

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**MECANISMOS DE DESGASTE, HISTÓRIA TÉRMICA E CICLO DE VIDA DE
COMPONENTES DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DE
AEROMODELO**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

como parte dos requisitos para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÉRIKA CHRISTIANE CORREIA DE LIMA

ORIENTADOR:

PROF. DR. JOÃO TELÉSFORO NÓBREGA DE MEDEIROS

Natal, Dezembro - 2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**MECANISMOS DE DESGASTE, HISTÓRIA TÉRMICA E CICLO DE VIDA DE
COMPONENTES DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DE
AEROMODELO**

ÉRIKA CHRISTIANE CORREIA DE LIMA

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.**

PROF. DR. JOÃO TELÉSFORO NÓBREGA DE MEDEIROS
Orientador

BANCA EXAMINADORA

PROF. DR. JOÃO TELÉSFORO NÓBREGA DE MEDEIROS
Presidente

PROF. DR. ROBERTO SILVA DE SOUZA
(EXAMINADOR EXTERNO - IFRN)

PROF. DR. ADEMIR OLIVEIRA DA SILVA
(EXAMINADOR INTERNO – UFRN)

PROF. DR. EFRAIN PANTALEON MATAMOROS
(EXAMINADOR INTERNO – UFRN)

“A experiência mostra que os homens são governados por aquilo que costumam ver e fazer, a ponto de mesmo as melhorias mais simples e óbvias nas ações mais comuns serem adotadas com hesitação, relutância e lentidão”.

Alexander Hamilton, 1971.

DEDICATÓRIA

À minha mãe, conhecida como Dona J6, pelo exemplo de paciência, superaç6o, abdicando da vida profissional para se dedicar aos filhos e ao marido, uma mulher de car6ter e fibra que me ensinou a import6ncia da educaç6o, do respeito e do significado “fam6lia”. Ofereço este trabalho em agradecimento aos ensinamentos que a senhora me proporcionou.

AGRADECIMENTOS

A **Deus** pela coragem, perseverança nos momentos mais difíceis deste projeto.

Aos meus pais **Joselita Medeiros Correia de Lima** e **Edmundo Correia de Lima** pela educação e oportunidade de estar realizando mais um objetivo da minha vida.

Aos meus irmãos que me apoiaram em todas as horas de alegria e tristeza durante este trabalho.

Ao meu querido esposo **Ithamar Dantas Cortez Neto** e ao meu filho **Heitor de Lima Alves Cortez**, pelo apoio e carinho que serviram de essência para a conclusão deste trabalho.

A minha querida sogra **Maria Lucinete Alves Cortes** pelos momentos em que precisei deixar aos seus cuidados meu filho para a conclusão deste trabalho.

Ao professor Dr. Engenheiro **João Telésforo Nóbrega de Medeiros**, pela concepção deste trabalho, por acreditar que eu poderia realizar este trabalho, mesmo sendo formada em outra área, foi o grande responsável por esta dissertação.

À Dra. **Rosângela Lula de Medeiros** por ter tratado da minha saúde e do meu filho sempre que precisei e principalmente pelo apoio carinhoso digno de uma conterrânea de Currais Novos.

Aos meus colegas **Engenheiro Winston Miranda Paiva**, **Kleber Matias Lima da Costa** e **Antonio Medeiros** pela amizade, discussão, desenvolvimento da bancada e suporte nos ensaios com seus aperfeiçoamentos.

Ao colega de trabalho, **Engenheiro Darlan Emanuel S. dos Santos** pelas horas de pesquisa no Laboratório de Ensaios de Materiais – CTGAS-ER realizando análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

A colega de trabalho, **Tecnóloga Andréa Santos Pinheiro** pelas horas de pesquisa no Laboratório de Ensaios de Materiais – CTGAS-ER realizando análise por Difração de Raios-X (DRX)

Às reuniões científicas realizadas pelo **Grupo de Estudos de Tribologia**, às segundas-feiras à noite que deram base ao meu espírito científico, lamentando que não pude assisti-las sempre.

Ao antigo responsável pelo Laboratório de Materiais – CTGAS-ER, Dr. Engenheiro **Francisco Antonio Vieira** pela disponibilidade em fazer uso de alguns equipamentos.

Ao programa de Pós-Graduação pela quebra de paradigmas acolhendo egressos de outros cursos.

RESUMO

Foi desenvolvida uma metodologia de ensaio que considerou a *variação da temperatura* e a *microscopia eletrônica de varredura* um método de quantificar e qualificar respectivamente a evolução do desgaste em três máquinas 46 LA de motor de combustão interna de dois cursos, com uma capacidade de cilindro de 7,64 cm³, de 23,0 milímetros de diâmetro e de curso de 18.4 milímetros, RPM de serviço de 2.000 a 16.000 rpm, potência de 1,2 HP, peso de 272 gramas. Os componentes do motor investigados foram: (1) cabeça do motor (liga Al-Si), (2) pistão (liga Al-Si) e (3) pino do pistão (Aço AISI 52100). Os ensaios foram realizados em uma bancada, os motores 1 e 2 foram ensaiados sem carga, e o motor 3 foi adicionado a dois ensaios um ventilador com velocidade do vento que variava entre 8,10 m/s a 11,92 m/s, com a finalidade de identificar e comparar o comportamento dinâmico do motor com os motores ensaiados sem carregamento. As temperaturas próxima ao contato e ambiente foram medidas através de dois termopares tipo K conectados ao dispositivo de ensaio e registradas por um microcomputador com software de aquisição de dados, controle e monitoramento dos parâmetros durante os ensaios. A superfície desgastada dos componentes foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise-EDS. O estudo foi complementado por ensaios de desvio de forma e medição de massa. A variação de temperatura associou-se à morfologia dos óxidos e os mecanismos de desgastes evidenciados foram discutidos correlacionando-se a solicitação termomecânica às respostas da caracterização dos materiais.

ABSTRACT

We developed an assay methodology that considered the temperature variation and the scanning electron microscopy as a method to quantify and characterize respectively the consumption evolution in three 46 LA machines, with internal combustion and two-stroke engines, 7.64 cm³ cylinder capacity, 23.0 millimeters diameter and 18.4 millimeters course, RPM service from 2.000 to 16.000 rpm, 1.2 HP power, and 272 grams weight. The investigated engines' components were: (1) head of the engine (Al-Si alloy), (2) piston (Al-Si alloy) and (3) piston pin (AISI 52100 steel). The assays were carried out on a desktop; engines 1 and 2 were assayed with no load, whereas in two assays of engine 3 we added a fan with wind speed that varied from 8.10 m/s to 11.92 m/s, in order to identify and compare the engine dynamic behavior as related to the engines assayed with no load. The temperatures of the engine's surface and surroundings were measured by two type K thermopairs connected to the assay device and registered in a microcomputer with data recording and parameters control and monitoring software, throughout the assays. The consumed surface of the components was analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and microanalysis-EDS. The study was complemented with shape deformation and mass measurement assays. The temperature variation was associated with the oxides morphology and the consumption mechanisms were discussed based on the relation between the thermal mechanical effects and the responses of the materials' characterization.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
	1.1 Objetivos	4
	1.1.2 Objetivos Gerais	4
	1.1.3 Objetivos Específicos	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
	2.1 Aspectos Tribológicos de Motores de Combustão Interna	6
	2.2 Desgaste e Atrito	9
	2.3 Principais Mecanismos de Desgaste	12
	2.4 Teoria Geral e Mecanismo do Desgaste Oxidativo	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	24
	3.1 Fundamentação do Método	24
	3.2 Caracterização dos Materiais	24
	3.2.1. Considerações Metodológicas sobre Aspectos Triboquímicos dos Materiais da Câmara de Combustão	24
	3.2.2. Identificação dos Componentes Funcionais Investigados no Motor	25
	3.3 Metodologia dos Ensaio	26
	3.3.1 Procedimento Experimental	29
	3.4 Caracterização do Desgaste	40
	3.4.1 Zonas selecionadas de Componentes do Motor para Análise do Desgaste	41
	3.4.2 Equipamentos Utilizados no Desenvolvimento Experimental	43
	3.5 Análise Qualitativa dos Principais Erros	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
	4.1 Relação entre Morfologia dos Óxidos e Variação de Temperatura	46
	4.2 Morfologias dos Óxidos no Cabeçote do Motor e na Cabeça do Pistão – Motores 2 e 3 durante os números de ciclos	66
	4.3 Temperatura, Concentração O/N, Óxidos constitutivos do Desgaste em componentes do motor	75
	4.4 Resposta da História Térmica dos Motores e das Relações Estatísticas dos Valores dos Parâmetros Tribológicos - Variação da Temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e Número de Ciclos	78
	4.4.1. Ensaio dos motores – caracterização quantitativa	78
	4.5 Resposta da Velocidade Angular e das Relações Estatísticas dos Valores dos Parâmetros Tribológicos – Rotação por Minuto e Número de Ciclos	82
	4.5.1. Ensaio dos motores	82
	4.6 Relação entre a cilindridade e o número de ciclos	84

4.6.1. Ensaio dos motores – caracterização quantitativa	84
4.7. Medição de massa	85
4.7.1. Ensaio dos motores – caracterização quantitativa	85
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	89
5.1. Conclusões	89
5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	91
6 REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO	92
ANEXO I	100
A.1.Princípios de Funcionamento dos Motores de Combustão Interna	100
A.1.1. Ciclo de Trabalho	102
A.1.2. Produção de Emissões em Motores de Combustão Interna	105
A.1.3 Temperatura Adiabática e Concentração O/N constitutivos do Desgaste em componentes do motor	109
ANEXO II	114
A.2. Análise do Ciclo de Vida em Motores de Combustão Interna	114
A.2.1. Conceitos Básicos	114
A.2.2. Histórico da ACV	115
ANEXO III	117
A.3. Métodos para Diagnosticar o Desperdício de Energia em Motores de Combustão Interna	117
A.3.1. Exergia, Anergia e Entropia	117
A.3.2. Eficiência Energética e Exergética	124
ANEXO IV	126
A.4. Desgaste em Motores de Combustão Interna	126
A.4.1. Desgaste dos Principais Componentes de Motores de Combustão Interna	126
APÊNDICE I	1
Atlas de falha de um motor ICE 1,2 HP - caracterização da evolução do desgaste ao longo da vida de três componentes detectada por Microscopia Óptica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em três motores ensaiados	
APÊNDICE II	21
Atlas de falha de um motor ice 1,2 HP parte interna do cabeçote do motor	
APÊNDICE III	53
Atlas de falha de um motor ice 1,2 HP da cabeça do pistão	
APÊNDICE IV	83
Atlas de falha de um motor ice 1,2 HP do pino do pistão	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	O canal de medida	2
Figura 2	Comportamento das variáveis pressão e temperatura	6
Figura 3	(a) Pistão típico de motor de combustão interna	7
	(b) Distribuição de tensões térmicas típicas de um pistão de motor de combustão interna	7
Figura 4	Osculação do contato	9
Figura 5	Exemplos de três processos de desgaste abrasivo	14
Figura 6	Possíveis Mecanismos de Erosão	16
Figura 7	Mudanças na configuração do contato como resultado do desgaste para uma esfera deslizando sobre um plano	18
Figura 8	Diagrama mostrando processo de desgaste por deslizamento em função da temperatura	20
Figura 9	Taxa de desgaste em ensaio de pino-sobre-disco com pino de aço 0,5 %C e disco de aço ferramenta; velocidade de 1 m/s	21
Figura 10	Mecanismo de desgaste oxidativo para altas velocidades	23
Figura 11	Componentes de um dos motores de combustão interna investigados e respectivas texturas remanescentes da manufatura	26
Figura 12	Diagrama esquemático do aparato experimental	28
Figura 13	Adaptações na bancada para realização dos ensaios nos motores 2 e 3	29
Figura 14	Registro da medição da massa dos componentes do motor em balança analítica	30
Figura 15	(a) Sistema de monitoração de temperatura,	30
	(b) Representação esquemática da localização do termopar, na medida da temperatura do contato	
Figura 16	Equipamentos utilizados nas análises das peças (pino, pistão e cabeçote)	31
Figura 17	(a) Áreas de óxidos analisadas próxima a abobada do cabeçote	32
	(b) Áreas de óxidos analisadas próxima ao anel do cabeçote	32
Figura 18	(a) Morfologia das deformações plásticas induzidas à textura pelo processo de jateamento com partículas sólidas	54
	(b) após o running-in	54
	(c) Morfologias de óxidos na superfície do cabeçote do motor, próximo à sede da vela	55
	(d) Polimerização da camada de óxido no entorno do furo-sede da vela	55
	(e) Processo de polimerização nas camadas de óxidos próximas ao redor do furo-sede da vela	56
Figura 19	Diagrama de fases Al_2O_3 e SiO_2	56
Figura 20	(a) Textura após processo de faceamento	57

LISTA DE FIGURAS

	(b) Textura da superfície da cabeça do pistão do motor, após o running-in evidenciando danos oriundos do faceamento, na etapa de fabricação da peça	58
	(c) Nucleação e remoção de óxidos na superfície da cabeça do pistão do motor	58
	(d) Nucleação e remoção de óxidos, superfície da cabeça do pistão	59
	(e) Polimerização da camada de óxidos na superfície da cabeça do pistão	59
Figura 21	Referencial dos quatro quadrantes A, B, C, D de óxidos térmicas	60
Figura 22	Morfologia de óxidos e formação de trincas térmicas na superfície ao redor do furo-sede da vela na parede interna do cabeçote do motor 2	60
Figura 23	Evidências de polimerização e fusão de óxidos próximas do furo-sede da vela na superfície interna da abóbada do cabeçote do motor 3	61
Figura 24	Microspalling decorrente do contato do pino com a parede do pistão	62
Figura 25	<i>Micro-spalling</i> decorrente do contato, zona de transição entre as regiões 4 e 5	63
Figura 26	<i>Pite</i> no interior do <i>microspalling</i> referente à região selecionada da Figura 25	63
Figura 27	(1) Malhas de trincas térmicas nos filmes de óxidos e (2) Camada de óxido em que se difundiu fração do combustível	64
Figura 28	Mecanismo de desgaste por “ <i>spallation</i> ” na zona do pino sob a biela	66
Figura 29	Superfície caracterizada por dano <i>spallation</i>	66
Figura 30	Diferentes estágios da camada de óxido na superfície da abóbada interna do cabeçote do motor 2	68
Figura 31	Diferentes estágios da camada de óxido na superfície da cabeça do pistão, motor 2	70
Figura 32	Diferentes estágios da camada de óxido na superfície da abóbada interna do cabeçote do motor 3	72
Figura 33	Estágios de intensificação das camadas de óxidos na superfície da cabeça do pistão	74
Figura 34	Difratograma DRX da <i>cabeça do pistão</i> , motor 1	75
Figura 35	Difratograma DRX do <i>cabeçote</i> , motor 1	75
Figura 36	Morfologia de óxido com cerca de 100 μm de raio, com evidências de trincas térmicas	76
Figura 37	Imagem referente à região selecionada da Figura 36	76
Figura 38	Imagem referente à região selecionada da Figura 37	76
Figura 39	Micro-análise EDS do Ponto A	76
Figura 40	Micro-análise EDS do Ponto B	76
Figura 41	Micro-análise EDS do Ponto C	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 42	História Térmica dos motores: (a) motor 1, (b) motor 2 e (c) motor 3	78
Figura 43	Dados estatísticos da temperatura no motor 1	80
Figura 44	Dados estatísticos da temperatura no motor 2	81
Figura 45	Dados estatísticos de temperatura no motor 3	81
Figura 46	Dados estatísticos de RPM no motor 2	83
Figura 47	Dados estatísticos de RPM no motor 3	83
Figura 48	Cilindricidade referente ao pistão - motor 2	84
Figura 49	Cilindricidade referente ao pino - motor 2	84
Figura 50	Cilindricidade referente ao pistão - motor 2	85
Figura 51	Cilindricidade referente ao pino - motor 2	85
Figura 52	Medição de massa referente ao cabeçote - motor 2	86
Figura 53	Medição de massa referente ao cabeçote - motor 3	86
Figura 54	Medição de massa referente ao pistão - motor 2	87
Figura 55	Medição de massa referente ao pistão - motor 3	87
Figura 56	Medição de massa referente ao pino - motor 2	88
Figura 57	Medição de massa referente ao pino - motor 3	88
Figura 58	Ciclo de trabalho de um motor Ciclo Otto	102
Figura 59	Ciclo de um Motor 2 Tempos	104
Figura 60	Padrões de difratogramas obtidos por DRX	112
Figura 61	Exergia transferida ao sistema térmico	121
Figura 62	Rede de análise de exergia	122
Figura 63	Representação esquemática dos fluxos de energia primária, secundária, final e útil com a indicação das perdas nos centros de transformação e no uso final	123
Figura 64	a) Conjunto da válvula	127
	b) Quebra da válvula por folga na guia de válvula	
Figura 65	Avaria por enxofre no combustível	128
Figura 66	Formação excessiva de carbono	128
Figura 67	Depósitos de cinza na válvula	129
Figura 68	Danificação por Pré-Iguição	129
Figura 69	Pistão engripado devido aos problemas no sistema de injeção	129
Figura 70	Danificação por Detonação, cabeça do pistão parcialmente destruída	130
Figura 71	Representação do perfil deformado do pistão	130
Figura 72	Detalhe do perfil e inclinação do 1º canaleta	131
Figura 73	Pistão com engripamento em “faixas”	132
Figura 74	Deformações radiais do cilindro	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 75	Adesão de partículas de alumínio sobre um anel de primeiro canaleta	133
Figura 76	Anéis de pistão com desgaste abrasivo na face de contato com o cilindro	134
Figura 77	Evolução do perfil e da área de contato (“bearing area”) em função do número de horas de ensaio	134
Figura 78	Anéis de pistão com exemplo de desgaste corrosivo	135
Figura 79	Superfície de um cilindro que rodou com combustível com alto teor de enxofre	135
Figura 80	Exemplo de trincas de fadiga de contato na superfície de contato do anel com o cilindro	136
Figura 81	Análise da microestrutura de um anel nitretado mostrando a formação de trincas ortogonais à superfície	137
Figura 82	Análise da microestrutura de um anel nitretado mostrando a formação de trincas inclinadas	137
Figura 83	Anel de 1º canaleta cromado, motor diesel, após 1000 h de ensaio	138
Figura 84	Destacamento de material e presença de trincas propagadas na superfície dos anéis de aço do ensaio de torque máximo e potência máxima	138

LISTA DE FIGURAS DOS APÊNDICES

Figura 1	Foto de um dos três motores de combustão interna de 1,2 HP utilizado em aeromodelismo	1
Figura 2	Motor de 2 tempos	1
Figura 3	Textura superficial da parede interna do cabeçote do motor 2	5
Figura 4	Textura superficial da parede interna do cabeçote do motor 2	5
Figura 5	Textura superficial heterogênea caracterizada por partículas esparsas de óxidos globoidais	6
Figura 6	Textura superficial heterogênea caracterizada por um forte adensamento de óxidos não necessariamente globoidais	6
Figura 7	Textura superficial evidenciada no entorno do furo-sede da vela:	7
Figura 8	Aglomerados de partícula de óxidos compactos	7
Figura 9	Aglomerados de partícula de óxidos	8
Figura 10	Textura superficial acentuadamente heterogênea	8
Figura 11	Textura superficial heterogênea	9
Figura 12	Morfologias de danos decorrentes do processo de usinagem por faceamento	10
Figura 13	Morfologias de danos decorrentes do processo de faceamento	10
Figura 14	Aderência e remoção de partículas de óxidos; formação de trincas térmicas	11
Figura 15	(a) Colônias de óxidos, trincas térmicas e padrão de fratura do filme de óxido próximo à borda da cabeça do pistão	11
	(b) (1) Representação das posições 12h, 3h, 6h e 9h; (2) tensões na superfície da cabeça do pistão e (3) Corte do perfil do motor de aeromodelismo	11
Figura 16	Colônias de óxidos; trincas térmicas e remoção de camadas de óxidos	12
Figura 17	Colônias de óxidos; trincas térmicas e remoção de camadas de óxidos	12
Figura 18	Colônias de óxidos com textura porosa – zona central da cabeça do pistão	13
Figura 19	Colônias de óxidos com etapa de vitrificação e fragilização em processo na evolução da textura porosa anterior – zona central da cabeça do pistão	13
Figura 20	Colônias de óxidos superpostas, fragilização em processo na zona (3h) da borda do pistão	14
Figura 21	Superfície do pino de aço com textura do processo de fabricação e aderência de partícula de óxido de alumínio oriunda da parede do pistão	15
Figura 22	Formação de pites provocando danos decorrentes da fadiga de contato	15

LISTA DE FIGURAS DOS APÊNDICES

Figura 23	Aderência de partícula de óxido, formação de “debris”	16
Figura 24	Micro-spalling decorrente do contato pino-pistão	16
Figura 25	Formação de trincas termomecânicas, decorrente do contato pino-parede do pistão	17
Figura 26	Remoção da camada de óxido e Spallation	17
Figura 27	Formação de pites	18
Figura 28	Delaminação de filmes de óxidos	18
Figura 29	Malhas de trincas térmicas e presença de “debris”	19
Figura 30	Morfologia de deformações plásticas na textura decorrente do processo de usinagem por jateamento	21
Figura 31	Morfologia de deformações plásticas na textura decorrente do processo de usinagem por jateamento	22
Figura 32	Morfologia de deformações plásticas na textura decorrente do processo de usinagem por jateamento	22
Figura 33	Deteção de micro-fissuras na propagação de óxidos	23
Figura 34	Morfologia de óxidos próximo ao furo-sede da vela	23
Figura 35	Morfologia de colônias estratificadas radialmente de óxidos na superfície da abóbada interna do cabeçote do motor 1	24
Figura 36	Morfologia de colônias estratificadas radialmente de óxidos na superfície da abóbada interna do cabeçote do motor 1	24
Figura 37	Morfologia de deformações plásticas na textura decorrente do processo de usinagem por jateamento	25
Figura 38	Morfologia de deformações plásticas na textura decorrente do processo de usinagem por jateamento	25
Figura 39	Morfologia de deformações plásticas na textura decorrente do processo de usinagem por jateamento	26
Figura 40	Morfologia de deformações plásticas na textura decorrente do processo de usinagem por jateamento	26
Figura 41	Morfologias de óxidos na superfície próximo a coroa circular do cabeçote do motor 2	27
Figura 42	Morfologias de óxidos próximo ao furo-sede da vela. Superfície da abóbada interna do cabeçote do motor 2	28

LISTA DE FIGURAS DOS APÊNDICES

Figura 43	Morfologias de óxidos na superfície próximo a coroa circular do cabeçote do motor 2	29
Figura 44	Morfologias de óxidos ao redor do furo-sede da vela	30
Figura 45	Trincas térmicas ao redor do furo-sede da vela, imagem referente a Figura 44	31
Figura 46	Morfologias de óxidos na superfície próximo a coroa circular do cabeçote do motor 2	32
Figura 47	Morfologias de óxidos, superfície com processo de fusão ao redor do furo-sede da vela	33
Figura 48	Superfície com processo de fusão ao redor do furo-sede da vela, imagem referente a Figura 47	34
Figura 49	Morfologia de óxidos na superfície próximo a coroa circular do cabeçote do motor 2	35
Figura 50	Morfologias de óxidos e formação de trincas térmicas na superfície ao redor do furo-sede da vela	36
Figura 51	Trincas térmicas próximas às regiões A e B na superfície ao redor do furo-sede da vela, imagem referente à Figura 50	37
Figura 52	Processo de fusão na superfície ao redor do furo-sede da vela, imagem referente à Figura 50	38
Figura 53	Morfologia de deformações plásticas na textura decorrente do processo de usinagem por jateamento	39
Figura 54	Morfologia de deformações plásticas na textura decorrente do processo de usinagem por jateamento	40
Figura 55	Morfologia de deformações plásticas na textura decorrente do processo de usinagem por jateamento.	41
Figura 56	Morfologia de deformações plásticas na textura decorrente do processo de usinagem por jateamento.	42
Figura 57	Morfologias de óxidos na superfície próximo a coroa circular do cabeçote do motor 3	43
Figura 58	Morfologias de óxidos ao redor do furo-sede da vela	44
Figura 59	Formação de trincas térmicas nas regiões (A, D e C), imagens referentes a Figura 58	45

LISTA DE FIGURAS DOS APÊNDICES

Figura 60	Expansão de óxidos na superfície próximo a coroa circular do cabeçote do motor 3	46
Figura 61	Expansão da camada de óxido ao redor do furo-sede da vela	47
Figura 62	Formação de trincas térmicas nas regiões (A) e (B) e do processo de fusão nas regiões (C) e (D), imagens referentes a Figura 61 próximo ao redor do furo-sede da vela	48
Figura 63	Morfologia de óxidos na superfície próximo a coroa circular do cabeçote do motor 3	49
Figura 64	Imagens referentes as regiões selecionadas da Figura 63	50
Figura 65	Processo de fusão e formação de camadas de óxidos uniformes próximo ao redor do furo-sede da vela	51
Figura 66	Imagens referentes a Figura 65 próximo ao redor do furo-sede da vela	52
Figura 67	Morfologias de danos decorrentes do processo de faceamento	53
Figura 68	Morfologias decorrentes do processo de faceamento	53
Figura 69	Micro-spallings decorrentes do processo de faceamento	54
Figura 70	Micro-spallings decorrentes do processo de faceamento	54
Figura 71	Micro-spallings decorrentes do processo de faceamento	55
Figura 72	(1) Malhas de trincas térmicas e (2) Remoção do filme de óxido	55
Figura 73	Morfologia de óxido com cerca de 100 µm de raio, seguido por trincas térmicas	56
Figura 74	Imagem referente à região selecionada da Figura 73	56
Figura 75	Imagem referente à região selecionada da Figura 74	56
Figura 76	Micro-análise do Ponto A por EDS	56
Figura 77	Micro-análise do Ponto B por EDS	56
Figura 78	Micro-análise do Ponto C por EDS	56
Figura 79	Micro-análise do Ponto A por EDS	57
Figura 80	Micro-análise do Ponto B por EDS	57
Figura 81	Crescimento de trincas na borda	58
Figura 82	Crescimento de trincas na borda	58
Figura 83	Formação de óxidos	59
Figura 84	(1) Remoção da camada de óxido e (2) Trincas Térmicas	59

LISTA DE FIGURAS DOS APÊNDICES

Figura 85	Imagem referente à região (1) selecionada da Figura 84, (1.1) Formações de trincas térmicas e (1.2) Remoção da camada de óxido	60
Figura 86	Imagem referente à região selecionada da Figura 85	60
Figura 87	Micro-análise do Ponto A por EDS	60
Figura 88	Micro-análise do Ponto B por EDS	60
Figura 89	Micro-análise do Ponto C por EDS	60
Figura 90	(1) Formação de óxidos e (2) Remoção e Formação da camada de óxido	61
Figura 91	(A) Formação da camada de óxido e (B) Remoção da camada de óxido, imagem referente à região selecionada nº2 da Figura 90	61
Figura 92	Diferentes morfologias e crescimento de óxidos	62
Figura 93	Imagem referente à região selecionada da Figura 92	62
Figura 94	(1) Expansão da camada de óxido e (2) Remoção da camada de óxido na borda	63
Figura 95	(1) Expansão da camada de óxido e (2) Remoção da camada de óxido na borda	63
Figura 96	(1) Expansão da camada de óxido e (2) Remoção da camada de óxido	64
Figura 97	(1) Expansão da camada de óxido e (2) Remoção da camada de óxido	64
Figura 98	Morfologias decorrentes do processo de faceamento	65
Figura 99	Morfologias decorrentes do processo de faceamento	65
Figura 100	Morfologias decorrentes do processo de faceamento	66
Figura 101	Morfologias decorrentes do processo de faceamento	66
Figura 102	Morfologias decorrentes do processo de faceamento	67
Figura 103	Morfologias decorrentes do processo de faceamento	67
Figura 104	(1) Formação da camada de óxido e (2) Remoção da camada de óxido na superfície da cabeça do pistão do motor 2	68
Figura 105	(1) Formação da camada de óxido, (2) Surgimento de trincas e (3) Remoção da camada de óxido na superfície da cabeça do pistão do motor 2	69
Figura 106	Remoção e surgimento de trincas na camada de óxido da superfície da cabeça do pistão do motor 2	70
Figura 107	(1) Formação da camada de óxido e (2) Remoção da camada de óxido na superfície da cabeça do pistão do motor 2	71

LISTA DE FIGURAS DOS APÊNDICES

Figura 108	(a) Formação da camada de óxido, (b) e (c) surgimento de trincas térmicas na camada de óxido na superfície da cabeça do pistão do motor 2, imagens referentes a Figura 107	72
Figura 109	(1) Formação da camada de óxido, (2) Remoção da camada de óxido, (3) e (4) Formação de trincas térmicas na camada de óxido na superfície da cabeça do pistão do motor 2	73
Figura 110	Morfologias decorrentes do processo de faceamento	74
Figura 111	Morfologias decorrentes do processo de faceamento	75
Figura 112	(A) Remoção da camada de óxido, direção 12h e (B) formação da camada de óxido, direção 12h	76
Figura 113	(1) Formação de óxidos, (2) Malhas de trincas térmicas e (3) Remoção da camada de óxido	77
Figura 114	Imagens referentes à Figura 113	78
Figura 115	(1) Formação da camada de óxido e (2) Remoção da camada de óxido	79
Figura 116	Formação de óxidos, malha de trincas térmicas	80
Figura 117	(1) Formação da camada de óxido, (2) Remoção da camada de óxido e (3) Malhas de trincas térmicas	81
Figura 118	Formação de óxidos e trincas térmicas	82
Figura 119	Zona escura localizada na superfície do pino do pistão, motor 1 na condição adquirida (“nova”)	83
Figura 120	Micro-análise do Ponto A por EDS	83
Figura 121	(1) Extração do pino formando danos e (2) Ranhuras decorrentes do processo de fabricação	84
Figura 122	Micro-análise do Ponto A por EDS	84
Figura 123	(1) Formação de pites e (2) Ranhuras provocando danos decorrentes da fadiga de contato	85
Figura 124	Imagem referente à região selecionada da Figura 123	85
Figura 125	(1) Danos provocados pela extração do pino e (2) Ranhuras decorrentes do contato	86
Figura 126	Zona de transição entre a região 2 e 3	86
Figura 127	Zona de transição entra região 1 e 2, surgimento de pites	87
Figura 128	Zona de transição entre a região 3 e 4, surgimento de “debris”	87

LISTA DE FIGURAS DOS APÊNDICES

Figura 129	Micro-spalling decorrente do contato	88
Figura 130	Micro-análise do Ponto A por EDS	88
Figura 131	Trincas termomecânicas	89
Figura 132	Imagem referente região selecionada da Figura 131	89
Figura 133	Formação de pites	90
Figura 134	Remoção da camada de óxido	90
Figura 135	Micro-spalling decorrente do contato, zona de transição entre as regiões 4 e 5	91
Figura 136	Imagem referente à região selecionada da Figura 135	91
Figura 137	Formação de sulcos	92
Figura 138	Zona de transição entre a região 1 e 2, surgimento de “debris”	92
Figura 139	Partícula de óxido, formação de partícula abrasiva	93
Figura 140	Micro-análise do Ponto A por EDS	93
Figura 141	Imagem da zona escura	94
Figura 142	Micro-análise do Ponto A por EDS	94
Figura 143	Imagem da zona escura	95
Figura 144	Imagem da zona escura	95
Figura 145	Partículas de óxidos, formação de “debris”	96
Figura 146	Micro-análise dos pontos A e B por EDS	96
Figura 147	(A) Remoção da camada de óxido e (B) Camada de óxido	97
Figura 148	Imagem referente à região selecionada da Figura 147	97
Figura 149	Micro-análise dos pontos A e B por EDS	97
Figura 150	(A) Remoção da camada de óxido e (B) Spallation	98
Figura 151	Imagem referente a região selecionada da Figura 150	98
Figura 152	Zona de transição entre a região 3 e 4 na superfície do pino do pistão	99
Figura 153	Danos provocados pela extração do pino do pistão. Imagem referente região selecionada da Figura 152	99
Figura 154	Formação de trincas. Superfície do pino do pistão	100
Figura 155	Imagem referente a região selecionada da Figura 154	100
Figura 156	Formação de “pittes”	101
Figura 157	Micro-análise dos pontos A e B por EDS	101

LISTA DE FIGURAS DOS APÊNDICES

Figura 158	Zona de transição entre a região 4 e 5 na superfície do pino do pistão	102
Figura 159	Micro-análise dos pontos A, B e C por EDS	102
Figura 160	(A) Formação de trincas térmicas e (B) Remoção da camada de óxido	103
Figura 161	Imagem referente a região selecionada (A) da Figura 160	103
Figura 162	Indícios do processo de desgaste oxidativo	104
Figura 163	Imagem referente à ampliação da região selecionada da Figura 162	104
Figura 164	(A) Remoção da camada de óxido	105
Figura 165	(A) Formação da camada de óxido e (B) Remoção da camada de óxido	105
Figura 166	Extração do pino formando danos	106
Figura 167	Micro-análise do Ponto A por EDS	106
Figura 168	Formação de partículas abrasivas	107
Figura 169	Micro-análise dos pontos A, B e C por EDS	107
Figura 170	Zonas escuras (Ponto A)	108
Figura 171	Micro-análise do Ponto A e B por EDS	108
Figura 172	Zona de transição entre a região 3 e 4	109
Figura 173	Zona de transição entre a região 4 e 5	109
Figura 174	(A) Camada de óxido e (B) Remoção da camada de óxido	110
Figura 175	Micro-análise dos Pontos A e B por EDS	110
Figura 176	Zona de transição entre a região 3 e 4, Região selecionada: Remoção da camada de óxido	111
Figura 177	(A) Camada de óxido e (B) Remoção da camada de óxido	111
Figura 178	Formação de trincas termomecânicas, decorrente do contato pino e parede do pistão	112
Figura 179	Zona de transição entre a região 4 e 5	112
Figura 180	(A) Remoção da camada de óxido e (B) Delaminação de óxidos	113
Figura 181	Micro-análise dos Pontos A e B por EDS	113
Figura 182	(A) Remoção da camada de óxido e (B) Formação de trincas	114
Figura 183	Micro-análise dos pontos A e B por EDS	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição química mássica (%) do aço AISI 52100	25
Tabela 2	Duração dos Ensaios (horas)	28
Tabela 3	Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 2 no 1º ensaio	33
Tabela 4	Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 2 no 2º ensaio	34
Tabela 5	Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 2 no 3º ensaio	34
Tabela 6	Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 2 no 4º ensaio	35
Tabela 7	Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 3 no 1º ensaio	35
Tabela 8	Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 3 no 2º ensaio	36
Tabela 9	Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 3 no 3º ensaio	36
Tabela 10	Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 2 no 1º ensaio	37
Tabela 11	Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 2 no 2º ensaio	37
Tabela 12	Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 2 no 3º ensaio	38
Tabela 13	Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 2 no 4º ensaio	38
Tabela 14	Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 3 no 1º ensaio	39
Tabela 15	Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 3 no 2º ensaio	39
Tabela 16	Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 3 no 3º ensaio	40
Tabela 17	Medições para caracterização do desgaste	40
Tabela 18	Peculiaridades evidenciadas no desgaste de componentes de um motor recentemente reportadas na literatura	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 19	Distribuição estatística dos dados variação da $(T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}})$ em função do número de ciclos, Ensaio do motor 1 – piloto	80
Tabela 20	Distribuição estatística dos dados variação da temperatura $(T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}})$ em função do número de ciclos, Ensaio do motor 2	81
Tabela 21	Distribuição estatística dos dados variação da temperatura $(T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}})$ em função do número de ciclos, Ensaio do motor 3	81
Tabela 22	Distribuição estatística dos dados da rotação por minuto (RPM), Ensaio do motor 2	82
Tabela 23	Distribuição estatística dos dados da rotação por minuto (RPM), Ensaio do motor 3	83
Tabela 24	Medições da variação de desvio de forma – motor 2	84
Tabela 25	Medições da variação de desvio de forma – motor 3	85
Tabela 26	Medições da massa, cabeçote – motor 2	86
Tabela 27	Medições da massa, pino – motor 2	86
Tabela 28	Medições da massa, pistão – motor 2	87
Tabela 29	Medições da massa, cabeçote – motor 3	87
Tabela 30	Medições da massa, pino – motor 3	88
Tabela 31	Medições da massa, pistão – motor 3	88
Tabela 32	Para os combustíveis líquidos, as diferenças principais entre os motores do ciclo Otto e do Ciclo Diesel	102
Tabela 33	Comparação das emissões de um MCI operando com gasolina e Diesel	106
Tabela 34	Limites Máximos de Emissão de Poluentes para Veículos Automotores – Euro II – CONAMA IV	108
Tabela 35	Determinação dos Parâmetros da Combustão, Temperatura Adiabática de Chama e Emissões de NO_x	109
Tabela 36	Valores máximos calculados da Temperatura Adiabática de Chama para os Combustíveis Nitrometano e Metanol introduzidos na câmara a 303 K	111
Tabela 37	Energia versus Exergia	122

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Critério de estratificação das cinco zonas superficiais do cabeçote do motor (parte interna em abóbada)	41
Quadro 2	Critério de estratificação das cinco zonas superficiais do pistão	41
Quadro 3	Critério de estratificação das cinco zonas superficiais do pino	42
Quadro 4	Procedimento e Equipamentos utilizados no desenvolvimento experimental – motor 1 – teste piloto	43
Quadro 5	Procedimento e Equipamentos utilizados no desenvolvimento experimental – motores 2 e 3	44
Quadro 6	Correlação para as dimensões dos óxidos em relação à variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$)	47
Quadro 7	(a) Gráficos do Coeficiente de correlação r , relação entre as áreas de óxidos proeminentes na parede interna do cabeçote com à variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) - 1º Ensaio	48
	(b) Gráficos do Coeficiente de correlação r , relação entre as áreas de óxidos proeminentes na parede interna do cabeçote com à variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) - 1º e 2º Ensaio	49
	(c) Gráficos do Coeficiente de correlação r , relação entre as áreas de óxidos proeminentes na parede interna do cabeçote com à variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) - 2º Ensaio	50
	(d) Gráficos do Coeficiente de correlação r , relação entre as áreas de óxidos proeminentes na parede interna do cabeçote com à variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) - 3º Ensaio	51
	(e) Gráficos do Coeficiente de correlação r , relação entre as áreas de óxidos proeminentes na parede interna do cabeçote com à variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) - 3º e 4º Ensaio	52
Quadro 8	Mecanismos de desgaste oxidativo nos três componentes dos motores	65

LISTA DE SÍMBOLOS

T_0	Temperatura ambiente	(K)
S_0	Entropia do estado de referência	(kJ/kg.K)
S_1	Entropia do ponto 1	(kJ/kg.K)
h_0	Entalpia do estado de referência	(kJ/kg)
h_1	Entalpia do ponto 1	(kJ/kg)
m	Vazão mássica	(kg/h)
I	Irreversibilidades	(kW)
c_p	Calor específico	[J/kgK]

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A crescente demanda por sistemas mecânicos mais eficientes, através da redução do atrito e desperdícios, como também a preocupação ecológica e o monitoramento em tempo real desses sistemas, tem seus reflexos na Tecnologia deste Século XXI. A redução nos níveis de emissão de poluentes, emissão de ruído, uso otimizado e que inclui a reciclagem de materiais e consumo de energia inserem-se nesses desafios.

