



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**CARACTERÍSTICAS DO DESGASTE DE ANÉIS DE PISTÃO
COM DIFERENTES TECNOLOGIAS DE TRATAMENTOS
SUPERFICIAIS**

MARCOS BATISTA GARCIA

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Materiais.**

**Orientador:
Prof. Dr. Francisco Ambrózio Filho**

**São Paulo
2003**

INSTITUTO DE PESQUISA ENERGÉTICA E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**CARACTERÍSTICAS DO DESGASTE DE ANÉIS DE PISTÃO COM
DIFERENTES TECNOLOGIAS DE TRATAMENTOS SUPERFICIAIS**

MARCOS BATISTA GARCIA



**Dissertação apresentada como
parte dos requisitos para obtenção
do grau de Mestre em Ciências na
Área de Tecnologia Nuclear - Materiais**

**Orientador:
Profº Dr. Francisco Ambrózio Filho**

**SÃO PAULO
2003**

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

William Barclay

A minha família, com quem
desejo compartilhar todos os
momentos de minha vida

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Francisco Ambrózio Filho, pela orientação objetiva e valiosas discussões.
 - A minha esposa Elaine e ao meu filho Felipe, pelo incentivo e compressão nos momentos mais difíceis desta jornada. Pela felicidade que estamos sentindo com a sementinha que foi plantada em nossas vidas.
 - Aos meus pais e irmãos, que na simplicidade de suas sabedorias me acompanhavam e iluminaram meu caminho.
 - Ao Centro Tecnológico de Pesquisa de Motores da COFAP, que proporcionou total liberdade no uso de suas instalações e equipamentos, e pela honra de conviver com grandes profissionais.
- A International Engines South América, que me deu a oportunidade de continuar caminhando, sendo que sem este apoio não teria sido possível a execução deste trabalho.
- A todos que direta ou indiretamente colaboraram na realização deste sonho.

CARACTERÍSTICAS DO DESGASTE DE ANÉIS DE PISTÃO COM DIFERENTES TECNOLOGIAS DE TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

Marcos Batista Garcia

RESUMO

Neste trabalho estudou-se o comportamento do desgaste de anéis de pistão com os tratamentos superficiais de Molibdênio, Nitretação e Cromo compósito utilizados na câmara combustão interna de motores Diesel. A partir de um modelo de desgaste e atrito em sistemas deslizantes, foram atribuídas características de acordo com os parâmetros estruturais, de interface e funcionais para os ensaios de desgaste em bancada com geometria tipo bloco-sobre-anel modificado e motor diesel em dinamômetro.

Os ensaios de motor em dinamômetro apresentaram resultados interessantes quanto a variações dimensionais dos anéis de pistão de 1º canaleta e cilindros. O ensaio de desgaste em bancada permitiu a variação de parâmetros funcionais, resultando em comportamentos adversos dos segmentos de anéis de pistão e do respectivo par contra-atritante.

Os resultados dos ensaios de bancada foram tratados através da determinação da força de atrito, quantificação do desgaste pela remoção de material, análises estatísticas, microscopia eletrônica de varredura da região de contato e análises de óleo lubrificante, buscando relacionar os resultados de ensaios acelerados com as melhores práticas de análise.

As características de desgaste e atrito destas tecnologias de tratamentos superficiais baseadas nos parâmetros dos ensaios, permitiu determinar algumas limitações dos anéis de pistão quando submetidos a diferentes aplicações em motores de combustão interna.

CHARACTERISTICS OF PISTON RINGS WEAR WITH DIFFERENT SURFACE TREATMENT TECHNOLOGIES

Marcos Batista Garcia

ABSTRACT

In this work, it was studied the wear mechanisms behavior of piston rings with surface treatments of molybdenum, nitriding and composite chromium utilized in internal combustion chamber of Diesel engines. From a wear and friction model to sliding systems, the characteristics of the structural, interface and functional parameters were defined, that had been attributed during the bench wear tests with geometry type block modified and diesel engine in dynamometer.

The engine tests in dynamometer presented interesting results, concerning the dimensional variation of top piston rings and bore cylinders. The bench wear tests allow the functional parameter variation, resulting in behaviors adverse of the piston ring segments and of the respective counter parts.

The results of the bench tests have been analyzed through the determination of friction, wear quantification by material removal, statistical analyses, scanning electronic microscope of the contact region and lubricant oil analyses, relating the results of the accelerated tests with the best analysis practical.

