidez desgaste severo local no ponto de atuação dos segmentos de anel de óleo, onde a textura de brunimento foi consideravelmente consumida, como já evidenciado pelo exame de estereoscopia (Figura 37a) e quantificado pelos dados de perfil de rugosidade (Figura 42).

Em contrapartida, na região de interface com o anel de primeiro canaleta em ponto morto superior, no cilindro do bloco do motor testado com gasolina, o desgaste local produzido apesar de razoável foi superior em relação ao etanol. A maior “calota” observada, atrelada a menor rugosidade final de núcleo (R_k de $0,27\ \mu\text{m}$ para gasolina e $0,47\ \mu\text{m}$ para etanol) pode não ser comprovadamente um predicado do uso da gasolina, mas justifica um exame detalhado e atenção para esta região de interface, de forma a entender possíveis fatores cooperantes para este comportamento.

O resultado do aspecto da superfície nesta região, cuja depressão ou “calota” de desgaste foi anteriormente indicada na Figura 30, é apresentado na Figura 53, na qual se observa elevada abrasão, caracterizada pela quantidade de riscos verticais, os quais em geral são relativamente mais espessos ao que foi observado até o momento no cilindro testado com etanol.

É possível ter um conceito mais claro deste caráter expressivamente mais abrasivo encontrado na região I do cilindro do motor testado com gasolina ao comparar a aparência verificada na Figura 53 com aquela da Figura 48, que ilustrou em mesma ampliação o aspecto correspondente a esta área no cilindro testado com etanol.

É possível observar cavidades onde pode ter ocorrido desprendimento de fina camada associada a uma região de terminação de grafita. Esse desprendimento pode ter ocorrido por um processo de delaminação por fadiga de contato. Na Figura 53 notam-se também pequenos pontos de pites característicos de corrosão.

Figura 53 - Desgaste produzido na região I, próximo ao Ponto Morto Superior (região de fim de curso do anel de 1º canaleta), no bloco testado com Gasolina. (500x)

A caracterização mostra que os mecanismos de desgaste ocorridos na região de ponto morto superior do motor que operou com gasolina são similares aos observados no motor que funcionou com etanol, porém, em magnitudes diferentes.

A disparidade mais significativa ressaltada no presente estudo é no que tange o mecanismo de abrasão na região do ponto morto superior, cuja intensidade foi consideravelmente maior para o motor testado com gasolina.

Uma hipótese plausível para explicar este contraste são os depósitos de resíduos escuros ou carbonização, evidenciados no exame do pistão após término do teste. Uma quantidade de depósitos carbonizados presentes no pistão entre os rasgos (ou “*grooves*”) dos anéis, inclusive acima do conjunto anel de óleo, é uma evidência de que estas partículas são carregadas ao longo do curso do pistão no cilindro, podendo influenciar no processo de desgaste abrasivo na região de ponto morto superior.

A Figura 54 é uma imagem que apresenta em maior ampliação e nitidez a região em discussão, sendo possível evidenciar os riscos abrasivos produzidos. Notam-se também os orifícios aqui descritos como “pites”, além da textura de brunimento remanescente, que apesar do desgaste ocorrido se mantém presente e homogênea, como já havia sido indicado pela análise de rugosidade.

Figura 54 - Desgaste produzido na região I, próximo ao Ponto Morto Superior (região de fim de curso do anel de 1º canaleta), no bloco testado com Gasolina. (1000x)

No centro da Figura 55 é mostrado o ponto que sugere a ocorrência de destacamento ou processo de delaminação similar ao observado no cilindro testado com etanol. A influência da grafita na formação de debris pelo desgaste por

deslizamento em movimento recíproco em ferro fundido é um dos pontos de interesse nesta imagem.

Contudo, e conforme o que já foi apresentado anteriormente, a análise metalográfica e de microscópio por varredura da secção em zona imediatamente abaixo da superfície, é requerida para melhor entender como este processo de dano ocorreria, uma vez que para que seja factível o desprendimento de uma partícula via fadiga de contato é necessário o estabelecimento de um campo de tensões e deformações cíclicas, a nucleação e propagação de uma microtrinca, até a fratura catastrófica da “fatia” ou “lasca” da superfície.

Figura 55 - Desgaste produzido na região I, próximo ao Ponto Morto Superior (região de fim de curso do anel de 1º canaleta), no bloco testado com Gasolina. (1000x)

A condição da superfície caracterizada pela Figura 55 (gasolina) e Figura 49 (etanol) são formas de visualizar este tipo de desgaste como vista de topo, e a técnica de metalografia e microscopia eletrônica da secção da amostra após preparação (embutimento, lixamento, polimento) com proteção da superfície permite a caracterização do fenômeno abaixo da superfície, sendo este o foco do próximo capítulo.

4.7 CARACTERIZAÇÃO DA SECÇÃO PRÓXIMA À SUPERFÍCIE ATRAVÉS DE METALOGRAFIA E MICROSCOPIA ELETRÔNICA

A partir da análise de perfilometria e de MEV da superfície, selecionaram-se para análise metalográfica algumas regiões onde houve o desgaste preferencial. Também se avaliou o aspecto da superfície em estado inicial.

Apresenta-se na Figura 56 o aspecto da secção de uma amostra nova do bloco utilizado no presente estudo, isto é, uma peça sem uso. Neste caso, observa-se na região imediatamente abaixo da superfície a continuidade e exposição da grafita, não havendo sinais notáveis de deformação ou microtrincas.

Figura 56 – Amostra no estado novo, ilustrando exposição da grafita e acabamento de usinagem.

Similarmente, na Figura 57, observa-se o aspecto da superfície da amostra no estado sem uso e a terminação da grafita. Todavia, neste caso uma parcela da lamela de grafita ficou retida na interface entre a superfície da amostra e o revestimento de alumínio. Apesar de a terminação ocorrer em mais de um ponto, não se observou nesse caso característica de fechamento da grafita ou microtrincas a nível microscópico.