A Tribologia, neste sentido, estuda os fluxos de: (a) energia por atrito, (b) massa, que caracterizam o desgaste, (c) filmes lubrificantes interpostos entre dois corpos sólidos em contato. A Mecânica do Contato entre sólidos acrescenta a tais fluxos as variações geométricas, as flutuações das cargas, tensões locais, deformações e propriedades elastoplásticas dos materiais ao longo da vida dos sólidos em contato constitutivos dos sistemas físicos e biológicos.

Por tais razões, a vida, funcionalidade, confiabilidade e eficiência de sistemas necessitam ser monitoradas em tempo real. O desafio é identificar-se uma variável ou um conjunto de variáveis cujas assinaturas sejam consecutivas facilmente e, ao mesmo tempo, permitam associar-se ao atrito e ao desgaste, numa visão sistêmica que privilegie o todo sem obnubilar as partes.

CRUTCHFIELD e FELDMAN (2001), pesquisadores do Instituto Santa Fé, na Califórnia, desenvolveram procedimentos sistemáticos para obter informações confiáveis baseadas em mecanismos intrínsecos e suas respectivas assinaturas, alimentando modelos. Associaram a taxa de produção de entropia da fonte a subgrupos, ou janelas de aquisição de dados, seqüenciadas, relativas a informações incompletas de campo de alguns processos determinísticos e estocásticos. Constataram e demonstraram a aplicabilidade do método a pequenos conjuntos de dados, em que se tem acesso apenas a curtas seqüências de medidas.

A Figura 1 apresenta o modelo icônico desenvolvido por CRUTCHFIELD e FELDMAN (2001), um canal de medidas composto por sistema – processo (fonte)- fluxo de dados – observador (receptor de dados). Seu objetivo era, a partir das informações coletadas, estimar (1) a distribuição de probabilidade das seqüências de dados e associá-la ao seu nível de aleatoriedade e (2) a dinâmica interna do processo, caracterizada por um conjunto de

estados e suas estruturas de transição, consideradas Markovianas¹. Eles admitiam que o observador não teria acesso direto aos estados internos da fonte e, por outro lado, poderia estimar uma acurácia arbitrária para a probabilidade das seqüências de medidas. Uma questão basilar, na avaliação dos autores, era identificar se a taxa de produção de entropia do sistema era inferior à capacidade do canal de medida. Se afirmativa, o observador poderia modelar o sistema para executar predições acuradas; se negativa, as seqüências de dados não poderiam ser decodificadas em uma modelagem livre de erro.

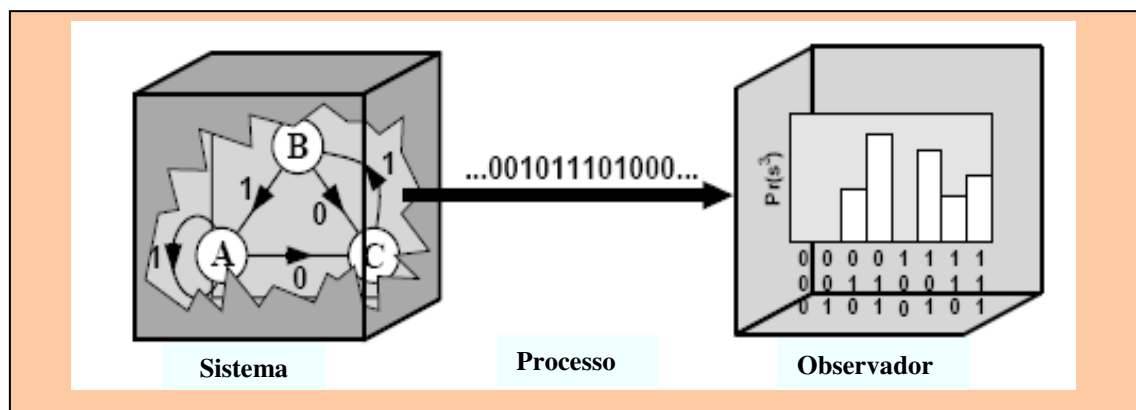


Figura 1 - O canal de medida descrito por CRUTCHELD e FELDMAN (2001). Os estados internos {A;B;C} do sistema são refletidos, apenas indiretamente, nas medidas binárias observadas – 1's e 0's. Um observador lida com tais dados escassos para construir um modelo do sistema investigado.

ÖNER e COLABORADORES²(2009), investigaram o desgaste de um cilindro revestido e sem revestimento de um motor Diesel monocilíndrico, 8,5 HP (6,25 kW), em que enfatizaram a evolução dos danos microestruturais associados às solicitações termomecânicas utilizadas.

O desenvolvimento deste trabalho se integra a essas duas linhas de pesquisa. Insere-se nos campos da Engenharia Mecânica, da Mecânica do Dano, da Análise do Ciclo de Vida, da Tribologia. Contribui com informações específicas aos projetistas, em especial àqueles de sistemas e de processamento de sinais aplicados a sistemas de geração de energia por combustão interna.

¹ Um campo Markoviano concerne às estruturas de grafos compostas por variáveis estocásticas, onde cada variável tem a propriedade que é independente de todas as outras, ignorando a direcionalidade implicada pelo tempo (o futuro e o passado), dados seus dois vizinhos em um grafo.

² Cengiz Öner, Hanbey Hazar, Mustafa Nursoy Surface properties of CrN coated engine cylinders. **Materials and Design** 30 (2009): 914–920.

A motivação deste trabalho é o desenvolvimento de um banco de informações que se integre, em um segundo momento, a uma técnica não destrutiva (NDT) para avaliação em processo do desgaste de motores de combustão interna. O refinamento deste método possibilitará a coleta de informações relativas ao estágio de vida, em ciclos, em que o motor começará a ratear (apresentar falhas), e com isso, traçar ações preditivas. Com este monitoramento e tratamento das informações coletadas, poder-se-á prever a proximidade da ocorrência de falhas.

Nesta investigação promoveu-se a identificação e registro da evolução, no tempo, dos principais mecanismos de desgaste em três peças integrantes basilares de um motor – parte interna do cabeçote, cabeça do pistão e pino do pistão e sua associação com duas variáveis, (a) o aquecimento em um locus externo do cabeçote do motor em relação ao ambiente e (b) o número de ciclos de vida desse motor ICE (ignição por centelha).

Desenvolveu um método experimental utilizando-se três motores de aeromodelo. A hipótese central a ser investigada neste trabalho é: Em um motor de combustão interna (MCI) monocilíndrico, dois tempos, **a evolução do desgaste** da parte interna do cabeçote, da cabeça do pistão e do pino do pistão, **está associada às assinaturas das flutuações da temperatura externa do motor durante o seu ciclo de vida**, em decorrência dos mecanismos de desgaste nele atuantes.

Além desta Introdução, 6 Capítulos, 4 Anexos e 4 Apêndices compõem este trabalho. O Capítulo 2 apresenta uma Revisão Bibliográfica integrada por um histórico dos aspectos tribológicos de motores de combustão interna, os principais mecanismos de desgaste por Aderência e Adesão, Abrasão, Corrosão, Cavitação, Erosão por Partículas Sólidas, por Fadiga de Contato e Oxidativo, os mecanismos de dano impostos aos materiais e a influência da temperatura de contato no desgaste.

No Capítulo 3, apresenta-se o Procedimento Experimental, os materiais, a instrumentação e as tecnologias utilizadas.

No Capítulo 4, apresentam-se os Resultados e Discussão de algumas análises estatísticas pertinentes e morfologias de danos detectados.

No Capítulo 5, apresentam-se as Conclusões e Sugestões para continuidade desta linha de pesquisa proposta.

No Capítulo 6, apresentam-se as Referências Bibliográficas da literatura pesquisada.

No Anexo 1, apresentam-se os conceitos fundamentais dos Princípios de Funcionamento dos Motores de Combustão Interna.

No Anexo 2, apresentam-se os conceitos básicos da Análise do Ciclo de Vida em Motores de Combustão Interna.

No Anexo 3, apresentam-se os Métodos para Diagnosticar o Desperdício de Energia em Motores de Combustão Interna.

No Anexo 4, apresenta-se o Desgaste em Motores de Combustão Interna.

No Apêndice 1, apresenta-se o atlas de falha de um motor ICE 1,2 HP - caracterização da evolução do desgaste ao longo da vida de três componentes detectada por Microscopia Óptica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em três motores ensaiados

No Apêndice 2, apresenta-se o atlas de falha de um motor ice 1,2 HP parte interna do cabeçote do motor

No Apêndice 3, apresenta-se o atlas de falha de um motor ice 1,2 HP da cabeça do pistão

No Apêndice 4, apresenta-se o atlas de falha de um motor ice 1,2 HP do pino do pistão

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Investigar a evolução do desgaste de três componentes importantes de um motor de combustão interna de dois tempos, 1,2 HP e buscar correlações com as flutuações do aquecimento da parede externa do seu cabeçote em função do número de ciclos da sua vida em serviço.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Propor uma metodologia para ensaio estacionário de um motor de combustão interna de aeromodelo que assegure a medição do seu aquecimento, identificação e análise da evolução do seu desgaste, ao longo dos seus ciclos de vida;

- Elaborar um atlas contendo evidências importantes do desgaste ao longo da vida de um motor de combustão interna de 1,2 HP;
- Identificar os principais mecanismos de desgaste atuantes no pino do pistão, na cabeça do pistão e na parede interna do cabeçote constituída pela abóbada da câmara de combustão, de três motores estacionários de 1,2 HP, mesmo fabricante e modelo.

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Aspectos Tribológicos de Motores de Combustão Interna

Segundo STOETERAU (2004) os motores de combustão interna, por sua natureza, estão sujeitos a condições tribológicas extremamente desfavoráveis, tais como: pressões e temperatura elevadas, lubrificação deficitária nas partes com movimento relativo, regimes de trabalho variáveis, entre outras. Independentemente de serem motores de combustão interna de 2 ou 4 tempos, automotivos, estacionários ou para aplicações diversas, as condições tribológicas que afetam o desempenho desses motores são severas.

Modernas técnicas e sensores piezoresistivos para medida dos parâmetros da combustão no interior da câmara de combustão de um motor vêm sendo desenvolvidas por Ha-Duong Ngo na Universidade Técnica de Berlim, com resultados apresentados na Figura 2 para um motor 4 tempos a gasolina.

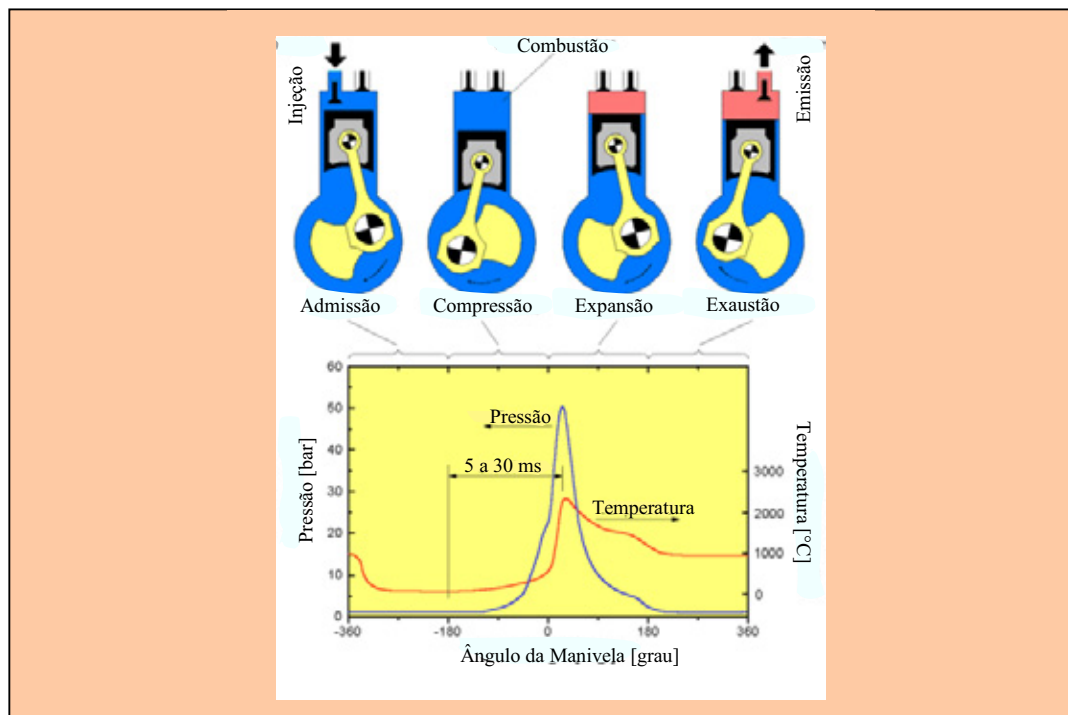
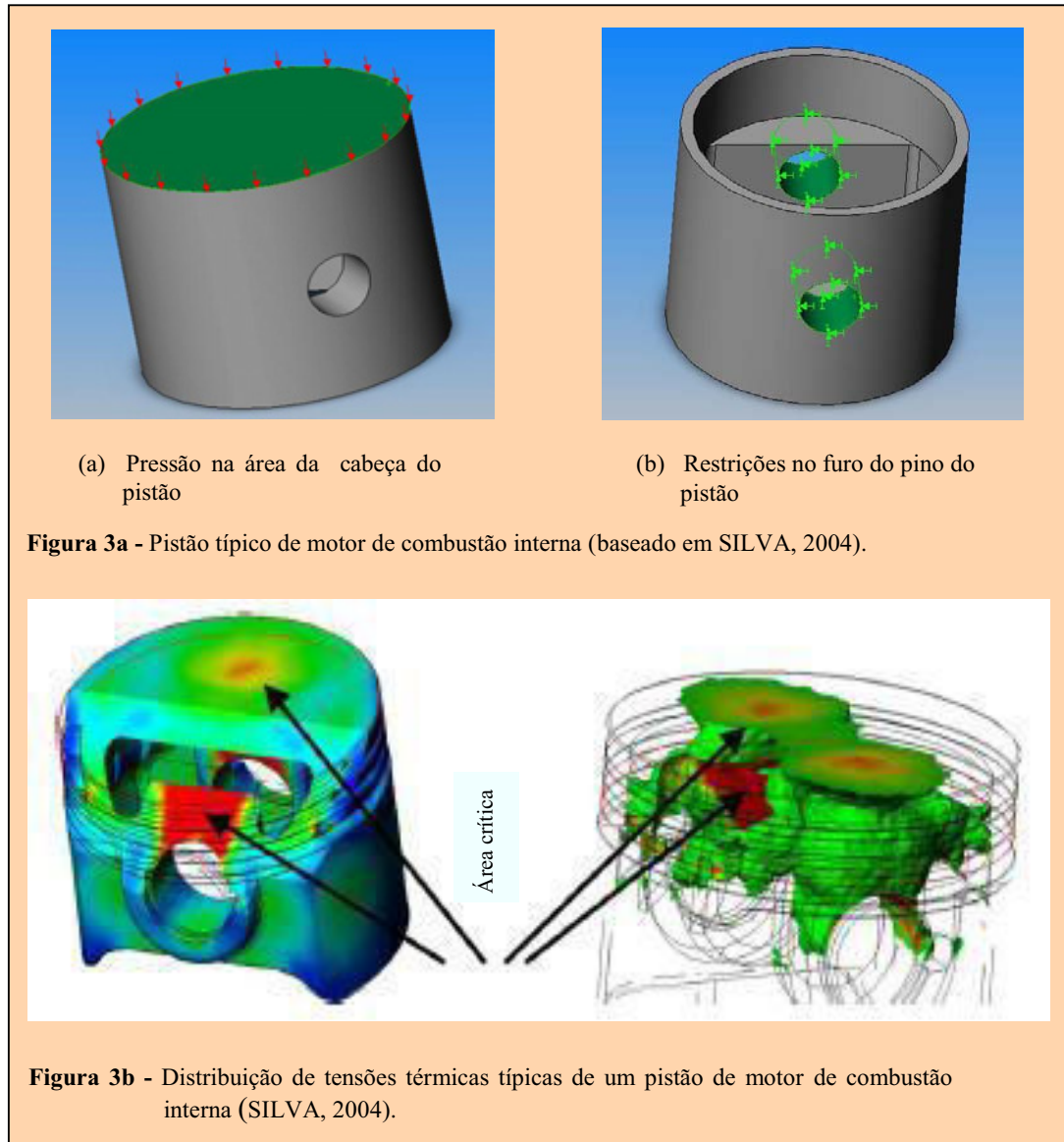


Figura 2 - Comportamento das variáveis pressão e temperatura a 1.500 rpm na câmara de combustão de um motor a gasolina de 4 tempos, medido por um sensor.

Fonte: http://www-mat.ee.tu-berlin.de/research/sic_sens/sic_sen3.htm

As tensões e deformações nos pistões variam com a geometria do pistão e as pressões “ad hoc” do motor, as Figuras 3a e 3b apresentam uma visão geral dos principais problemas tribológicos encontrados em pistões de motores de combustão interna (SILVA, 2004).



O conjunto “pistão, anel e cilindro” é considerado por PAWLUS (1997) o mais importante sistema tribológico em um motor de combustão interna. Para o referido sistema o acabamento da superfície apresenta ligação direta com o atrito, desgaste e lubrificação. Esta questão é particularmente agravada pela variedade de condições de operação como velocidade, carga e temperatura do motor.

Segundo STOETERAU (2004), antes de considerar os problemas tribológicos, é importante considerar o fenômeno de uma maneira geral. Essencialmente, em uma abordagem tribológica, considera-se a interação de pelo menos duas superfícies sólidas em contato em um determinado ambiente, resultando em manifestações exteriores:

1) Ocorre uma dissipação de energia, fruto da resistência ao movimento, representada pelo coeficiente de atrito. Essa dissipação de energia resulta em calor liberado no contato e uma quantidade de ruído pequena, mas muitas vezes significativa. Deve ser enfatizado que, como estão sempre envolvidas duas superfícies, parâmetros como o coeficiente de atrito devem ser relacionados com o par de materiais que interagem em um meio, com ou sem a presença de um terceiro corpo. Falar do coeficiente de atrito de um material sem referenciar o outro material em contato (contracorpo) é cientificamente incorreto. A existência de superfícies sem atrito é impossível e que a associação geralmente feita entre baixo atrito e superfícies lisas é, também, basicamente incorreta.

2) Durante o processo de escorregamento relativo, as superfícies modificam suas características básicas, de um valor maior ou menor. Elas podem se tornar mais lisas ou mais rugosas, ter propriedades físicas, tais como dureza, alteradas, e podem ainda perder material através do processo de desgaste. Essas mudanças nas superfícies podem ser benéficas, como acontece em situações de amaciamento, para produzir condições de operação próximas à ideal, ou desastrosas, quando ocorre a falha da superfície (perda da função técnica), necessitando da substituição da peça.

Os estudos relacionados ao desgaste são restritos a simulações em condições um tanto distantes do real, dificuldade esta apresentada, por exemplo, no trabalho realizado por POPOV et al (2001) “Desgaste em motores de combustão: experimento e simulação com base no método de autômata celular móvel”, no qual a evolução numérica e a comparação dos resultados obtidos nos ensaios experimentais foram realizados no tribômetro, deixando para uma investigação futura a necessidade de pesquisar sobre a influência dos processos nas nanocamadas formadas no relevo da superfície, como também a influência do relevo nas características dinâmicas das nanocamadas, destacando a importância da pesquisa no campo dos processos físicos de atrito envolvidos nos motores de combustão.

2.2. Desgaste e Atrito

A compreensão dos mecanismos de contato entre superfícies com movimento relativo entre si requer considerações aos níveis macro, micro e nano. Os desenvolvimentos tecnológicos do final do Século XX (energia, materiais, processos, instrumentação, revestimentos com filmes finos e modelagem entre os corpos) têm possibilitado ampliar a visão e os recursos para a consolidação da ciência tribológica.

Os desafios multiplicam-se, dada a complexa e crescente gama de demanda por produtos melhores, mais eficientes, mais confortáveis, mais baratos e de possível utilização em ambientes diversificados (MEDEIROS, 2002).

No final do século XIX, Hertz desenvolveu as primeiras análises, consideradas satisfatórias sobre a teoria de contato entre dois sólidos, realizando o modelamento matemático das tensões de contato, atualmente referenciado como contato de Hertz. O contato de Hertz entre dois corpos sólidos é aquele em que suas superfícies, ditas em contato não conforme, são submetidas a um estado de tensão compressiva e se comportam elasticamente, com pequena osculação (Figura 4). A teoria foi baseada na hipótese de que cada uma das superfícies em contato poder ser descrita por dois raios de curvatura, porém devido à elevada quantidade de simplificações definidas durante a elaboração do modelo, os resultados aplicados em casos práticos são limitados. As deduções e conclusões de Hertz, fundamentam as teorias da mecânica do contato (Figura 4), no regime elástico. São eventualmente extrapoladas ao regime plástico ou ao contato cíclico de rolamento e/ou deslizamento (SERBINO, 2005).

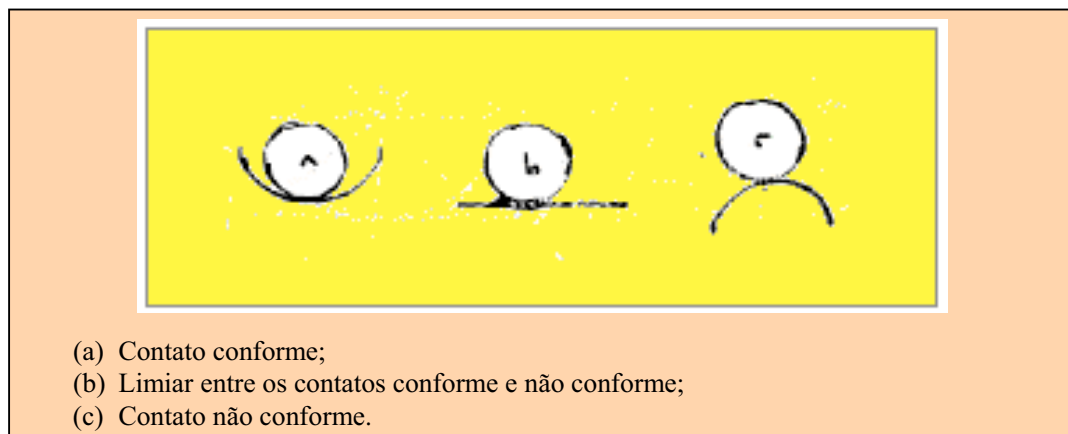


Figura 4 - Osculação do contato, na definição de Da VINCI apud (MEDEIROS, 2002).

As morfologias dos danos nas superfícies de contato mostram o resultado do tribocontato, que geralmente é aplicado em várias etapas consecutivas e por diferentes micromecanismos em regime cumulativo (SERBINO, 2005).

O trabalho de HUQ e CELIS (2001) propôs um procedimento para correlacionar as perdas de desgaste volumétrico de um primeiro corpo com energia dissipada para ensaios de rolamentos em superfícies planas. A validade e limitação das perdas de desgaste versus o modelo de energia dissipada é ilustrado para camadas duras de TiN e (Ti, Al)N, e multicamadas (Ti, Al)N/TiN, bem como o efeito da aplicação da carga normal e umidade relativa do ambiente com taxa de desgaste para diferentes camadas. O desgaste de materiais no contato por deslizamento é considerado como resultado da energia dissipada devido ao atrito no contato entre os corpos, podendo gerar danos, fraturas, deformações plásticas ou reações triboquímicas.

As interações superficiais ditam e controlam o funcionamento de praticamente todos os dispositivos mecânicos construídos pelo homem, fato com o qual se observa uma importância central da tribologia em termos de desenvolvimento tecnológico; entretanto, ainda hoje, isso nem sempre é reconhecido (PERSSON, 1999 apud MARU, 2003).

O desgaste normalmente é utilizado como dano ao material (superfície sólida), geralmente envolvendo perda de material, devido ao movimento relativo entre a superfície e as substâncias em contato. Embora pareça ser simples esta questão, os estudos realizados nesse campo estão ainda em fase inicial, ou seja, atualmente a mecânica deste fenômeno se encontra em nível de estruturação em sua compreensão básica onde, possivelmente, o grande desafio para resolver este tipo de problema seja antecipar o tipo de desgaste a que o componente será submetido (SERBINO, 2005).

Segundo MATAMOROS (2004), existem diversas razões para estudar o desgaste, dentre as quais pode-se destacar:

- a) Melhorar o conhecimento do comportamento ao desgaste de uma determinada família de materiais;
- b) Otimizar ou selecionar materiais para uma determinada aplicação;
- c) Entender os efeitos de certas variáveis num tipo particular de processo de desgaste, e
- d) Dar suporte ao desenvolvimento de modelos preditivos e descritivos para o desgaste de um determinado tribossistema.

O desgaste é uma propriedade sistêmica do material, ou seja, não se pode afirmar que o comportamento ao desgaste de um dado material é bom ou ruim sem antes descrever o seu contracorpo e as condições de desgaste a que este for submetido (MATAMOROS, 2004).

Em situações envolvendo deslizamento ou rolamento, um termo associado ao desgaste é o atrito. O atrito pode ser definido como a força que se opõe ao movimento relativo entre duas superfícies. Genericamente, a magnitude da força de atrito é descrita em termos de um coeficiente de atrito, que é a razão entre a força de atrito e a força normal que pressiona os corpos entre si. LUDÉMA (1988) ressalta que, na tecnologia moderna, o coeficiente de atrito é considerado como sendo variável e dependente de parâmetros operacionais (por exemplo, umidade, temperatura, velocidade e pressão de contato), de lubrificantes, de propriedades do substrato e dos filmes superficiais. Desses, a dependência é, em geral, maior com as propriedades das superfícies e com o acabamento superficial do que com as propriedades do substrato, porém, com a ressalva de que as propriedades do substrato influenciam tanto a cinética de adsorção das espécies químicas, bem como pode influenciar o acabamento originado do processamento (LUDÉMA, 1988 apud MARU, 2003).

Segundo BAYER (1994) apud MARU (2003), uma maneira de entender a distinção entre as tendências do atrito e do desgaste é a consideração da energia dissipada pelo sistema. O atrito pode ser relacionado à energia total dissipada pelo sistema, sendo essa energia constituída de duas partes: energia na forma de calor e energia na forma de desgaste. A razão entre essas duas energias pode variar para diferentes tribossistemas e diferentes mecanismos de desgaste. A energia associada com o movimento ou dano do material da superfície, que é o desgaste, é normalmente pequena em comparação à energia devida ao calor gerado.

Para ZUM GAHR (1987), o atrito e o desgaste não são propriedades intrínsecas dos materiais, mas sim características da interação desses materiais com variáveis operacionais do processo a que estão submetidos, sendo estes responsáveis, respectivamente, por dissipações de energia e matéria. O atrito é a resistência ao deslocamento e é gerado a partir da interação de sólidos em determinadas áreas de contato; já o desgaste é a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido, decorrente do contato e do movimento relativo deste com outro corpo sólido, líquido ou gasoso.

Para MOURA (1981), sempre que uma superfície se mover em relação a uma outra, haverá uma força contrária a esse movimento. Esta força chama-se atrito, ou resistência ao movimento.

Ainda segundo MOURA (1981), o atrito é, em alguns casos, necessário e útil, como nos sistemas de freios e, em outros casos, indesejáveis, porque dificulta o movimento e consome energia motriz, sem produzir o correspondente trabalho. Nesta condição, o atrito precisa ser o mínimo possível.

2.3. Principais Mecanismos de Desgaste

Do ponto de vista de mecanismos de desgaste, a literatura traz dados com os quais diversos processos de desgaste podem ser explicados (PETERSON, 1980). Integrar esses mecanismos de desgaste num único conjunto de dados para prever o comportamento aos diversos sistemas de desgaste é ainda um grande desafio (MATAMOROS, 2004).

HUTCHINGS (1992) utiliza o tipo de movimento relativo para classificar o mecanismo de desgaste geral, como por exemplo, o desgaste por deslizamento, dentro desses mecanismos estão associados diferentes tipos de desgaste. Segundo HUTCHINGS (1992) no desgaste por deslizamento podem surgir partículas de desgaste, como no curso do desgaste abrasivo.

Para TOMANIK (2001), o desgaste por deslizamento acontece em geral, quando 2 corpos lubrificadas deslizam entre si, o óleo existente na região de contato desenvolve pressões hidrodinâmicas que mantêm as superfícies separadas. Sob certas condições (baixas velocidades, por ex.), essas pressões não são suficientes para manter essa separação e parte da carga é suportada pelo contato das asperezas existentes nas superfícies. As asperezas em contato se deformam e se desgastam por um processo de fadiga ou por arrancamento. O desgaste das asperezas geralmente produz uma superfície polida, o que melhora as condições hidrodinâmicas.

O desgaste por deslizamento é comumente modelado pela equação de Archard, (HUTCHINGS, 1992):

$$Q = \frac{K.W}{H} \quad [\text{mm}^3/\text{m}] \quad (2.16)$$

onde Q : volume desgastado do material mais mole [mm^3], por unidade de distância percorrida [m].

K : coeficiente adimensional de desgaste

W : carga normal [N]

H : dureza do corpo mais mole [N.m⁻²]

A equação de Archard é largamente utilizada pela sua simplicidade e também por permitir quantificar a severidade do desgaste, em diferentes sistemas, pelo coeficiente K . O parâmetro $k = K/H$ [mm³/N.m] é mais comum em aplicações de engenharia, e é denominado de coeficiente dimensional de desgaste. k representa o volume [mm³] de material removido por desgaste por unidade de distância percorrida [m] por unidade de carga normal no contato [N].

Neste item, são apresentados os principais mecanismos de desgaste por deslizamento que podem predominar em determinadas condições de carregamento, tais como:

Desgaste por Aderência e Adesão: O desgaste adesivo ocorre durante a ação combinada da adesão entre as asperezas e do movimento de deslizamento de duas superfícies em contato, causando uma deformação plástica severa das asperezas. Posteriormente ocorre um arrancamento de fragmentos de material das superfícies, que são aderidos e transferidos para superfícies até serem convertidos em resíduos de desgaste. A transferência de material é o fenômeno que distingue-se o desgaste adesivo dos outros mecanismos de desgaste (RABINOWICZ, 1965 apud FARÍAS, 2004).

Desgaste Abrasivo: HUTCHINGS (1992) apud SERBINO (2005) classificou o desgaste abrasivo a dois ou três corpos, onde a dois corpos a remoção do material é provocada pelo riscamento ocorrido pela penetração do pico dos relevos da superfície com maior resistência mecânica, ou maior dureza, na superfície com menor dureza. Eventualmente estes picos que são mais frágeis podem ser rompidos, podendo promover o aumento da intensidade deste processo. No desgaste a três corpos, existem partículas duras se movendo entre as duas superfícies, onde dependendo dos ângulos instantâneos entre as extremidades destas partículas e as superfícies de contato, pode ocorrer um menor ou maior grau de penetração. A taxa de desgaste é normalmente menor nesse último caso. Segundo TOMANIK (2001) eventualmente um processo de 3 corpos pode se transformar num de 2, se a partícula dura penetrar e ficar impregnada numa das superfícies (usualmente a mais mole). Neste caso, a maior taxa de desgaste geralmente ocorre na superfície mais dura e não na mais mole.

Nota-se que, dependendo do processo abrasivo, pode ocorrer o simples deslocamento do material para os lados ou formação de uma cunha ou proa na frente do penetrador ou ainda um processo severo de corte no material.

A Figura 5, obtida por KATO (1990) apud SERBINO (2005) mostra exemplos de três modos de processo abrasivo, realizado em penetrador com ponta arredondada contra uma

superfície. Para materiais dúteis estes mecanismos podem ser observados, onde estes modos de abrasão podem ser acompanhados de micro-trincamento superficial ou subsuperficial por um processo de fadiga de contato.

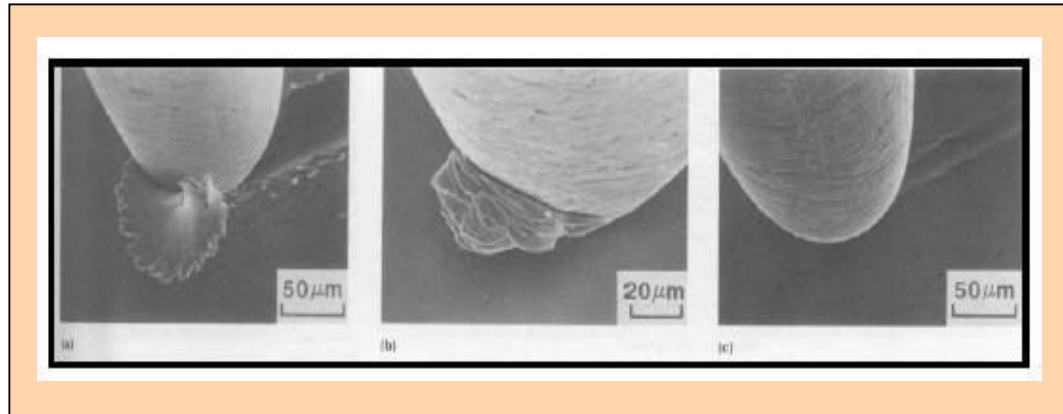


Figura 5 - Exemplos de três processos de desgaste abrasivo.
a) Corte; b) Formação de proa; c) Sulcamento (Kato, 1990 apud SERBINO, 2005).

Desgaste Corrosivo: Em motores de combustão interna, o desgaste corrosivo deve-se a reações triboquímicas (devido a misturas óleo/combustível) na face de contato anel/cilindro. A presença de enxofre no combustível aumenta o desgaste corrosivo (TOMANIK, 2001). Este desgaste ocorre sempre que as superfícies em contato se encontram em um ambiente corrosivo (McGEEHAN, 1978). O deslizamento entre as superfícies provoca a remoção do filme protetor formado, facilitando assim o ataque corrosivo destas superfícies pelo meio (GAHR, 1987).

Desgaste por Cavitação: A cavitação é um mecanismo de desgaste caracterizado por microcavidades decorrentes da formação e subsequente colapso, dentro de um líquido e próximo à parede que o confina, de bolhas contendo vapor, gás ou ambos. A cavitação resulta de uma redução localizada da pressão hidrostática, produzida seja pela movimentação de líquido (escoamento) seja por uma superfície sólida (vibração). A cavitação é um mecanismo de desgaste por fadiga, ou seja, o material é sujeito a forças cíclicas desenvolvidas em decorrência de sucessivos colapsos de bolhas gerando, nas paredes do material, microcavidades. Portanto, o material cavitado precisa absorver impactos consecutivos para não sofrer os desgastes devido à cavitação (PINTO, 2006).

Para ALLENSTEIN (2007), algumas características dos líquidos podem ter influência nos danos ocasionados por cavitação. Entre eles devem ser citadas:

- Alta pressão – o pico de pressão pode atingir algumas centenas de MPa ou até GPa. Isto quer dizer, maior que o limite elástico da maioria dos materiais;

- Pequena dimensão – a dimensão dos micro-jatos é muito pequena (desde poucos micrômetros até centenas de micrômetros). Então, cada impacto na superfície sólida se concentra numa área pequena;

- Tempo – a duração de um impacto é de apenas alguns microsegundos;

- Alta temperatura – por causa da dissipação localizada de energia durante o colapso, a temperatura local pode ser muito alta (na ordem de milhares de graus Celsius) (CHEN, 2005 apud ALLENSTEIN, 2007).

Segundo SERBINO (2005) o desgaste por cavitação afeta equipamentos como turbinas, bombas e outros dispositivos que transportam fluidos, os quais podem estar submetidos a mudanças bruscas de pressão, provocando efeitos de erosão de superfícies sólidas, vibrações, ruídos excessivos, diminuição de eficiência e outros, o que se traduz em enormes gastos para o reparo e reposição desses tipos de equipamentos.

SERBINO (2005) ainda cita dois tipos de desgates:

Erosão por Partículas Sólidas: O termo erosão, às vezes é confundido com um dos tipos de processos abrasivos, a diferença é que a erosão é realizada pelo choque de partículas sólidas, líquidas ou gasosas, em impacto e rebote na superfície, promovendo sua desaceleração, enquanto que abrasão ocorre sob deslizamento de uma partícula abrasiva, com, aplicação de carga externa, geralmente mantendo sua velocidade. Erosão por partículas sólidas é a perda de material resultante de repetidos impactos de partículas sólidas, contidos em gás ou líquidos a velocidades significativas. O mecanismo é regido pela formação de crateras oriundas da deformação plástica causadas pelo impacto que sólidas partículas promovem a superfície do metal, sendo que a princípio os metais são endurecidos na região de atuação da deformação plástica, podendo gerar tensões residuais de compressão, melhorando a resistência mecânica, em modo localizado.

Os mecanismos conhecidos do desgaste erosivo são apresentados na Figura 6, conforme STACHOWIAK e BATCHELOR (2000).

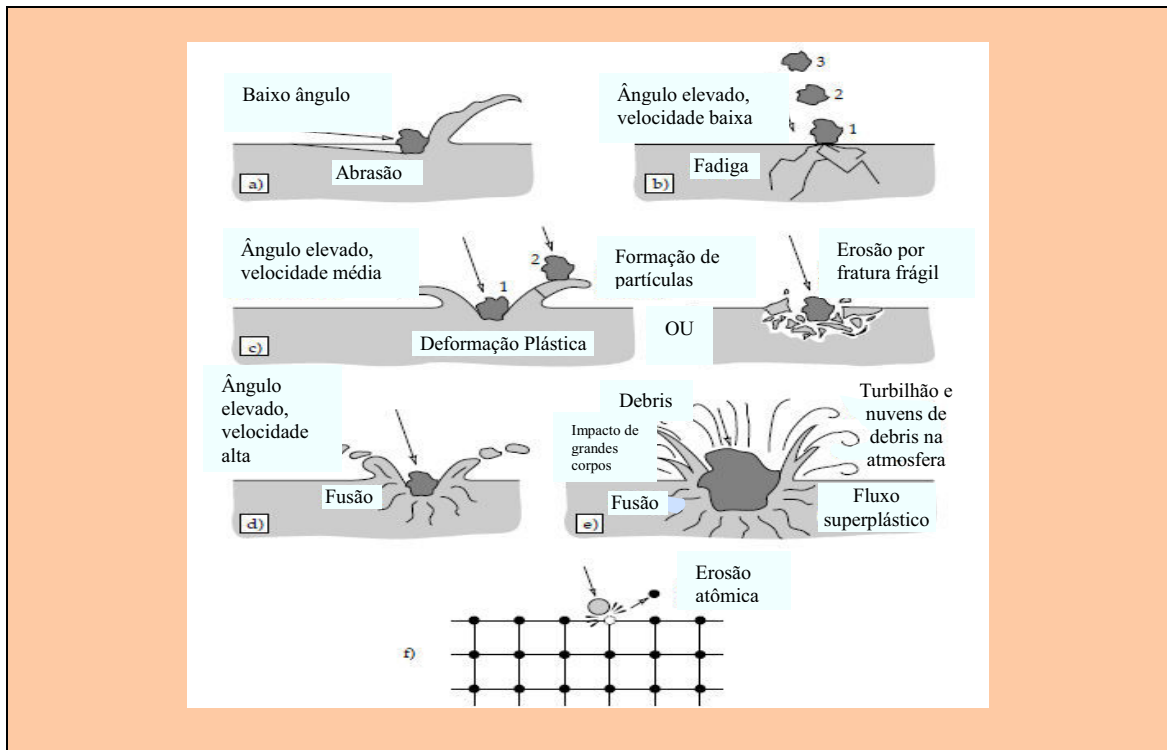


Figura 6 - Possíveis Mecanismos de Erosão: a) abrasão em baixos ângulos de impacto, b) fadiga na superfície durante baixa velocidade, impacto elevado do ângulo de colisão, c) fratura frágil ou deformação plástica múltipla durante a velocidade média, grande impacto do ângulo de colisão, d) superfície que derrete em velocidades elevadas de impacto, e) erosão macroscópica com efeitos secundários, f) degradação da estrutura de cristal dos impactos por átomos (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2000).