The friction and wear characteristics of this surfaces treatment technologies based in the tests parameters will allow to determine some limitation of surface treatments for top piston rings, when submitted to different applications in internal combustion engines.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	7
2	Revisão bibliográfica	11
2.1	Definição de desgaste	11
2.2	Mecanismos de desgaste	12
2.2.1	Adesivo	13
2.2.1.1	Scuffing	17
2.2.2	Abrasivo	19
2.2.3	Fadiga de superfície	23
2.2.3.1.	Delaminação	26
2.2.4.	Triboquímico	28
2.3.	Desgaste em sistemas deslizantes	30
2.4.	Desgaste do par tribológico Anel-Cilindro	32
2.4.1.	Etapas de desgaste	33
2.5	Parâmetros que influenciam no desgaste de sistemas deslizantes	34
2.5.1	Parâmetros estruturais	
2.5.1.1.	Anéis de pistão	36
2.5.1.2.	Cilindros	48
2.5.2	Parâmetros de interface	53
2.5.3	Parâmetros funcionais	65
2.6.	Testes de simulação de desgaste e atrito	68

2.6.1.	Análise da superfície de desgaste	
2.6.1.1.	Quantificação do desgaste	70
2.6.1.2.	Análises dos mecanismos de desgaste	72
3	Materiais	74
3.1	Anéis de pistão	
3.1.1	Material base	74
3.1.2.	Tratamentos superficiais	76
3.1.3	Requisitos geométricos	80
3.2.	Camisa de cilindro	
3.2.1.	Material base	85
3.2.2.	Requisitos geométricos	86
4	Métodos	
4.1	Metodologia de Ensaio	
4.1.1	Motor diesel em dinamômetro	88
4.1.2.	Teste de desgaste e atrito em bancada	
4.1.2.1.	Teste de atrito	92
4.1.2.2.	Teste de desgaste	92
4.2	Metodologia de Análise	94

5	Resultados	
5.1	Ensaio de desgaste em bancada	101
5.1.1	Análise da superfície de contato dos segmentos de anéis de pistão	102
5.2	Ensaio de motor Diesel em dinamômetro	107
5.2.1	Análise da superfície de contato dos anéis de pistão	108
6	Discussão	
6.1	Ensaio de desgaste em bancada	111
6.2	Ensaio de motor em dinamômetro	120
7	Conclusão	124
	Anexos	126
	Referência bibliográfica	138

FIGURAS

Nº	Descrição	Página
1 -	Representação dos sistemas do veículo	1
2 -	Representação dos quatro tempos do ciclo Otto	2
3 -	Distribuição de energia em veículo de passeio	4
4 -	Diagrama de Stribeck modificado	5
5 -	Componentes da câmara de combustão interna	7
6 -	Mecanismos de desgaste: adesivo, abrasivo, fadiga de superfície e corrosivo	12
7 -	Esquema de geração de partículas como resultado do mecanismo de desgaste adesivo	14
8 -	Superfície de anel cromado com <i>scuffing</i>	18
9 -	Representação do mecanismo de abrasão	19
10 -	Aspecto do mecanismo de desgaste abrasivo em superfície de anel cromado	20
11 -	Aspecto das trincas de fadiga paralelas e paralelas	23
12 -	Aspecto das trincas em anel de pistão nitretado	23
13 -	Aspecto da fadiga de superfície em anel de pistão nitretado	25
14 -	Etapas do mecanismo de delaminação	26
15 -	Seqüência para a ocorrência do desgaste corrosivo	28
16 -	Modelo de desgaste e atrito em sistemas deslizantes	34
17 -	Diferença entre os diâmetros na folga entre pontas	36
18 -	Ovalização negativa e positiva de anéis de pistão	37
19 -	Semelhança do perfil com a geometria cilindro-plano	38
20 -	Perfis dos tratamentos superficiais na região de contato dos anéis de pistão	42
21 -	Processo de aspersão térmica em anéis de pistão	43
22 -	Diagrama de fase Ferro - Nitrogênio	45
23 -	Principais características da camada de Cromo compósito	46

24 - Estratégia tecnológica para os tratamentos superficiais de anéis de primeiro canaleta em motores MRD	47
25 - Desvios de forma da secção transversal do cilindro	49
26 - Deformação de cilindro após teste de motor	50
27 - Requisitos necessários para a camisa de cilindro	53
28 - Simulação da espessura do filme de óleo lubrificante	56
29 - Curva de Stribeck em função de λ	58
30 - Esquema representativo das forças atuantes no anel de pistão de primeiro canaleta	61
31 - Distribuição da carga de contato ao longo da parede do cilindro	62
32 - Resultado de desgaste simulado e real após veículo rodar 76.115 km	63
33 - Influencia da velocidade na taxa de desgaste	65
34 - Categorias de teste e simulação de desgaste	68
35 - Esquema da interação do feixe de elétrons com a amostra e as profundidades típicas de escape	72
36 - Microestrutura do ferro fundido nodular sem e com ataque Nital.	75
37 - Microestrutura do aço inoxidável martensítico	75
38 - Forma e composição da mistura de pós Mo-NiCr-MoC	77
39 - Aspecto da secção transversal da microestrutura	77
40 - Aspecto da secção transversal da camada nitretada	78
41 - Perfil de microdureza da camada nitretada	79
42 - Aspecto da secção transversal do Cromo compósito	79
43 - Perfis do pacote de anéis de pistão	81
44 - Aspecto da superfície de contato com tratamento superficial de Molibdênio	82
45 - Aspecto da superfície de contato com tratamento superficial de Nitretação	83
46 - Aspecto da superfície de contato com tratamento superficial de Cromo compósito	83