Figura 57 – Amostra no estado novo, ilustrando grafita na superfície brunida.

A série de figuras a seguir é referente ao regime de ponto morto superior em região de interface com o anel de primeiro canaleta, fim de teste.

Na amostra retirada do bloco do motor testado com etanol (Figura 58), foi possível identificar microtrincas em continuidade com a terminação da grafita próxima à superfície. A forma da grafita deformada sugere deformações plásticas geradas por esforços compressivos na região de desgaste severo do ponto morto superior.

Figura 58 - Região da zona de desgaste preferencial, onde foram observadas microtrincas e compressão da lamela de grafita. Motor testado com Etanol.

A mesma região foi examinada por intermédio de microscópio eletrônico de varredura. Nas imagens a seguir (Figura 59), se observa com maior nitidez a ocorrência da compressão da grafita e microtrincas associadas à mesma. A Figura 59b apresenta em maior ampliação (10.000 vezes) um dos pontos de interface com a superfície onde o aspecto de descontinuidade de fina camada pode ser evidenciado.

Figura 59 – A) Região da zona de desgaste preferencial, onde foram observadas microtrincas e compressão da lamela de grafita. Imagem de MEV. B) Mesma região da figura anterior, detalhando em maior ampliação a descontinuidade com a superfície. Motor testado com Etanol.

Em outra imagem obtida do mesmo cilindro testado com etanol (Figura 60), foi possível observar aspecto semelhante ao anterior, com a deformação da grafita, e camadas finas de material próximas de situação de destacamento.

Figura 60 – A) Região da zona de desgaste preferencial. Partículas finas na eminência do destacamento. B) Com dimensões da partícula. Motor testado com Etanol.

As dimensões aproximadas de possíveis partículas ou lascas que poderiam ser arrancadas total ou parcialmente durante o decorrer do uso foram exemplificadas através da Figura 60b, resultando neste caso em específico em espessuras na ordem de 1,1 e 2,2 μm .

É importante discernir que tais fatias em delaminação podem sofrer deformações plásticas forçadas pelo anel resultando em um destacamento parcial do debri ou mesmo permanecer ligadas ao cilindro por muito tempo, pois é razoável vislumbrar que o processo de propagação das trincas até a remoção de um volume nesta região tende a ser demorado.

Outro ponto que deve ser levado em consideração é a hipótese de deformação plástica secundária na região das bordas das cavidades produzidas por este mecanismo de desgaste, conforme reflexão descrita com o auxílio da Figura 48.

Em outras palavras, raciocina-se que não se trata de um único episódio, mas de uma coleção de eventos com sequencias e interações diversas, cujo resultado resume-se em perda de material do cilindro. A grafita tem papel importante neste contexto, uma vez que pode ser entendida como uma descontinuidade da matriz da microestrutura do ferro fundido.

No motor testado com gasolina, o resultado da análise metalográfica não foi diferente. Como se observa na Figura 61 microtrincas em continuidade com a terminação da grafita próxima à superfície estão presentes.

Figura 61 - Região da zona de desgaste preferencial, onde foram observadas microtrincas próximas à superfície. Motor testado com Gasolina.

A Figura 62 apresenta o aspecto da mesma região quando examinada por intermédio de microscópio eletrônico de varredura. A ocorrência de microtrincas associadas com a forma da grafita foi precedida pela compressão da mesma.

Figura 62 - Região da zona de desgaste preferencial, onde foram observadas microtrincas próximas à superfície. Imagem de MEV. Motor testado com Gasolina.

Considerando o fato de que a Figura 61 (motor testado com gasolina) está na mesma ampliação da Figura 56 (bloco novo), assim como a Figura 58 (motor testado com etanol), e ambas são de regiões similares, isto é, ponto de parada do anel de primeiro canaleta no ponto morto superior, é possível constatar que o dano localizado e caracterizado pela deformação da grafita e pelas microtrincas está presente em ambas as condições de amostras ao fim de teste (etanol e gasolina), e contrastam com a situação de exposição da terminação da grafita obtida na usinagem de brunimento.

Nadel e Eyre relataram no ano de 1978, através de importante publicação da revista Tribology International, resultado similar ao das micrografias aqui apresentadas. [86] Em análise metalográfica de amostra (Figura 63) retirada do cilindro de um bloco de motor de ferro fundido cinzento, na região de desgaste severo, foi caracterizada a estrutura de camadas finas de material deformado, cuja aparência foi denominada de delaminação.

O bloco de motor foi analisado ao final do uso contínuo, cuja presença de trincas transversais concentradas nas pontas da grafita foi registrada e comentada por Nadel e Eyre como uma forma de visualizar como a formação dos debris ocorreria na superfície. [86] Adicionalmente, o mecanismo de abrasão em cilindro de bloco de motor foi também caracterizado pelo mesmo autor através da observação da superfície das amostras em 1978.

Figura 63 – Resultado de trabalho de 1978, relatando a ocorrência de desgaste por delaminação em cilindro de bloco de motor em ferro fundido cinzento. [86]

Figura 64 - Mesma região da Figura 62 anterior, detalhando em maior ampliação as microtrincas da superfície. Imagem de MEV. Motor testado com Gasolina.

A Figura 64 ilustrou em maior ampliação a região detalhada pela Figura 62, cujo mecanismo de desgaste seria similar ao observado há 34 anos.

A Figura 65 A e B foi obtida com o intuito de caracterizar na máxima ampliação possível no equipamento e condições do estudo, a trinca em interface com a superfície na região de desgaste localizado em ponto morto superior. Índícios de ramificações da trinca são perceptíveis através da apreciação da Figura 65b.

Figura 65 – A) Detalhe da microtrinca na superfície do cilindro. Ampliação de 10000x. B) Detalhe da microtrinca na superfície do cilindro. Ampliação de 15000x.