Desgaste por Fadiga de Contato: Caracteriza-se quando partículas são extraídas por variações de tensões cíclicas. No mecanismo por fadiga superficial ou de contato, o carregamento cíclico gerado por movimento relativo entre superfícies como rolamento, riscamento ou impacto de partículas, gera um nível de concentração de tensões, provocando deformação plástica pontual e posterior nucleação de trincas superficiais ou subsuperficiais. Essas trincas contribuem para o posterior destacamento de fragmentos de material por delaminação.

Para MEDEIROS (2002) uma das evidências da fadiga de contato referendada na literatura pertinente por TALLIAN (1992) apud DUMONT (1997), é a presença de danos identificados nos contatos:

- Lascamento, onde os ciclos termomecânicos subsequentes de deformações plásticas e encruamentos induzem a nucleação e propagação de trincas no campo de tensões hertzianas e promovem a formação de crateras macroscópicas;

- Microlascamento, onde os danos têm ordem de grandeza similar à do perfil de rugosidade superficial, além do contato apresentar superfícies lustrosas.

A cabeça do pistão está sempre mais quente (picos de, aproximadamente, 382°C) do que a sua borda (209°C) e do que os seus dois furos (225°C) para sediarem o respectivo pino. Assim, a resistência à fadiga do material na zona mais aquecida é menor que nas demais regiões, ainda que o material seja o mesmo. Os seus principais mecanismos de desgaste são (a) fadiga térmica na cabeça do pistão e (b) fadiga mecânica nas zonas que contêm os furos da parede do pistão que sediam o seu respectivo pino (SILVA, 2004).

Pinos de pistão geralmente são fabricados em aços para rolamentos comerciais. Nesses aços, um mecanismo comum a essas transformações é a migração de carbono por efeito das tensões cíclicas, correlacionando-se com a modificação das propriedades mecânicas do material. O fenômeno é acelerado na circunvizinhança de inclusões, provocando sobretensões localizadas. As decoesões são atribuídas à superação do limiar de compatibilidade entre o campo de tensões a que se submete o contato, as flutuações no atrito - com reflexo direto na posição variável de incidência da máxima tensão de cisalhamento - e o comportamento do material (GRAS e INGLEBERT, 1998 apud MEDEIROS, 2002).

Segundo VOSKAMP (1985) apud MEDEIROS (2002), as regiões de coloração escura (*der*, dark etching region) e as de coloração branca (*wer*, white etching region) surgem na microestrutura de aço AISI 52100 ou DIN 100Cr6, material utilizado no pino do pistão, após carregamento sob pressões de Hertz entre 2 e 4 GPa, entre 10^5 e 10^9 ciclos de tensão. O surgimento das regiões *der*, de coloração escura, deve-se às micromigrações de átomos de carbono provocadas por movimentos de discordâncias, associando tensões de cisalhamento às alterações microestruturais.

Segundo BAYER (1994) apud MARU (2003), há inúmeras propriedades ou características das superfícies que podem afetar tanto o comportamento como as transições devidas ao desgaste. Entre tais, têm-se as características geométricas (forma geral dos corpos e forma e distribuição das asperezas), propriedades mecânicas (módulo elástico, dureza e parâmetros de fadiga), características físicas (encruamento, difusão e parâmetros de rede) e características químicas (composição e polaridade da superfície). O desgaste é influenciado por esses fatores e também pode ser dependentes entre si. Uma situação de desgaste estável seria aquela em que os parâmetros de superfície não mudariam em função do desgaste.

Entre as características geométricas, tem-se a distribuição das tensões na região do contato, que muda quando o contato é afetado pelo desgaste. A Figura 7, segundo BAYER

(1994) apud MARU (2003) mostra o efeito do desgaste no contato esfera-plano. Inicialmente não-conforme, pode se tornar conforme ou continuar não-conforme.

A Figura 7 destaca algumas implicações do desgaste, entre as quais, deformação plástica. Tais fenômenos podem causar mudanças na densidade de discordâncias e no tamanho de grão das estruturas próximas à superfície, o que geralmente resulta em modificações nas propriedades de dureza e de fragilidade das superfícies.

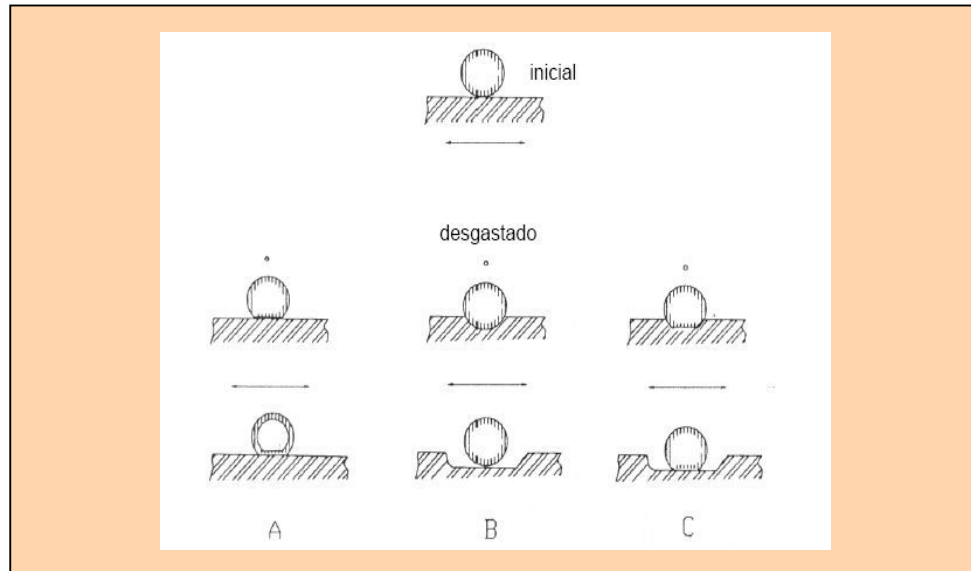


Figura 7 - Mudanças na configuração do contato como resultado do desgaste para uma esfera deslizando sobre um plano. A: somente a esfera se desgasta; B: somente o plano se desgasta; C: Ambos se desgastam (BAYER, 1994 apud MARU, 2003).

BAYER (1994) apud MARU (2003) menciona que, além das mudanças geométricas associadas com o desgaste, outras mudanças que influenciam as propriedades físicas e mecânicas das tribo-superfícies podem ocorrer, como as mudanças na composição e na estrutura. Um exemplo clássico de mudança de composição é o que ocorre no processo de desgaste oxidativo.

2.4. Teoria Geral e Mecanismos do Desgaste Oxidativo

A oxidação é a mais importante reação de corrosão em altas temperaturas. Os metais e ligas oxidam-se quando são aquecidos a temperaturas elevadas, no ar ou em meios oxidantes, onde os produtos e o meio possibilite a ocorrência das reações químicas (QUINN, 1992 apud MATAMOROS, 2004).

BAYER (1994) apud MARU (2003) também descreve a temperatura superficial

como um fator de importância a ser considerado no que se refere a tribo-superfícies. Entre os fatores que influenciam essa temperatura, há o calor gerado na superfície pelo atrito, as condutividades térmicas dos materiais, os caminhos para a condução de calor para fora da interface e a temperatura ambiente. Muitos fenômenos, tais como transformações de fase, formação de filme de óxido e amolecimento do material, estão intrinsecamente ligados à temperatura das superfícies de contato atingida durante o desgaste por deslizamento.

Para FARÍAS (2004) a influência da temperatura na cinética da oxidação é descrita por uma relação parabólica. Durante o contato por deslizamento de duas superfícies metálicas, a baixas temperaturas ou a temperatura ambiente, a oxidação do metal é muito rápida e ocorre nos contatos de asperezas, onde a temperatura pontual ou flash exerce uma marcada influência. Esse período de rápida oxidação é seguido pela passivação da superfície, limitando o crescimento do filme de óxido até uma espessura da ordem de 2 nm, para aços carbono e baixa liga, para temperaturas inferiores a 200°C, conforme FEHLNER (1986), ou até valores típicos de 2 µm de espessura, para temperaturas inferiores a 450°C (QUINN et al., 1979). Entretanto, a temperaturas elevadas, acima de 450°C, a oxidação passa a ser mais dominante fora dos contatos de asperezas, ocorrendo um crescimento mais acelerado do filme de óxido, chegando a atingir espessuras de 10 µm (QUINN, 1979).

A película de óxido formada é aderente ao metal e é extremamente fina. Na região onde se forma a película passiva o metal praticamente não é corroído (MATAMOROS, 2004).

Segundo HUQ e CELIS (2001) os processos de desgaste em contatos por deslizamento podem ser assumidos para serem dirigidos pela temperatura de contato, transformação de microestruturas, formação de finas camadas triboquímicas, fusão das superfícies de contato, ou falhas induzidas pela mecânica e tensões térmicas. O aumento da temperatura local e a perda de material no desgaste localizam ambos os resultados da energia dissipada de atrito na área de contato, conforme a Figura 8.

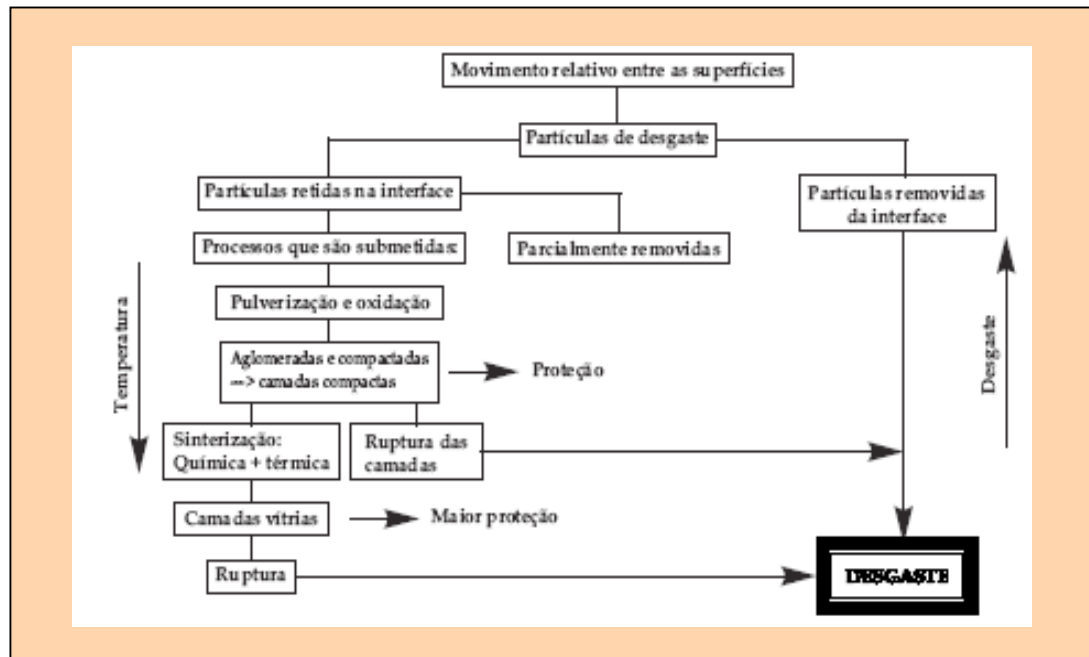


Figura 8 - Diagrama mostrando processo de desgaste por deslizamento em função da temperatura (Adaptado de JIAN et al., 1995 apud FARIAS, 2004).

O desgaste oxidativo é uma forma de desgaste que acontece num par deslizante, principalmente sob a ação da atmosfera ou sob condições de deslizamento com lubrificação em que $[\lambda < 1]$, ou seja, a relação entre a espessura do filme de óleo e a rugosidade das superfícies em contato é menor que um. Nesses casos, um filme de óxido é formado sobre as áreas reais de contato (“hot-spot”) a uma temperatura relativamente alta. Esta oxidação tribológica (tribooxidação) pode reduzir a taxa de desgaste em até mesmo duas ordens de grandeza, quando comparado com o desgaste do mesmo metal numa atmosfera inerte. No entanto, a redução na taxa de desgaste acontecerá somente se o filme de óxido for formado durante o deslizamento (MATAMOROS, 2004).

Na Figura 9, mostra-se uma curva com transição do desgaste descrita por HUTCHINGS (1992) apud MATAMOROS (2004).

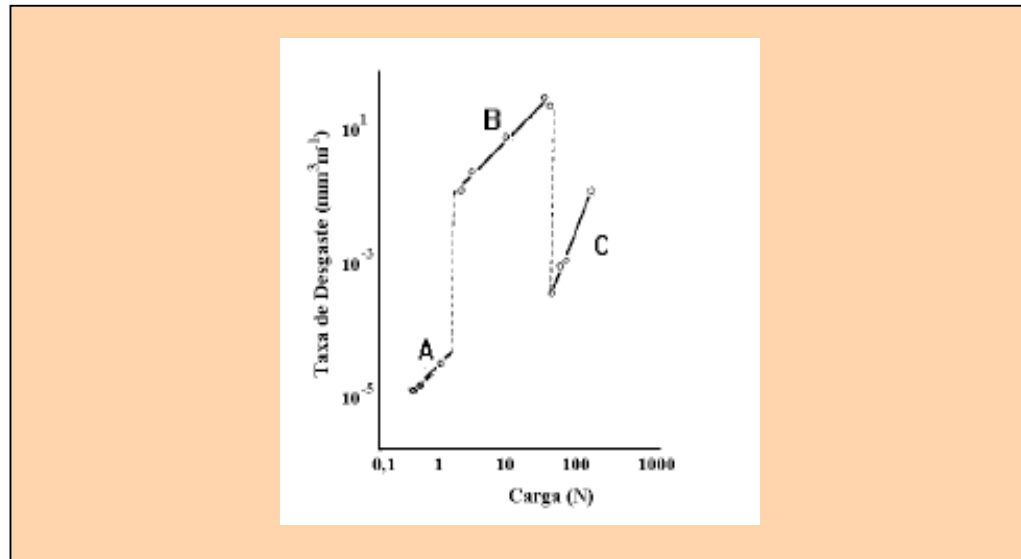


Figura 9 - Taxa de desgaste em ensaio de pino-sobre-disco com pino de aço 0,5 %C e disco de aço ferramenta; velocidade de 1 m/s. A: desgaste moderado, B: desgaste severo e C: desgaste moderado (HUTCHINGS, 1992 apud MATAMOROS, 2004).

A região **A** apresenta um mecanismo de desgaste para cargas baixas onde as taxas de desgaste são pequenas, aumentando à medida que se aumenta a carga. Essa região foi relacionada à ocorrência de formação de filme de óxido entre as superfícies em contato, em que os produtos do desgaste são partículas de óxidos. Com o aumento subsequente da carga, ocorre uma transição do desgaste moderado para severo, região **B**, indicando que o aumento da carga favorece a quebra das camadas de óxido. Neste caso, as partículas de óxido atuam como abrasivo e a taxa de desgaste atinge valores mais altos, acontecendo nesta região predominantemente o mecanismo de abrasão a três corpos e o contato é metal-metal e as partículas de desgaste são metálicas. Para que isto ocorra, a dureza dos óxidos deve ser, pelo menos, 20% menor que aquela de um dos corpos em contato, segundo HUTCHINGS (1992). A terceira região **C** do gráfico mostra a ocorrência de uma outra transição do regime de desgaste com diminuição da taxa de desgaste, onde a temperatura do contato cresce devido aos altos valores de carga, permitindo uma nova oxidação das superfícies pela ação da temperatura elevada no contato. Observa-se com isso que podem ocorrer dois tipos de oxidação no desgaste por deslizamento de aços, que depende do nível de carregamento e, conseqüentemente, da temperatura das superfícies em contato. Em geral, o desgaste oxidativo é relacionado ao regime de desgaste moderado.

As transições nos mecanismos de desgaste dependem do sistema tribológico, mais do que propriamente das características do material, o que torna complexa a obtenção de uma

sistematização do seu estudo. Além disso, observa-se que existe uma dificuldade na previsão da ocorrência das transições nos mecanismos de desgaste ao se englobar as diversas variáveis capazes de promover modificações, tanto topográficas quanto físico-químicas, nas superfícies de contato dos materiais. Pode-se citar como as variáveis mais importantes a dureza relativa entre os materiais, a temperatura, a carga e a velocidade, bem como as variáveis microestruturais, como a natureza e a distribuição das fases e a fração volumétrica do filme de óxido superficial (MATAMOROS, 2004).

O estudo do mecanismo de desgaste oxidativo em situações de deslizamento, é tópico de investigação desde os anos 1960 e tem sido objeto dos exames microscópicos e cristalográficos das superfícies desgastadas e das partículas de desgaste. Em geral, observa-se que no estado inicial dos processos, “running-in”, o desgaste é severo. Durante este período, as superfícies em contato vão se conformando, até que a área de cada pico ou patamar em contato chegue ao tamanho estável, conforme a teoria de deformação plástica de BOWDEN e TABOR mencionado por QUINN (1992), dada pela relação W/H , onde W é a carga aplicada e H é a dureza Brinell.

Ainda segundo QUINN (1983) no regime de desgaste oxidativo moderado, para velocidades superiores a 1 m/s, a temperatura de contato entre asperezas pode atingir valores muitos elevados (acima de 400°C), e se a carga no contato é baixa, de maneira que favoreça a ocorrência de desgaste moderado ocorre o crescimento de uma camada de óxido superficial. Nessas condições, a oxidação prossegue de maneira muito rápida, particularmente nos contatos de asperezas devido ao aquecimento por atrito.

LIM e ASHBY (1987) distinguiram dois regimes de desgaste oxidativo: moderado e severo, referindo-se à magnitude da oxidação e não à do desgaste. Para os dois regimes, a taxa de desgaste é baixa, típica do desgaste moderado.

Na Figura 10, apresenta-se a seqüência de eventos associados à formação e remoção de camadas de óxidos durante o desgaste oxidativo a altas velocidades (acima de 1 m/s) de acordo com QUINN (1983) e FARÍAS (2004).

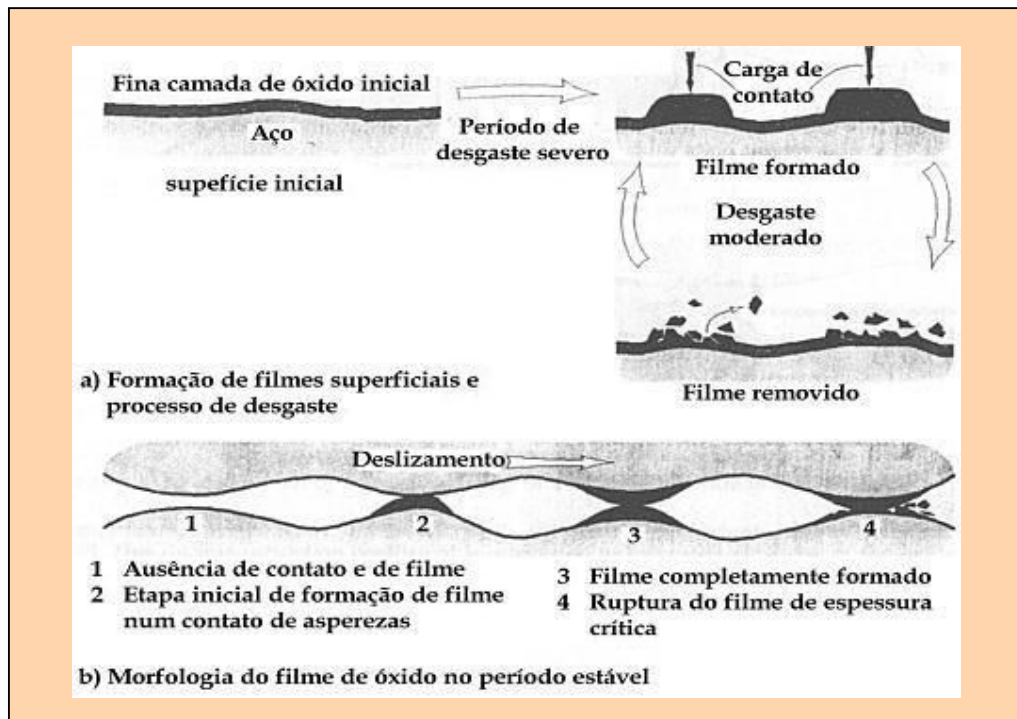


Figura 10 - Mecanismo de desgaste oxidativo para altas velocidades (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2000 apud FARIAS, 2004).

Segundo WELSH (1965), as superfícies têm rugosidade características em cada região do gráfico. No regime moderado, por exemplo, a aparência da superfície desgastada é lisa, demonstrado pelo perfil de rugosidade onde a altura das asperezas tem baixos valores ($0,5 \mu\text{m}$). Além disso, cada região apresenta valores diferenciados do coeficiente de atrito e dos resíduos de desgaste: no desgaste severo os resíduos de desgaste “debris” são metálicos e grandes (20 a $200 \mu\text{m}$), enquanto que no desgaste moderado, são pequenos e formados principalmente por óxidos ($0,01$ a $1 \mu\text{m}$).

Dois trabalhos de LIMA e colaboradores, associados a esta dissertação, foram apresentados e discutidos com pesquisadores em congressos brasileiros SBPMAT e CONEM. Esses artigos, aliados a outras comunicações, integravam a presente investigação e foram importantes pelas discussões efetuadas, reflexões suscitadas e na consolidação das etapas parciais de desenvolvimento desta Dissertação.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Fundamentação do método

Este trabalho foi realizado em duas etapas. Inicialmente, adotou-se a visão metodológica de Francis Bacon, o qual fez observações durante vários ensaios e, com dados em mãos, registrou evidências experimentais que induziram ao estabelecimento de relações e leis. A utilização desse método indutivo, que se baseia na experimentação, contribuiu para a sistematização e programação da segunda parte do trabalho, baseada no método dedutivo de René Descartes, que, da teoria, no racionalismo, faria hipóteses iniciais relativas ao “elo mais fraco da corrente”, buscaria informações básicas sobre temperaturas adiabática de chama e de fusão de óxidos e materiais presentes na câmara de combustão e sobre os movimentos relativos entre partes móveis do motor e formularia novas hipóteses, deduziria teoremas e soluções analíticas.

De acordo com MEDEIROS (2002), esse encadeamento metodológico indutivo-dedutivo da Ciência e Engenharia Tribológica se complementa com a lógica Hegeliana, que exigiria a fundamentação dos mecanismos envolvidos no processo de desgaste dos componentes do motor, consideraria o atrito, bem como inquiriria se há transição de desgaste decorrentes de combinações de parâmetros, materiais, formas e dimensões.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1. Considerações Metodológicas sobre Aspectos Triboquímicos dos Materiais da Câmara de Combustão

A câmara de combustão do motor ICE estudado é um reator que converte energia química do combustível em energia mecânica de acionamento de um rotor de hélice. Esse combustor tem partes móveis, fixas, movimentos relativos entre elas e fluxo de fluido com partículas no seu interior.

Utilizou-se o combustível padrão de aerodelismo, composto de Álcool Metílico, Nitrometano 10% (99,95% de Nitrometano Puro e 99,9% de Metanol Puro) e Lubrificante, aditivado com 18% de óleo (óleo sintético - 80%) e de rícino -20%.

3.2.2. Identificação dos Componentes Funcionais Investigados no Motor

1 - *Cabeçote do Motor e Pistão*: Foi identificada por meio de microscopia MEV-BSE e microanálise por EDS a utilização de ligas metálicas de Alumínio-Silício nos componentes dos motores ensaiados, esse fato é explicado na literatura, em função das suas propriedades mecânicas, resistência ao desgaste e demais mecanismos de deterioração triboquímica atuantes em uma câmara de combustão de um motor ICE (ignição por centelha). No cabeçote e na cabeça do pistão do motor 1, à guisa de ensaio exploratório dos possíveis compostos identificáveis ao final da sua vida em serviço de 6 milhões de ciclos, incluiu-se uma análise por difração de Raios-X (DRX).

2 - *Pino do Pistão*: Foi identificada por meio de microscopia MEV-BSE e microanálise por EDS a utilização de Aço AISI 52100, constituintes da maioria dos mancais de rolamentos e cuja composição apresenta-se na Tabela 1 (MEDEIROS, 2002).

Tabela 1 - Composição química mássica (%) do aço AISI 52100 (MEDEIROS, 2002).

C	Ni	Mn	Cr	P	Cu	S	Ti	Si	V	Fe
1,00	0,03	0,38	1,46	0,016	0,009	0,015	0,006	0,27	0,005	Bal

A Figura 11 apresenta os três componentes dos motores de aerodelismo que foram investigados neste estudo na condição “como adquiridos comercialmente”.

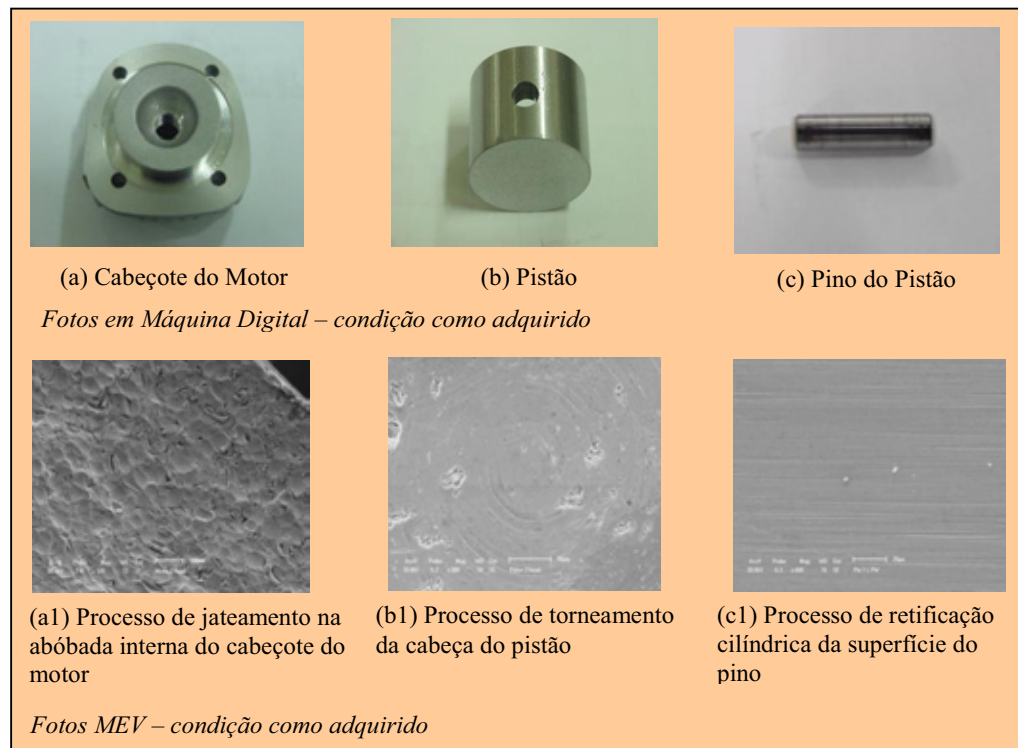


Figura 11 - Componentes de um dos motores de combustão interna investigados e respectivas texturas remanescentes da manufatura.

3.3 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

O objeto da pesquisa era correlacionar a evolução, no tempo, do desgaste com duas variáveis, (a) a temperatura em um locus externo do cabeçote do motor e (b) o número de ciclos de vida desse motor ICE. Para isso, usaram-se três motores de combustão interna de dois tempos de aeromodelismo, modelo O.S 46 LA, cilindrada $7,64 \text{ cm}^3$, 23,0 mm de diâmetro, curso de 18,4 mm, 1,2 HP de potência nominal, massa de 272 g, que trabalha entre 2.000 e 16.000 rpm.

O primeiro motor foi desmontado, analisado, fotografado e, após discussão concernente aos objetivos do trabalho, aos aspectos tribológicos, de transferência de calor, de captação do sinal de temperatura por termopar e erros experimentais associados, foram selecionados (a) os três componentes do motor, cuja evolução do desgaste seria acompanhado e (b) o locus da instalação dos termopares (b.1) sobre o cabeçote, para medição da temperatura T_{motor} e (b.2) a 5 cm do vértice da bancada, para aquisição da temperatura T_{ambiente} , Figura 12.

Os ensaios-piloto (“screening tests”) consistiram em:

(a) Primeiro amaciamento do motor, com duração de $8,0 \pm 0,5$ minutos, conforme

a Tabela 2, adotando-se procedimento padrão recomendado pelo fabricante do motor, em que a velocidade variou desde 2.000 ± 100 até 11.100 ± 100 rpm. Finda esta primeira etapa, o motor acumulava, naquele instante, uma vida de cerca de 60.000 ± 1.000 ciclos.

- (b) Desmontagem, inspeção visual, limpeza e análises por Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS dos três componentes do motor selecionado;
- (c) Montagem e segundo amaciamento do motor, durante cinco minutos, a 2.000 ± 100 rpm e, em seguida, durante três minutos numa transição de 2.000 rpm para 11.100 ± 100 rpm, com incrementos (adotados empiricamente) a cada dez segundos, repetindo-se o procedimento inicial até adotar este regime (“steady-state”) de alta rotação do motor, quando o motor acumulava, naquele instante, uma vida de cerca de $1,2 \times 10^5$ ciclos, com um erro de vida estimado em 1,1%;
- (d) Execução de ensaios a 11.200 ± 100 rpm de velocidade de giro nominal, durante 190 minutos, atingindo-se uma vida acumulada da ordem de $2,0 \times 10^6$ ciclos, ou 2,0 Megaciclos. Durante esse tempo, o motor consumiu 3,5 litros do combustível padrão para o motor, nitrometano+metanol+óleo lubrificante, adquirido comercialmente.
- (e) Desmontagem do motor, resgate e limpeza dos três componentes, análises por microscopia eletrônica de varredura e EDS.
- (f) Execução de ensaios a 11.125 ± 100 rpm, durante 197 minutos, atingindo-se uma vida acumulada de 4,0 Megaciclos, consumindo mais 3,5 litros do combustível padrão.
- (g) Desmontagem do motor, repetição do procedimento (e) supracitado.
- (h) Execução de ensaios a 11.000 ± 100 rpm, durante 190 minutos, atingindo-se uma vida acumulada de $6,0 \pm 0,2$ Megaciclos, consumindo mais 3,5 litros do combustível padrão, quando o ensaio foi interrompido pela parada de funcionamento do motor – registrado pela perturbação no sinal da temperatura medida na parede externa do cabeçote.
- (i) Análises finais dos três componentes do motor por MEV e EDS, demonstrando seus desgastes severos e consolidando o método.

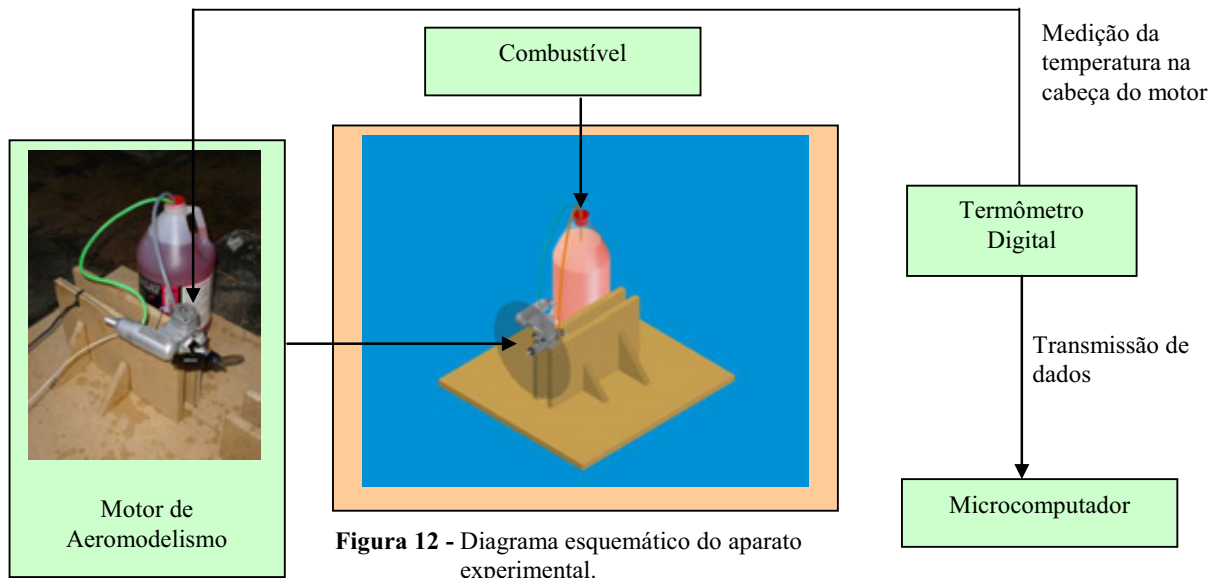


Tabela 2 – Duração dos Ensaios (horas).

MOTORES	RUNNING-IN (minutos)	1º ENSAIO (horas)	2º ENSAIO (horas)	3º ENSAIO (horas)	4º ENSAIO (horas)	TOTAL
MOTOR 1	8	3	3	3	-	9 hs e 8 minutos
MOTOR 2	8	3	6	4	6	19 hs e 8 minutos
MOTOR 3	8	3	6	9	-	18 hs e 8 minutos

Após as avaliações e evidências obtidas nos ensaios piloto, definiu-se o procedimento experimental adotado para as ciclagens subseqüentes nos dois novos motores, designados como motor 2 e motor 3. Os ensaios piloto (Motor 1) e com o motor 2 desenvolveram-se em uma bancada estacionária, com carregamento apenas de sua hélice como fornecida originalmente.

Nos ensaios com o terceiro motor, introduziu-se uma carga aerodinâmica proporcionada por um ventilador convencional de 450 mm de diâmetro de hélice, nas duas primeiras fases de ensaio, para investigar os efeitos decorrentes dessa ação de empuxo aerodinâmico sobre o aquecimento do cabeçote do motor.

Nos ensaios com os Motores 2 e 3 foi acoplado à bancada um novo tanque de combustível modelo INTEKI/C.305 em substituição ao tanque constituído pelo próprio depósito do galão (motor 1- ensaios-piloto), Figura 13.

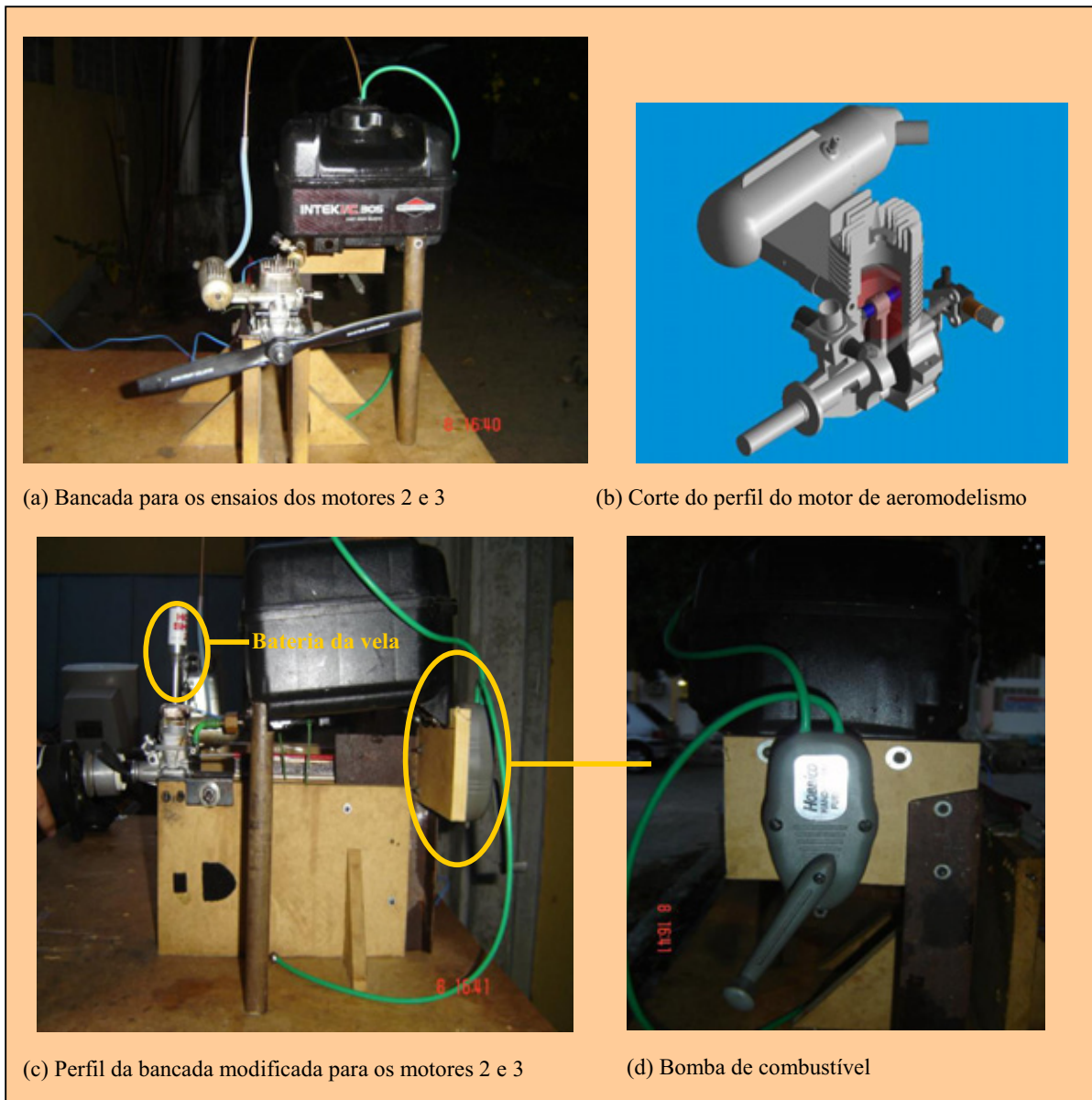


Figura 13 - Adaptações na bancada para realização dos ensaios nos motores 2 e 3.

3.3.1 Procedimento Experimental

Antes do início de cada ensaio e após o seu término, foram realizadas as medições de massa em balança analítica (Figura 14) nos três componentes dos motores em análise, com o objetivo de quantificar a variação mássica dos componentes.



Figura 14 - Registro da medição da massa dos componentes do motor em balança analítica.

As temperaturas ambiente e do cabeçote dos motores foram medidas para monitorar o aquecimento da superfície externa do cabeçote do motor e correlacioná-lo à evolução do desgaste de cada um dos motores ao longo da vida. Dois termopares tipo K foram conectados ao dispositivo de ensaio. Os sinais eram registrados em um microcomputador (Figura 15 (a)) com software de aquisição de dados, utilizando-se uma interface RS232.