47 - Aspecto dos perfis de rugosidade dos três tratamentos superficiais	84
48 - Matriz de ferro fundido cinzento para cilindro com ataque térmico	85
49 - Gráfico de circularidade nas alturas de 30 e 90 mm	86
50 - Aspecto típico do brunimento da camisa de cilindro	87
51 - Esquema de montagem do equipamento Falex e as condições de fixação do segmento de anel de pistão	91
52 - Determinação da folga entre pontas dos anéis de pistão	94
53 - Aspecto da área espelhada de uma camisa de cilindro	95
54 - Microscópio eletrônico de varredura e o sistema de micro análise por raio X	96
55 - Características dos mecanismos de desgaste dos tratamentos superficiais	97
56 - Representação da tela do software Minitab 2000	98
57 - Desgaste dos diferentes tratamentos superficiais e respectivos anéis padrão	101
58 - Aspecto da superfície de contato do modo VIII após ensaio de desgaste em bancada	103
59 - Aspecto da superfície de contato do modo XIV após ensaio de desgaste em bancada.	104
60 - Aspecto da superfície de contato do modo IV após ensaio de desgaste em bancada	105
61 - Aspecto da superfície de contato do modo VI após ensaio de desgaste em bancada	106
62 - Variação da espessura radial nas regiões próxima ao gap e ao longo do perímetro do anel de pistão para os diferentes tratamentos superficiais	107
63 - Variação da folga entre pontas e porcentagem de área espelhada para os diferentes tratamentos superficiais	107

64 - Superfície de contato do tratamento superficial de Molibdênio após 500 horas de teste de motor, região do gap	110
65 - Superfície de contato do tratamento superficial de Molibdênio após 500 horas de teste de motor, região a 180° do gap	110
66 - Superfície de contato do tratamento superficial de Nitretação após 500 horas de teste de motor, região do gap	111
67 - Superfície de contato do tratamento superficial de Nitretação após 500 horas de teste de motor, região a 180° do gap	111
68 - Superfície de contato do tratamento superficial de Cromo composto após 500 horas de teste de motor, região do gap	112
69 - Superfície de contato do tratamento superficial de Cromo composto após 500 horas de teste de motor, região a 180° do gap	112
70 - Principais efeitos da variável área de contato de ambos tratamentos superficiais	117
71 - Principais interações da variável área de contato de ambos tratamentos superficiais	118
72 - Principais efeitos da perda de massa do anel padrão contra ambos tratamentos superficiais	119
73 - Principais interações da variável perda de massa do anel padrão contra ambos tratamentos superficiais	120
74 - Gráfico de carga aplicada x força de atrito dos diferentes tratamentos superficiais	127
75 - Aspecto da superfície de contato do Molibdênio e do respectivo anel padrão após teste de atrito	128
76 - Aspecto da superfície de contato do Nitretado e do respectivo anel padrão após teste de atrito	128

77 - Aspecto da superfície de contato do Cromo composito e do respectivo anel padrão após teste de atrito	129
78 - Aspecto do tratamento de Molibdênio após teste de atrito, observa-se material incrustado	130
79 - Espectro de análise via EDS da incrustação observada na figura anterior	130
80 - Análise físico-química do número de ácido total (TBN)	132
81 - Análise físico-química do número de base total (TAN)	132
82 - Análise físico-química da viscosidade a 40°C	133
83 - Análise físico-química da viscosidade a 100°C	133
84 - Índice de viscosidade (IV)	134
85 - Análise de Ferro por emissão óptica	134
86 - Análise de Silício por emissão óptica	135
87 - Análise de Molibdênio por emissão óptica	135
88 - Análise de Cromo por emissão óptica	136
89 - Análise de Zinco por emissão óptica	136

TABELAS

3.1 – Composição química dos materiais de base	74
3.2 – Propriedades mecânicas dos materiais de base	74
3.3 – Principais características de tratamentos superficiais	76
3.4 – Valores limites de ovalização dos anéis de pistão	80
3.5 – Composição química do material base do cilindro	85
3.6 – Configuração e posição de montagem dos anéis de pistão	89
3.7 – Análise química do óleo lubrificante	90
3.8 – Modos de teste de desgaste em bancada	93
5.1 – Valores de desgaste dos seguimentos de anéis de pistão e do anel padrão após teste em bancada	101
5.2 – Classificação dos mecanismos de desgaste pelos modos de ensaio	102
5.3 – Classificação dos mecanismos de desgaste dos tratamentos superficiais após teste de motor MRD	109
6.1 – Principais efeitos e interações significativos nos ensaios de desgaste em bancada	113
6.2 – Determinação de estimativa de vida dos anéis de pistão, considerando o 80.000 Km em veículo	122
6.2 – Determinação do desgaste nos testes de motor e bancada considerando o mecanismo de desgaste	123
A.2 – Resultados das análises físico-químicas de óleo lubrificante após 25 e 500 horas de teste de motor	131

1 INTRODUÇÃO

No início do século 20, surgiram os primeiros automóveis nas ruas da Europa e Estados Unidos, elevando o crescimento industrial e estabelecendo uma nova condição de vida.

Como um dos mais importantes artigos de todo o mundo, o automóvel tornou-se um meio de transporte conveniente para milhões de pessoas, que necessita ainda de combustível para seu abastecimento, de manutenção e de peças sobressalentes, devendo reunir todos esses recursos para que o conjunto produza os melhores resultados de performance, conhecido como integração de sistemas que assegura o seu funcionamento contínuo[1].