A imagem a seguir (Figura 66), ainda do cilindro do bloco de motor testado com gasolina, apresenta a região onde região de dano mais severo pôde ser observado na amostra, e chama a atenção pela presença de uma partícula na eminência do destacamento.

Figura 66 - Região da zona de desgaste preferencial. Partícula na eminência do destacamento. A imagem da esquerda apresenta as dimensões da partícula. Motor testado com Gasolina.

A Figura 67 apresenta o aspecto da mesma região quando examinada por intermédio de microscópio eletrônico de varredura, evidenciando a ocorrência de fratura de partículas com um ponto comum de nucleação.

Figura 67 - Partícula na eminência do destacamento. Imagem de MEV. Motor testado com Gasolina.

Na Figura 68 obtida em alta ampliação, nota-se a cavidade gerada após o desprendimento de uma ou mais partículas, possivelmente por fadiga de contato. A cratera foi preenchida pelo revestimento protetivo de alumínio aplicado na superfície durante a preparação da amostra para análise.

Figura 68 - Cavidade gerada pelo desprendimento de partícula. Região do PMS. Motor testado com Gasolina.

A mesma região foi fotografada por MEV (Figura 69), cujo padrão irregular da superfície da cavidade indica que a mesma foi resultado do processo de desgaste localizado. Uma partícula similar à observada na Figura 61 e Figura 66 deve ter se destacado.

Figura 69 - Cavidade gerada pelo desprendimento de partícula. Imagem de MEV em alta ampliação. Motor testado com Gasolina.

Com o auxílio do MEV em ampliação de 2500x, uma pequena partícula ao lado direito da mesma imagem (Figura 69) foi caracterizada. Esta partícula está aparentemente solta, e de acordo com o espectro de energia (Figura 70) trata-se de ferro fundido, por conter Fe e Si. A mesma deve ter participado do mesmo processo de desgaste.

Figura 70 – A) Destacamento de pequena partícula de ferro fundido, indicada como “ponto D1” em Figura 69. B) Espectro de energia de partícula indicada na Figura 70. Motor testado com Gasolina.

As microtrincas observadas nas micrografias obtidas na análise por microscopia óptica, assim como por microscopia eletrônica, sugerem que o movimento alternativo do anel de pistão, o qual contém superfície curva (contato não-conforme) no ponto de interface, implica em cargas cíclicas, cuja magnitude é maior no tempo de explosão/expansão (efeito da pressão de combustão).

O carregamento cíclico gera tensões de cisalhamento sub-superficiais, e com o decorrer da ciclagem, fatias de espessura de alguns micrômetros destacariam-se, precedidas por trincas nucleadas a partir de pontos preferenciais concentradores de tensão ou descontinuidades pré-existentes, característicos da grafita lamelar. O modelo proposto na Figura 71 apresenta esquematicamente o processo de desgaste por fadiga de contato (fadiga de superfície ou delaminação), em cilindro de bloco de motor de combustão interna, na região de ponto morto superior, onde o regime de lubrificação é limítrofe.

Figura 71 – Esquema proposto para o desgaste por fadiga de contato (fadiga de superfície ou delaminação), em cilindro de bloco de motor de combustão interna.

A Figura 71b ilustra a ocorrência do micro contato. A superfície do anel tem aproximadamente três vezes a dureza do contra-corpo cilindro. O contato ocorre no final de curso, onde a velocidade tende a zero, e ocorre a inversão do movimento.

O cilindro está constantemente sendo solicitado pela força tangencial (carga de mola) de projeto do anel de compressão, em todo o curso do cilindro. No tempo de escape, e iniciando a admissão, a força de mola do anel será a principal responsável pelo esforço que gera a pressão de contato.

A cada duas voltas do virabrequim ocorre uma explosão, e neste momento a pressão gerada pela combustão será somada à pré-tensão oriunda da força tangencial, aumentando significativamente a pressão de contato.

Retomado o movimento, a superfície é descarregada, com a descida do pistão em direção ao ponto morto inferior. Com uma nova compressão, o ciclo se repete. Define-se então o ciclo, com uma frequência dependente da rotação de trabalho.

Assim, a interface está constantemente sendo tensionada e aliviada, levando à deformação superficial do material e compressão da grafita, podendo ser agravado por corrosão, considerando-se a proximidade com a câmara de combustão (Figura 71c).

A trinca nucleada cresce acompanhando a interface da lamela de grafita (que está modificada em relação ao estado inicial, pela ação da pressão de contato e temperatura), culminando com a fratura e destacamento do debri (Figura 71d).

Este tipo de desgaste, o qual é gerado através da remoção de fragmentos pela propagação de trincas, foi observado de maneira similar por vários autores, tendo sido discutido em 1978 por Nadel e Eyre [86], em 1987 por Goldenstein e Vatauvuk [89], em 1989 por Endo [90]. A fadiga de contato em ferro fundido cinzento lamelar foi também foco de estudo de Terheci, Manory e Herder em 1995 [91], e Sinatora, Neves, Ângelo e Souza [92] em 2007.