Nos ensaios piloto, Motor 1, durante a primeira ciclagem, (2×10^6 ciclos), o termopar foi instalado na parte superior externa do cabeçote do motor distando $9,0 \pm 0,5$ mm do centro da vela, Figura 15 (b). Na seqüência, após avaliação de possíveis interferências por correntes parasitas devido à vela de ignição, optou-se, a partir da segunda ciclagem desse Motor 1, por instalar o termopar distando cerca de $23,0 \pm 0,5$ mm do centro da vela, *locus* definitivo adotado a partir de então e para os ensaios com os motores 2 e 3.

As medições da velocidade da hélice do motor foram realizadas por um tacômetro durante todo o ensaio, a cada 5 minutos (motor 1 – ensaios piloto) e 10 minutos (ensaios com os motores 2 e 3).

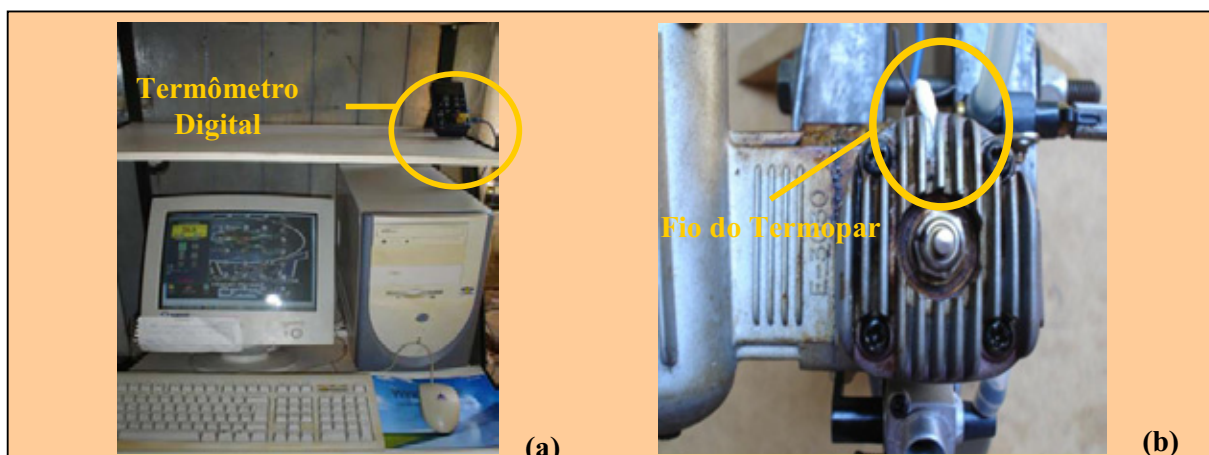


Figura 15 - (a) Sistema de aquisição da temperatura, (b) *Locus* do termopar utilizado na medida da temperatura do cabeçote do motor, encapsulado com um filme de PTFE para isolamento.

Após cada ensaio, as peças (pino, pistão e cabeçote) que deveriam ser analisadas por MEV eram submetidas a banho de ultrassom com acetona por 20 minutos, Figura 16 (a).

A seguir, eram secadas e os três componentes do motor eram metalizados com ouro, Figura 16 (b), examinados através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e nas partes de interesse eram executadas micro-análises por EDS (Fluorescência de Raios-X por energia dispersiva), Figura 16 (c), com o objetivo de avaliar os seus principais mecanismos de desgaste e caracterizar os óxidos e substratos.



Figura 16 – Equipamentos utilizados nas análises das peças (pino, pistão e cabeçote).

Os desvios de forma que afetam as dimensões nominais das peças foram medidos. Para as diferentes morfologias de óxidos foram realizadas medições das áreas que se formaram especificamente no cabeçote, conforme apresentado na Figura 17. Verificou-se, assim, a correlação do aquecimento da parede externa do cabeçote pela variação das medidas da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) com a evolução da vida, em número de ciclos e com as dimensões dos óxidos. Para isso, foram escolhidas algumas imagens representativas da nucleação, evolução do tamanho e porosidade dos óxidos após cada ensaio.

A seleção de sete áreas de nucleação de *óxidos proeminentes na parede interna do cabeçote* utilizou imagens das análises MEV após cada ciclagem (universo de dados). Tais áreas foram confrontadas com *os sete maiores e sete menores valores do aquecimento da parede externa do cabeçote* obtidos pela variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$).

Essas áreas de óxidos foram consideradas desenvolvidas como uma função dos mecanismos de desgaste decorrentes dos campos de solicitações termomecânicas do motor, natureza das misturas combustíveis-ar-lubrificante e da hidrodinâmica da câmara de combustão ao longo de cada ciclagem. Constatou-se baixo valor de correlação entre as sete áreas e os valores de variação do *aquecimento da parede externa do cabeçote* obtidos pela variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) em alguns ensaios (Tabelas 8 e 9).

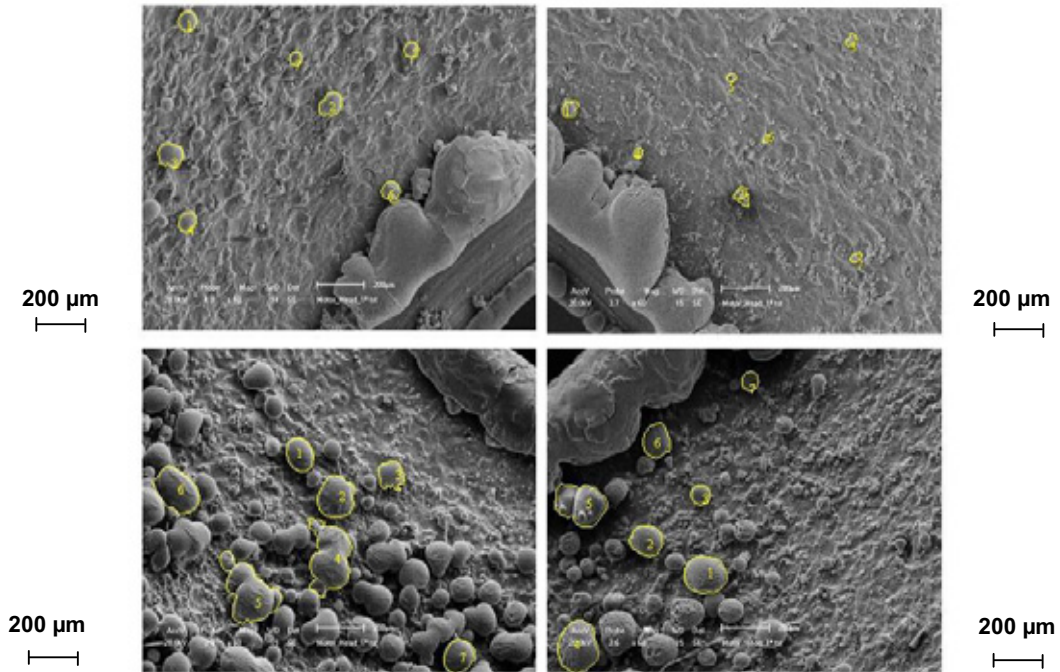


Figura 17 (a) – Áreas de óxidos analisadas próxima à abobada do cabeçote.

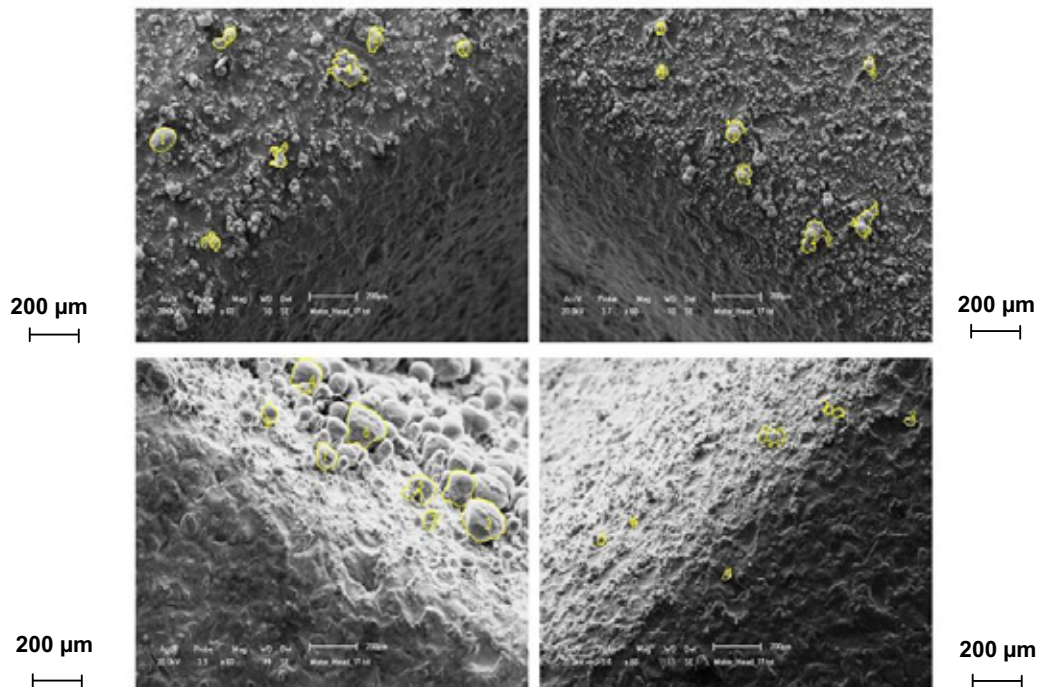


Figura 17 (b) – Áreas de óxidos analisadas próxima ao anel do cabeçote.

A partir desses resultados, utilizou-se como critério de correlação os quatorze maiores *valores do aquecimento da parede externa do cabeçote* obtidos pela variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) em cada ciclagem para confrontá-los com as sete áreas de *óxidos proeminentes na parede interna do cabeçote* medidas utilizando-se imagens obtidas por MEV.

As Tabelas 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 contêm o coeficiente de correlação r , entre as sete áreas de *óxidos proeminentes na parede interna do cabeçote* confrontadas com *os sete maiores e sete menores valores do aquecimento da parede externa do cabeçote* obtidos pela variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$). As Tabelas 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16 contêm o coeficiente de correlação r , entre as sete áreas de *óxidos proeminentes na parede interna do cabeçote* confrontadas com *os quatorze maiores valores do aquecimento da parede externa do cabeçote* obtidos pela variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$), assumindo-se assim a hipótese de que o desgaste oxidativo das zonas de óxidos proeminentes era termicamente ativado.

As duas últimas colunas das tabelas abaixo devem ser entendidas da seguinte forma:

- A correlação direta concerne à associação entre os menores valores de área com os menores aquecimentos e, da mesma forma, maiores valores de área de óxidos nas regiões com os maiores aquecimentos;
- Por sua vez, a correlação cruzada se dá pela associação entre as maiores áreas e as menores aquecimentos e, por conseqüência, as menores áreas com os maiores aquecimentos. Essa terminologia não tem significado estatístico, serve apenas para entendimento dos dados expostos nas tabelas.

Tabela 3 – Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 2 no 1º ensaio.

	1º Ensaio - M2							
	ΔT [K]	ΔT^4 [K] ⁴	Abobada (μm^2)	Anel (μm^2)	Correlação			
					DIRETA		CRUZADA	
MENORES	145,4	446948646	820	178	0,85	0,96	0,93	0,67
	156	592240896	848	405				
	156,2	595283874	946	473				
	163,4	712866504	1125	549				
	167,6	789034617	1149	585				
	168,4	804207925	1530	588				
	170,7	849051599	1915	713				
MAIORES	195,7	1466774336	33262	3015	0,95	0,84	0,83	0,87
	196,6	1493943090	40061	3405				
	197,1	1509198960	46098	3732				
	197,5	1521487539	69890	9088				
	197,7	1527659894	94848	10219				
	211,5	2000974190	171802	12521				
	211,6	2004761223	242348	21384				

Tabela 4 – Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 2 no 2º ensaio.

	2º Ensaio - M2							
	$\Delta T[\text{K}]$	$\Delta T^4[\text{K}]^4$	Abobada (μm^2)	Anel (μm^2)	Correlação			
					DIRETA		CRUZADA	
MENORES	111,2	152904106	634	460	0,94	0,89	0,87	0,99
	118,8	199189189	848	674				
	122,2	222989710	991	918				
	123,2	230378969	1323	979				
	123,5	232631130	1338	1024				
	126,5	256072005	1442	1832				
	127,6	265095709	1793	2052				
MAIORES	189,5	1289546055	5869	7043	0,99	0,88	0,78	0,95
	189,6	1292270207	6107	7963				
	190	1303210000	7323	11198				
	190,4	1314219105	9216	13027				
	190,6	1319749740	12963	13607				
	193,4	1399026301	28259	16085				
	194,2	1422318642	35198	16771				

Tabela 5 – Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 2 no 3º ensaio.

	3º Ensaio - M2							
	$\Delta T[\text{K}]$	$\Delta T^4[\text{K}]^4$	Abobada (μm^2)	Anel (μm^2)	Correlação			
					DIRETA		CRUZADA	
MENORES	67,7	2957428027	1625	1085	0,81	0,60	0,76	0,56
	68,9	2957428027	3909	5988				
	74,4	2957428027	4863	6096				
	78,8	2962504067	6671	7009				
	80,8	3013624614	6918	7695				
	84,6	3018772808	8585	7890				
	85,6	3065403922	8829	8015				
MAIORES	260,2	4583837032	29844	56311	0,88	0,99	0,97	0,93
	261,4	4668983434	31125	59494				
	262,2	4726403001	34015	63558				
	263,3	4806217677	42732	74477				
	264,3	4879649773	64628	81929				
	268	5158686976	77195	92567				
	278,2	5990023175	87704,	157259				

Tabela 6 – Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 2 no 4º ensaio.

	4º Ensaio - M2							
	$\Delta T[\text{K}]$	$\Delta T^4[\text{K}]^4$	Abobada (μm^2)	Anel (μm^2)	Correlação			
					DIRETA		CRUZADA	
MENORES	80,4	41785365	1253	13534	0,74	0,86	0,94	0,94
	101,8	107396743	3921	24476				
	102,4	109951163	9326	29183				
	102,7	111245326	14366	35195				
	104,7	120167417	2435	38799				
	105,3	122945740	24845	43165				
	105,4	123413436	25201	48915				
MAIORES	171,6	867099896	25814	70653	0,91	0,95	0,56	0,73
	172	875213056	34027	83595				
	176,9	979290027	35594	987223				
	182,1	1099612791	55107	119549				
	188,9	1273291476	57631	128463				
	190,1	1305955767	132107	162802				
	198,7	1558803845	152658	166796				

Tabela 7 – Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 3 no 1º ensaio.

	1º Ensaio - M3							
	$\Delta T[\text{K}]$	$\Delta T^4[\text{K}]^4$	Abobada (μm^2)	Anel (μm^2)	Correlação			
					DIRETA		CRUZADA	
MENORES	95,1	81794117	468	491	0,87	0,90	0,92	0,94
	96,9	88164776	1019	727				
	100,2	100802403	1179	840				
	151,2	522645439	1255	882				
	170,8	851042925	1366	1032				
	180,3	1056775915	2093	1130				
	184,5	1158738620	2916	1489				
MAIORES	195,7	2120893546	19266	7099	0,97	0,83	0,94	0,82
	196,6	2152696456	19778	7343				
	197,1	2160702757	22336	9019				
	197,5	2201069770	25519	11402				
	197,7	2233768483	25604	11429				
	211,5	2283497973	35217	19034				
	211,6	2287679245	35979	34475				

Tabela 8 – Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 3 no 2º ensaio.

	2º Ensaio – M3							
	$\Delta T[\text{K}]$	$\Delta T^4[\text{K}]^4$	Abobada (μm^2)	Anel (μm^2)	Correlação			
					DIRETA		CRUZADA	
MENORES	87,1	57553617	2617	6978	0,72	<u>-0,05</u>	0,66	-0,11
	138,2	364780969	2633	4746				
	141,5	400890495	3438	4889				
	142,6	413502464	3440	5823				
	143,2	420505879	4184	11174				
	145,2	444494576	4212	5419				
	145,9	453128280	4219	6129				
MAIORES	173,3	901974482	9196	12071	0,79	<u>-0,23</u>	0,45	-0,42
	174,2	920857867	10516	9675				
	174,2	920857867	10687	5345				
	174,2	920857867	11201	7013				
	174,2	920857867	11918	13704				
	174,2	920857867	12439	3612				
	174,9	935748712	23711	9732				

Tabela 9 – Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 3 no 3º ensaio.

	3º Ensaio – M3							
	$\Delta T[\text{K}]$	$\Delta T^4[\text{K}]^4$	Abobada (μm^2)	Anel (μm^2)	Correlação			
					DIRETA		CRUZADA	
MENORES	121,2	215779648	1787	7219	0,96	<u>0,40</u>	0,95	0,15
	121,3	216492673	2658	21306				
	128	268435456	3235	73544				
	128,5	272654400	3558	11954				
	132	303595776	4736	43584				
	136,1	343109309	4871	68711				
	136,9	351247945	546	19473				
MAIORES	208,4	1886213542	18869	87336	0,98	<u>0,01</u>	0,95	0,01
	208,9	1904380649	26664	12091				
	209	1908029761	32104	25109				
	211	1982119441	41074	4764				
	212,4	2035251341	70183	53976				
	214	2097273616	72037	59339				
	215,4	2152696456	86764	30846				

Tabela 10 – Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 2 no 1º ensaio.

	1º Ensaio - M2							
	ΔT [K]	ΔT^4 [K] ⁴	Abobada (μm^2)	Anel (μm^2)	Correlação			
					DIRETA		CRUZADA	
QUATORZE MAIORES TEMPERATURAS	194,4	1428186891	819	177	0,80	0,94	0,93	0,67
	194,6	1434073279	848	405				
	195	1445900625	945	473				
	195	1445900625	1125	549				
	195,2	1451841657	1149	585				
	195,3	1454819030	1530	588				
	195,3	1454819030	1915	713				
	195,7	1466774336	33262	3015	0,95	0,84	0,77	0,78
	196,6	1493943090	40061	3405				
	197,1	1509198960	46098	3732				
	197,5	1521487539	69890	9088				
	197,7	1527659894	94848	10219				
	211,5	2000974190	171802	12521				
	211,6	2004761223	242348	21384				

Tabela 11 – Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 2 no 2º ensaio.

	2º Ensaio - M2							
	ΔT [K]	ΔT^4 [K] ⁴	Abobada (μm^2)	Anel (μm^2)	Correlação			
					DIRETA		CRUZADA	
QUATORZE MAIORES TEMPERATURAS	186,1	1199459235	634	460	0,94	0,93	0,87	0,99
	186,1	1199459235	848	674				
	186,7	1215002780	991	918				
	186,8	1217607985	1323	979				
	187,5	1235961914	1338	1024				
	187,7	1241243795	1442	1832				
	189	1275989841	1793	2052				
	189,5	1289546055	5868	7043	0,99	0,88	0,93	0,91
	189,6	1292270207	6107	7963				
	190	1303210000	7323	11198				
	190,4	1314219105	9216	13027				
	190,6	1319749740	12963	13607				
	193,4	1399026301	28259	16085				
	194,2	1422318642	35198	16771				

Tabela 12 – Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 2 no 3º ensaio.

	3º Ensaio - M2							
	$\Delta T[\text{K}]$	$\Delta T^4[\text{K}]^4$	Abobáda (μm^2)	Anel (μm^2)	Correlação			
					DIRETA		CRUZADA	
QUATORZE MAIORES TEMPERATURAS	255,5	4261511040	1625	1085	0,99	0,88	0,76	0,56
	256,4	4321873822	3909	5988				
	257,2	4376065935	4863	6098				
	258,1	4437639496	6671	7009				
	258,1	4437639496	6918	7695				
	259,3	4520745588	8585	7890				
	259,1	4506814178	8829	8015				
	260,2	4583837032	29844,51	56311	0,88	0,99	0,89	0,74
	261,4	4668983434	31125	59494				
	262,2	4726403001	34015,24	63558				
	263,3	4806217677	42731,71	74479				
	264,3	4879649773	64628,05	81929				
	268	5158686976	77195,12	92567				
	278,2	5990023175	87704,27	157259				

Tabela 13 – Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 2 no 4º ensaio.

	4º Ensaio - M2							
	$\Delta T[\text{K}]$	$\Delta T^4[\text{K}]^4$	Abobada (μm^2)	Anel (μm^2)	Correlação			
					DIRETA		CRUZADA	
QUATORZE MAIORES TEMPERATURAS	164,6	734039319	1253	13535	0,96	0,98	0,94	0,94
	165,5	750225795	3921	24476				
	166,4	766678506	9326	29183				
	167,7	790919440	14366	35195				
	167,9	794699216	24351	38799				
	168,5	806119860	24845	43165				
	168,8	811876123	25201	48915				
	171,6	867099896	25814	70652	0,91	0,95	0,83	0,97
	172	875213056	34027	83595				
	176,9	979290027	35595	98723				
	182,1	1099612791	55107	119549				
	188,9	1273291476	57631	128463				
	190,1	1305955767	132107	162802				
	198,7	1558803845	152656	166796				

Tabela 14 – Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 3 no 1º ensaio.

	1º Ensaio							
	ΔT [K]	ΔT^4 [K] ⁴	Abobada (μm^2)	Anel (μm^2)	Correlação			
					DIRETA		CRUZADA	
QUATORZE MAIORES TEMPERATURAS	210,4	1959669990	468	491	0,75	0,81	0,92	0,94
	213,4	2073851525	1019	727				
	213,5	2077741515	1179	840				
	213,5	2077741515	1255	882				
	213,6	2081636975	1366	1032				
	213,6	2081636975	2094	1130				
	214,5	2116943105	2916	1489				
	214,6	2120893546	19266	7099	0,97	0,83	0,62	0,58
	215,4	2152696456	19778	7343				
	215,6	2160702757	22336	9019				
	216,6	2201069770	25519	11402				
	217,4	2233768483	25604	11429				
	218,6	2283497973	35217	19035				
	218,7	2287679245	35979	34475				

Tabela 15 – Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 3 no 2º ensaio.

	2º Ensaio							
	ΔT [K]	ΔT^4 [K] ⁴	Abobada (μm^2)	Anel (μm^2)	Correlação			
					DIRETA		CRUZADA	
QUATORZE MAIORES TEMPERATURAS	173,1	897817924	2617	1634	0,65	0,93	0,66	0,95
	173,2	899894403	2633	3162				
	173,2	899894403	3438	3209				
	173,2	899894403	3440	3612				
	173,2	899894403	4184	3730				
	173,2	899894403	4212	4037				
	173,3	901974482	4219	4746				
	173,3	901974482	9196	9732	0,80	0,71	0,852	0,78
	174,2	920857867	10516	10799				
	174,2	920857867	10687	11174				
	174,2	920857867	11201	11389				
	174,2	920857867	11918	12071				
	174,2	920857867	12439	13705				
	174,9	935748712	23711	114485				

Tabela 16 – Correlação entre a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e a área dos óxidos “abobada” e “anel” (μm^2) para o motor 3 no 3º ensaio.

	3º Ensaio							
	ΔT [K]	ΔT^4 [K] ⁴	Abobáda (μm^2)	Anel (μm^2)	Correlação			
					DIRETA		CRUZADA	
QUATORZE MAIORES TEMPERATURAS	203	1698181681	1787	4764	0,89	091	0,95	0,97
	203,4	1711605977	2658	5263				
	204,9	1762657096	3235	7092				
	204,9	1762657096	3557	7219				
	205	1766100625	4736	9009				
	206	1800814096	4871	11556				
	208,4	1886213542	5462	11804				
	208,4	1886213542	18869	59339	0,98	0,95	0,88	0,96
	208,9	1904380649	26664	68711				
	209	1908029761	32104	69108				
	211	1982119441	41074	73544				
	212,4	2035251341	70183	74106				
	214	2097273616	72032	87335				
	215,4	2152696456	86764	99537				

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO DESGASTE

A Tabela 17 apresenta os métodos utilizados na caracterização do desgaste.


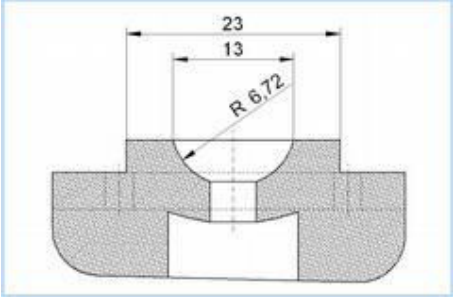
Tabela 17 – Avaliação do desgaste segundo escalas diversas e caracterização.

Escala	Método de caracterização	Escopo
Milimétrica	Desvio de Forma (1ª Ordem)	Metrologia Desvio de Cilindricidade
	História térmica	Transferência de Calor Aquecimento da parede externa do cabeçote relativo ao ambiente
	Variação mássica	Metrologia Variação mássica do cabeçote, pistão e pino
Micrométrica	Análise estatística	Transferência de Calor e Materiais Correlação da variação da temperatura e o número de ciclos com as dimensões dos óxidos
	Microscopia e Composição das Superfícies	Materiais Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com micro-análise por EDS (Fluorescência de Raios-X por energia dispersiva); Evolução de óxidos e sua distribuição geométrica na câmara de combustão

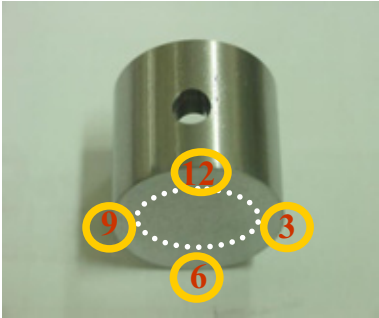
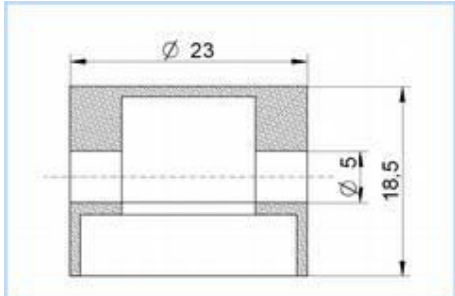
3.4.1 Zonas selecionadas de Componentes do Motor para Análise do Desgaste

Os Quadros 1, 2 e 3 apresentam as zonas submetidas às diferentes solicitações termomecânicas do pino, do pistão e da parte interna do cabeçote.

Quadro 1 - Critério de estratificação das cinco zonas superficiais do cabeçote do motor (parte interna em abóbada).

Cabeçote do Motor	Zona na coroa circular do cabeçote do motor	
	A, B, C, D	Circundante ao furo da vela
	Zona de interface entre abóbada e a coroa circular	Base da abóbada
		
	Cotas expressas em milímetros	

Quadro 2 – Critério de estratificação das cinco zonas superficiais do pistão.

Pistão	Zona no setor circular da cabeça do pistão				
	12 horas	3 horas	6 horas	9 horas	Centro
	Próxima à cavidade do pistão	Em sentido horário após o ponto 12 h	Próxima ao cavidade do pistão	Em sentido horário após o ponto 6 h	Central da superfície do pistão
					
	Cotas expressas em milímetros				

Quadro 3 - Critério de estratificação das cinco zonas superficiais do pino.

Pino	Zona circunferencial do pino				
	A	B	C	D	E
	Contato entre o pino e a parede do pistão	Contato físico ausente; ambiente oxidativo	Contato entre o pino e a biela	Contato físico ausente; ambiente oxidativo	Contato entre o pino e a parede do pistão
	<p> ■ Zona de Contato com o Pistão ■ Zona Sem Contato ■ Zona de Contato com a Biela </p> <p>(Cotas expressas em milímetros)</p>				

3.4.2 Equipamentos Utilizados no Desenvolvimento Experimental

A relação completa dos equipamentos utilizados durante o desenvolvimento experimental desta dissertação é discriminada abaixo.

Quadro 4 - Procedimento e Equipamentos utilizados no desenvolvimento experimental – motor 1 – teste piloto.

Etapa	Procedimento	Equipamentos
1	Medida de temperatura	Dois termopares tipo-K acoplados a uma interface RS-232, Instrutherm TH-060, resolução 1°C, do Laboratório de Dinâmica e Tribologia do Depto de Engenharia Mecânica da UFRN.
2	Medição da rotação	Tacômetro modelo HANGAR 9 – Micro Digital Tach do Laboratório de Dinâmica e Tribologia do Depto de Engenharia Mecânica da UFRN.
3	Banho ultra-sônico	Metason - 14 de fabricação Panambra do Laboratório de Ensaios de Materiais do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis-CTGAS-ER.
4	Secagem	Secador Taiff Turbo do Laboratório de Ensaios de Materiais do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis-CTGAS-ER.
5	Estudo da superfície dos corpos de prova e da subsuperfície da zona de contato	Equipamento modelo SSX – 550 Superscan de fabricação Shimadzu do Laboratório de Ensaios de Materiais do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis-CTGAS-ER.
6	Danos relacionados aos materiais e à composição química gerada dos óxidos	Micro-analise por EDS (Fluorescência de Raios-X por energia dispersiva), acoplado ao equipamento modelo SSX – 550 Superscan de fabricação Shimadzu do Laboratório de Ensaios de Materiais do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis CTGAS-ER.

Quadro 5 - Procedimento e Equipamentos utilizados no desenvolvimento experimental – motores 2 e 3.

Etapa	Procedimento	Equipamentos
1	Medição de massa	Balança analítica modelo AW 220, precisão 0,1 mg - Shimadzu do Laboratório de Ensaios de Materiais do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis- CTGAS-ER.
2	Medidas de circularidade	Equipamento modelo Measure 353 de fabricação Mitutoyo QM do Laboratório de Metrologia do Depto de Engenharia Mecânica da UFRN.
3	Medida de temperatura	Dois termopares tipo-K acoplados a uma interface RS-232, TD 990 – Termômetro Digital, resolução 1°C, do Laboratório de Dinâmica e Tribologia do Depto de Engenharia Mecânica da UFRN.
4	Medição da velocidade e do número de ciclos	Tacômetro Digital – TC – 5030 – ICEL do Laboratório de Dinâmica e Tribologia do Depto de Engenharia Mecânica da UFRN.
5	Banho ultra-sônico	Metason - 14 de fabricação Panambra do Laboratório de Ensaios de Materiais do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis-CTGAS-ER.
6	Secagem	Secador Taiff Turbo do Laboratório de Ensaios de Materiais do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis- CTGAS-ER.
7	Estudo da superfície dos corpos de prova e da subsuperfície da zona de contato	Equipamento modelo SSX – 550 Superscan de fabricação Shimadzu do Laboratório de Ensaios de Materiais do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis- CTGAS-ER.
8	Danos relacionados aos materiais e à composição química gerada dos óxidos	Micro-análise por EDS (Fluorescência de Raios-X por energia dispersiva), acoplado ao equipamento modelo SSX – 550 Superscan de fabricação Shimadzu do Laboratório de Ensaios de Materiais do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis- CTGAS-ER

3.5 ANÁLISE QUALITATIVA DOS PRINCIPAIS ERROS

(1) Medição da temperatura: Os termopares utilizados nos ensaios foram calibrados, adotando-se dois pontos termodinâmicos de referência, o ponto tríplice da água (0°C) e água em evaporação (100°C). Inicialmente, o posicionamento do termopar solidário ao corpo-de-prova - motor 1- ensaios-piloto foi realizado com dificuldade de fixação da distância em relação ao centro da vela. Usou-se fita de PTFE para isolá-lo e ajudar a fixá-lo, após a segunda ciclagem dos ensaios-piloto.

- (2) **Vibração durante o ensaio:** Nos ensaios-piloto, causou folgas nos parafusos de fixação da válvula controladora de fluxo tipo agulha (responsável pela passagem de combustível para o motor) e dificultou a fixação do termopar no cabeçote do motor, ocasionando paradas nos ensaios. Resolveu-se aumentando o seu torque de aperto.
- (3) **Realização dos ensaios:** Foi observado nos ensaios-piloto que, em horários diurnos, o motor não podia trocar calor por convecção forçada durante os ensaios de forma similar àquela para a qual foi projetado e a sua temperatura chegava a picos extremamente altos, variando de 278°C a 298°C, ocasionando, por vezes, o seu travamento.
- (4) **Retirada do pino:** O pino era solidário ao pistão através de um ajuste inicialmente deslizante e, a partir do segundo ensaio, um ajuste interferente. Assim, como o pino necessitava ser retirado para análise por MEV, a sua remoção da parede do pistão provocava desgaste abrasivo na direção axial.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Relação entre Morfologia dos Óxidos e Variação de Temperatura

Em um motor de combustão interna ICE, dois tempos, o estabelecimento de camadas de óxido na liga de Alumínio-Sílicio (Cabeça do Pistão e Cabeçote do motor) e no Aço 52100 (Pino do Pistão) ocorre por um processo triboquímico de nucleação e crescimento, considerando-se que quando o componente recém-fabricado é exposto à atmosfera rica em oxigênio, óxidos termodinamicamente estáveis, ou não, desenvolvem-se na forma de pequenos núcleos na superfície nano e micrométrica. Nessa situação, a formação de vários tipos de óxidos podem ocorrer simultaneamente, a taxas diferentes, o que pode ser explicado, considerando que atuam como catalisadores nas superfícies, a ação da pressão e temperatura, decorrentes do processo de combustão em série, em intervalos freqüentes da ordem de 10^{-3} a 10^{-4} segundos.

A abordagem em relação à formação de fadiga térmica encontrada nos três componentes dos motores foi baseada na investigação dos constituintes microestruturais de ferros fundidos brancos multicomponentes (ligas Fe-Cr-V-Mo-W-C) presente no trabalho de SILVA (2003) e ferros fundidos cinzentos (ligas C-Si-S-P-Mn) na literatura de SERBINO (2005).

A formação de óxidos nas superfícies desgastadas foi prevista de acordo com o aumento da temperatura e o número de ciclos baseado na literatura como os de [HUTCHINGS (1992); (QUINN, 1992) apud MATAMOROS (2004) e BAYER (1994) apud MARU (2003)].

A Figura 21 apresenta o critério utilizado para a identificação de nucleação, propagação e porosidade dos óxidos após cada ensaio estacionário (universo de dados) a partir da seleção de sete áreas de cada imagem de MEV. Os dados referentes aos valores de coeficiente de correlação r entre as áreas de óxidos gerados nos cabeçotes dos motores 2 e 3, as quatorze maiores variações da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$), juntamente com o número de ciclos, demonstraram representatividade como apresentados nos Quadro 6 e 7 abaixo:

Quadro 6 – Correlação para as dimensões dos óxidos em relação à variação da temperatura
($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$).

(1º Ensaio)	Coefficiente de correlação (r)	Correlação	ΔT (Tm-Ta)
Abóbada do cabeçote do <i>Motor 2</i>	0,80	Correlação positiva forte	194,4 a 195,3
	0,95		195,7 a 211,6
Anel do cabeçote do <i>Motor 2</i>	0,94		194,4 a 195,3
	0,84		195,7 a 211,6
Abóbada do cabeçote do <i>Motor 3</i>	0,75		210,4 a 214,5
	0,97		214,6 a 218,7
Anel do cabeçote do <i>Motor 3</i>	0,81		210,4 a 214,5
	0,83		214,6 a 218,7
(2º Ensaio)	Coefficiente de correlação (r)	Correlação	ΔT (Tm-Ta)
Abóbada do cabeçote do <i>Motor 2</i>	0,94	Correlação positiva forte	186,1 a 189
	0,99		189,5 a 194,2
Anel do cabeçote do <i>Motor 2</i>	0,93		186,1 a 189
	0,88		189,5 a 194,2
Abóbada do cabeçote do <i>Motor 3</i>	0,65	Correlação positiva moderada	173,1 a 173,3
	0,80	Correlação positiva forte	173,3 a 174,9
Anel do cabeçote do <i>Motor 3</i>	0,93	173,1 a 173,3	
	0,71	173,3 a 174,9	
(3º Ensaio)	Coefficiente de correlação (r)	Correlação	ΔT (Tm-Ta)
Abóbada do cabeçote do <i>Motor 2</i>	0,99	Correlação positiva forte	255,5 a 259,1
	0,88		260,2 a 278,2
Anel do cabeçote do <i>Motor 2</i>	0,88		255,5 a 259,1
	0,99		260,2 a 278,2
Abóbada do cabeçote do <i>Motor 3</i>	0,89		203 a 208,4
	0,98		208,4 a 215,4
Anel do cabeçote do <i>Motor 3</i>	0,91		203 a 208,4
	0,95		208,4 a 215,4
(4º Ensaio)	Coefficiente de correlação (r)	Correlação	ΔT (Tm-Ta)
Abóbada do cabeçote do <i>Motor 2</i>	0,96	Correlação positiva forte	164,6 a 168,8
	0,91		171,6 a 198,7
Anel do cabeçote do <i>Motor 2</i>	0,98		164,6 a 168,8
	0,95	171,6 a 198,7	

Quadro 7(a) – Gráficos do Coeficiente de correlação r , relação entre as áreas de óxidos proeminentes na parede interna do cabeçote com à variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$)

1º Ensaio.

1º Ensaio	
Correlação Positiva Forte	
<i>O valor de r será tão mais próximo de 1 ou -1 quanto mais forte for a correlação</i>	
Abóbada do cabeçote do Motor 2	
Abóbada do cabeçote do Motor 2	
Anel do cabeçote do Motor 2	
Anel do cabeçote do Motor 2	
Abóbada do cabeçote do Motor 3	
Abóbada do Cabeçote do Motor 3	

Quadro 7(b) – Gráficos do Coeficiente de correlação r , relação entre as áreas de óxidos proeminentes na parede interna do cabeçote com a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) 1º e 2º Ensaio.

1º Ensaio	
Correlação Positiva Forte	
<i>O valor de r será tão mais próximo de 1 ou -1 quanto mais forte for a correlação</i>	
Anel do cabeçote do Motor 3	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>1º Ensaio - Motor 3</p> <p>Anel do Cabeçote [μm^2]</p> <p>($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) [K]</p> <p>$r = 0,81$</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>1º Ensaio - Motor 3</p> <p>Abobada do Cabeçote [μm^2]</p> <p>($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) [K]</p> <p>$r = 0,83$</p> </div> </div>
2º Ensaio	
Correlação Positiva Forte	
<i>O valor de r será tão mais próximo de 1 ou -1 quanto mais forte for a correlação</i>	
Abóbada do cabeçote do Motor 2	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>2º Ensaio - Motor 2</p> <p>Abobada do Cabeçote [μm^2]</p> <p>($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) [K]</p> <p>$r = 0,94$</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>2º Ensaio - Motor 2</p> <p>Anel do Cabeçote [μm^2]</p> <p>($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) [K]</p> <p>$r = 0,99$</p> </div> </div>
Anel do cabeçote do Motor 2	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>2º Ensaio - Motor 2</p> <p>Abobada do Cabeçote [μm^2]</p> <p>($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) [K]</p> <p>$r = 0,93$</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>2º Ensaio - Motor 2</p> <p>Anel do Cabeçote [μm^2]</p> <p>($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) [K]</p> <p>$r = 0,88$</p> </div> </div>

Quadro 7(c) – Gráficos do Coeficiente de correlação r , relação entre as áreas de óxidos proeminentes na parede interna do cabeçote com à variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$)
2º Ensaio.