Estes veículos eram vistos como uma grande mistura de peças, agrupadas na forma de sistemas e classificados de acordo com os processos tecnológicos de cada fabricante. A eficiente interação destes componentes é um grande desafio na busca por melhores desempenhos e, conseqüentemente, uma maior satisfação para os usuários. A figura 1 representa alguns destes sistemas no veículo.

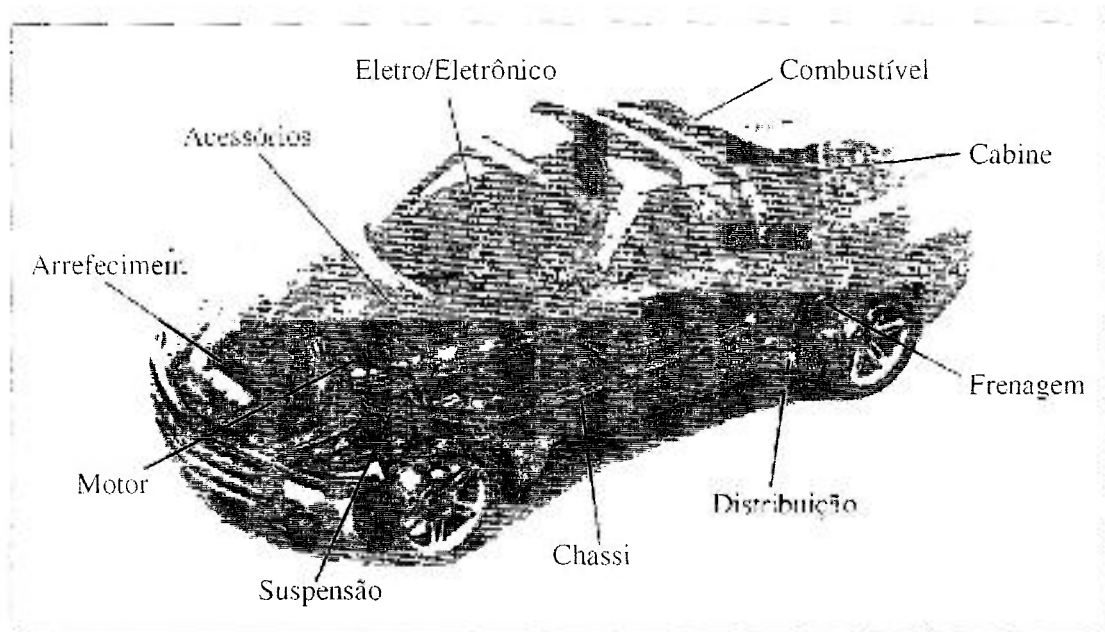


Figura 1 – Representação dos sistemas do veículo

Como propulsor do veículo e sendo um dos principais sistemas, o motor pode ser classificado em dois tipos, de combustão interna e externa. O primeiro tem como origem o motor turbinado a gás, que apresenta interessantes vantagens, mas tem como desvantagem direta o custo de fabricação extremamente elevado, comparado aos motores a pistão utilizados atualmente nos automóveis e que serão abordados ao longo deste trabalho.

Os motores a vapor das antigas locomotivas e bondes são os melhores exemplos de motores de combustão externa, onde se tem a queima do carvão, lenha de madeira ou óleo combustível do lado de fora do motor, gerando vapor que promove o movimento no seu interior[2].

A versão moderna do motor de combustão interna mais utilizado é o *four stroke combustion cycle*, baseado no conceito de quatro tempos, também conhecido como ciclo Otto, inventado por NICOLAUS OTTO em 1876. A figura 2 representa os tempos ou estágios denominados como admissão, compressão, combustão e exaustão.