O desgaste por delaminação com trincas em continuidade com lamelas de grafita foram observadas em trabalho anterior específico de cilindro de bloco de motor. [86] Analogamente ao observado na presente pesquisa, trincas e camadas

ou “fatias” deformadas foram observadas e atribuídas à ocorrência de tensões superficiais em trabalho, e descritas como evidências que possibilitam visualizar como o processo de fratura dos debrís ocorreria. [86] [93]

O mecanismo de desgaste por fadiga de contato em ferro fundido foi também estudado através de reprodução em laboratório, sendo que em uma das amostras de ferro fundido cinzento lamelar trincas puderam ser relacionadas ao local das lamelas. [92]

Suportado por outro trabalho anterior [91], foi evidenciado nesta pesquisa que os flocos de grafita são sítios de nucleação para as trincas, sendo que o processo de nucleação destas, abaixo da superfície ou mesmo na superfície, é baseado no fenômeno de fadiga e, portanto, além da resistência mecânica, tenacidade à fratura no ferro fundido é desejável em aplicações que envolvem desgaste. A morfologia da grafita é essencial para esta propriedade. [91]

A partir da análise dos dados de caracterização das superfícies desgastadas, com combustível etanol e gasolina, associados à revisão da literatura no que tange regime de lubrificação e atrito do sistema, pode-se descrever o regime de lubrificação predominante em função dos tempos de trabalho do motor e ângulo do virabrequim. O regime limítrofe em PMS foi confirmado pela característica do desgaste, da mesma forma a espessura do filme em PMI, na região do último anel (raspador de óleo) é tão fina quanto aquela do anel de 1º canaleta em PMS.

O maior desgaste na região central do motor testado com etanol deve estar associado além da abrasão, com a pressão de combustão, que é cerca de 10% superior em relação ao motor funcionando com gasolina.

O pistão em meio de curso no tempo de “explosão” é solicitado em maior pressão e por isso com base na literatura já apresentada, o regime pode sair de hidrodinâmico e entrar em regime misto, que é basicamente o regime hidrodinâmico com eventuais quebras de filme ocasionando o contato entre superfícies. No caso do pistão em meio de curso no tempo de “admissão” o regime é predominantemente hidrodinâmico, uma vez que as pressões são baixas.

O ponto crítico do sistema, contudo, se dá no PMS, quando o ângulo do virabrequim está “próximo” de zero graus, pois no momento da explosão a

pressão de combustão eleva-se ao nível máximo, cuja oferta de óleo nesse momento é a mínima possível.

A quantidade de riscos transversais típicos de abrasão observados na caracterização da superfície dos cilindros mostra a participação assídua de partículas no processo global de desgaste. As partículas abrasivas em geral são cerâmicas e de origem externa ao motor, quando não capturadas pelos filtros. Todavia, há também de se considerar aquelas formadas dentro do cilindro e da câmara.

Os debris gerados durante todo o processo são arrastados até o fim de curso do pistão em PMI. Igualmente o desgaste dos anéis exerce contribuição.

A maior pressão de combustão devida ao uso do etanol tem impacto direto na espessura do filme lubrificante e na transição entre regimes de lubrificação, uma vez que foi mostrado que, carga aplicada, velocidade e viscosidade influenciam diretamente a espessura do filme no par tribológico. Sendo assim, o maior desgaste na região central do cilindro para o motor testado com este combustível é coerente, apesar de que a diminuição de rugosidade ocasionada pela alteração topográfica foi significativa e chamou a atenção, especialmente por tratar-se de uma região onde o regime de lubrificação na teoria seria unicamente hidrodinâmico. No entanto, é preciso considerar que o *hardware* é exatamente o mesmo para ambas as condições. Isto é, o motor fisicamente não muda, é o mesmo conjunto mecânico independente do combustível, afinal esse é o conceito da tecnologia *Flex-Fuel* (veículo que pode ser operado em qualquer proporção de mistura gasolina/etanol). Isto significa que, a geometria dos componentes, os materiais, a textura de brunimento, a carga tangencial de mola dos anéis, e por fim as folgas existentes entre pistão e cilindro são em tese as mesmas, mas a pressão de combustão e, por conseguinte, a carga, não é. Da mesma forma, as reações químicas são diferentes, portanto a viscosidade do lubrificante também pode mudar durante o trabalho e dependendo do combustível alimentado.

Ao final, é esperado que a espessura do filme lubrificante e o regime de lubrificação sejam diferentes dependendo do combustível utilizado. Mais do que isso, é preciso considerar que partículas estão presentes no processo de desgaste e no meio interfacial.

O desgaste corrosivo certamente também tem sua contribuição no processo global, principalmente considerando as descobertas a partir das análises por estereoscopia e MEV da superfície, onde ficou claro o aspecto corrosivo na região do ponto morto superior em interface com a câmara de combustão.

No presente estudo, apesar da maior severidade representada pelo uso do etanol, o resultado global de desgaste localizado na região de inversão do movimento não representou uma anormalidade, pelo contrário, esteve em níveis razoáveis e abaixo do esperado, tanto para gasolina quanto para etanol, considerando-se resultados anteriores da literatura para motores de ignição por faísca. [67], [68]

Os resíduos de combustão gerados pela queima da gasolina participam do processo de desgaste na região do ponto morto superior com uma parcela de abrasão, a qual teria sido evidenciada pela sequência de sulcos transversais detalhada na análise por microscópio de varredura. Importante nesse momento lembrar que, na região do ponto morto superior o regime é limitrofe e a oferta de lubrificante é mínima, onde o efeito de abrasão pode ser potencializado.

Os resultados desta pesquisa mostraram ainda que, os segmentos do conjunto anel de terceiro canaleta representam um ponto de atenção quando se discute o atrito e o desgaste severo localizado no sistema anel-cilindro. Isso porque a região de atuação destes representou o maior desgaste observado. Na verdade não é algo que surpreende se considerarmos que a espessura destes segmentos é um terço daquela do anel de primeiro canaleta, sua ponta curva (contato não conforme) e a alta dureza do revestimento de cromo. A carga de mola exercida contra o cilindro em área aparente pequena pode explicar o maior desgaste. Os aspectos relacionados ao dimensionamento deste componente não foram discutidos na pesquisa, uma vez que o foco é cilindro, mas aparentemente existe uma oportunidade de aprofundamento visando a redução de perdas por atrito.

5 CONCLUSÕES

A conclusão desta pesquisa é apenas um pequeno passo após muitos que já se deram por plêiades de estudiosos do tema, e só foi possível graças à ajuda incondicional de inmensuráveis colaboradores. A utilidade científica para benefício em estudos do porvir é o que se almeja.