2º Ensaio Correlação Positiva Moderada <i>0.30 a 0.7 positivo ou negativo indica correlação moderada.</i>		2º Ensaio Correlação Positiva Forte <i>O valor de r será tão mais próximo de 1 ou -1 quanto mais forte for a correlação</i>	
Abóbada do cabeçote do Motor 3	<p>2º Ensaio - Motor 3 $r = 0,65$</p>	<p>2º Ensaio - Motor 3 $r = 0,80$</p>	
	2º Ensaio Correlação Positiva Forte <i>O valor de r será tão mais próximo de 1 ou -1 quanto mais forte for a correlação</i>		
Anel do cabeçote do Motor 3	<p>2º Ensaio - Motor 3 $r = 0,93$</p>	<p>2º Ensaio - Motor 3 $r = 0,71$</p>	

Diferentemente da maioria das correlações apresentadas, observou-se, no Quadro 7(c), abóbada do cabeçote do motor 3, no 2º ensaio, que houve correlação apenas moderada entre a área dos óxidos e a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$). Isto ocorreu devido ao pequeno intervalo de temperatura relativamente à área dos óxidos, $1.602 [\mu\text{m}^2]$ em um intervalo de temperatura $\Delta T = 0,2 [\text{K}]$.

Quadro 7(d) – Gráficos do Coeficiente de correlação r , relação entre as áreas de óxidos proeminentes na parede interna do cabeçote com a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$)

3º Ensaio.

3º Ensaio	
Correlação Positiva Forte	
<i>O valor de r será tão mais próximo de 1 ou -1 quanto mais forte for a correlação</i>	
Abóbada do cabeçote do Motor 2	<p>3º Ensaio - Motor 2 $r = 0,99$</p>
Anel do cabeçote do Motor 2	<p>3º Ensaio - Motor 2 $r = 0,88$</p>
Abóbada do cabeçote do Motor 3	<p>3º Ensaio - Motor 3 $r = 0,89$</p>
Anel do cabeçote do Motor 3	<p>3º Ensaio - Motor 2 $r = 0,99$</p>
Abóbada do cabeçote do Motor 3	<p>3º Ensaio - Motor 3 $r = 0,98$</p>

Quadro 7(e) – Gráficos do Coeficiente de correlação r , relação entre as áreas de óxidos proeminentes na parede interna do cabeçote com a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) 3º e 4º Ensaio.

3º Ensaio	
Correlação Positiva Forte	
<i>O valor de r será tão mais próximo de 1 ou -1 quanto mais forte for a correlação</i>	
Anel do cabeçote do Motor 3	
4º Ensaio	
Correlação Positiva Forte	
<i>O valor de r será tão mais próximo de 1 ou -1 quanto mais forte for a correlação</i>	
Abóbada do cabeçote do Motor 2	
Anel do cabeçote do Motor 2	

A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permitiu registrar a evolução da formação de materiais cerâmicos na parede do cabeçote do motor ao longo da sua vida, como ilustra a Figura 18. O mesmo aconteceu para a cabeça do pistão, Figura 20.

As Figuras 18[(a) e (b)], apresentam morfologias de deformações plásticas na textura do cabeçote do motor, esta morfologia pode ser explicada em decorrência, por exemplo, de um processo de usinagem por jateamento ocorrido durante a fabricação do cabeçote do motor. Observou-se que a textura da Figura 18(b) está mais evidente em virtude da ação do running-in, que recolheu a fina camada de óxido depositada no cabeçote do motor quando novo.

Observou-se nas Figuras 18[(c) e (d)] deformações nas cabeças dos óxidos, estes ficaram com aspecto de esponjas, onde as partículas que se desprenderam foram possivelmente aderidas às paredes do pino, pistão ou emitidas para o meio-ambiente.

A Figura 18(e) apresentou formação espessa de óxidos como também o processo de fusão ao redor do centro da vela, região que se submeteu a elevadas temperaturas. Diagramas de fase $Al_2O_3-SiO_2$ (Figura 19), mostram temperatura de fusão de óxidos da ordem de 2.050°C (90%Alumina) e de 1.587°C (10%Alumina). Evidências de fusão de óxidos na cabeça do pistão ou no cabeçote do motor obtidas por fotos em análises de MEV com métodos de microanálise por EDS e DRX são indicativas de temperaturas pontuais elevadas dessa ordem de grandeza. Analogamente, tais famílias de óxidos possuem módulos de elasticidade que variam, respectivamente, de 400GPa (100% Alumina) a 70 GPa (100% Silica = SiO_2), as quais, solicitadas pelas elevadas tensões nas paredes da câmara de combustão, tendem a desenvolver malhas de trincas. Os estados de *tensão e deformação* decorrentes das *solicitações mecânicas e térmicas – não necessariamente em fase –* e dos fluxos de energia e massa nos materiais das paredes da câmara de combustão tendem a **(a) colapsar** (com evidências de trincas, nos casos de comportamento frágil), **(b) deformar plasticamente**, gerando “*dimples*” ou **(c) fundir pequenas zonas ou camadas** desses óxidos.

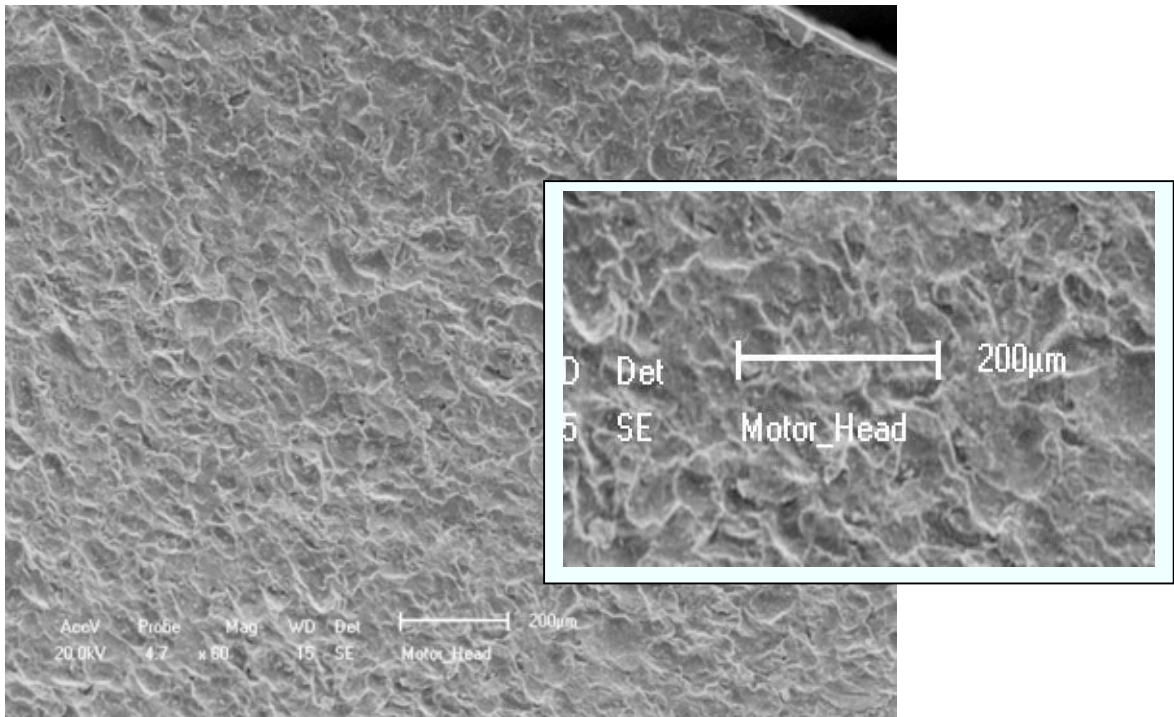


Figura 18 (a) - Morfologia das deformações plásticas induzidas à textura pelo processo de jateamento com partículas sólidas. Superfície da abóbada interna do cabeçote do motor, *condição "nova"*. SEM-SE

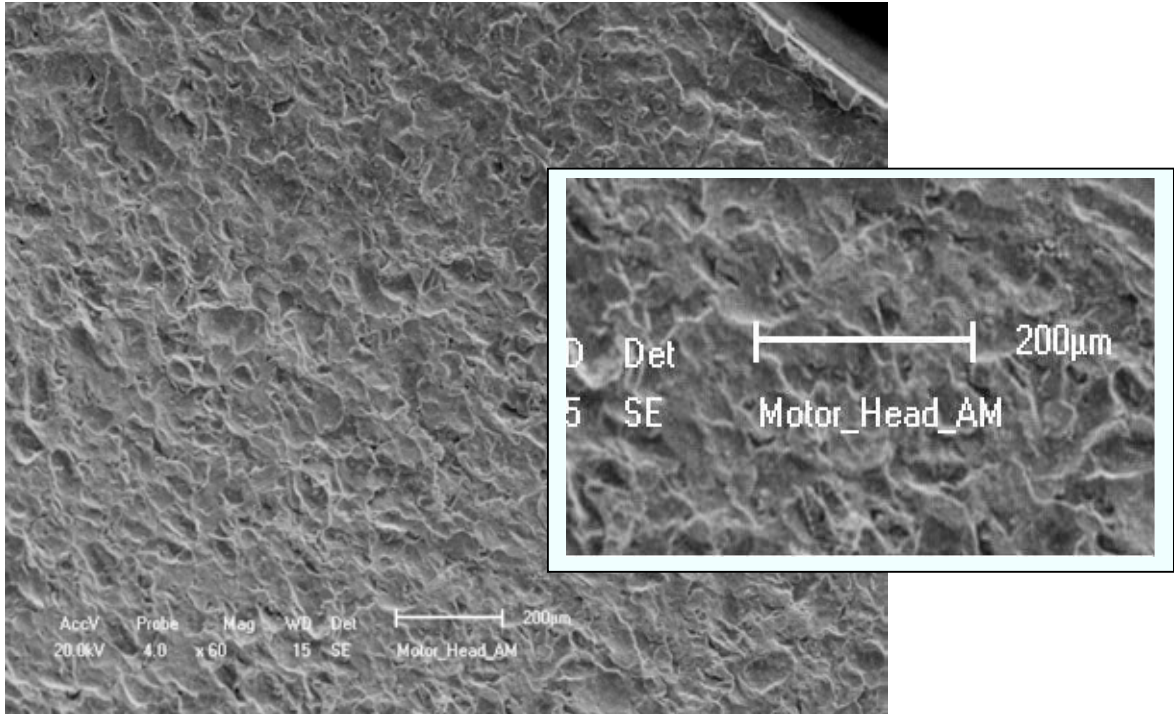


Figura 18 (b) - *após o running-in*. SEM-SE

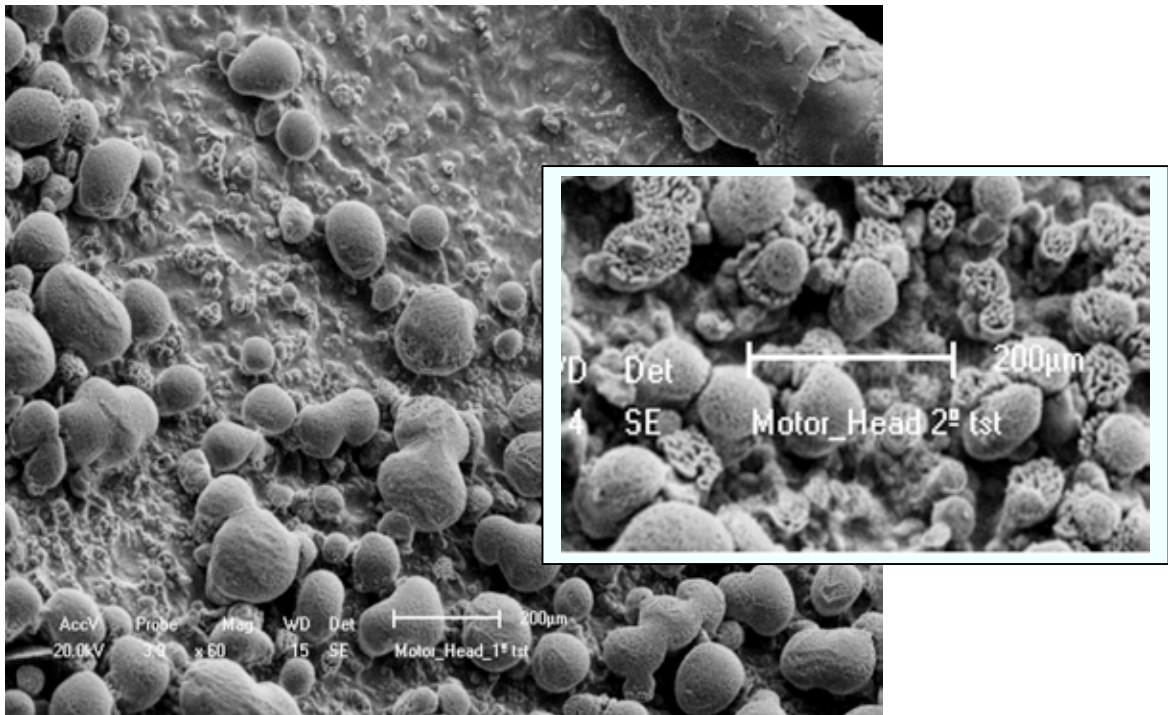


Figura 18 (c) - Morfologias de óxidos na superfície do cabeçote do motor, próximo à sede da vela, *após 2 megaciclos*. SEM-SE

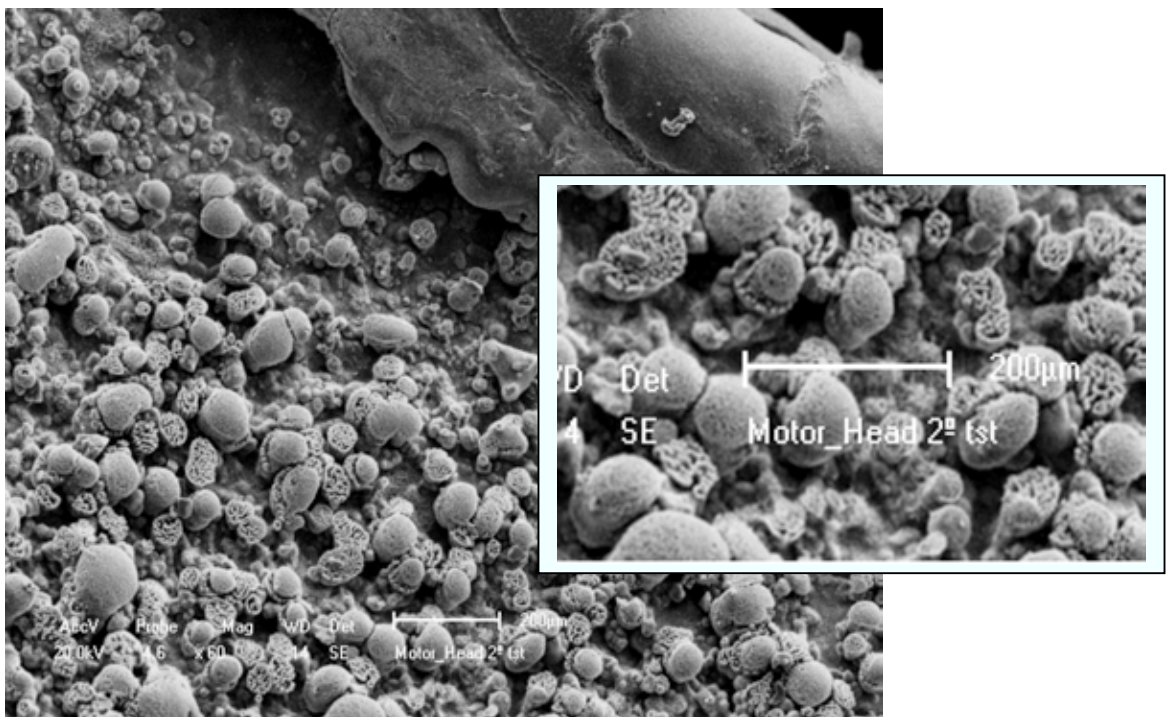


Figura 18 (d) - Polimerização da camada de óxido no entorno do furo-sede da vela. Superfície da abóbada interna do cabeçote do motor, *após 5 megaciclos*. SEM-SE

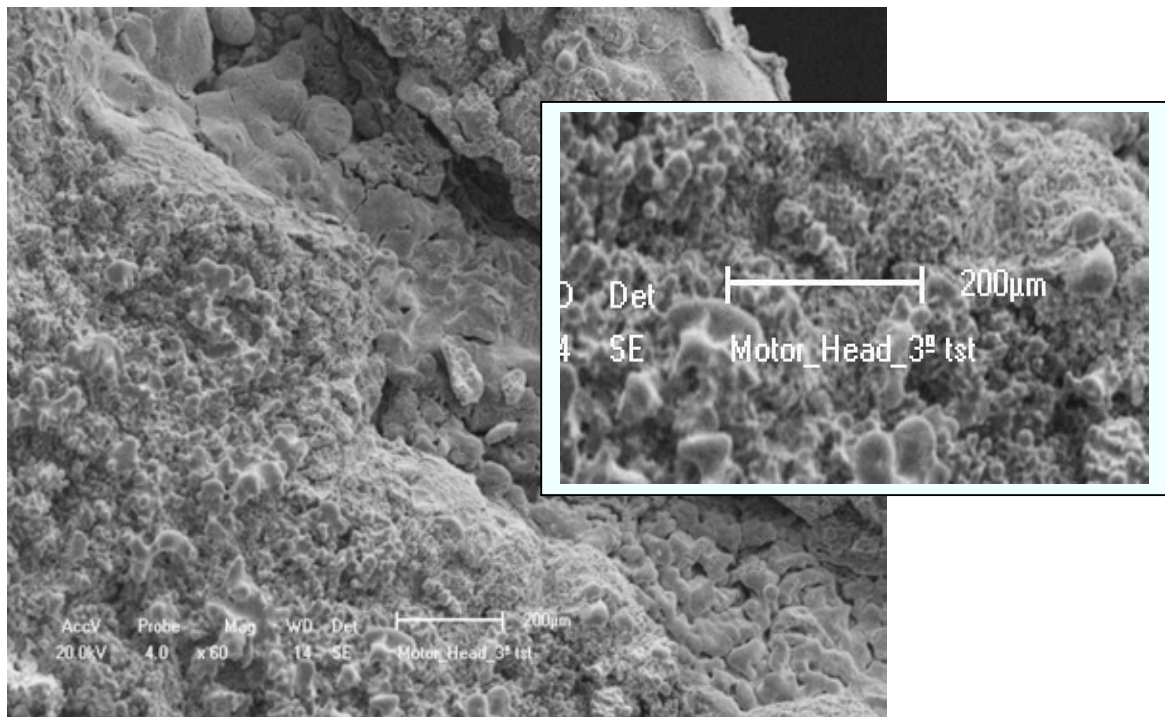


Figura 18 (e) - Processo de polimerização nas camadas de óxidos próximas ao redor do furo-sede da vela. Superfície da abóbada interna do cabeçote do motor , após 11 megaciclos. SEM-SE

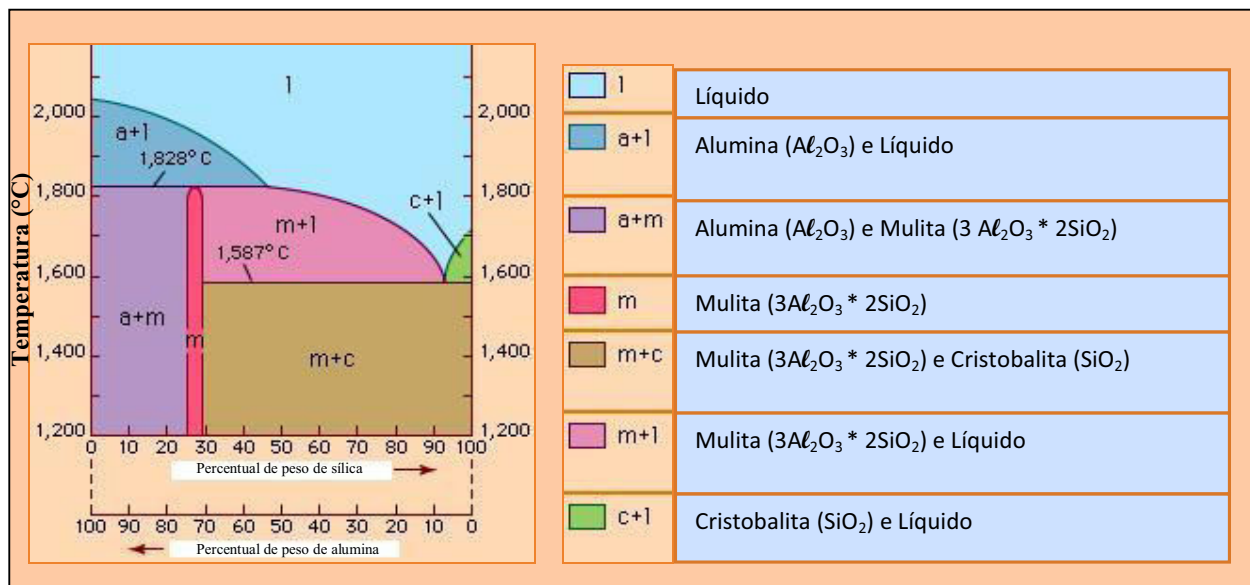


Figura 19 - Diagrama de fases Al_2O_3 e SiO_2 .

Fonte: <http://media-2.web.britannica.com/eb-media/87/1587-004-8BD6E13A.gif>

Os danos superficiais devidos aos processos de fabricação dos componentes dos motores novos ficaram mais evidenciados após o processo de *running-in* dos motores

(60.000 ± 1.000 ciclos) como sugerido pelas imagens das Figuras 20[(a) e (b)]. As Figuras 20 [(c) e (d)] apresentam aspectos recursivos da nucleação, crescimento e remoção de óxidos em uma mesma camada.

A formação espessa de óxidos, Figura 20(e) apresentou-se com um aspecto de grãos aderidos à camada de óxidos já existente.

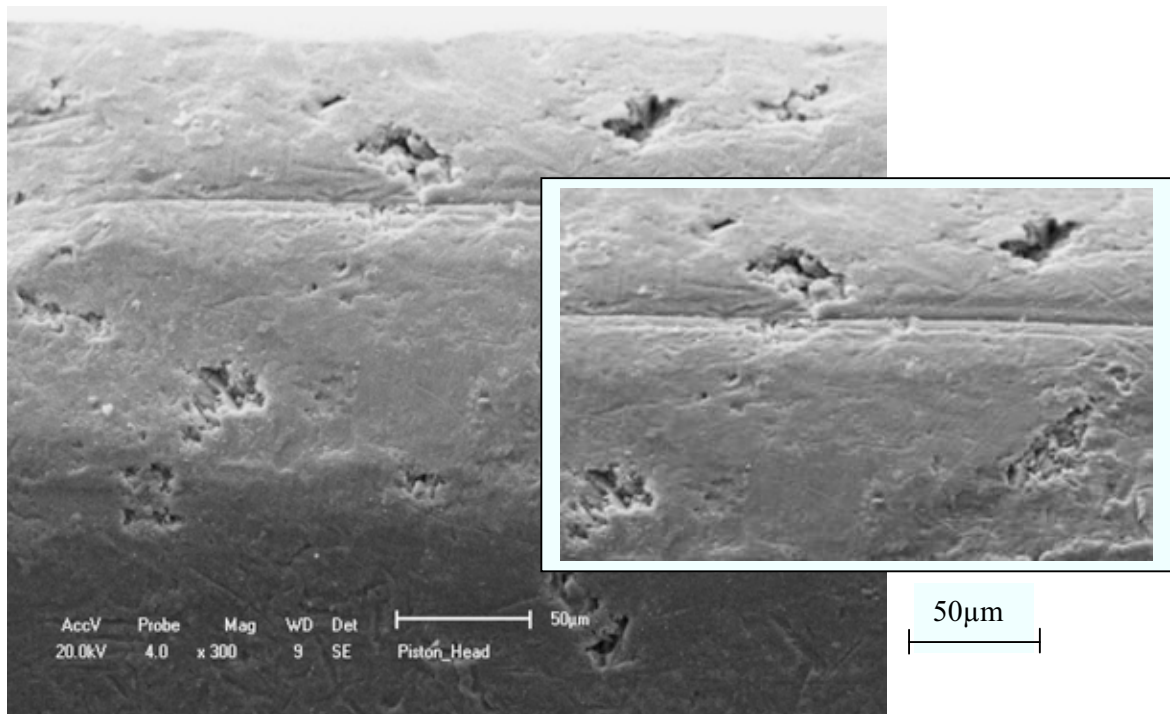


Figura 20 (a) - Textura após processo de faceamento. Superfície da cabeça do pistão do motor, *condição "nova"*. SEM-SE

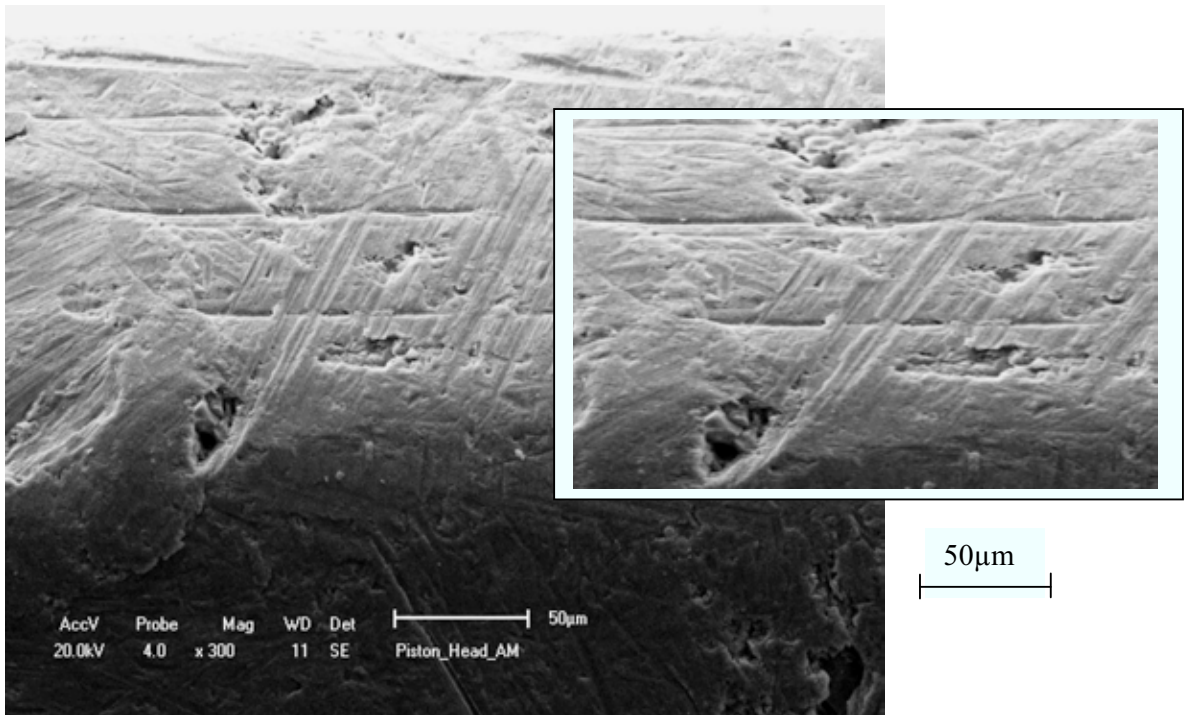


Figura 20 (b) - Textura da superfície da cabeça do pistão do motor, *após o running-in* evidenciando danos oriundos do faceamento, na etapa de fabricação da peça. SEM-SE

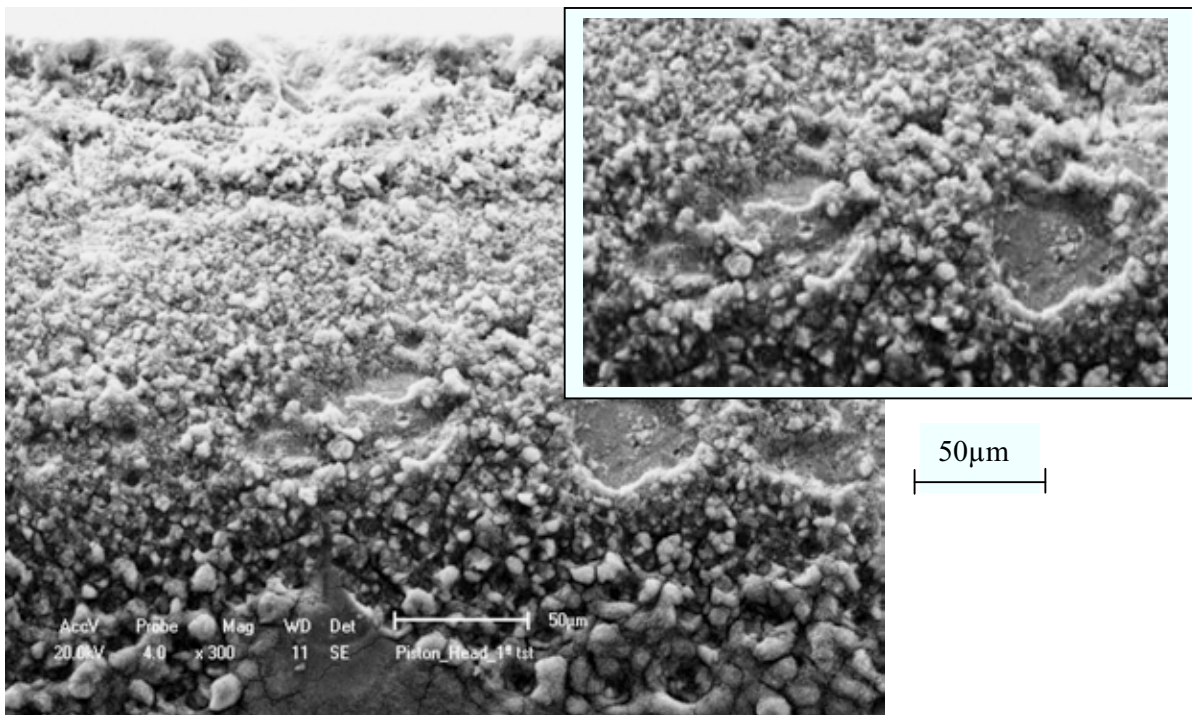


Figura 20 (c) - Nucleação e remoção de óxidos na superfície da cabeça do pistão do motor, *após 2 megaciclos*. SEM-SE

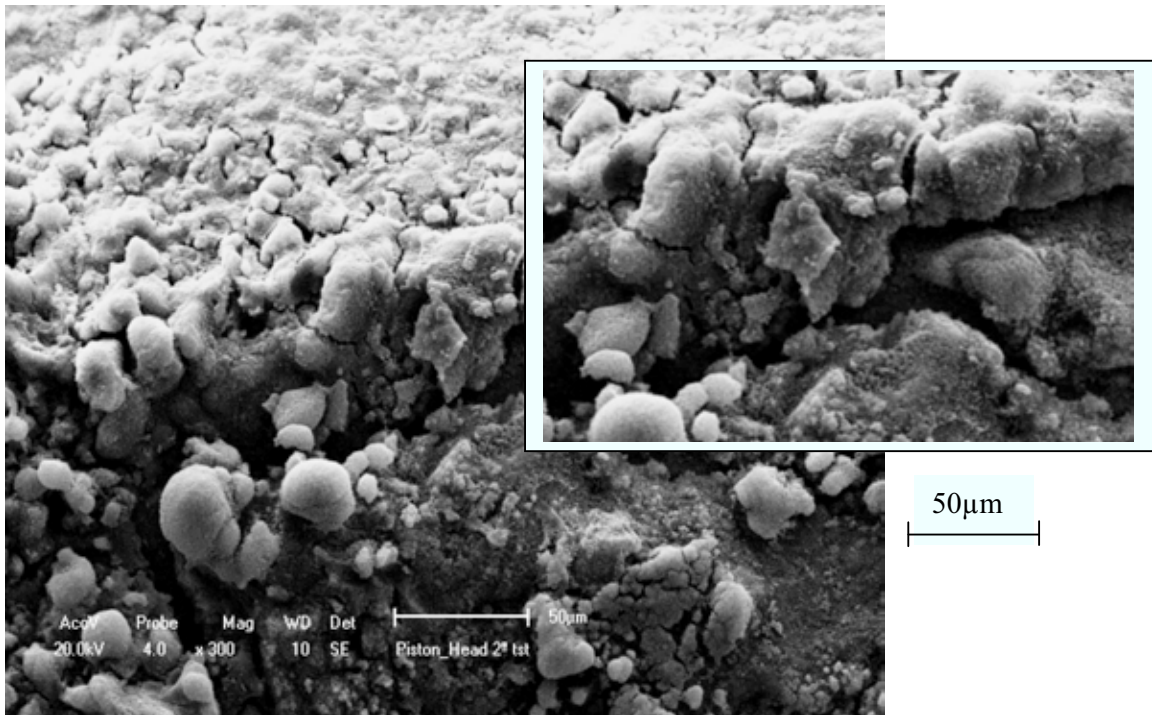


Figura 20 (d) - Nucleação e remoção da camada de óxidos, superfície da cabeça do pistão, *após 5 megaciclos*. SEM-SE

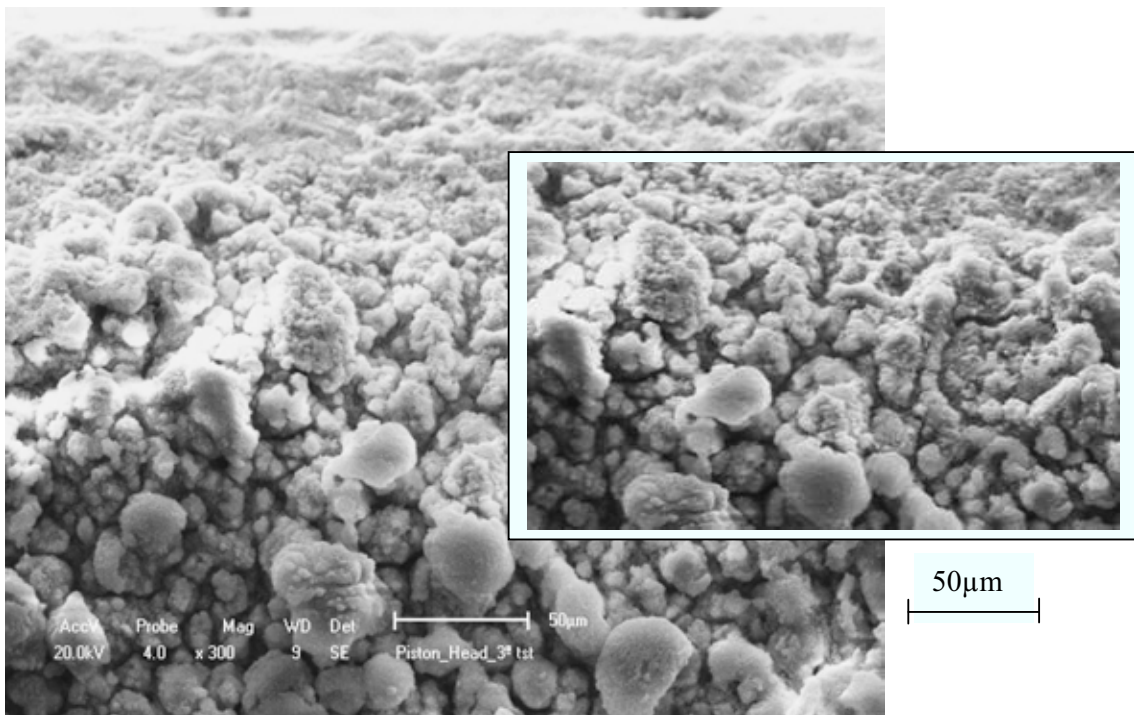


Figura 20 (e) - Polimerização da camada de óxidos na superfície da cabeça do pistão, *após 11 megaciclos*. SEM-SE

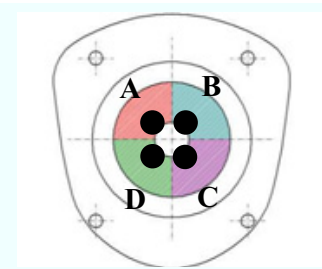
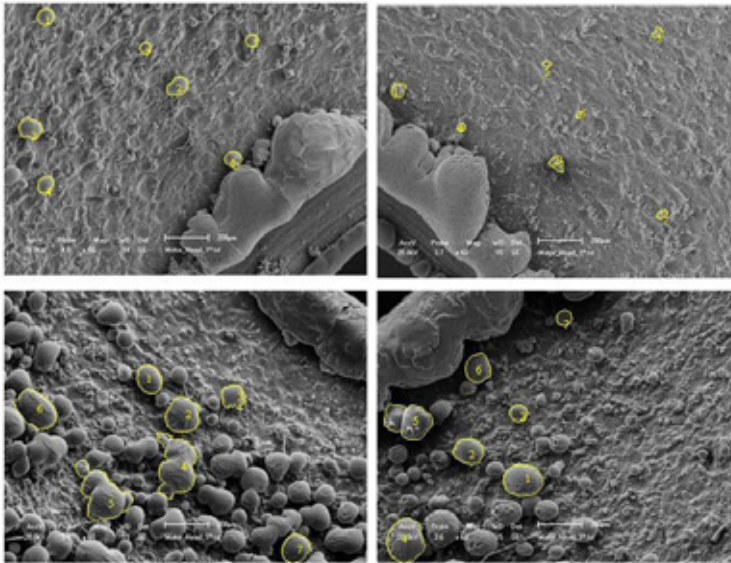


Figura 21 – Referencial dos quatro quadrantes A, B, C, D de óxidos. Morfologias de óxidos ao redor do furo-sede da vela. Superfície da abóbada interna do cabeçote do *motor 3*, após 2 megaciclos. SEM-SE

O processo de polimerização de óxidos por vezes obnubilou suas fronteiras nas superfícies dos cabeçotes dos motores, impossibilitando sua mensuração para o motor 2 e para o motor 3, provocando um menor universo amostral. Isto se amplificou à medida em que o número de ciclos crescia, motor 2 (Figura 22, após 12 megaciclos) e motor 3 (Figura 23, após 11 megaciclos).