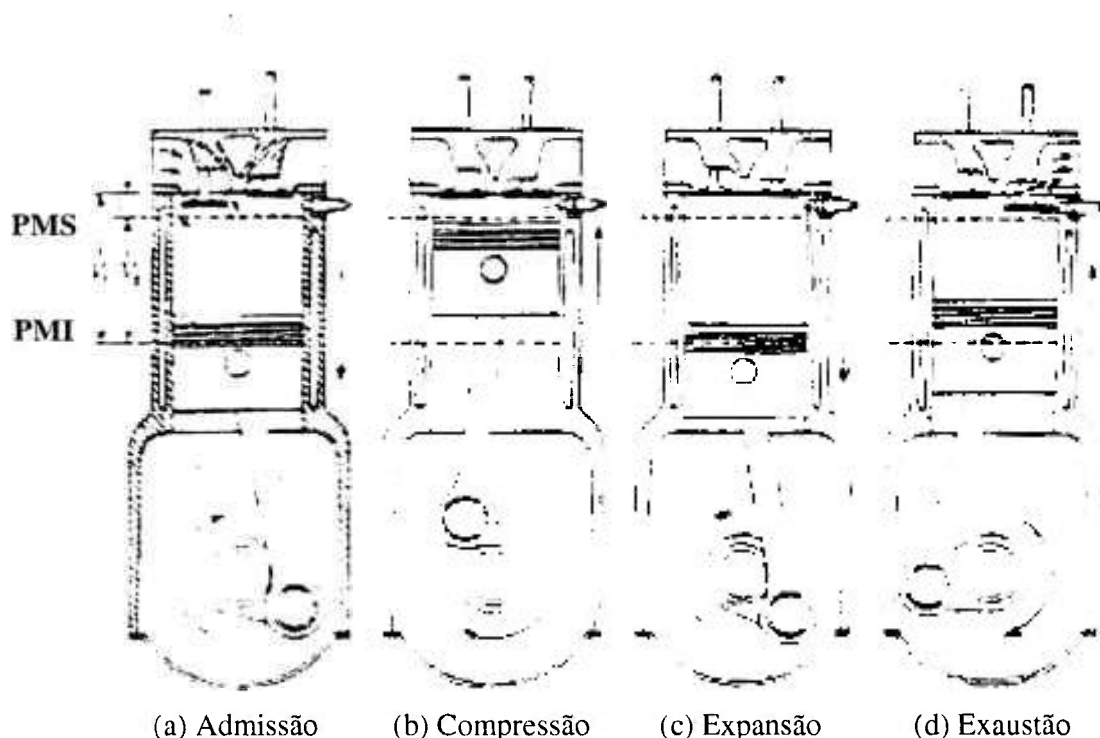


Figura 2 – Representação dos quatros tempos do ciclo Otto

A energia mecânica é produzida a partir da energia química contida nos combustíveis, ou seja, o ciclo tem seu início pelo estágio de admissão. O conjunto do pistão parte do ponto morto superior (PMS) com a abertura da válvula de admissão e o movimento de descida enche a câmara de combustão interna com a mistura combustível-ar. Então, o conjunto volta a subir, comprimindo a mistura combustível-ar, o que permitirá a explosão.

Quando o pistão atinge novamente o ponto morto superior, ocorre uma ignição, ocasionando uma explosão que desloca o conjunto para baixo. Uma vez estando o pistão na posição do ponto morto inferior (PMI), tem-se a abertura da válvula de escape no mesmo instante que o conjunto sobe, empurrando os gases da combustão em direção do sistema de exaustão, e assim sucessivamente[3].

O movimento linear produzido a partir do conjunto do pistão no interior da câmara de combustão interna, quando conectado a biela e ao virabrequim, transforma-se em movimento rotativo, acionando os demais sistemas do motor e permitindo a interação dos componentes. Para este trabalho os sub sistemas do motor foram classificados como:

- ♦ Estrutural
- ♦ Trem de válvulas
- ♦ Admissão de ar
- ♦ Combustível
- ♦ Lubrificação
- ♦ Elétrico e eletrônico
- ♦ Transmissão de potência
- ♦ Exaustão
- ♦ Arrefecimento
- ♦ Auxiliar

Em 1892 na Alemanha, RUDOLF DIESEL desenvolveu e patenteou a idéia do motor a diesel, visando criar um motor com maior eficiência térmica, hoje mais viável em função das elevadas taxas de compressão 14:1 até 25:1, enquanto os motores a gasolina chegam a 12:1 [1].

A redução de peso e o aumento da potência dos motores de combustão interna com tecnologia Diesel deverão ser um dos campos de atuação mais importantes do futuro, levando os fabricantes a buscarem soluções tecnológicas mais eficazes no quesito desgaste e atrito. Os resultados refletem um desafio que os tribologistas buscam na melhoria das características operacionais, nas respostas legais no que tange ao controle de emissões e a eficiência energética[4].

Desde a segunda metade do século 20 tem havido muitos estudos sobre a influência do atrito nos componentes de motores e revelam dados que determinam para onde vai a energia oriunda da queima do combustível. A figura 3 mostra que aproximadamente 13% da energia da combustão encontra-se no contato dos pneus com o pavimento; o motor contribui com 62,4% da perda mecânica dissipada, principalmente por atrito[2][5].