A tentativa de abordagem, observação, busca do entendimento e descrição do comportamento metalúrgico e tribológico do cilindro de um motor de combustão interna com bloco de ferro fundido cinzento, quando submetido a condições extremas de trabalho, seja com combustível etanol ou gasolina, foi objeto de estudo. As proposições obtidas nas condições da pesquisa são listadas a seguir.

- Acúmulo de resíduos de carbonização, depositados no topo do cilindro (interface com a câmara de combustão) e entre anéis de pistão, foi observado no motor testado com gasolina.
- O desgaste máximo em região de ponto morto superior (PMS), na área de interface com primeiro anel, foi ligeiramente superior para o motor testado com gasolina em relação ao etanol.
- O desgaste abrasivo pontual localizado em região de PMS do cilindro testado com gasolina, no ponto de interface com primeiro anel, pode ter sido influenciado pelos resíduos de carbonização.
- Ao final do teste de durabilidade, seja com combustível gasolina, seja com etanol, o desgaste observado foi de baixa magnitude, compatível ou inferior ao encontrado na literatura para a região de PMS.
- A região de ponto morto inferior (PMI), na área de interface com o conjunto anel de óleo, apresentou o maior desgaste localizado. As depressões topográficas (“calotas de desgaste”) formadas pelos segmentos do anel de terceiro canaleta são nítidas e de geometria definida para ambos os casos de combustível.
- Na região de PMI, o desgaste localizado do motor alimentado com etanol foi maior em relação ao ocorrido no teste com gasolina.

- Ao final do teste, as ranhuras de brunimento remanescentes são identificáveis através de exame visual, sendo que a textura sobeja ao longo de todo o comprimento do cilindro, exceto em pontos de desgaste localizado, evidenciado pelo exame em microscópio estereoscópico.
- Sinais de corrosão na zona de interface com a câmara de combustão, observados em destaque no cilindro que operou no motor alimentado com etanol, devem estar relacionados à maior corrosividade deste combustível.
- O maior desgaste localizado produzido pelo anel de óleo não afetou a durabilidade e desempenho dos motores no escopo do estudo, mas indica um item de atenção no que tange redução de perdas por atrito.
- Na região do meio do cilindro, a redução de rugosidade de núcleo R_k foi razoável e similar para ambos os cilindros analisados, sendo o desgaste ligeiramente superior para o caso do motor testado com etanol. Este fato é atribuído à influência da pressão de combustão, que é maior para o motor que operou com etanol.
- A região de PMI apresentou redução mais acentuada de parâmetro R_k em relação ao estado inicial, para ambos os motores. Esta redução foi atribuída à lubrificação limítrofe, associada à pressão de contato exercida pelos segmentos do anel de óleo.
- A redução de rugosidade de núcleo R_k na região de PMI ocorreu com maior severidade para o teste realizado com etanol. Esta maior severidade foi atribuída à influência da pressão de combustão, associada à lubrificação limítrofe.
- O desgaste verificado no anel de pistão de primeiro canaleta do motor testado com etanol foi aproximadamente o dobro do verificado no motor alimentado com gasolina.
- Apesar do desgaste, ao final do teste, a espessura de cromo remanescente indica que o anel de pistão de primeiro canaleta não chegou à metade de sua vida útil no que tange desgaste de camada de cromo.
- Os mecanismos de desgaste ocorridos na região de ponto morto superior do motor que operou com gasolina são similares aos observados no motor que funcionou com etanol, porém, em magnitudes diferentes entre si.

- Na região de PMS o desgaste foi caracterizado pelos mecanismos de desgaste por deslizamento (inclui adesão), abrasão, fadiga de contato e corrosão, os quais ocorrem de maneira conjugada. Nesta região, o regime de lubrificação é limítrofe.
- Em região de meio do cilindro, houve predominância de desgaste abrasivo ao longo do curso, notáveis até o fim de curso em PMI. Nesta região de meio, o regime de lubrificação é hidrodinâmico com eventuais passagens pelo regime misto, que é basicamente o regime hidrodinâmico com eventuais quebras de filme ocasionando o contato momentâneo entre superfícies e/ou a potencialização do desgaste abrasivo.
- Além do mecanismo de desgaste abrasivo, o desgaste por fadiga de contato foi caracterizado em região de desgaste preferencial em PMS.
- A fratura e eventual delaminação de partículas pelo mecanismo de fadiga de contato são precedidos pela ocorrência da compressão da grafita e microtrincas associadas à mesma.
- O mecanismo de desgaste por delaminação com trincas em continuidade com lamelas de grafita são influenciados pela morfologia da grafita, sendo os resultados da caracterização metalúrgica compatíveis com a literatura.
- O modelo proposto neste estudo considera que as cargas cíclicas exercidas pelo contato do anel de pistão (cujas magnitude é maior no tempo de explosão/expansão), influencia a compressão das lamelas e nucleação de trincas a partir de pontos preferenciais concentradores de tensão ou descontinuidades pré-existentes, característicos da grafita lamelar, no processo de dano por delaminação ou fadiga de contato.

A complexidade da pesquisa exigiu observação crítica e por meios diversos, envolveu a consideração de diferentes fatores e mecanismos conjugados. Requereu uma extensa revisão bibliográfica, envolvendo diferentes áreas de concentração de conhecimento, como mecânica automotiva, metalurgia e ciência dos materiais, tribologia, engenharia dimensional, engenharia química, legislação, mecânica de falhas, processos de produção (usinagem, fundição), técnicas de caracterização e preparação de amostras.