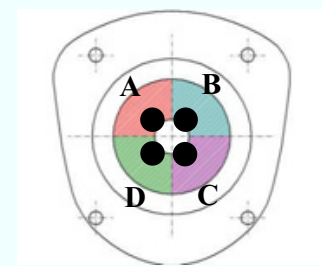
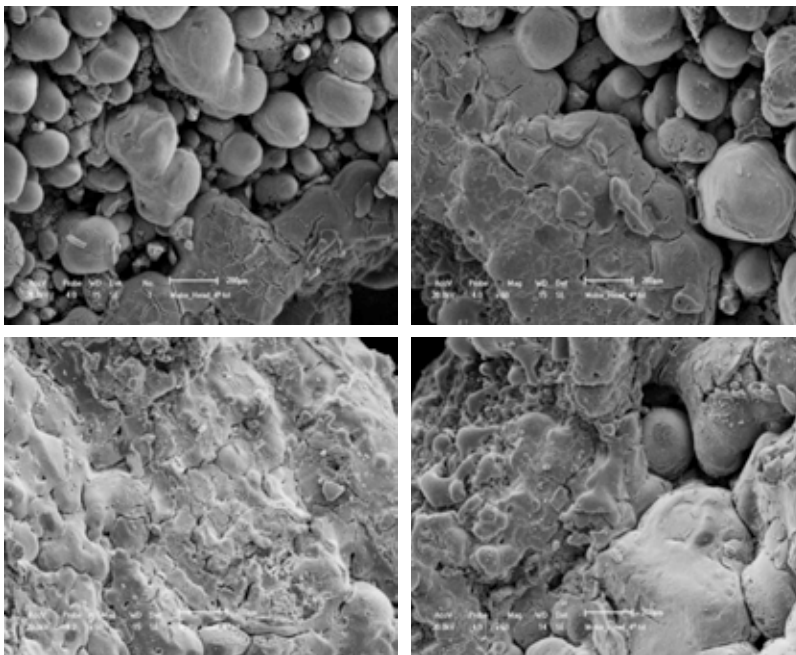


Figura 22 - Morfologia de óxidos e formação de trincas térmicas na superfície ao redor do furo-sede da vela na parede interna do cabeçote do *motor 2*, após 12 megaciclos. SEM-SE

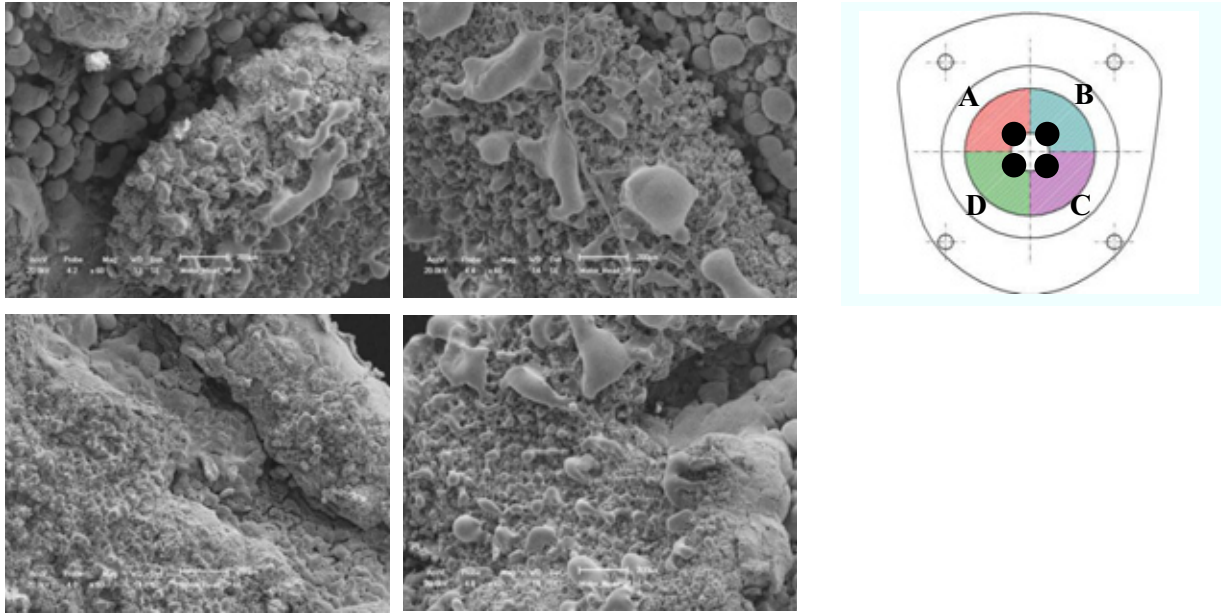


Figura 23 - Evidências de polimerização e fusão de óxidos próximas do furo-sede da vela na superfície interna da abóbada do cabeçote do *motor 3*, após *11 megaciclos*. SEM-SE

Após o “*running-in*”, ocorreram nucleação e crescimento de óxidos. Eles foram detectados após cada ensaio, e assemelhadas, havendo remoções parciais, polimerizações e/ou vitrificações associadas ao desgaste e, em seguida, um novo ciclo de nucleação, crescimento e remoção, tudo numa mesma camada e em camadas adjacentes. Os aspectos tribológicos considerados relevantes são apresentados neste trabalho relativamente aos três componentes – cabeça do pistão, cabeçote do motor, pino do pistão - dos três motores ensaiados.

Durante o efeito cíclico da formação, crescimento e remoção de óxidos, produtos da reação interpostos na *superfície de contato entre o pino e o pistão* já não apresentavam apenas uma degradação superficial. Observou-se que no substrato da camada de óxido do material alguns danos por *microspalling* se produziram e, no seu interior, filmes de óxidos se delaminavam em *flakes* da ordem de 20 μm (Figura 24) e 30 μm (Figura 25), produzidos nas bordas do contato, durante a evolução do número de ciclos.

MOTOR 1 – APÓS 4 MEGACICLOS
PINO DO PISTÃO

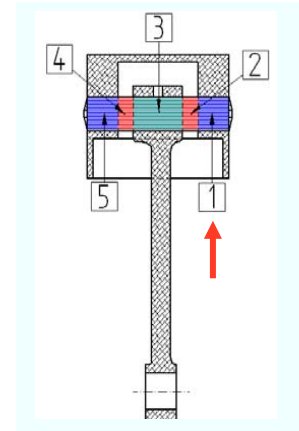
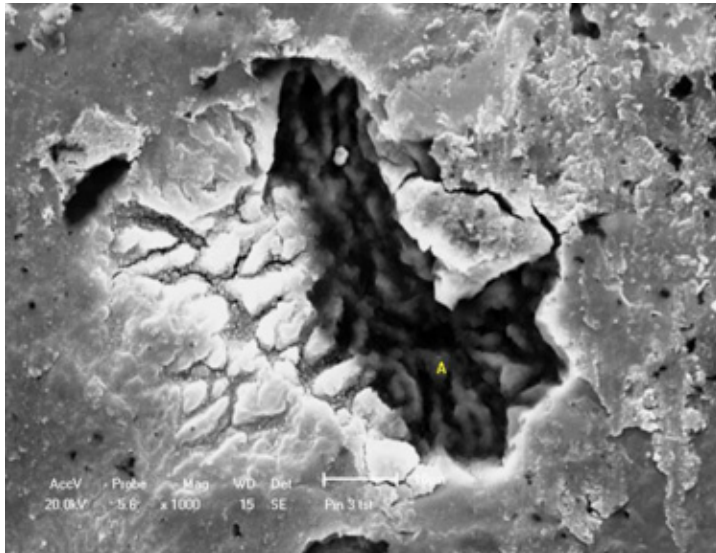


Figura 24 - *Microspalling* decorrente do contato do pino com a parede do pistão. Superfície do pino do pistão, *motor 1* na condição *após 4 megaciclos*, imagem referente à região 1. SEM-SE

Evidências encontradas nas superfícies do pino, Figuras 24 e 25, confirmam que as irreversibilidades nas unidades adjacentes dos materiais em contato, vinculadas ao desgaste por contato cíclico, são monotonicamente crescentes e associadas à deterioração do material, em combinações espaço-tempo distintas. Esses processos ocorrem por sobrecargas termomecânicas vinculadas a mecanismos paralelos de desgaste (a exemplo da microabrasão), nucleação e propagação de microtrincas, encruamentos em processo, discordâncias, microdeformações plásticas, formações de óxidos, MEDEIROS (2002).

Nas Figuras 24 a 26 registraram-se danos por *microspallings* e pites, referendados na literatura pertinente por DUMONT (1997) *apud* MEDEIROS (2002). Percebe-se, nessas figuras, detalhes da ocorrência de danos por micro-abrasão, com subsequente arrancamento de material da pista de rolamento, confirmando a literatura de HUTCHINGS (1992) *apud* SERBINO (2005), a remoção do material foi provocada pelo fato de existirem partículas duras se movendo entre as duas superfícies onde pode ocorrer um menor ou maior grau de penetração, dependendo dos ângulos instantâneos entre as extremidades destas partículas e as superfícies de contato.

MOTOR 1 – APÓS 6 MEGACICLOS
PINO DO PISTÃO

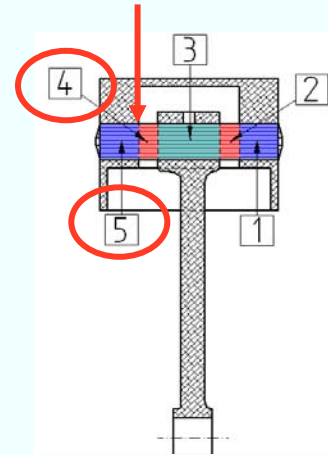
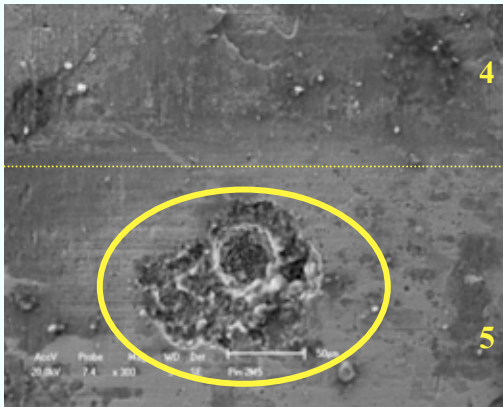


Figura 25 - *Micro-spalling* decorrente do contato, zona de transição entre as regiões 4 e 5. Superfície do *pino do pistão, motor 1* na condição *após 6 megaciclos*. SEM-SE

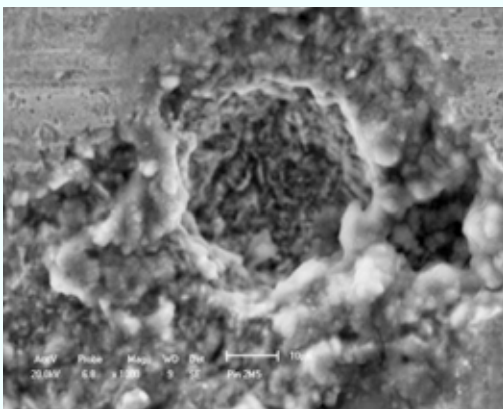


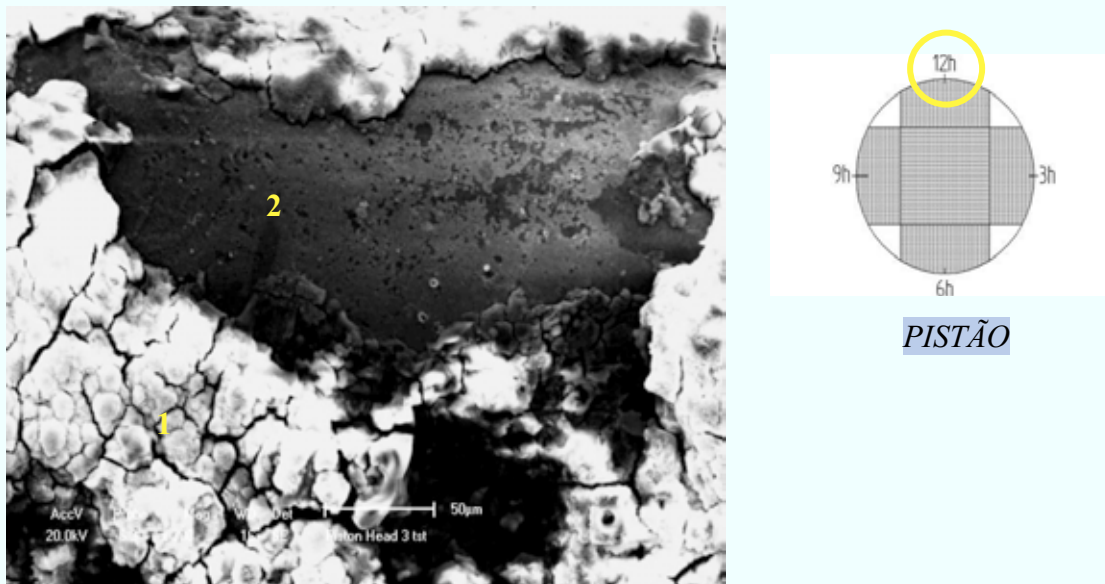
Figura 26 - *Pite* no interior do *microspalling* referente à região selecionada da Figura 25. Superfície do *pino do pistão, motor 1* na condição *após 6 megaciclos*. SEM-SE

As tensões térmicas devidas ao (1) atrito parede-cilindro e (2) processo de combustão mostraram-se mais perceptíveis com o avançar dos ensaios ao se analisarem as zonas superficiais (1) e (5) do pino, que contactavam com a parede do pistão. Essa região do pino é revestida com um filme fino de PTFE. Na zona (3) o contato entre o pino e a biela, o efeito térmico era minorado mas, em compensação, intensificava-se a sollicitação mecânica do contato pino-biela. Ao se desmontar e montar o pino na sua sede, para realizar análises por MEV, incorria-se em seu desgaste abrasivo a dois ou três corpos, devido ao deslizamento com ou sem partículas abrasivas entre as duas superfícies, removendo o material.

Em termos dos mecanismos de desgaste baseados nas análises microscópicas, constata-se que a formação das partículas de desgaste, *debris*, foi causada principalmente pelo

colapso estrutural dos filmes de óxidos, geralmente associado às tensões termomecânicas. O acúmulo do número de ciclos tem um efeito sobre a taxa de formação da película de óxido e governa o tipo de óxido formado, porém, tem menor efeito na velocidade de crescimento das trincas. No desprendimento do filme, a temperatura das superfícies é elevada e resulta, também, em produção de óxidos. Nestas condições, a nucleação e o crescimento das trincas em uma área grande do filme de óxido formado sobre a parede interna dos cabeçotes (Figura 22) e da superfície dos pistões (Figura 27) dos motores, são facilitadas. Os filmes de óxidos podem ter sido removidos de acordo com os mecanismos apresentados no Quadro 8.

MOTOR 1 – APÓS 4 MEGACICLOS

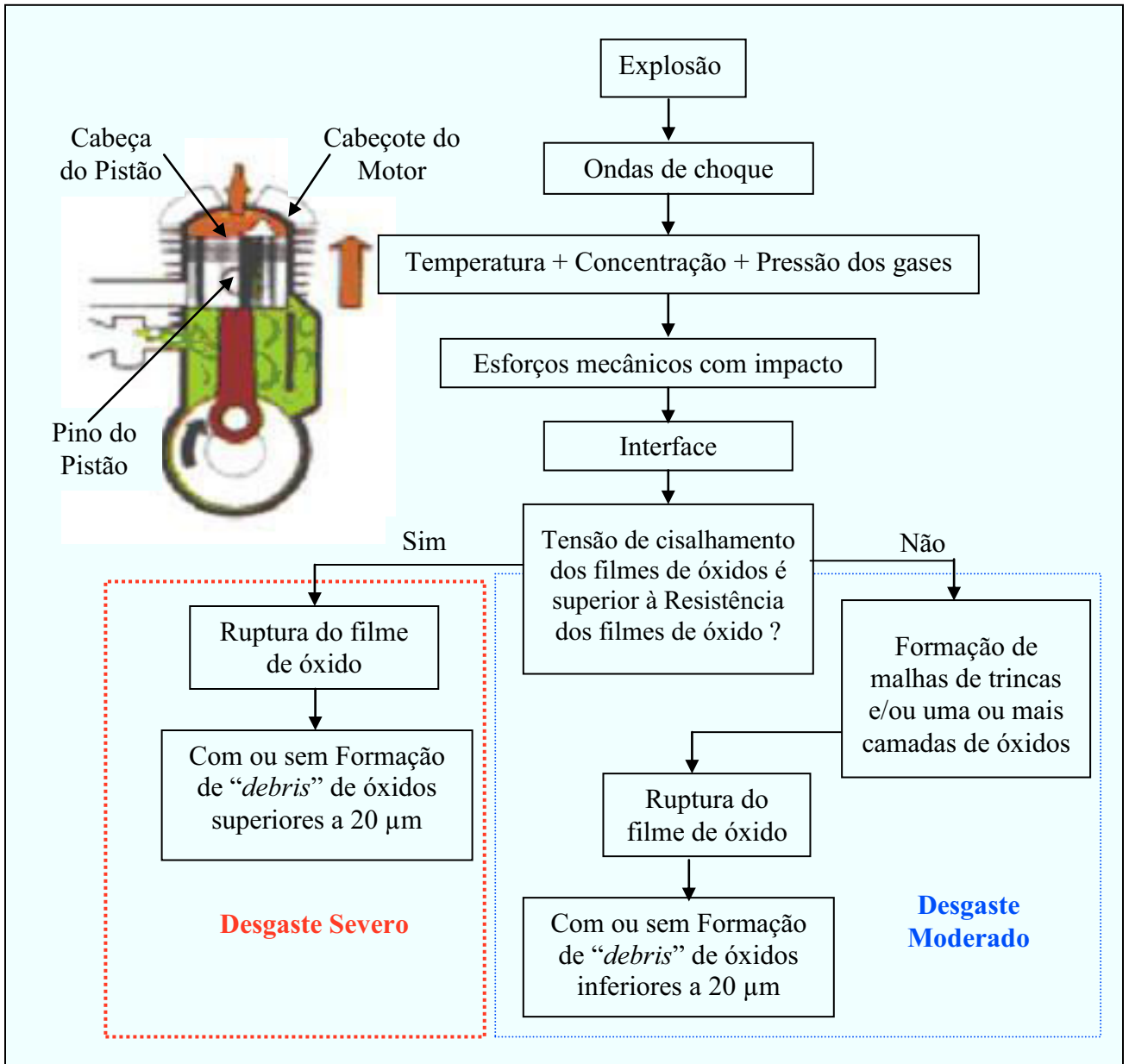


PISTÃO

Figura 27 - (1) Malhas de trincas térmicas nos filmes de óxidos e (2) Camada de óxido em que se difundiu fração do combustível. Superfície da cabeça do pistão do *motor 1*, após 4 megaciclos. SEM-SE

Quadro 8 – Mecanismos de desgaste oxidativo nos três componentes dos motores

Fonte: Elaborado pelo autor



Em cada um dos três pistões, durante o *front* da onda gerada devido à explosão da mistura, a superfície é *rapidamente aquecida* e tende a dilatar-se em uma zona restrita e, conseqüentemente, a superfície circunvizinha fica submetida à tensão de compressão que, se superar o limite de escoamento em regiões pontuais do material dos pistões, poderá causar deformação plástica microscópica na região da superfície do pistão em contato direto com a zona de combustão.

No *resfriamento*, a superfície tende a contrair-se e recuperar o regime de deformações elásticas que não foi suprimido pela deformação plástica anterior mas, novamente, é confinada pelo restante do pistão (cujas dimensões, sob regime permanente, não se alteraram em momento algum) e a superfície fica submetida à tensão de tração.

O ciclo compressão-tração descrito é associado às flutuações térmicas e conduz à nucleação de trincas na superfície da camada de óxidos da cabeça do pistão denominadas *trincas térmicas*, cujo crescimento subsequente dá origem a arranjos como o mostrado na Figura 27, referente aos pistões, denominado *malha de trincas térmicas*, (SILVA, 2003). Em geral, as tensões térmicas de um componente são associadas às deformações geradas pelo seu resfriamento ou aquecimento, equivalentes à sua contração e dilatação cíclica.

A Figura 28 apresenta danos resultantes das flutuações da temperatura e do movimento alternado pendular do pino sob a biela, caracterizando o processo de *Spallation*, denominado processo *Spallation*. Este processo foi citado no trabalho de BAUFELD et al (2005), Figura 29, investigando uma superliga de níquel B com revestimento de NiCoCrAlY e revestimento de barreira térmica (TBC) de zircônia sob condições de fadiga mecânica com gradiente térmico.

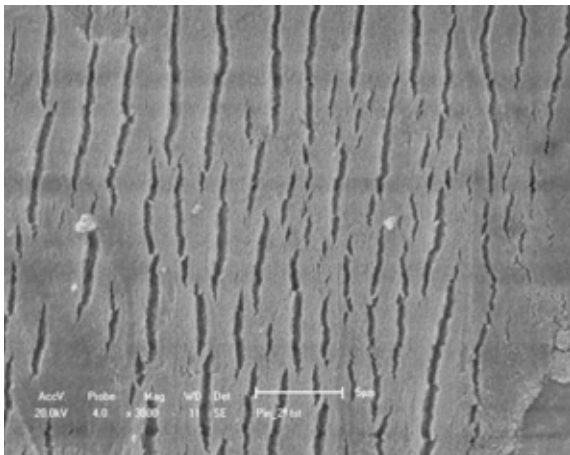


Figura 28 - Mecanismo de desgaste por “*spallation*” na zona do pino sob a biela. Superfície do pino do pistão, *motor 2* na condição após **6 megaciclos**. SEM-SE

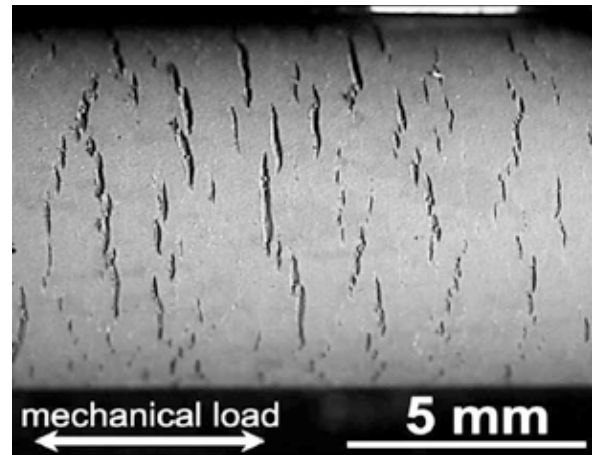
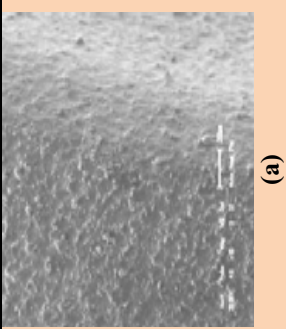
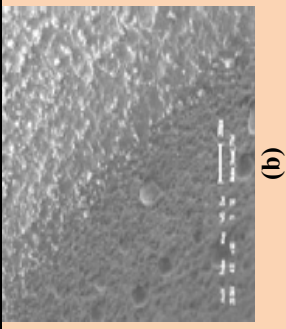
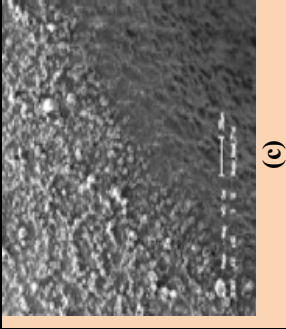
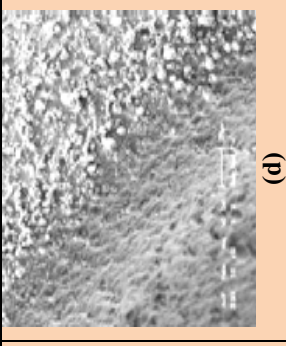
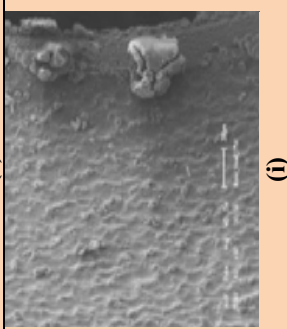
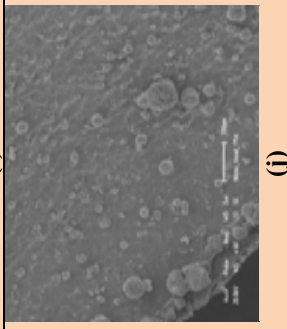
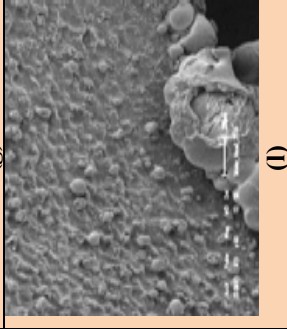
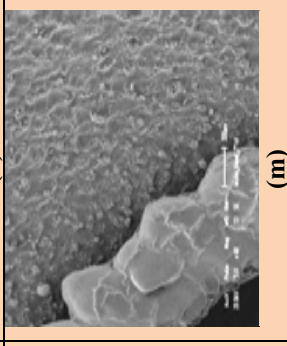
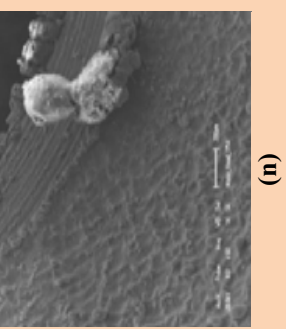
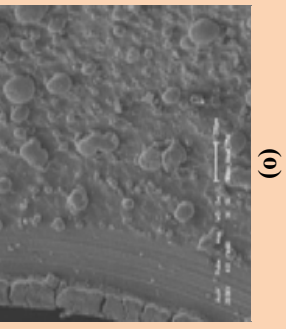
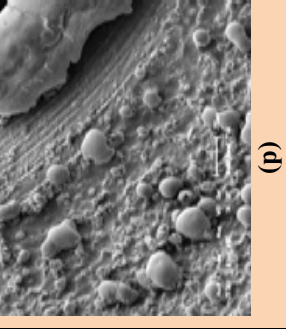
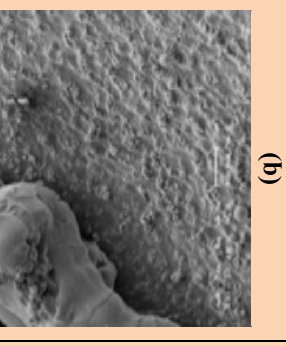






Figura 29 - Superfície caracterizada por dano *spallation* em uma superliga de níquel revestida por barreira térmica e NiCoCrAlY (Baufeld et al, 2005). SEM-SE

4.2 Morfologias dos Óxidos no Cabeçote do Motor e na Cabeça do Pistão – Motores 2 e 3 durante os números de ciclos

Cabeçote	Motor 2 após 2 megaciclos		Motor 2 após 6 megaciclos	
<p>Observou-se formação de óxidos na área específica (f), (g) e (h) em relação a (a), (b), (c), (d) e (e) possivelmente resultado da localização do filamento da vela. Com o aumento do número de ciclos associado às condições de temperatura, todas as quatro áreas ocorreram formações de óxidos.</p>	 <p>(a)</p>	 <p>(b)</p>	 <p>(c)</p>	 <p>(d)</p>
<p>Após 2 Megaciclos a imagem evidencia a formação espessa de óxidos ao redor do centro da vela, região que se submeteu a elevada temperatura. Nessa região a formação de óxidos foi mais intensa. Ao longo da área (p) formou-se óxidos de diferentes morfologias e ao redor do centro da vela. apresentaram o surgimento de malhas de trincas térmicas, resultado da presença de concentradores de tensões.</p>	 <p>(e)</p>	 <p>(f)</p>	 <p>(g)</p>	 <p>(h)</p>
	 <p>(i)</p>	 <p>(j)</p>	 <p>(l)</p>	 <p>(m)</p>
	 <p>(n)</p>	 <p>(o)</p>	 <p>(p)</p>	 <p>(q)</p>

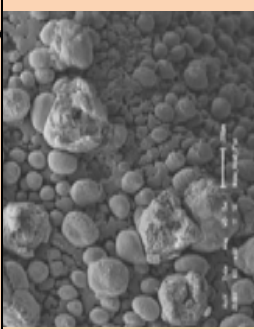
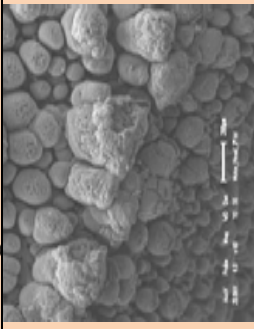
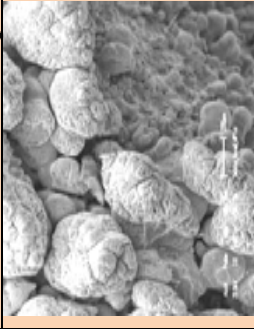
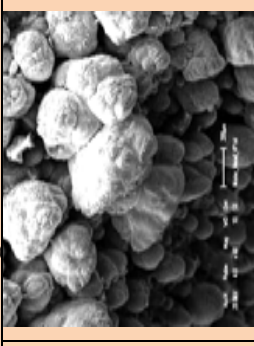

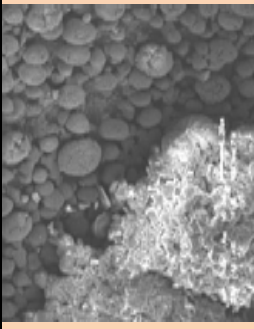
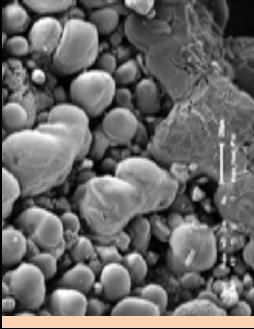
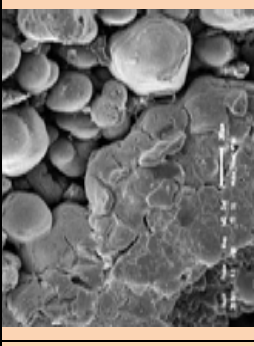
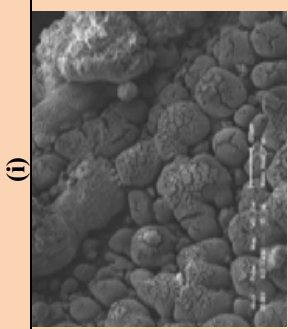
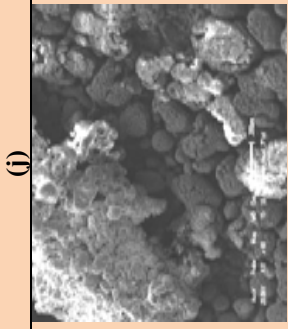
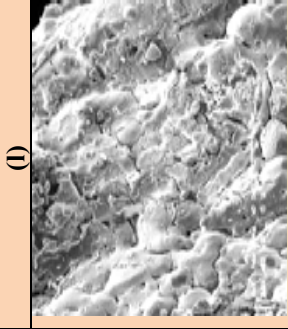
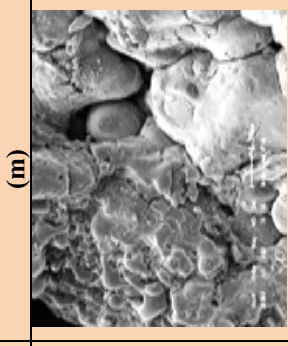




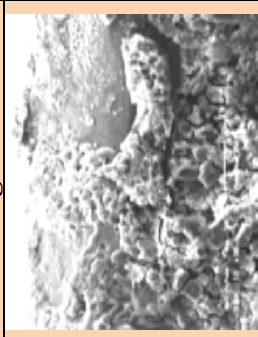
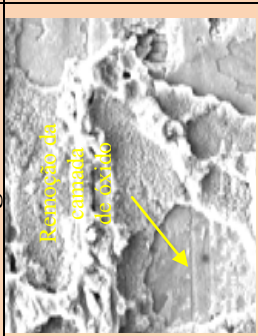
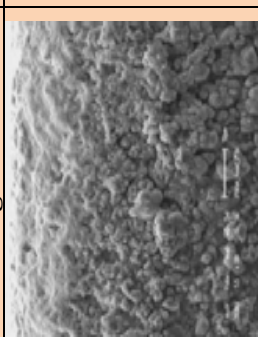
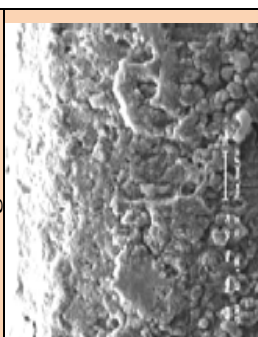
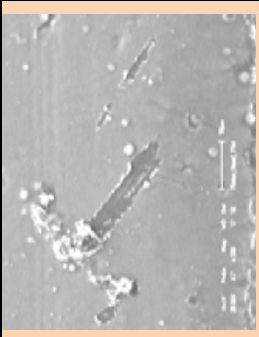
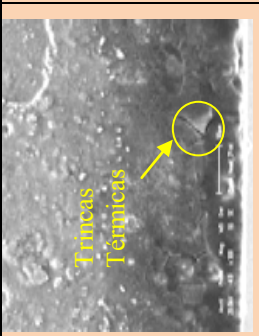
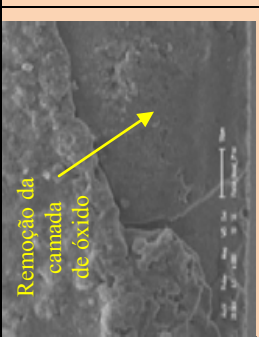
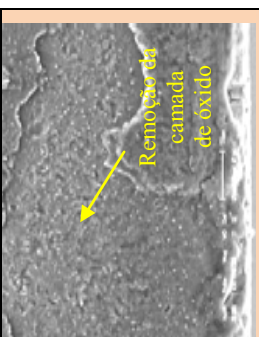
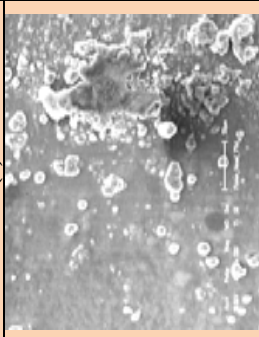

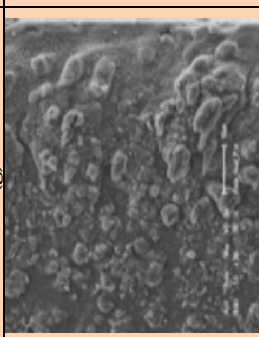
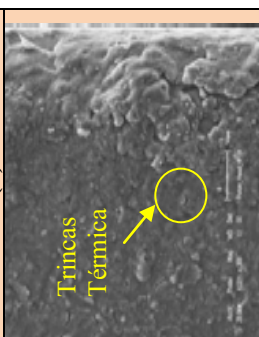
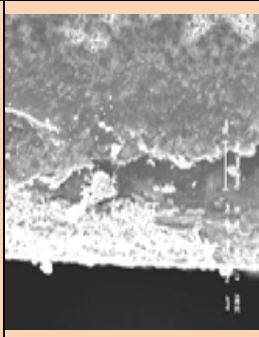
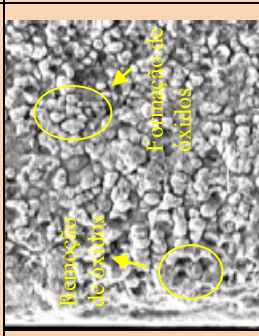
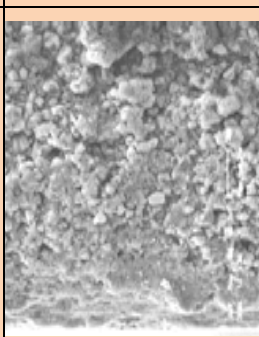
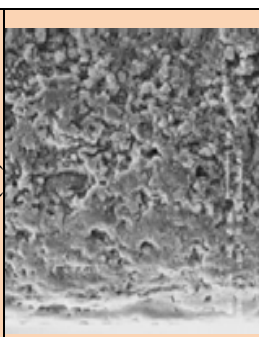
Cabeçote	Motor 2 após 8 megaciclos		Motor 2 após 11 megaciclos	
<p>As imagens (e) e (f), apresentaram algumas trincas térmicas, decorrente do aumento da temperatura no interior da câmara de combustão e do número de ciclos acumulados. As imagens (g) e (h) registraram dois momentos nos quais as áreas formaram uma camada polimerizada de óxidos.</p>	 <p>(a)</p>	 <p>(b)</p>	 <p>(c)</p>	 <p>(d)</p>
<p>Após 6 Megaciclos, apresenta-se uma formação espessa e polimerizada de óxidos ao redor do furo sede da vela, região que se submeteu à elevada temperatura. Nessa região, a formação de óxidos foi mais intensa. Com o aumento do número de ciclos, associado às condições de altas temperaturas que prevalecem e subsequente evolução do desgaste, em todas as quatro áreas analisadas tanto após 8 megaciclos quanto após 11 megaciclos ocorreram aumento das camadas de óxidos, com o surgimento de malhas de trincas térmicas.</p>	 <p>(e)</p>	 <p>(f)</p>	 <p>(g)</p>	 <p>(h)</p>
	 <p>(i)</p>	 <p>(j)</p>	 <p>(l)</p>	 <p>(m)</p>
	 <p>(n)</p>	 <p>(o)</p>	 <p>(p)</p>	 <p>(q)</p>

Figura 30 – Diferentes estágios da camada de óxido na superfície da abóbada interna do cabeçote do motor 2 – vida indicada na parte superior

Cabeça do Pistão	Motor 2 após 2 megaciclos	Motor 2 após 6 megaciclos	Motor 2 após 8 megaciclos	Motor 2 após 12 megaciclos
<p>Formação e remoção de óxidos na região de direção 12h, ou seja, na direção “norte” da cabeça do pistão.</p>	 <p>(a)</p>	 <p>(b)</p>	 <p>(c)</p>	 <p>(d)</p>
<p>Na direção 6h (“sul”) formação de trincas térmicas e remoção da camada de óxidos decorrentes da localização do filamento da vela nas direções 12h e 6h e respectivas tensões térmicas, conforme SILVA (2004).</p>	 <p>(e)</p>	 <p>(f)</p>	 <p>(g)</p>	 <p>(h)</p>
<p>Além do crescimento da camada de óxidos, a região de direção 3h apresentou o surgimento de trincas térmicas resultante da deformação plástica microscópica localizada, induzida pela presença de concentradores de tensões, de acordo com SERBINO (2005).</p>	 <p>(i)</p>	 <p>(j)</p>	 <p>(l)</p>	 <p>(m)</p>
<p>Processo recursivo de formação e remoção de óxidos na região 9h: partículas de óxidos são removidas, as superfícies do material ficam expostas novamente à temperatura e ao oxigênio e, assim, novas camadas de óxidos são formadas.</p>	 <p>(n)</p>	 <p>(o)</p>	 <p>(p)</p>	 <p>(q)</p>