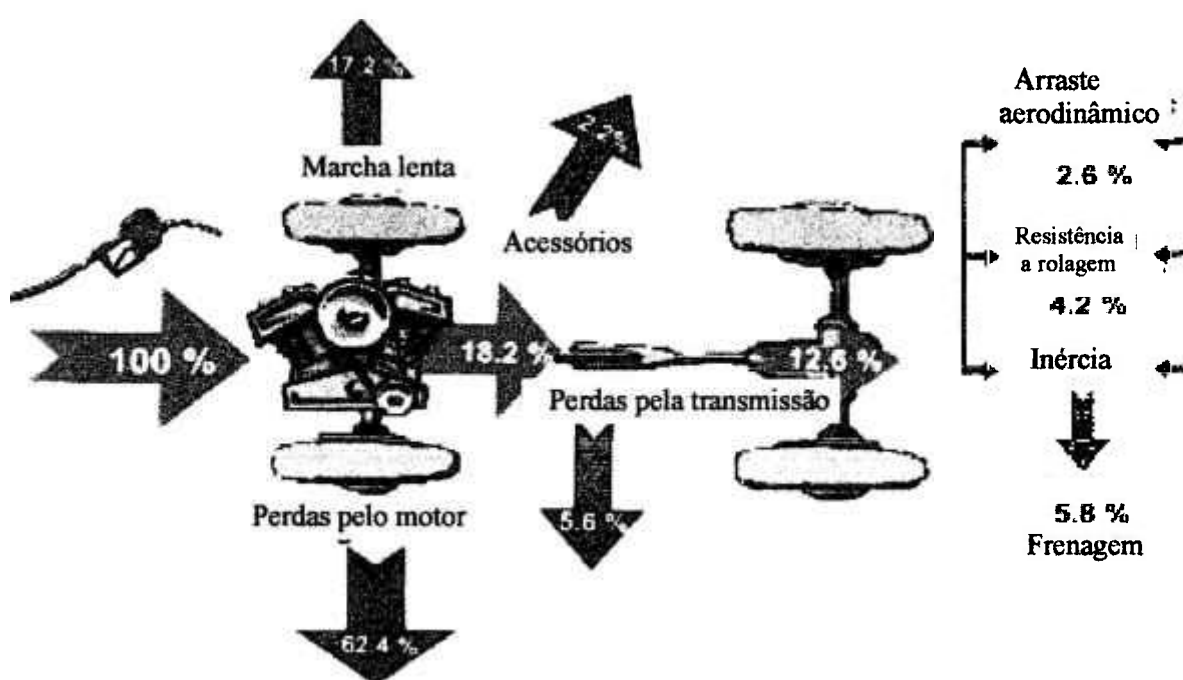


Figura 3 – Distribuição de energia em veículo de passeio

De forma subjetiva, a proporção de perda por atrito total nos motores está estimada em 40% para o conjunto do pistão, sendo a metade promovida pelos anéis de pistão[17].

A condição tribológica do conjunto anel-cilindro, trem de válvulas e mancais do motor tem acarretado um melhor entendimento nos conceitos de diferentes modos de lubrificação ao longo de cada ciclo de funcionamento, e convencionalmente está representado na figura 4, pelo diagrama de STRIBECK modificado.

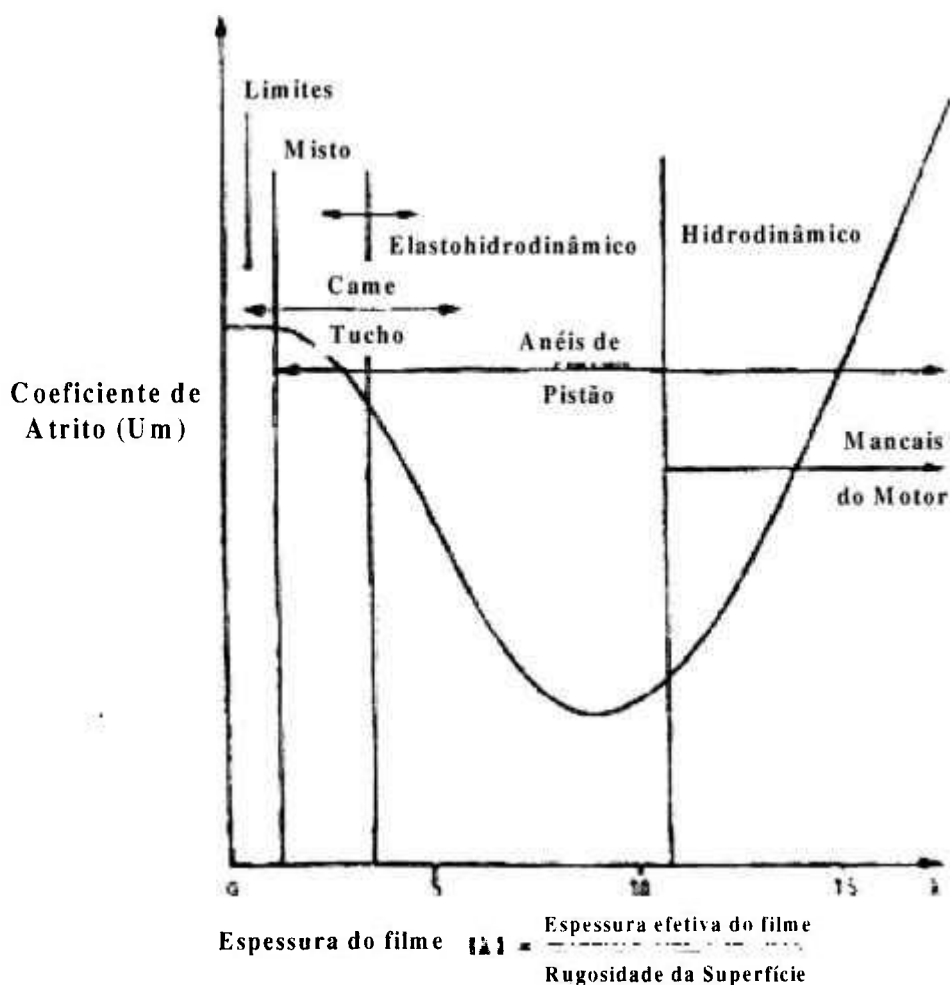


Figura 4 – Diagrama de Stribeck modificado [7]

Neste cenário, o desgaste do par tribológico anel-cilindro talvez seja o principal fator na determinação efetiva da vida do motor, sendo o anel de pistão o mais complexo componente nos motores de combustão interna, devido às condições críticas de carga, velocidade, temperatura e suprimento de óleo lubrificante, principalmente o anel de compressão alojado no primeiro canaleta do pistão.