6 REFERÊNCIAS

- [1] A. P. SLOAN JÚNIOR, Meus anos com a General Motors, São Paulo: Negócio Editora, 1963.
- [2] “GENERAL MOTORS,” General Motors, 2011. [Online]. <http://www.chevrolet.com/100-years>. [Acesso em 20 Novembro 2011].
- [3] ANFAVEA, “Anuário Estatístico da Indústria Automobilística Brasileira,” ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, São Paulo, 2011.
- [4] ANP, “ANP,” 2011. [Online]. <http://www.anp.gov.br>. [Acesso em 10 Dezembro 2011].
- [5] F. CORRADINI, *Efeito da temperatura do líquido de arrefecimento na produção de emissões poluentes de motor de ignição por faísca*, São Paulo, SP: Universidade de São Paulo, 2005.
- [6] F. STERLING, *Internal Combustion Engine Manual*, vol. 1, Washington, D.C.: Beresford Printer, 1911.
- [7] P. PENIDO FILHO, Os motores de combustão interna, Belo Horizonte: Lemi, 1991.
- [8] PETROBRÁS, “Site da Petrobrás Distribuidora,” 2012. [Online]. www.br.com.br. [Acesso em 06 Janeiro 2012].
- [9] K. BERGSTRÖM, S. A. MELIN e D. JONES, *ECOTEC Turbo Biopower Engine from GM Powertrain - Utilizing the Power of Nature's Resources*. In: *Internationales Wiener Motorensymposium*, Viena: Austrian Society of Automotive Engineers , 2007.

- [10] J. R. SODRÉ e G. T. C. PINTO, *Caracterização de Performance e Emissões de um Motor para Concentrações Variáveis de Gasolina e Etanol Hidratado*, São Paulo, SP: Society of Automotive Engineers, 2006.
- [11] ABNT, *NBR6601 - Veículos rodoviários automotores leves - Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.
- [12] Robert Bosch GmbH, *Gasoline Engine Management*, Cambridge, MA: Bentley Publishers, 2006.
- [13] P. H. OGATA, D. DOS SANTOS FILHO, L. P. NISHIKAWA, L. OKAZAKI e H. GOLDENSTEIN, *A Study on the Camshaft Lobe Microstructure Obtained by Different Processing*. SAE Paper 2012-36-0499., São Paulo: Society Of Automotive Engineers, 2012.
- [14] National Academy of Sciences, *Assessment of Fuel Economy Technologies for Light-Duty Vehicles*, Washington, DC: National Academy of Sciences, 2011.
- [15] K. Holmberg, P. Andersson e A. Edermir, *Global energy consumption due to friction in passenger cars*, Vols. %1 de %2p. 221-234, Tribology International, 2011.
- [16] P. M. F. GONÇALVES, *Concepção de um motor de combustão interna para um veículo automóvel de extra-baixo consumo de combustível*, Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2008.
- [17] R. I. TAYLOR, *Lubrication, Tribology & Motorsport*, Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 2002.
- [18] "BOSCH," 2012. [Online]. <http://www.bosch.com.br>. [Acesso em 01 Fevereiro 2012].
- [19] T. SUGA e Y. HAMAZAKI, *Development of honda flexible fuel vehicle*, San Francisco, California: Society of Automotive Engineers International, 1992.

- [20] K. VOLLRATH, *Motorguss werden die werkstoffarten neu gemischt?*, Kontruieren + Giessen, v.28, n.2, 2003.
- [21] W. L. GUESSER, *Propriedades mecânicas dos ferros fundidos*, São Paulo: Blucher, 2009.
- [22] J. SCHMIDT, *Future trends in engines*, Joinville, SC: Tupy, 2007.
- [23] F. MOCELLIN, *Desenvolvimento de tecnologia para brunimento de cilindros de blocos de motores em ferro fundido vermicular*, Florianópolis, 2007.
- [24] P. KODALL, P. HOW e W. McNULTY, *Methods of improving cylinder liner wear. SAE Paper 2000-01-0926*, SAE Society of Automotive Engineers, 2000.
- [25] M. B. TKAYA, S. MEZLINI, M. E. MANSORI e H. ZAHOUANI, *On some tribological effects of graphite nodules in wear mechanism of SG cast iron: finite element and experimental analysis. Wear 267 (2009) 535-539*, Elsevier, 2009.
- [26] ISO, *ISO 13565-2 Geometrical Product Specifications - Surface Texture: Profile method; surfaces having stratified functional properties - Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve*, ISO - International Organization of Standardization, 1996.
- [27] PHOTONITA, "Photonita Metrologia Óptica," Photonita Metrologia Óptica, 2012. [Online]. www.photonita.com.br. [Acesso em 06 Janeiro 2012].
- [28] L. SABRI, S. MEZGHANI, M. E. MANSORI e H. ZAHOUANI, *Multiscale study of finish-honing process in mass production of cylinder liner. Wear 271 (2011) 509-513*, Elsevier, 2011.
- [29] H. GOLDENSTEIN, J. VATAVUK, R. FUOCO, E. ALBERTIN e A. SINATORA, *Uma contribuição para o estudo da fratura frágil em ferro fundido nodular ferrítico*, São Paulo, SP: Metalurgia e Materiais, 1986.