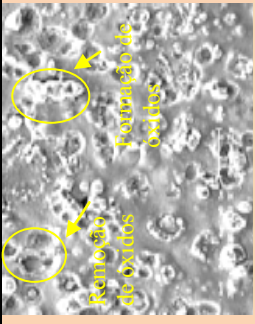
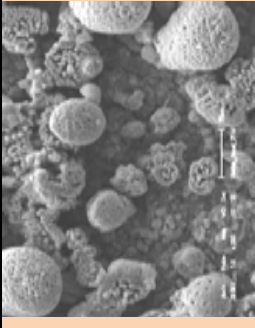
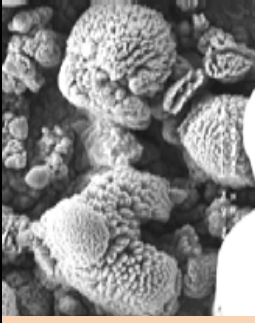
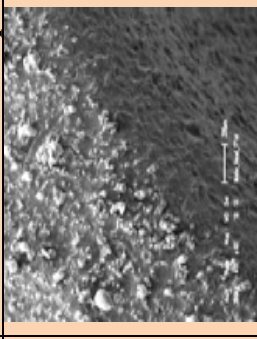
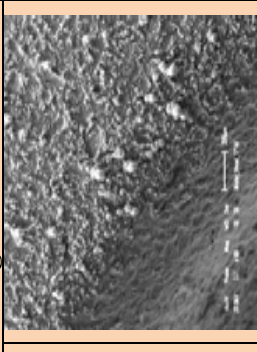
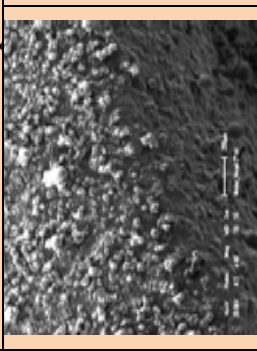
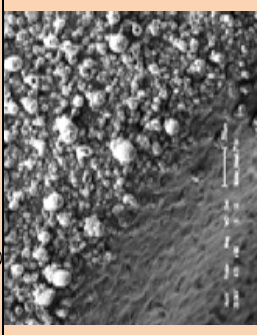
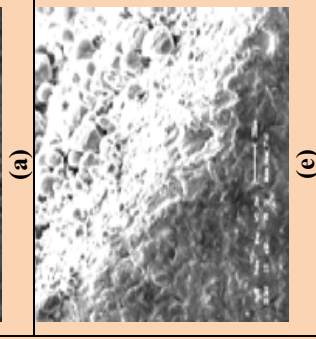
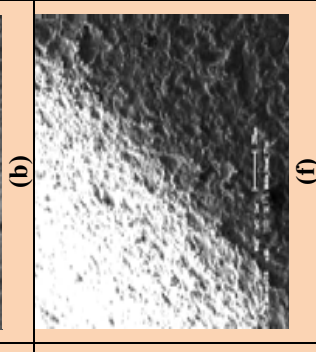
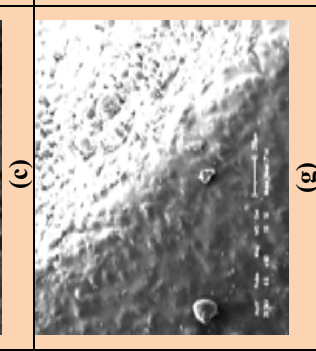
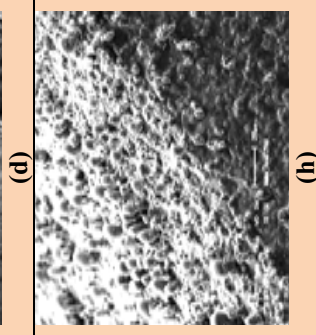
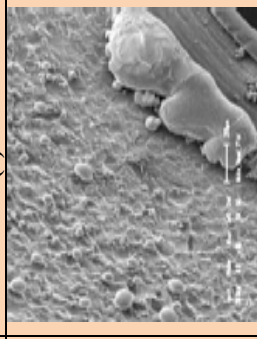
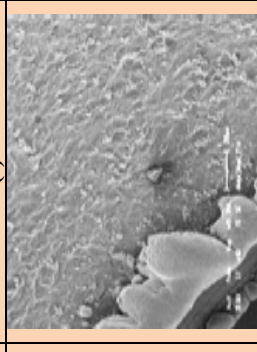
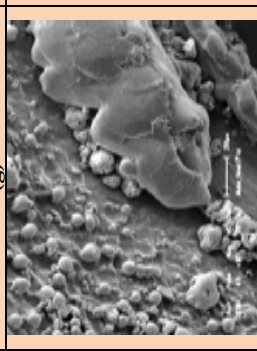
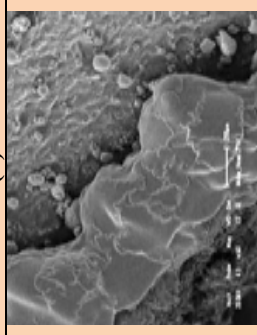
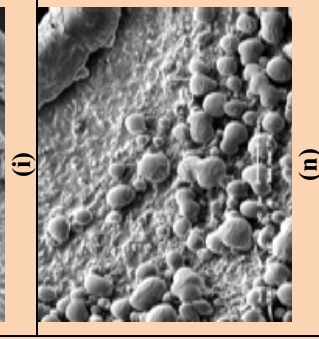
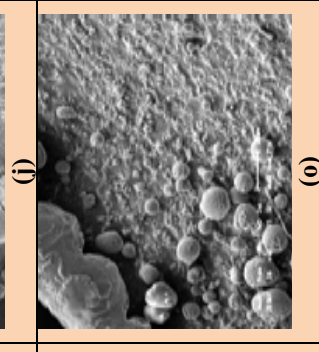
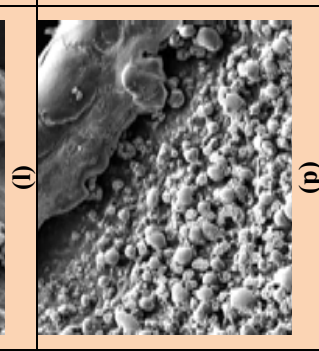
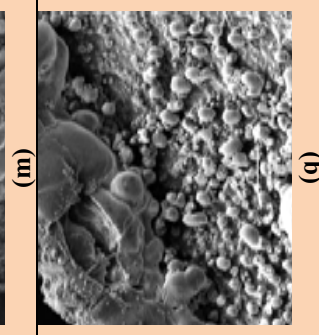
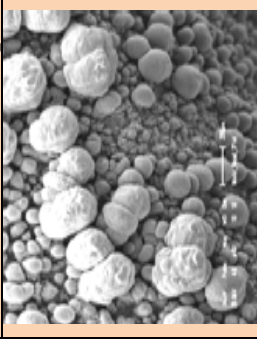
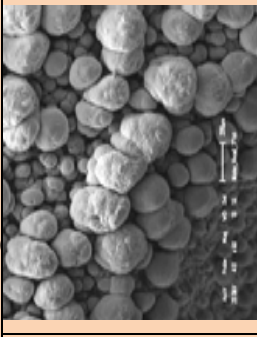
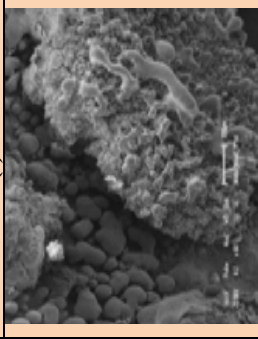
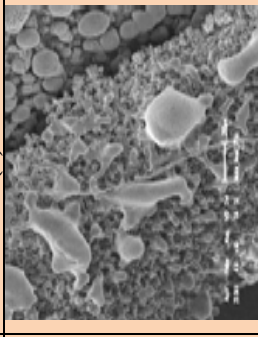




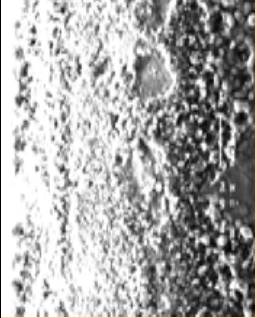
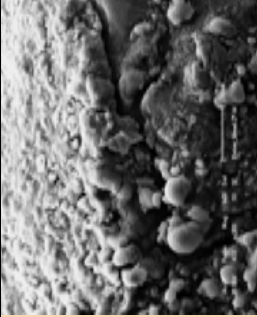
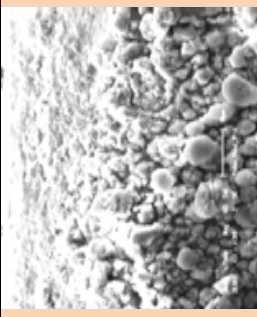
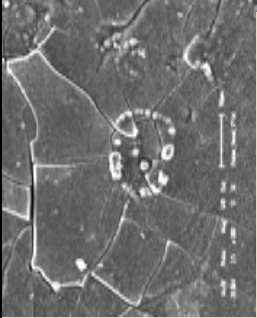
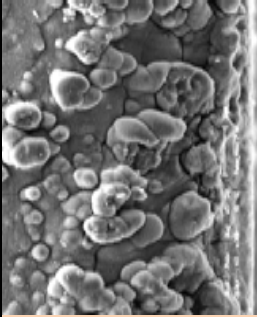
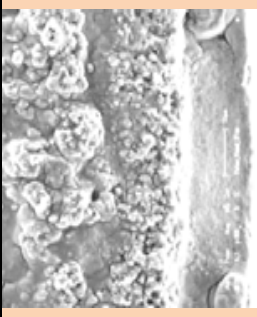
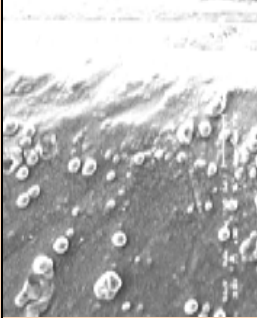
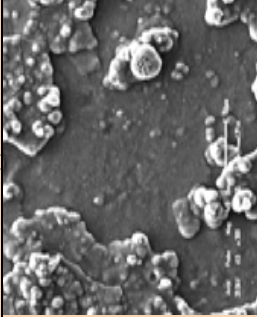
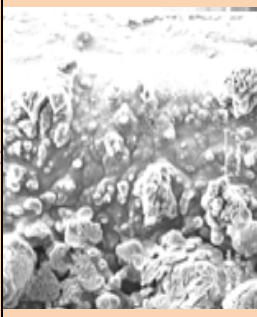
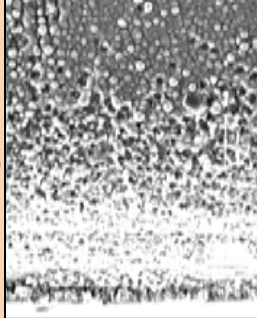
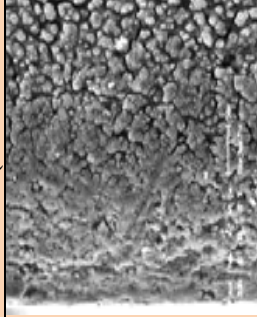
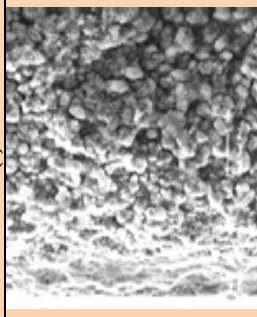
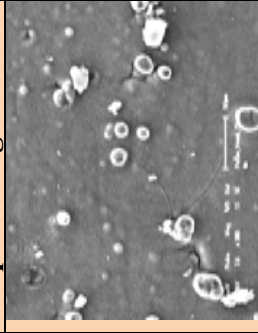
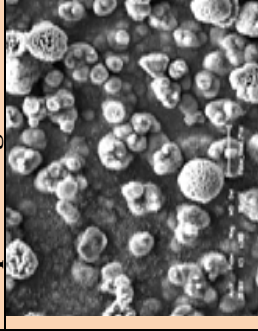

<p>Cabeça do Pistão</p> <p>Na região central da cabeça do pistão aconteceu o contato direto com a zona de combustão, apresentando elevada concentração de temperatura em comparação a temperatura nas bordas do pistão.</p>	<p>Motor 2 após 2 megaciclos</p>  <p>(r)</p>	<p>Motor 2 após 6 megaciclos</p>  <p>(s)</p>	<p>Motor 2 após 8 megaciclos</p>  <p>(t)</p>	<p>Motor 2 após 12 megaciclos</p>  <p>(u)</p>
--	---	--	---	--

Figura 31 – Diferentes estágios da camada de óxido na superfície da cabeça do pistão, **motor 2**– vida indicada na parte superior

Cabecote	Motor 3 após 2 megaciclos		Motor 3 após 5 megaciclos	
<p>Observou-se formação de óxidos nas áreas específicas (e), (f), (g) e (h) em relação a (a), (b), (c) e (d) possivelmente resultado da localização do filamento da vela. Com o aumento do número de ciclos associado às condições de temperatura, todas as quatro áreas ocorreram formações de óxidos.</p>	 <p>(a)</p>	 <p>(b)</p>	 <p>(c)</p>	 <p>(d)</p>
	 <p>(e)</p>	 <p>(f)</p>	 <p>(g)</p>	 <p>(h)</p>
<p>Após 2 Megaciclos, há formação espessa de óxidos ao redor do centro da vela, região que se submeteu às elevadas temperaturas. Nessa região, a formação de óxidos foi mais intensa. Ao longo das áreas (n), (o), (p) e (q), formaram-se óxidos de diferentes morfologias e, ao redor do centro da vela apresentaram o surgimento de malhas de trincas térmicas, resultado da presença de concentradores de tensões, como também o início do processo de fusão. a uma temperatura Tf, a qual permanece constante durante o processo.</p>	 <p>(i)</p>	 <p>(j)</p>	 <p>(l)</p>	 <p>(m)</p>
	 <p>(n)</p>	 <p>(o)</p>	 <p>(p)</p>	 <p>(q)</p>

Cabecote	Motor 3 após 11 megaciclos	
<p>Após 5 Megaciclos, há formação espessa de óxidos na região que se submeteu às elevadas temperaturas. Com o aumento do número de ciclos, associado às condições de altas temperaturas que prevalecem e subsequente evolução do desgaste, em todas as quatro áreas analisadas ocorreram aumento de óxidos.</p>	 <p>(r)</p>	 <p>(s)</p>
<p>Polimerização de óxidos ao redor do furo sede da vela, região que se submeteu às elevadas temperaturas. Há indícios de um processo de fusão a uma temperatura T_f, a qual permanece constante durante o processo. O calor absorvido por unidade de massa, enquanto o corpo se funde, constitui o calor latente de fusão da substância.</p>	 <p>(t)</p>	 <p>(u)</p>
<p>Figura 32 – Diferentes estágios da camada de óxido na superfície da abóbada interna do cabecote do , motor 3– vida indicada na parte superior</p>	 <p>(v)</p>	 <p>(x)</p>
	 <p>(z)</p>	 <p>(y)</p>

Cabeça do Pistão	Motor 3 após 2 megaciclos	Motor 3 após 5 megaciclos	Motor 3 após 11 megaciclos
<p>A formação de óxidos continuou principalmente na região de direção 12h, após 5 megaciclos.</p>	 <p>(a)</p>	 <p>(b)</p>	 <p>(c)</p>
<p>Na direção 6h ocorreu a formação de óxidos, decorrente da possível localização do filamento da vela nas direções 12h e 6h. Esta região apresenta tensões térmicas, conforme SILVA (2004).</p>	 <p>(d)</p>	 <p>(e)</p>	 <p>(f)</p>
<p>Remoção de óxidos na região 3h: após uma nova ciclagem, formou-se uma nova camada de óxido devido à exposição da superfície do material ao oxigênio e à temperatura.</p>	 <p>(g)</p>	 <p>(h)</p>	 <p>(i)</p>
<p>Formação das camadas de óxidos na região 9h, após 5 megaciclos.</p>	 <p>(j)</p>	 <p>(l)</p>	 <p>(m)</p>

Cabeça do Pistão	Motor 3 após 2 megaciclos	Motor 3 após 5 megaciclos	Motor 3 após 11 megaciclos
<p>Na região central, intensificação da camada de óxidos insinuando que (1) ocorreu uma intensificação da zona de combustível, (2) uma consequente distribuição de temperatura mais elevada do que nas bordas do pistão.</p>	 <p style="text-align: center;">(n)</p>	 <p style="text-align: center;">(o)</p>	 <p style="text-align: center;">(p)</p>
<p>Figura 33 – Estágios de intensificação das camadas de óxidos na superfície da cabeça do pistão, motor 3 – vida indicada na parte superior</p>			

4.3 Caracterização DRX e EDS de Óxidos em paredes da câmara do motor

Os difratogramas (Figuras 34 e 35) obtidos por DRX concernem às regiões do motor 1 relativas à **(1)** zona central da cabeça do pistão e **(2)** parede interna do cabeçote. Ambos os difratogramas evidenciam compostos amorfos com picos característicos de cristalinização rica para determinados ângulos 2θ e foram obtidos em superfícies ensaiadas a 6,2 milhões de ciclos.

As colônias de óxidos na cabeça do pistão 1 foram visualizadas *já* aos 2 milhões de ciclos com a morfologia de desgaste das Figuras 36, 37, 38, 39, 40 e 41.

Tais evidências ilustram principalmente o desgaste oxidativo, cuja discussão na literatura é sintetizada na Tabela 18, com vestígios de desgaste adesivo comprovados por algumas micro-análises por EDS expostas a seguir.

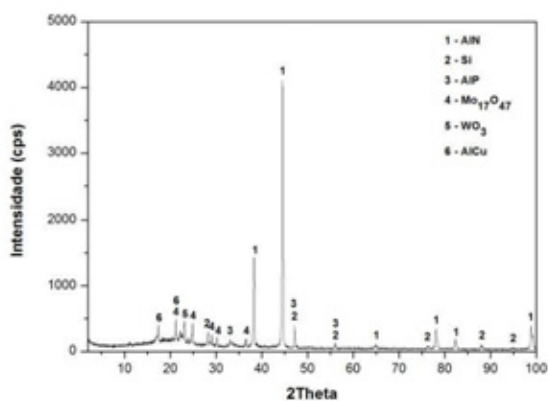


Figura 34 - Difratograma DRX da *cabeça do pistão, motor 1* após *6,2 milhões de ciclos* evidenciando-se fases amorfas e cristalinas presentes em sua composição.

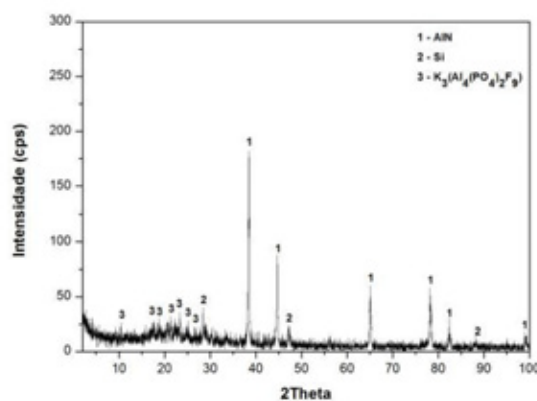


Figura 35 - Difratograma DRX do *cabeçote, motor 1* após *6,2 milhões de ciclos* evidenciando-se fases amorfas e cristalinas presentes em sua composição.

CABEÇA DO PISTÃO - REGIÃO DO CENTRO

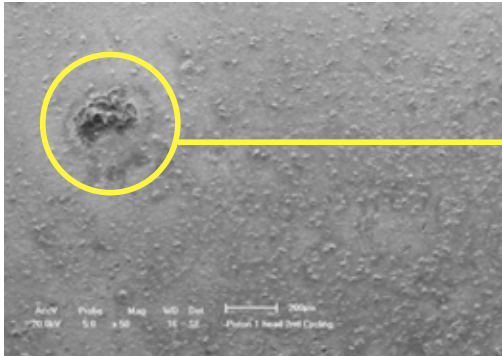


Figura 36 - Morfologia de óxidos com cerca de 100 µm de raio, com evidências de trincas térmicas. Superfície da cabeça do pistão do *motor 1*, após 2 megaciclos. SEM-SE

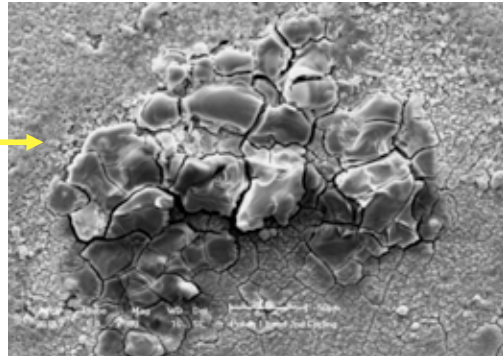


Figura 37 - Imagem referente à região selecionada da Figura 36. Superfície da cabeça do pistão do *motor 1*, após 2 megaciclos. SEM-SE

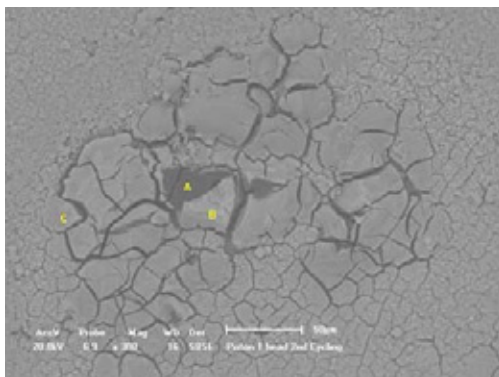


Figura 38 - Imagem referente à região selecionada da Figura 37. Superfície da cabeça do pistão do *motor 1*, após 2 megaciclos. SEM-SBSE

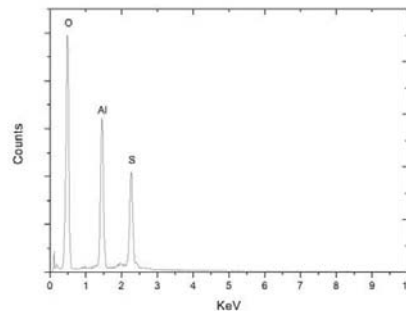


Figura 39 - Micro-análise EDS do Ponto A da Figura 38 em que alumínio e silício dizem respeito aos elementos de liga do material do pistão na zona oxidada devida ao processo de combustão.

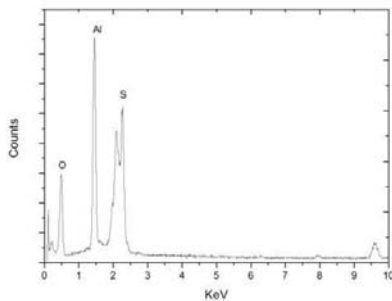


Figura 40 - Micro-análise EDS do Ponto B da Figura 38, em que o enxofre evidencia início de desgaste adesivo devido ao combustível/ lubrificante depositado em óxido de alumínio na superfície do pistão.

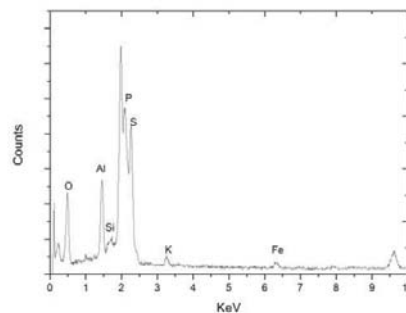


Figura 41 - Micro-análise EDS do Ponto C da Figura 38: Partícula de 20 µm em que (a) enxofre e fósforo evidenciam indícios de desgaste adesivo devido ao combustível/lubrificante depositados em óxido de alumínio na superfície do pistão (b) Ferro e carbono detectados indicam depósitos.

Tabela 18 - Peculiaridades evidenciadas no desgaste de componentes de um motor recentemente reportadas na literatura.

Data	Pesquisadores	Material	Evidências relatadas	Observações
2004	Kurita & Yamagata	Liga monolítica Al-Si	Desgaste abrasivo moderado no cilindro, lub EHD, partículas Si ~ 0,15µm	Consumo de óleo e refrigeração do cilindro Al-Si superiores ao do cilindro de f ^o f ^o
2007	Dienwiebel e col.	Al-Si Alusil [®]	Após o <i>running-in</i> , partículas Si inicialmente protrudaram-se da matriz de Al	Partículas de Si, por triboquímica, geraram uma matriz resistente ao desgaste próxima à superfície
2009	Slattery e col.	Al-Si	Desgaste abrasivo moderado no cilindro, lub EHD, partículas Si ~ 0,6µm	Fragmentação das partículas de Si, polimento subsequente
2010	Slattery e col.	Al-Si, com 12% Si e mais Ni, Cu, Mg, Fe	Partículas de Si com morfologia de agulhas ($\phi=19\pm 1\mu\text{m}$, $L=63\pm 4\mu\text{m}$) ou como colônias densas de finas partículas ($\phi=3,3\pm 0,2\mu\text{m}$, $L=5,9\pm 0,4\mu\text{m}$) µAnálises: EDS: Al, Si, C, O, Ca, P, S XPS: Zn (do óleo) & Al, Si, C, O, Ca, P, S, N, Na, Cl, Mg, F	Dureza do “Bulk” (Mg ₂ Si, Al ₁₅ (Mn,Fe) ₃ Si ₂ , Al, Agulhas Si, intermetálicos de Ni, colônias Si) HBN 103,2±0,2 (esfera $\phi=10\text{mm}$, carga 500kgf)
2010	Este trabalho	Pistão: Liga Al-Si Pino do Pistão: Aço 52100	Análises DRX, EDS Pino do Pistão: Al, Si, C, O, Ca, P, S, Mg, Fe, Nb, Na, Zn, Cl, K, Cr, Mn, Ti Cabeça do Pistão: Al, Si, C, O, P, S, Mg, K, Na, Zn, Cu	Pino do Pistão: Desgaste Abrasivo Oxidativo, Fratura Frágil, µFusão, “Spallation” Cabeça do Pistão: Desgaste Adesivo, Oxidativo, Erosivo Cabeçote: Desgaste Adesivo, Oxidativo, Erosivo

4.4 Resposta da História Térmica dos Motores e das Relações Estatísticas dos Valores dos Parâmetros Tribológicos - Variação da Temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) e Número de Ciclos

4.4.1 Ensaio dos motores – caracterização quantitativa

Apresentam-se os momentos estatísticos comumente usados na avaliação do sinal do temperatura, quais sejam, média, mediana, desvio padrão, distorção e curtose.

A Figura 42 apresenta os resultados obtidos para a distribuição estatística dos dados iniciais e finais do sinal da temperatura, adquiridos por computador, a uma taxa de aquisição de 0,0033 Hz (um dado a cada 30 segundos), durante o ensaio dos três motores.

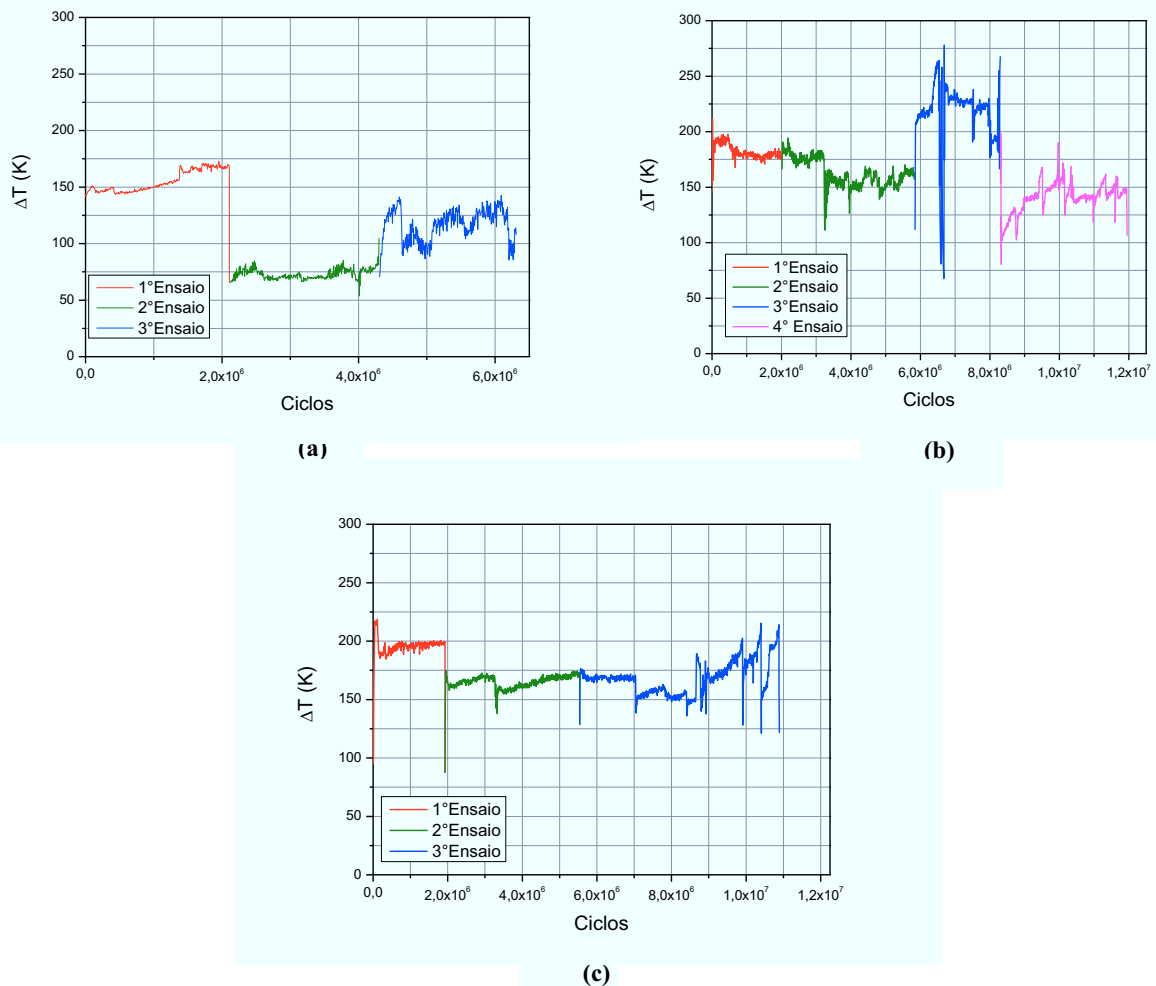


Figura 42 - História Térmica dos motores: (a) motor 1, (b) motor 2 e (c) motor 3.

De uma forma geral observou-se na Figura 42(a) que ao decorrer dos ensaios a temperatura oscila, como era de se esperar, já que nestas condições o desgaste nos 3 componentes intensificou-se. A variação de temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) era de aproximadamente 170 K durante o 1º ensaio (2.0 Megaciclos). Entretanto a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) para o 2º ensaio reduziu, resultado justificado pela mudança da localização do termopar no ensaio, esta mudança teve como finalidade reduzir uma possível interferência da vela sobre as medições de temperatura. Durante o 3º ensaio, depois de 4.5 Megaciclos, a variação de temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) apresentou oscilações freqüentes de aproximadamente 75 K à 148 K, o motor 1-piloto estava falhando freqüentemente, fato confirmado pelos momentos estatísticos listados na Tabela 19 e Figura 43, mostrando a dispersão do conjunto de valores analisados e outros momentos relativos a cada ensaio. Observou-se que todas as curvas de temperatura se comportam de maneira irregular durante todo o período dos ensaios com o aumento progressivo do número de ciclos aplicado.

Ao decorrer do ensaio a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) na Figura 42(b) atingiu maiores valores a partir do terceiro ensaio (8 Megaciclos), o motor apresentou rateamento em dois momentos específicos, o primeiro deu-se quando a variação de temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) chegou a aproximadamente 285 K e o segundo a 220 K, o motor começou a falhar freqüentemente, provocando a interrupção do ensaio após 8 Megaciclos, fato apresentado pelo desvio padrão listado na Tabela 20 e Figura 44. No quarto ensaio (aproximadamente 11 Megaciclos) o rateamento começou quando o pico da variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) chegou a 200 K, depois a 125 K e por fim a 150 K. Neste ensaio a agulha que ajusta a quantidade de combustível foi totalmente aberta para que o motor pudesse funcionar.

Observou-se na Figura 42(c) que para o primeiro ensaio a variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) foi alta. No segundo ensaio a temperatura sofreu uma queda, fenômeno que pode ser explicado segundo WILLIAMS (2004) onde em situações em que carregamento repetido é imposto dois processos podem ocorrer: primeiro, uma carga que gera fluxo plástico no início da aplicação pode gerar um sistema de tensão residual protetora que permite que a mesma carga de serviço seja suportada por longos períodos elasticamente, este processo é chamado de *Shakedown*” e a carga máxima para a qual ele ocorre é conhecido como “*limite de shakedown elástico*”. Segundo, associado a cargas mais severas, ocorre quando este limite é excedido e *shakedown* não ocorre resultando em deformação plástica a cada ciclo de carregamento.

Sendo assim, nos dois primeiros ensaios o motor não sofreu nenhuma parada, durante os dois ensaios foi utilizado o ventilador, entretanto para o terceiro ensaio, o motor começou a apresentar “rateamento” em dois momentos específicos, o primeiro deu-se quando a variação de temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) chegou a aproximadamente 210 K, e o segundo a 222 K, o motor começou a apresentar oscilações na variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) frequentemente, fato confirmado pelo desvio padrão listado na Tabela 21 e Figura 45.

No intervalo entre as duas paradas do terceiro ensaio ocorreu uma chuva inesperada que durou aproximadamente trinta minutos. Neste ensaio a agulha que ajusta a quantidade de combustível foi totalmente aberta para que o motor pudesse funcionar, não foi utilizado o ventilador: o ar umidificou-se e a combustão passou a ser processada com mistura mais rica, compensando o vapor d’água incremental. O interessante da constatação experimental é que a temperatura acima do cabeçote demonstrou-se sensível à flutuação de umidade para esse nível de vida do motor (11 Megaciclos).

As Tabelas 19, 20 e 21 contêm os momentos estatísticos obtidos pela variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$). Os resultados são consequência das condições de flutuação da temperatura, associando-se à irregularidades no desempenho do motor.

Tabela 19 - Distribuição estatística dos dados variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) em função do número de ensaios, Motor 1 – piloto.

Temperatura	Primeiro ensaio	Segundo ensaio	Terceiro ensaio
Média	155	73	116
Mediana	151	72	119
Desvio Padrão	9	5	14
Distorção	0,46	1,10	-0,73
Curtose	-1,43	5,67	0,60

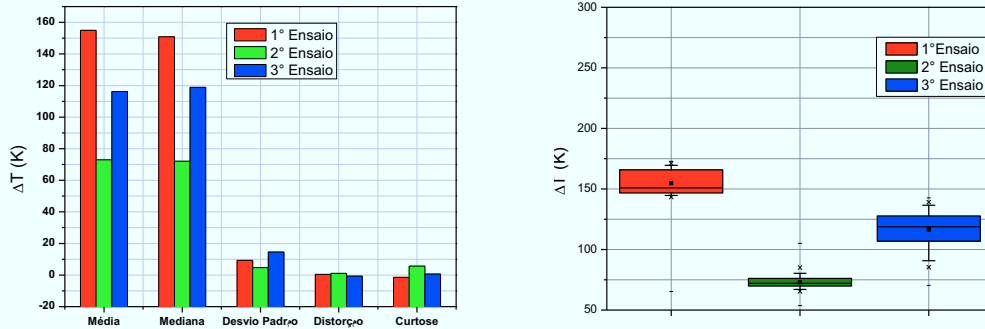


Figura 43 - Dados estatísticos da temperatura no motor 1.

Tabela 20 - Distribuição estatística dos dados variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) em função do número de ensaios, Motor 2.

Temperatura	Primeiro ensaio	Segundo ensaio	Terceiro ensaio	Quarto ensaio
Média	182	162	189	141
Mediana	180	161	195	142
Desvio Padrão	7	13	32	13
Distorção	0,23	-0,35	-2,73	-0,52
Curtose	3,35	2,10	9,76	1,94

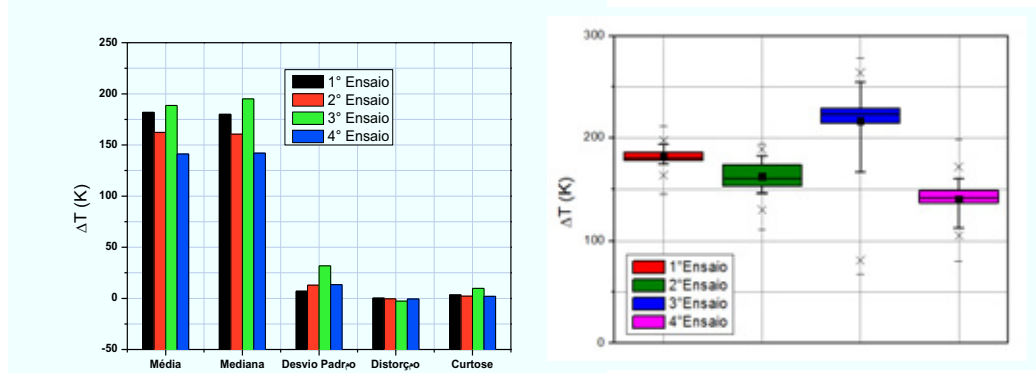


Figura 44 - Dados estatísticos da temperatura no motor 2.

Tabela 21 - Distribuição estatística dos dados variação da temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) em função do número de ensaios, Motor 3.

Temperatura	Primeiro ensaio	Segundo ensaio	Terceiro ensaio
Média	195	165	167
Mediana	197	166	168
Desvio Padrão	11	6	15
Distorção	-6,20	-3,95	-0,11
Curtose	55,28	44,74	4,64

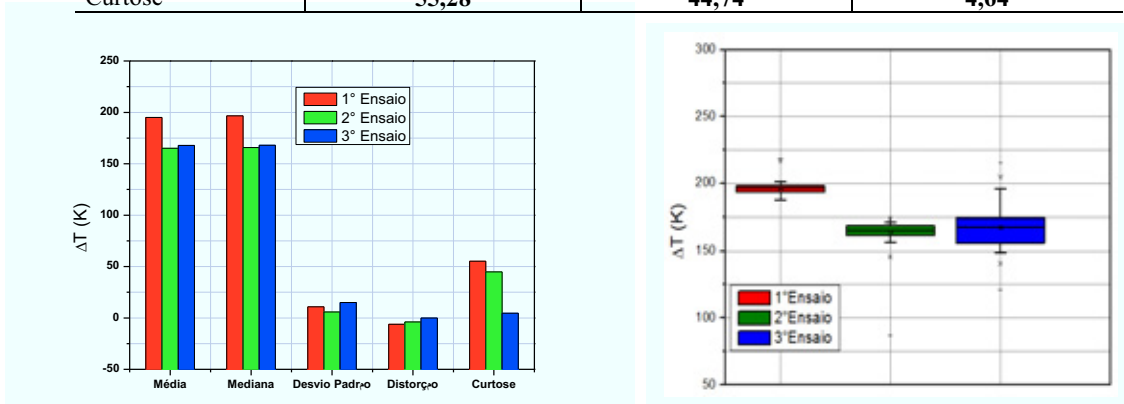


Figura 45 - Dados estatísticos de temperatura no motor 3.

4.5 Resposta da Velocidade Angular e das Relações Estatísticas dos Valores dos Parâmetros Tribológicos – Rotação por Minuto e Número de Ciclos

4.5.1. Ensaio dos motores – caracterização quantitativa

Os dados referentes as Tabela 22 e 23 e as Figuras 46 e 47 apresentam os momentos estatísticos média, mediana, desvio padrão, distorção e curtose usados na avaliação do sinal de velocidade de giro da hélice, adquiridos por tacômetro, a cada dez minutos, durante o ensaio dos motores. Estes resultados foram consequência da evolução do desgaste juntamente com a redução da vida útil do motor.

A maior dispersão para o motor 2 foi apresentada no terceiro ensaio, fato confirmado por meio dos dados obtidos pela flutuação da temperatura, como também comprovado pelos dados da rotação. No quarto ensaio a agulha que ajusta a quantidade de combustível foi totalmente aberta para que o motor pudesse funcionar, porém a rotação não apresentou crescimento, confirmando a evolução do desgaste. Observou-se que a rotação para o motor 2 tendeu a diminuir à medida que o tempo de ensaio aumentava. A Figura 46 resume essa tendência descrita na Tabela 22.

A Tabela 23 evidencia uma queda de rotação, após o primeiro ensaio do motor 3, em consequência da evolução do desgaste. Para que o motor permanecesse em funcionamento no terceiro ensaio foi necessário a abertura completa da entrada de combustível, no entanto a rotação tendeu a diminuir, neste ensaio foi retirado a refrigeração através do ventilador.

Tabela 22 - Distribuição estatística dos dados da rotação por minuto (RPM), Ensaio do motor 2.