Em termos gerais a concepção geométrica do pistão e anéis de pistão tem mudado muito pouco desde os pioneiros trabalhos de RAMSBOTTON (1862) em relação aos motores a vapor[2]. Este inventor tem grande mérito pelo seu desenho revolucionário desta simples peça, anel de pistão metálico com um diâmetro livre dez por cento maior que o diâmetro interno do cilindro.

Quando montados no interior do cilindro, os anéis de pistão tornam-se circulares e auto-expansivos, proporcionando uma vedação móvel entre a câmara de combustão interna e o cárter do motor. Os anéis de pistão contribuem na transmissão de calor absorvido da câmara de combustão interna para as paredes do cilindro e deste para o sistema de arrefecimento, além de estabelecer o controle da lubrificação entre os anéis de pistão e a parede do cilindro [8].

O objetivo dos fabricantes de motores está direcionado para projetos de alta confiabilidade e durabilidade, que dependem principalmente do comportamento funcional dos anéis de pistão, das pressões de combustão, das condições térmicas, do tipo de cilindro e do seu respectivo acabamento superficial, do pistão, do óleo lubrificante, do combustível e dos demais sistemas do veículo.

A figura 5 apresenta a câmara de combustão interna e seus componentes, a posição dos anéis de pistão alojados nos canaletes do pistão e o conjunto no interior da camisa de cilindro.

Para uma melhor eficiência deste sistema, os anéis de pistão são classificados em dois tipos: anel de compressão que veda a câmara de combustão, reduzindo ao máximo a passagem de gases de combustão para o cárter do motor através da folga entre o anel, pistão e o cilindro, evitando a deterioração do óleo lubrificante e a perda de rendimento do motor, impedindo também que o óleo lubrificante passe em excesso para a câmara de combustão, sendo queimado e conseqüentemente aumentando o consumo de óleo lubrificante e o nível de emissão de poluentes. O anel de óleo tem a função de raspar o excesso de óleo da parede do cilindro, drenando-o em direção ao cárter do motor, e assegurando uma película adequada de óleo lubrificante suficiente para lubrificar os anéis de compressão[9] [10].