- [30] H. GOLDENSTEIN e M. S. F. d. LIMA, *Desenvolvimento Microestrutural de ferro fundido branco e vermicular com tratamento de superfície por laser*, Soldagem e Inspeção, 2005.
- [31] H. KEMPERS, *Stahlwerkskokillen aus gusseisen mit kugelgraphit*, Gisseri, 1966.
- [32] S. HASSE, *Duktiles gusseisen*, Berlin: Schiele & Schön, 1996.
- [33] W. L. GUESSER, I. MASIERO, E. MELLERAS e C. S. CABEZAS, *Thermal conductivity of gray iron and compacted graphite iron used for cylinder heads*, Revista Matéria, 2005.
- [34] E. M. SERBINO, *Um estudo dos mecanismos de desgaste em disco de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar*, São Paulo: Escola Politécnica Universidade de São Paulo, 2005.
- [35] A. B. d. SOUZA SANTOS e C. H. C. BRANCO, *Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares*, São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989.
- [36] I. C. H. HUGHES, *A review of solidification of cast irons with flake graphite structures.*, London: The iron and steel institute, 1968.
- [37] J. VATAVUK, *Notas de aula e comunicação pessoal.*, 2008.
- [38] A. PIESKE, F. CHAVES, L.M e J. F. REIMER, *Ferros fundidos cinzentos de alta qualidade*, Joinville: Soc. Ed. Tupy, 1974.
- [39] D. M. STEFANESCU, *ASM HANDBOOK*, vol. 15, ASM International, 1988.
- [40] R. B. d. ANDRADE, *Parâmetros térmicos e estruturais em ferros fundidos cinzento e nodular solidificados em moldes de areia e unidirecionalmente*, Campinas: Universidade Estadual de Campinas UNICAMP, 2009.
- [41] J. VAN EEGHEM, *L'application de l'analyse thermique en fonderie de fonte progres et developments recents*, 1976.

- [42] H. GOLDENSTEIN, *Notas de aula e comunicação pessoal.*, 2011.
- [43] ISO, *ISO 945-1 Microstructure of cast irons - Part 1: Graphite classification by visual analysis*, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 2008.
- [44] D. CRAIG, M. HORNUNG e T. McCLUHAN, *Gray iron*, vol. 15, ASM International, 1988.
- [45] A. SINATORA, *Tribologia: Um resgate histórico e o estado da arte*, São Paulo, SP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- [46] H. P. JOST, *Tribology: How a word was coined 40 years ago*, Londres: Tribology & Lubrication Technology, 2006.
- [47] K. C. LUDEMA, *Friction, Wear and Lubrication: A Textbook in Tribology*, Hardcover, 1996.
- [48] M. B. GARCIA, *Características do desgaste de anéis de pistão com diferentes tecnologias de tratamentos superficiais*, São Paulo, SP: IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2003.
- [49] I. M. HUTCHINGS, *Tribology - Friction and wear of engineering materials*, London: Arnold, 1992.
- [50] H. S. CHENG, *Lubrication Regimes*. ASM Handbook volume 18 - Friction, Lubrication, and Wear Technology, ASM International, 1992.
- [51] R. C. ROSENBERG, *General friction considerations for engine design. General Motors Research*, Detroit: SAE Society of Automotive Engineers, 1983.
- [52] J. F. ARCHARD, *Appl. Phys.* 24, 1953.
- [53] K. H. ZUM GAHR, *Microstructure and wear of materials*, USA: Elsevier, 1987.

- [54] J. VATAVUK, *Mecanismo de desgaste em anéis de pistão e cilindros de motores de combustão interna*, São Paulo: USP, 1994.
- [55] J. A. GREENWOOD e J. B. P. WILLIAMSON, "Contact of nominally flat surfaces," *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vols. %1 de %2295, N. 1442, 1966.
- [56] A. SINATORA, *Notas de aula*, São Paulo, 2010.
- [57] J. McCOOL, *Comparison of models for the contact of rough surfaces*, vol. 107, 1985.
- [58] W. A. GLAESER e S. J. SHAFFER, *Contact Fatigue*, vol. 19, ASM International, 1996.
- [59] S. M. RHODE, *A mixed friction model for dynamically load contacts with application to piston ring ubrication*, New York: American Society of Mechanical Engineers, 1980.
- [60] E. TOMANIK e F. E. B. NIGRO, *Piston ring pack and cylinder wear modelling*, São Paulo: Society of Automotive Engineers, 2001.
- [61] C. Technology, "Circle Track Engine Technology," 2012. [Online]. <http://www.circletrack.com/engine tech/index.html>. [Acesso em 06 Janeiro 2012].
- [62] E. B. GmbH, "Eisenwerk Brühl GmbH," [Online]. <http://www.ebbruehl.com>. [Acesso em 06 Janeiro 2013].
- [63] K. Mollenhauer e H. TSCHOEKE, *Handbook of Diesel Engines*, Heidelberg GERMANY: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [64] M. Priest e C. Taylor, *Automobile engine tribology - approaching the surface*, Amsterdam: Wear 241, Elsevier, p.143-147 , 2000.
- [65] M. Priest, *The Wear and Lubrication of Piston Rings, Ph.D. Thesis*, Leeds: Univ. Leeds, 1996.
- [66] P. Ogata, *Comunicação pessoal 2012*, São Paulo, Brasil, 2012.

- [67] E. W. SCHNEIDER e D. H. BLOSSFELD, *Effect of break-in and operating conditions on piston ring and cylinder bore wear in spark-ignition engines*. SAE Paper 2004-01-2917, SAE Society of Automotive Engineers, 2004.
- [68] A. GANGOPADHYAY, *Development of a piston ring-cylinder bore wear model*. SAE Paper 2000-01-1788, SAE Society of Automotive Engineers, 2000.
- [69] J. VATAVUK e V. DEMARCHI, *The effect of the addition of hard particles on the wear of liner and ring materials running with high sulfur fuel*. SAE Paper 950527, São Paulo: Society of Automotive Engineers, 1995.
- [70] T. SUDARSHAN e S. BHADURI, *Wear in cylinder liners*. Wear 91 (1983) 269-279, Elsevier, 1983.
- [71] A. R. MOREIRA, Z. PANOSSIAN, G. M. BRAGAGNOLO, C. A. LINO DOS SANTOS, M. C. GANDUR e E. MONTEIRO DE SOUZA, *Corrosividade do etanol anidro, do etanol hidratado e da mistura combustível E25*. Intercorr2010_036, Fortaleza, CE, Brasil: INTERCORR 2010, 2010.
- [72] C. A. LINO DOS SANTOS, Z. PANOSSIAN e G. d. SOUZA PIMENTA, *Estudos de corrosão em meio de etanol*. Intercorr2010_398, Fortaleza, CE, Brasil: INTERCOOR 2010, 2010.
- [73] S. T. G. AMARAL, *Corrosão de vários materiais metálicos em álcool etílico*. Dissertação de mestrado em engenharia da energia, metalurgia e materiais., Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1984.
- [74] M. PRIEST, D. DOWSON e C. TAYLOR, *Predictive wear modelling of lubricated piston rings in a diesel engine*. Wear 231 (1999) 89-101, Elsevier, 1999.
- [75] E. ABBOTT e F. FIRESTONE, *Specifying surface quality*. Mech Engineering 55 (1933) 569-572, Mech Engng, 1933.
- [76] A. SREENATH e N. RAMAN, *Mechanism of smoothing of cylinder liner surface during running-in*. Tribology International (1976) 55-62, Elsevier, 1976.
- [77] K. STOUT e T. SPEDDING, *The characterization of internal combustion engine bores*. Wear 83 (1982) 311-326, Elsevier, 1982.