RPM	Primeiro ensaio	Segundo ensaio	Terceiro ensaio	Quarto ensaio
Média	11.147	10.655	10.646	10.251
Mediana	11.128	10.685	10.597	10.232
Desvio Padrão	271	216	314	137
Distorção	0,067	-0,40	0,35	0,31
Curtose	0,98	-0,19	-1,20	-0,62

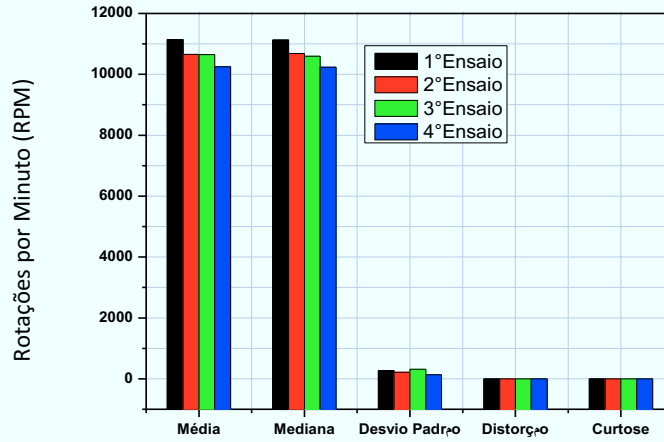


Figura 46 - Dados estatísticos de RPM no motor 2.

Tabela 23 - Distribuição estatística dos dados da rotação por minuto (RPM), Ensaio do motor

3.

RPM	Primeiro ensaio	Segundo ensaio	Terceiro ensaio
Média	10.703	10.266	10.147
Mediana	10.662	10.258	10.198
Desvio Padrão	326	540	319
Distorção	0,42	-0,22	0,58
Curtose	-1,07	-0,40	-0,05

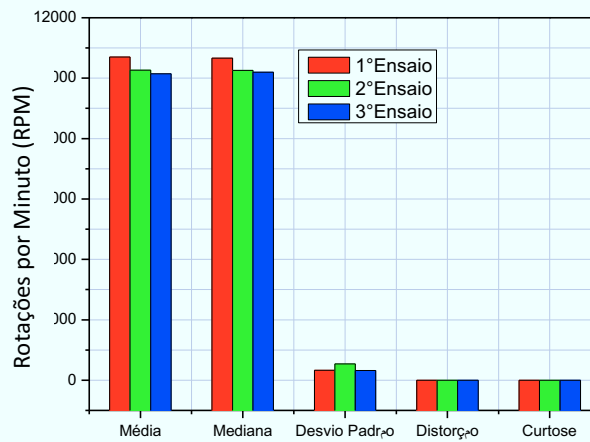


Figura 47 - Dados estatísticos de RPM no motor 3.

4.6 Relação entre a cilindridade e o número de ciclos

4.6.1. Ensaio dos motores – caracterização quantitativa

A cilindridade obtida a partir da avaliação diametral para os componentes pino e pistão foi detalhada nas Tabelas 24 e 25. As Figuras 48 e 49 apresentam os resultados medidos metrologicamente para os dois componentes citados anteriormente.

Os dados detalhados na Tabela 24 representou a resposta contínua que no terceiro ensaio, a partir de 6 Megaciclos a evolução do desgaste foi evidente, tanto para o pistão (Figura 48) como para o pino (Figura 49) o aumento significativo da cilindridade deu-se no terceiro ensaio. Entretanto, esta medida só é obtida com o motor parado e desmontado, diferentemente da temperatura, ou seja, sem os efeitos do aquecimento.

Tabela 24 - Medições da variação de desvio de forma – motor 2.

Número de Ciclos	Pistão (mm)	Cilindridade Total do Pistão	Pino (mm)	Cilindridade Total do Pino
Novo	22,8502	0,0014	5,0072	0,0032
Após o Running	22,9751	0,0017	5,0124	0,0058
Após 2 Megaciclos	22,8549	0,0018	4,9906	0,0022
Após 6 Megaciclos	22,9719	0,0048	5,0055	0,0050
Após 8 Megaciclos	23,0171	0,0178	4,9825	0,0160
Após 12 Megaciclos	23,0013	0,0036	5,0048	0,0108

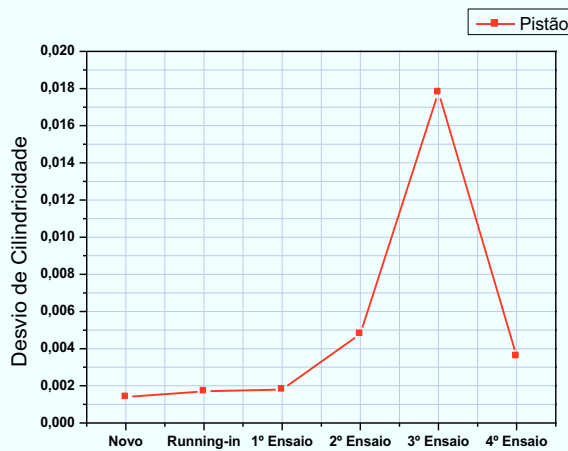


Figura 48 - Cilindridade referente ao pistão - motor 2.

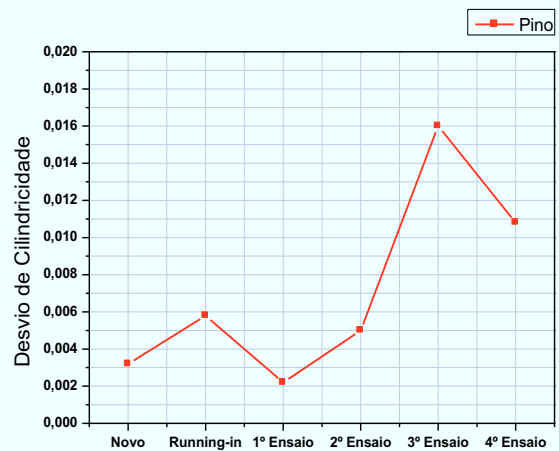


Figura 49 - Cilindridade referente ao pino - motor 2.

A Tabela 25, juntamente com as Figuras 50 e 51 apresentam a confirmação da evolução do desgaste já obtida anteriormente, o primeiro ensaio envolve o processo de shakedown, facilitando a cilindridade do segundo ensaio. Para o terceiro ensaio ocorreu um pequeno crescimento do desvio de cilindridade.

Tabela 25 - Medições da variação de desvio de forma – motor 3.

Número de Ciclos	Pistão (mm)	Cilindricidade Total do Pistão	Pino (mm)	Cilindricidade Total do Pino
Novo	22,9896	0,0030	4,9896	0,0030
Após o Running	23,0263	0,0026	5,0019	0,0060
Após 2 Megaciclos	22,9944	0,0064	5,0060	0,0080
Após 5 Megaciclos	23,0030	0,0034	5,0036	0,0076
Após 12 Megaciclos	22,9955	0,0060	4,9795	0,0052

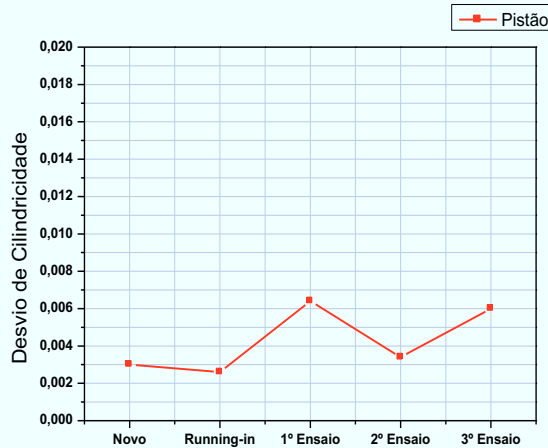


Figura 50 - Cilindricidade referente ao pistão - motor 3.

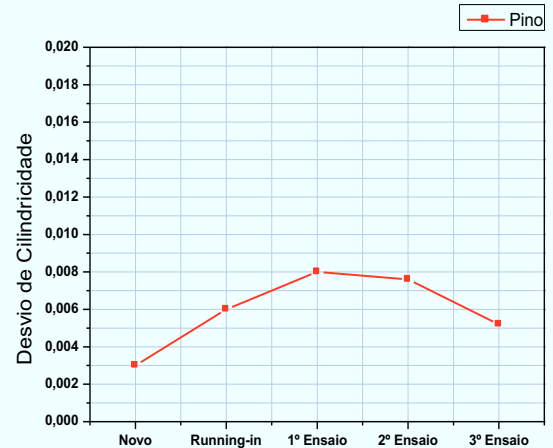


Figura 51 - Cilindricidade referente ao pino - motor 3.

4.7. Medição de Massa

4.7.1. Ensaio dos motores – caracterização quantitativa

As Figuras 52, 53, 54, 55, 56 e 57 apresentam os resultados medidos em balança analítica para os componentes dos motores 2 e 3: pino, cabeçote do motor e pistão. A massa obtida foi detalhada nas Tabelas 26, 27, 28, 29, 30 e 31.

Conforme os resultados das tabelas a massa não sofreu alteração significativa que fosse destacada, ou seja não foi detectado perda de massa no cabeçote e pistão dos motores 2 e 3, porém foi apresentado um ganho de massa, devido a formação de óxidos e resíduos (lubrificante e combustível) impregnados na parte interna do cabeçote e pistão, mesmo após o banho de ultrassom. Assim a medição de massa não foi um parâmetro aconselhado para caracterizar a evolução do desgaste nestes componentes.

Nas Tabelas 30 e 31, observa-se respectivamente para o motor 2 e 3 uma perda de massa no primeiro ensaio em relação ao running-in, depois essa tendência foi invertida, apresentando ganho de massa no segundo ensaio, formação de óxidos, em seguida ocorre

novamente perda de massa no terceiro ensaio. Assim a variação de massa no pino também não foi um parâmetro aconselhado para caracterizar a evolução do desgaste.

Tabela 26 - Medições da massa, cabeçote – motor 2.

Massa (g)	Running-in	Primeiro ensaio	Segundo ensaio	Terceiro ensaio	Quarto ensaio
Média	25,1425	25,1596	25,1995	25,2619	25,3548
Mediana	25,1425	25,1596	25,1995	25,2619	25,3548
Desvio Padrão	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001
Distorção	0,00	-1,68	0,00	0,00	0,00
Curtose	-0,311	3,20	-0,7	-0,7	-1,77636E-15

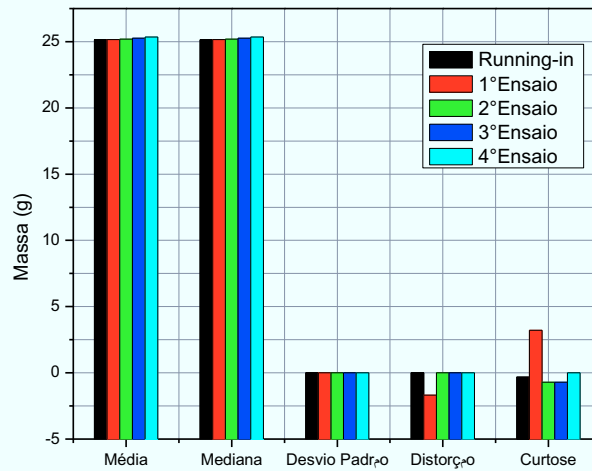


Figura 52 - Medição de massa referente ao cabeçote - motor 2.

Tabela 27 - Medições da massa, cabeçote – motor 3.

Massa (g)	Novo	Running-in	Primeiro ensaio	Segundo ensaio	Terceiro ensaio
Média	25,2851	25,2859	25,3003	25,3855	25,4164
Mediana	25,2851	25,2859	25,3003	25,3855	25,4164
Desvio Padrão	0,0001	0,0002	0,0001	0,0008	0,0001
Distorção	-0,31	-0,59	0,28	-2,57	0,94
Curtose	2,21	-1,25	-1,39	6,96	0,35

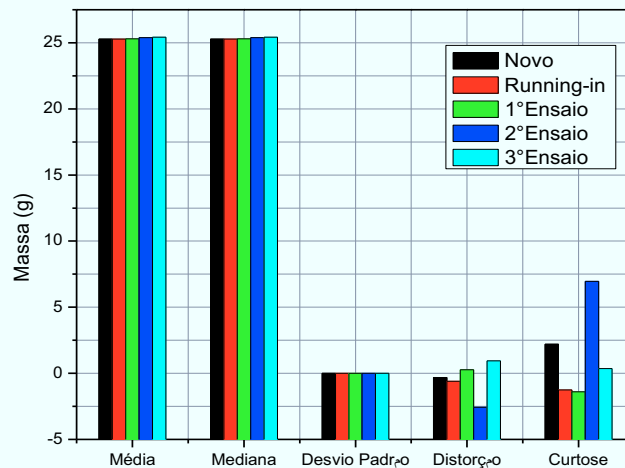


Figura 53 - Medição de massa referente ao cabeçote - motor 3.

Tabela 28 - Medições da massa, pistão – motor 2.

Massa (g)	Running-in	Primeiro ensaio	Segundo ensaio	Terceiro ensaio	Quarto ensaio
Média	7,9168	7,9171	7,9461	7,9701	8,0006
Mediana	7,9168	7,9171	7,9461	7,9701	8,0006
Desvio Padrão	0,0002	0,0003	0,0001	0,0004	0,0002
Distorção	0,82	-1,56	-0,40	1,85	0,82
Curtose	-0,54	1,88	-0,23	4,38	-0,54

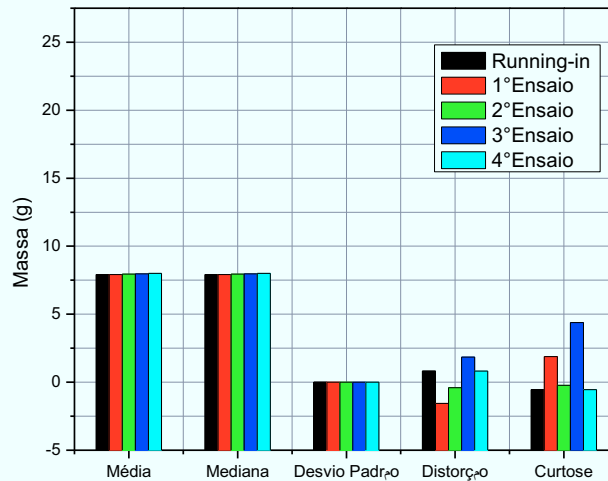


Figura 54 - Medição de massa referente ao pistão - motor 2.

Tabela 29 - Medições da massa, pistão – motor 3.

Massa (g)	Novo	Running-in	Primeiro ensaio	Segundo ensaio	Terceiro ensaio
Média	7,8736	7,8739	7,9126	7,9749	8,0706
Mediana	7,8736	7,8739	7,9126	7,9749	8,0706
Desvio Padrão	0,0001	0,0003	0,0001	0,0001	0,0001
Distorção	0,40	-0,43	0,30	0,63	0,00
Curtose	-0,23	-0,27	0,15	1,74	0,81

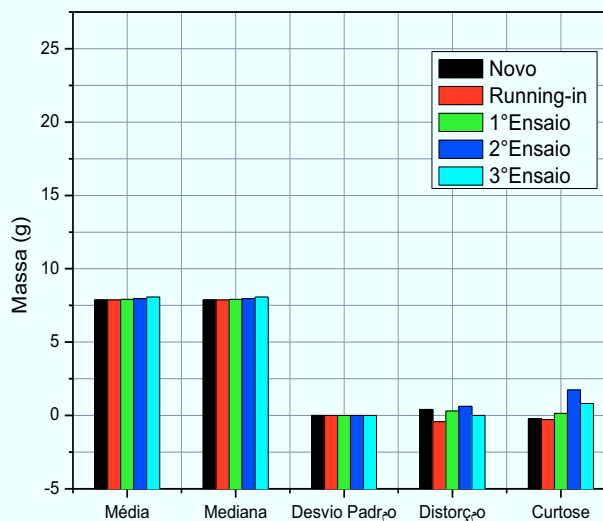


Figura 55 - Medição de massa referente ao pistão - motor 3.

Tabela 30 - Medições da massa, pino – motor 2.

Massa (g)	Running-in	Primeiro ensaio	Segundo ensaio	Terceiro ensaio	Quarto ensaio
Média	2,4893	2,4888	2,5052	2,4896	2,4896
Mediana	2,4893	2,4888	2,5052	2,4896	2,4896
Desvio Padrão	0,0002	0,0002	0,0001	0,0002	0,0001
Distorção	-0,54	-0,17	0,28	0,12	0,30
Curtose	-1,05	-1,39	-1,39	-0,97	0,15

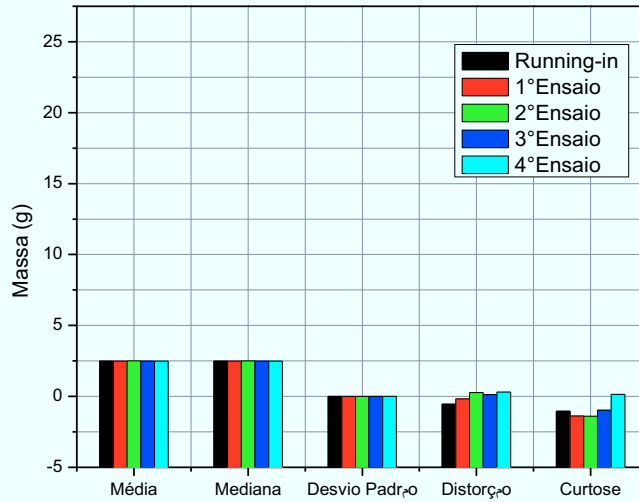


Figura 56 - Medição de massa referente ao pino - motor 2.

Tabela 31 - Medições da massa, pino – motor 3.

Massa (g)	Novo	Running-in	Primeiro ensaio	Segundo ensaio	Terceiro ensaio
Média	2,4895	2,4903	2,4901	2,4972	2,4912
Mediana	2,4895	2,4903	2,4901	2,4972	2,4912
Desvio Padrão	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0002
Distorção	0,88	0,54	-0,39	0,40	0,30
Curtose	-0,71	-1,05	-0,45	-0,23	-0,16

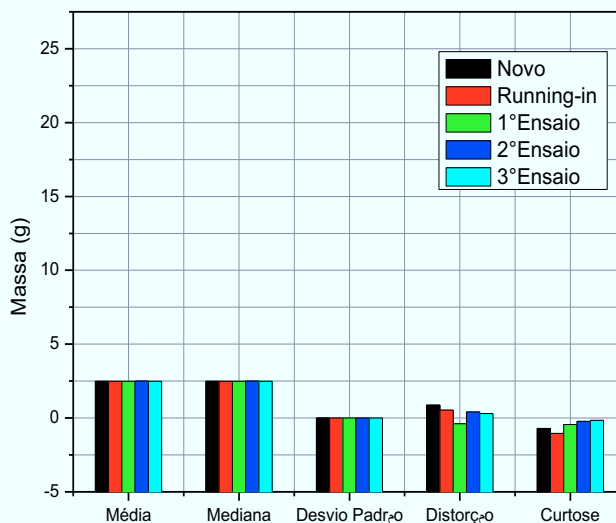


Figura 57 - Medição de massa referente ao pino - motor 3.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Para o estudo dos tipos de mecanismos do desgaste atuantes durante os ensaios, utilizando três motores de aerodelismo, sob condições experimentais estipuladas em: velocidade variando desde 2.000 até 11.100 ± 100 rpm, acumulando, uma vida de cerca de 12 Megaciclos ± 1 Megaciclos, sob temperatura inicial da superfície próxima ao ambiente, foi concluído que:

1. O método desenvolvido avalia o desenvolvimento do dano, a morfologia e sua natureza que estão relacionados a história térmica do cabeçote do motor e seu ciclo de vida respectivamente;
2. A medição da temperatura na zona externa sobre o cabeçote do motor mostrou-se um parâmetro representativo do desgaste, bem como do desempenho normal do motor;
3. O desvio-padrão e a curtose do sinal de temperatura, adquirindo a cada 30 segundos, demonstraram associação com a intensificação do desgaste do motor e com o seu desempenho;
4. Os principais mecanismos de desgaste identificados nas superfícies da cabeça e pino do pistão e na abóbada interna do cabeçote foram o desgaste oxidativo, desgaste erosivo, desgaste abrasivo e por fadiga térmica;
5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) pode ser utilizada em conjunto com a variação da temperatura para confirmar fenômenos originados tribologicamente;
6. A análise estatística dos resultados de desgaste permitem:
 - a) Estudar de uma forma quantitativa os fenômenos de desgaste permitindo, com poucos ensaios, ter uma avaliação do sistema tribológico.

- b) Os coeficientes de correlação extraídos da área dos óxidos formados com a diferença de temperatura ($T_{\text{motor}} - T_{\text{ambiente}}$) demonstraram para o motor 2: $0,80 \geq R \geq 0,99$ e para o motor 3: $0,71 \geq R \geq 0,97$ de representatividade de fenômenos típicos ocorridos durante os ensaios.
7. O regime de desgaste severo como descrito por HUTCHINGS (1992) foi confirmado a partir da dimensão de partículas de desgaste com dimensões superiores a $20\mu\text{m}$.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- a) Verificar a evolução dos mecanismos de desgaste, sob condições de maior temperatura final no cabeçote do motor, utilizando gradativamente maiores temperaturas;
- b) Alterar a composição química do combustível, para verificar a influência nas taxas e mecanismos de desgaste;
- c) Estudar o consumo de combustível de maneira mais detalhada;
- d) Verificar qual a influencia da vibração para o desempenho do motor;
- e) Identificar os mecanismos de desgaste para motores de potência 10 HP, 100 HP e 1000 HP utilizando a metodologia proposta neste trabalho;
- f) Identificar a morfologia dos óxidos por meio da variação da temperatura.

CAPÍTULO 6 - REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ABREU, Y. V., **Estudo Comparativo da Eficiência Energética da Indústria da Cerâmica de Revestimento Via Úmida no Brasil e na Espanha**. 2001. 147p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

ACRES, G. J. K., **Catalyst Systems For Emission Control From Motor Vehicles, in Pollution, Causes, Effects and Control**, 1992. Edited by Harrison, R. M., The Royal Society of Chemistry.

ALLENSTEIN, A. N., **Estudo da Resistência à Cavitação do Aço Inoxidável Martensítico Ca6-Nm Nitretado por Plasma**. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

ALVIM, C. F. et al., **Energia Final e Equivalente - Procedimento Simplificado de Conversão**. Revista Economia e Energia, nr. 18 - jan/fev. 2000. Disponível em: www.ecen.com/eee18/energqui.htm.

BAUFELD, B. et al., **Defect Evolution in Thermal Barrier Coating Systems Under Multi-Axial Thermomechanical Loading**. Surface & Coatings Technology (2005) - German Aerospace Center, Cologne, Germany. Available online 29 September 2005.

BAYER, R. G., **Mechanical Wear Prediction and Prevention**, Marcel Dekker, 657p., 1994.

BET, L., **Avaliação do Comportamento de um Motor Diesel, Refrigerado a Ar, Funcionando como Motor Dual Diesel – GNC**. 1991. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

BRAUN, S. et al., **A Poluição Gerada por Máquinas de Combustão Interna Movidas à Diesel - A Questão dos Particulados. Estratégias Atuais para a Redução e Controle das Emissões e Tendências Futuras**. Quim. Nova, Vol. 27, No. 3, 472-482, 2003.

CHEN, Y. M.; MONGIS, J., **Cavitation Wear in Plain Bearing** – Mécanique & Industries 6, pgs 195-201, 2005.

CHRISTIANSEN, K., **Life Cycle Assessment in a Historical Perspective**, In: Workshp internacional sobre análise do ciclo de vida, ABNT, Rio de Janeiro, 1996.

CRUTCHELD, J. P.; FELDMAN, D. P., **Regularities Unseen, Randomness Observed: Levels of Entropy Convergence**. Santa Fe Institute Working Paper 01-02-012. February 8, 2001.

CURRAN, M. A. (org.), **Environmental Life Cycle Assessment**, McGraw Hill, Nova Iorque, 1996.

DEGOBERT, P., **Automobiles and Pollution**; ed. SAE Society of Automotive Engineers, Warrendale: United States of America, 1995. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010040422004000300018&script=sci_arttext#fig1>. Visitado em 21/03/2005.

DIENWIEBEL, M.; PÖHLMANN, K.; SCHERGE, M., **Origins of the Wear Resistance of AISi Cylinder Bore Surfaces Studied by Surface Analytical Tools**. *Tribology International* 40 (10–12) (2007) 1597–1602.

DUMONT, M. L., **Etude des Endommagements de Surface Induits par la Latigue de Roulement Dans les Contacts Élastohydrodynamiques pour des Aciers M50 et 100Cr6**. 1997. 197p. PhD Thesis. Laboratoire de Mécanique des Contacts, INSA de Lyon, France.

FARÍAS, M. C. M., **Influência da Velocidade de Deslizamento, da Carga Normal e da Transformação Martensita Induzida por Deformação Plástica na Resistência ao Desgaste por Deslizamento dos Aços Inoxidáveis Austeníticos**. 2003. 173p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

FAVA, J. et al., **A Technical Framework for Life-Cycle Assessment**, SETAC, Washington, 1991.

FEHLNER, F. P., **Low-Temperature Oxidation: The Role of Vitreous Oxides**. New York: Wiley, 1996.

FIRAT, M.; KOCABIYIK, U., **Analytical Durability Modeling and Evaluation – Complementary Techniques for Physical Testing of Automotive Components**. *Engineering Failure Analysis* (11) (2004), In press.

GAHR, K. Z., **Microstructure and Wear of Materials**, Elsevier Science Publishers, 1987.

GARCIA, M. B., **Características do Desgaste de Anéis de Pistão com Diferentes Tecnologias de Tratamentos Superficiais**. 2003. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisa Energética e Nucleares. Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo.

GRAS, R.; INGLEBERT, G., **Fatigue de Contact: Endommagements et Simulation**. 17^e Journées de Printemps: Fatigue de Contact. Senlis - France, 27-28 mai 1998. Commission de Fatigue des Matériaux, SFMM - Société Française du Métallurgie et Materials. 8(1) - 8(12), 1998.

HORTA NOGUEIRA, L. A.; PEREZ, S. A. N., OLIVEIRA JUNIOR, S., Mini-curso: **Análise Exegética de Processos**. SP. De 7 a 9 de Dezembro, 1994.

HUQ, M. Z.; CELIS, J. P., **Expressing Wear Rate in Sliding Contacts Based on Dissipated Energy**, Department of Metallurgy and Materials, Katholieke Universiteit Leuven, Kasteelpark Arenberg 44, B-3001 Leuven, Belgium. Received 22 March 2001; received in revised form 4 September 2001; accepted 2 October 2001.

HUTCHINGS, I. M., **Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials**. Cambridge: British Library Cataloguing in Publication Data, 1992-a. 273p.

JUNIOR, S. G. L. et al., **Estudo da Usinagem de Guias de Válvulas de um Motor de Combustão Interna**, 17º Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2007.

JUNIOR, R. F. M., **Análise Topográfica da Superfície de Cilindro de Motores a Combustão Interna**. 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

KARIMI et al., **Influence of Oxygen Content on Structure and Properties of Multi-Element AlCrSiON Oxynitride thin Films**. Surface & Coatings Technology 204 (2010) 2716–2722

KATO, K., **Wear Mode Transitions**; Scripta Metall., vol.24, 1990, p.815-820.

KOCH, F., **A New Technique for Measuring the Deformation of Cylinder Bores During Engine Operation**, Paper SAE 950540, 1995.

KOTAS, T. J., **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**, Butterworths, 1985.

KURITA, H. et al., SAE Int. (2004), 2004-01-1028.

LIM, S. C.; ASHBY, M. F., **Wear-Mechanism Maps**. Acta metallurgical 35(1), 1-24. (1987).

LIMA, ÉRIKA C. C.; COSTA, KLEBER M. L.; MEDEIROS, JOÃO T. N., **An Approach for Life Cycle Analysis of a Two Strokes Engine by Monitoring of the Wear**. In: Brazilian Mrs Meeting 2005 – IV Encontro da SBPmat – Sociedade Brasileira de Pesquisa em Materiais, realizado em Recife/PE.

LIMA, ÉRIKA C.C. et al., **Life Cycle Analysis (LCA) of an IC Engine by Wear Microscopy and Head Temperature Statistics**. In: IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica 2006, realizado em Recife/PE.

LIZARRAG, J. M. S., **Termodinâmica de Fluidos Y El Método de Análisis Exergético**, 1987. In: Minicurso: Análise exergética de processos. Horta Nogueira, L.A.; Perez, S.A.N.; Oliveira Junior, S. SP de 7 a 9 de Dezembro, 1994.

LUDEMA, K. C. **Friction**, In: CRC Handbook of Lubrication, Vol.II Theory & Design, CRC Press, p.31-48, 1988.

MARTINELLI JÚNIOR, L. C., **Máquinas Térmicas I - Motores de Combustão Interna**. 182p. Apostila. Unijuí – Campus Panambi, 2003.

MARU, M. M., **Estudo do Desgaste e Atrito de um Par Metálico sob Deslizamento Lubrificado**. 2003. 254p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

MATAMOROS, E. P., **Modelo de Desgaste Oxidativo Baseado em Parâmetros Termodinâmicos**. 2004. 185p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

- MEADOWS, D. H. et al., **Limites do Crescimento**, Ed. Perspectiva, São Paulo, 1972.
- MEDEIROS, J. T. N., **Fadiga de Contato de Discos Metálicos Não-Conformes Submetidos a Ensaio a Seco de Rolamento Cíclico**. 2002. 2 volumes. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MICROSENSOR & ACTUATOR TECHNOLOGY CENTER, **Pressure Measurement in Combustion Engines**. Disponível em: <http://www-mat.ee.tu-berlin.de/research/sic_sens/sic_sen3.htm>. Acesso em: 17 de Setembro de 2010
- MILHOR, C. E., **Sistema de Desenvolvimento para Controle Eletrônico dos Motores de Combustão Interna Ciclo Otto**. 2002. 101p. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- MOURA, C. R. S. et al., **Lubrificantes e Lubrificação**, Ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1981.
- McGEEHAN, J. A., **A Literature Review of the Effects of Piston and Ring Friction and Lubrication Oil Viscosity on Fuel Economy**, Chevron Research Co., Paper SAE 780673, 1978.
- NEELIS, M. L.; KOOI, H. J. VAN DER; GEERLINGS, J. J. C., **Exergetic Life Analysis of Hydrogen Production and Storage Systems for Automotive Applications**, International Journal of Hydrogen Energy, 2003.
- NABI, Md. NURUN., **Theoretical Investigation of Engine Thermal Efficiency, Adiabatic Flame Temperature, NO_x Emission and Combustion-Related Parameters for Different Oxygenated Fuels**, Applied Thermal Engineering 30 (2010) 839-844.
- NEGRI, J. C. et al., **Avaliação Termoeconômica como Fator Comparativo entre Configurações de Usinas Termoelétricas**, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XV SNPTEE, Foz do Iguaçu – Paraná – Brasil, 1999.
- ÖNER, C. et al., **Surface Properties of CrN Coated Engine Cylinders**. Materials and Design 30 (2009): 914–920.
- PASSARINI, L. C., **Projeto e Análise de Válvulas Eletromagnéticas Injetoras de Combustível: Uma Nova Proposta**. 1993. 388p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- PAWLUS, P., **Change of Cylinder Surface Topography in Initial Stage of Engine Life**, Wear, vol. 209, p. 69-83. 1997.
- PERSSON, B. N. J., **Sliding Friction**, Surface Science Reports 33, p.83-119, 1999.
- PETERSON, M.B., **Classification of Wear Process**. In: Wear Control Handbook. ASM Handbook, New York, p.9-15, 1980.
- PINTO, A. A., **Resistência ao Desgaste por Cavitação de Aços Revestidos com Poliuretano**, 16º Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade

Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2006.

POPOV, V. L. et al., **Wear in Combustion Engines: Experiment and Simulation on the Base of Movable Cellular Automata Method**. Physical Mesomechanics 4 (4) (2001), in press.

QUINN, T. F. J., **Oxidational Wear**, ASM Handbook, vol 18, p. 280, 1992.

QUINN, T. F. J., **Review of Oxidational Wear, Part 1: The Origins of Oxidational Wear**, Tribology International 16(5), 257-271, 1983.

QUINN, T. F. J.; SULLIVAN, J. L.; ROWSON, D. M., **New Developments in the Oxidational Theory of the Mild Wear of Metals**. In: Wear of Materials: International Conference on Wear of Materials (K. C. Ludema, W. A. Glaeser and S. K. Rhee, Eds.). New York: ASME. pp. 1-11. 1979.

RABINOWICZ, E., **Friction and Wear of Materials**. New York: Wiley. 1965.

RIBEIRO, F. M., **Inventário de Ciclo de Vida da Geração Hidrelétrica no Brasil - Usina de Itaipu: primeira aproximação**. 2003. 456p. Dissertação (Mestrado) - Programa Interunidades de Pós - Graduação em Energia (EP-IF-FEA-IEE). Universidade de São Paulo, São Paulo.

RTA-REDE TÉCNICA AUTOMOTIVA, **A Importância dos Anéis nos Motores a Combustão Interna**. Disponível em: <<http://www.oficinabrasil.com.br/.../material...apoio/material-de-apoio-260509.pdf>>. Acesso em: 03 de Março de 2010

SABURI, S.; SAITOH, Y.; YAMADA, T., **Tribology Between Piston Rings and Cylinder Liners of Marine Diesel Engines**, Engineering Review, volume 38, nº1, 2005.

SANTOS, A. H. M. et al., **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações de Equipamentos**. Ed. EFEI, 2ª edição, ELETROBRÁS/PROCEL – Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Minas Gerais, 2001.

SERBINO, E. M., **Um Estudo dos Mecanismos de Desgaste em Disco de Freio Automotivo Ventilado de Ferro Fundido Cinzento Perlítico com Grafita Lamelar**. 2005. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVA, C. R. S., **Fadiga Térmica de Ferros Fundidos Brancos Multicomponentes**. 2003. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVA, F. S., **Fatigue on Engine Pistons – A Compendium of Case Studies**, Engineering Failure Analysis (2005) - Department of Mechanical Engineering, University of Minho, Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal. Received 12 July 2004; accepted 14 December 2004.

SILVA, G. A., **Análise de Ciclo de Vida de Processos Industriais**, apostila do curso AQ-

012- Análise de Ciclo de Vida de Processos Industriais, PECE - Programa de Educação Continuada em Engenharia-Escola Politécnica/Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

SOARES, S. R. et al., **Análise do Ciclo de Vida de Produtos (revestimento, blocos e telhas) do Setor Cerâmico da Indústria de Construção Civil**. 2002. 131p. Relatório Parcial I/IV - Universidade Federal de Santa Catarina - Centro Tecnológico - Engenharia Sanitária-Ambiental, Santa Catarina.

SOTREQ, **O Diesel e o Motor Caterpillar**. Disponível em: <<http://www.sotreq.com.br/artigostecnicos/diesel.pdf>>. Acesso em: 27 de Julho de 2004

SHUSTER, M. et al., “**Piston Ring Cylinder Liner Scuffing Phenomenom: Investigation, Simulation and Prevention**” paper SAE 1999-01-1219, 1999a.

SHUSTER, M. et al., **Metallurgical and Metrological Examinations of the Cylinder Liner-Piston Ring Surfaces After Heavy Duty Diesel Engine Testing**. Tribology Transactions v.42 (1999), 1, p.116-125. 1999 b.

STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W., **Engineering Tribology**. 1 ed.. Butterworth Heinemann S&T, 2000.

SLATTERY, B.E.; PERRY, T.; EDRISY, A., **Microstructural Evolution of a Eutectic Al-Si Engine Subjected to Severe Running Conditions**. Materials Science and Engineering A 512 (2009) 76–81

SLATTERY, B.E.; EDRISY, A.; PERRY, T., **Investigation of Wear Induced Surface and Subsurface Deformation in a Linerless Al-Si Engine**. Wear 269 (2010) 298–309

STOETERAU, R. L., **Tribologia**. 172p. Apostila, Universidade Federal de Santa Catarina Centro Tecnológico-Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.

STOCKEL, M. W., **Auto Service and Repair**, The Goodheart – Willcox CO., Inc. South Holland, Illinois, USA, 1969.

SZARGUT, J.; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R., **Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes**. Berlin: Springer-Verlag, 1988. p. 8.

TALLIAN, T. E., **Simplified Contact Fatigue Life Prediction Model- Part I: Review of Published Models**. Journal of Tribology, v.114, p. 207-22, Apr. 1992.

TAYLOR, C. F.; TAYLOR, E.S., **The Internal Combustion Engine**, Second edition, 1962.

TAYLOR, C. F. **Análise dos Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1988. v. 1 e 2.

TOMANIK, A. E., **Modelamento do Desgaste por Deslizamento em Anéis de Pistão de Motores de Combustão Interna**. 2000. 198p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

TORRES, E. A., **Análise Exergética**. 2001. 31p - Escola Politécnica - Departamento de Engenharia Química - Laboratório de Energia – LEN. Universidade Federal da Bahia, Bahia.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E., **Fundamentos da Termodinâmica Clássica** 2ª ed. São Paulo, Edgard Blücher e EDUSP, 1976, vol. 1.

VATAVUK, J., **Mecanismo de Desgaste em Anéis de Pistão e Cilindros de Motores de Combustão Interna**. 1994, p.34 - 39. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

VIGON, B.W. et al., **Life Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles**, EPA, Cincinnati, 1993.

VOLCI, G. A., **Comportamento Tribológico do Anel de Primeiro Canaleta em Motores Operando em Sistemas Flex Fuel**. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

VOLVO, 2006, **Volvo 850 GLT Engine**, The Volvo Owners Club, Disponível em: www.volvoclub.org/tech/850GLT-EngineTechInfo.pdf. Acesso em: 20/11/2007.

VOSKAMP, A. P., **Material Response to Rolling Contact Loading**., ASME Trans., Journal of Tribology, v. 107, p. 359-66, 1985.

VOSKAMP, A. P., **Subsurface Residual Stress Concentrations During Rolling Contact Fatigue**., Materials Science Forum, vols. 347-9, 2000.

ZUM-GAHR, K. H., **Microstructure and Wear of Materials**. Siegen, Federal Republic of Germany, Institute of Materials Technology. University of Siegen, 1987. v. 10.

WALL, G., **Exergy, Ecology and Democracy-Concepts of a Vital Society**, in: Szargut J. et al (Eds), ENSEC 93 Intransnational Conference on Energy Systems and Ecology, 5-9 July 1993, Krakow, Poland, 1993, pp. 111-121, <http://www.exergy.se/goran/eed/index.html>.

WALL, G., **Exergy-a Useful Concept Within Resource Accounting**, Institute of Theoretical Physics, Göteborg, Report N° 77-42, 1977, 58p., ISBN 99-1767571-X and 99-0345612-7, <http://www.exergy.se/ftp/paper1.pdf>.

WALL, G.; GONG, M., **On Exergy and Sustainable Development—Part 1: Conditions and Concepts**, exergy, Internat. J. 1 (3) (2001), in press.

WALL, G.; GONG, M., **On Exergy and Sustainable Development—Part 2: Indicators and Methods**, exergy, Internat. J. 1 (4) (2001), in press.

WELSH, N. C., **The Dry Wear Of Steels, The General Pattern Of Behavior. Part I**. Philosophical Transactions A, v.257, p.31-50, 1965.

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M.; ALTING, L., **Environmental Assessment of Products**, 2 vol., Kluwer Academic Press, Copenhagen, 1997.

WILLIAM, J. A., The Behaviour of Sliding Contacts Between Non-Conformal Rough Surface Protected by “Smart” Films; Tribology Letters, 2004, Vol. 17, Nº. 4