- [78] P. PAWLUS, *Change of cylinder surface topography in the initial stage of engine life. Wear* 209 (1997) 69-83, Elsevier, 1997.
- [79] R. KUMAR, S. KUMAR, B. PRAKASH e A. SETHURAMIAH, *Assessment of engine liner wear from bearing area curves. Wear* 239 (2000) 282-286, Elsevier, 2000.
- [80] K. STOUT e E. DAVIS, *Surface topography of cylinder bores - The relationship between manufacture, characterization and function. Wear* 95 (1984) 111-125, Elsevier, 1984.
- [81] J. KELLER, V. FRIDRICI, P. KAPSA e J. HUARD, *Surface topography and tribology of cast iron in boundar lubrication., Tribology International* 42 (2009) 1011-1018, 2009.
- [82] E. BECKER e K. LUDEMA, *A qualitative empirical model of cyinder bore wear. Wear* 225 (1999) 387-404, Elsevier, 1999.
- [83] E. TOMANIK, *Friction and wear bench tests of different engine liner surfaces. Tribology International* 41 (2008) 1032-1038, Elsevier, 2008.
- [84] E. F. FINKIN, *Speculations on the theory of adhesive wear. Wear* 21 (1972) 103-114, Elsevier, 1972.
- [85] E. KORSHID e A. M. NAWWAR, *A review of the effect of sand dust and filtration on automobile engine wear. Wear* 141 (1991) 349-371, Elsevier, 1991.
- [86] J. Nadel e T. Eyre, *Cylinder liner wear in low speed diesel engines, TRIBOLOGY International*, 1978.
- [87] A. R. RIAHI e A. T. ALPAS, *Wear map for grey cast iron. Wear* 255 (2003) 401-409, Elsevier, 2003.
- [88] J. M. HAN, R. ZHANG, O. O. AJAYI, G. C. BARBER, Q. ZOU, L. GUESSOUS, D. SCHALL e S. ALNABULSI, *Scuffing behavior of gray iron and 1080 steel in reciprocating and rotational sliding. Wear* 271 (2011) 1854-1861, Elsevier, 2011.
- [89] J. VATAVUK e H. GOLDENSTEIN, *Aços Hadfield contendo carbonetos de Nb*

e Ti, Rio de Janeiro: ABM Associação Brasileira de Metais, 1987.

- [90] M. ENDO, *Effects of graphite shape, size and distribution on the fatigue strength of spheroidal graphite cast irons. Japan Society Materials Science 38 (1989) 1139-1144*, Japan: Japan Society of Materials Science, 1989.
- [91] M. TERHECI, R. R. MANORY e J. H. HERDER, *The friction and wear of automotive grey cast iron under dry sliding conditions. Part 2. Friction and wear-particle generation mechanisms and their progress with time. Wear 185 (1995) 119-124*, Elsevier, 1995.
- [92] J. C. K. Neves, C. M. Ângelo, R. M. Souza e A. Sinatora, *Effect of mechanically imposed stresses on the contact fatigue resistance of two cast irons with high hardness matrix. Wear, p. 700-706*, London: Elsevier, 2007.
- [93] T. EYRE, R. ILES e D. GASSON, *Wear characteristics of flake and nodular graphite cast iron. Wear13 (1969) 229-245*, Elsevier, 1969.
- [94] P. MARQUES DA SILVA, *Desenvolvimento de metodologia para a determinação de álcoois superiores em álcool combustível, utilizando a técnica de cromatografia líquida de alta eficiência com detecção eletroquímica*, Araraquara, SP: Universidade Estadual Paulista, 2009.
- [95] C. A. X. MARQUES, L. S. G. TEIXEIRA, L. A. M. PONTES, E. V. SOBRINHO, P. R. B. Guimarães, J. F. PADILHA e R. F. VIANNA, *Avaliação da adição de aditivos do tipo "Booster" de octanagem no poder antidetonante da gasolina automotiva brasileira. In: 2º Congresso brasileiro de P&D em petróleo e gás., Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.*
- [96] G. S. LOSSO, *Detecção de falhas de motores de combustão interna a pistão*, São José dos Campos, SP: ITA - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2007.
- [97] A. RAMAN, *Materials Selection and Applications in Mechanical Engineering*, Industrial Press, 2007.

- [98] B. J. TAYLOR e T. S. EYRE, *A review of piston ring and cylinder liner materials. Tribology International* (1979) 79-89, Elsevier, 1979.
- [99] V. BULATOV e D. VEDERNIKOV, *On the influence of fatigue on machine part wear. Wear* (1993) 167-172, Elsevier, 1993.
- [100] D. SCOTT, A. I. SMITH, J. TAIT e G. R. TREMAIN, *Materials and Metallurgical aspects of piston ring scuffing - a literature survey. Wear* (1975) 293-315, Elsevier, 1975.