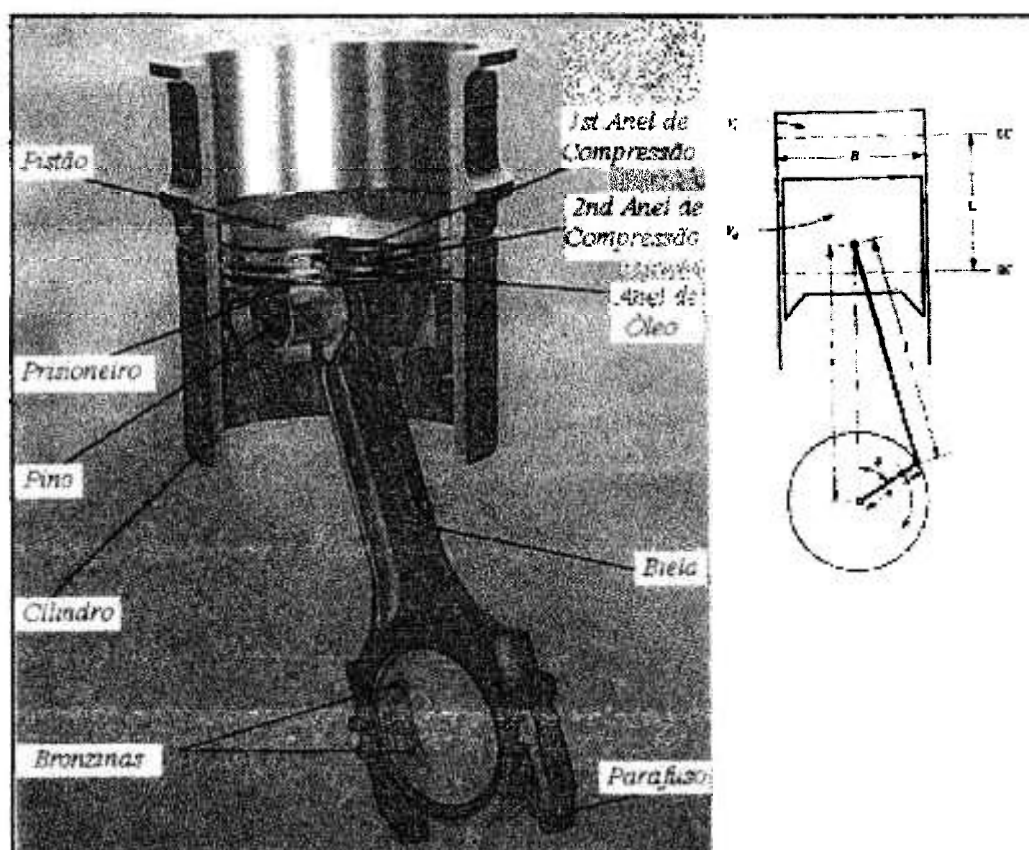


Figura 5 – Detalhe dos componentes da câmara de combustão interna

Até a Segunda Guerra Mundial, os anéis de compressão não eram revestidos, porém, com a necessidade de maior resistência dos motores no deserto da África, iniciou-se a aplicação de revestimento a base de cromo através de processos eletrolíticos, com uma satisfatória resistência ao desgaste abrasivo e corrosivo [6]. Quando submetido a condições críticas de cargas e temperatura, apresentava baixa resistência ao *Scuffing* (um tipo de desgaste adesivo), devido ao aumento localizado de pressão nas asperezas, com a ausência de lubrificação poderá ocorrer uma adesão de materiais por micro soldagem e a ruptura desta região, assim como a transferência de material de uma superfície para a outra [12]. Este tipo de falha tem maior incidência na fase de amaciamento do motor.

No final da década de 50, com a ampliação das vias de pavimentação em escala mundial e com a nova geração de motores automotivos[13][14], iniciou-se a fabricação de anéis de primeiro canaleta com revestimento de molibdênio, aplicado por aspersão térmica com chama ou plasma.

A elevada resistência ao *scuffing* do revestimento de molibdênio é atribuída ao seu elevado ponto de fusão, a estrutura porosa, e pelo efeito lubrificante do óxido de molibdênio. A estrutura porosa resultante da aspersão do metal funciona como reservatório de óleo lubrificante melhorando principalmente o desempenho nas condições mais críticas de operação [15].

Os anéis de pistão são partes metálicas geralmente confeccionadas em ferro fundido cinzento ou nodular, com um tratamento superficial a base de molibdênio na região de contato com o cilindro que confere uma maior resistência ao desgaste.

As novas tendências de projetos e materiais para anéis de pistão são determinadas em todo o mundo pela necessidade do mercado. O produto consagrado em alguns países e em andamento em outros utilizam aço inoxidável com alto teor de cromo, que atribui melhores características funcionais com resposta a nitretação principalmente do aço com 18% de cromo, mas o aço com 13% de cromo também confere boas características na camada nitretada e um baixo custo de produção. Nos Estados Unidos e Grã-Bretanha, dão preferência para o aço com 13% de cromo, enquanto que no Japão e na Alemanha predomina o aço com 18% de cromo; o mesmo vem ocorrendo na América Latina [16].

1.1 OBJETIVO

A exigência do mercado com a regulamentação dos níveis de emissões e a durabilidade dos motores, estão voltados para efeitos adversos que requerem a redução do atrito. Em motores de combustão interna tem-se um decréscimo da eficiência de funcionamento ao longo de sua vida útil devido ao desgaste de seus componentes.

No sistema de lubrificação dos motores ocorrem muitas contaminações durante o uso e podem expor os componentes mecânicos a elevadas taxas de desgaste prematuro e até mesmo a uma ruptura.

Um histórico do desenvolvimento de anéis de pistão utilizado em motores Diesel rápido e pesado, nos quais as temperaturas e pressões de trabalho são muito mais elevadas, foram observadas várias ocorrências de falhas, principalmente no que diz respeito ao desgaste adesivo e trincas por fadiga de superfície, e em alguns casos desgaste excessivo do cilindro, principalmente na região do ponto morto superior (PMS).

Neste trabalho estudou-se as características de desempenho e os mecanismos de desgaste de três tratamentos superficiais utilizados em anéis de pistão de primeiro canaleta, disponíveis comercialmente em todo mundo.

Para tanto, foram definidos os parâmetros estruturais, de interface e funcionais, e atribuídos aos ensaios tribológicos em bancada. Os mecanismos de desgaste foram identificados através de microscopia eletrônica de varredura, e relacionados as características das superfícies de contato de anéis de pistão e cilindros após 500 horas de ensaio com motor diesel em dinamômetro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definição de Desgaste

O desgaste é um processo de remoção de material de uma ou mais superfícies sólidas em contato, devido a uma ação mecânica. Isto ocorre quando as superfícies estão em movimento relativo de deslizamento ou rolamento (unidirecional ou recíproco). Em determinados sistemas tribológicos, a remoção de material usualmente é um processo muito lento, mas muito estável e contínuo[18].

Embora não seja tão grave como a fratura, que causa problemas de serviço, o desgaste é também um problema caro, tendo aspectos positivos e negativos como: reposição de peças e os recursos utilizados para melhorar as condições de desgaste. Por outro lado, se todo o desgaste pudesse ser eliminado, a repercussão na economia seria notória. O uso de produtos permanentes que não apresentem problemas de desgaste; conseqüentemente, não haveria necessidade de reposição no mercado e grande parte dos negócios seriam devastados nas indústrias e fornecedores de roupas, sapatos, pneus, automóveis, etc [19].

Em muitos casos, este tipo de deterioração devido ao desgaste pode ser minimizado pela lubrificação, filtragem, material de engenharia, desenho de projeto, entre outros fatores.

Desde que o desgaste envolva a interação com outros componentes e/ou materiais, estes também devem ser estudados. Adicionalmente, este é um fenômeno de superfície, ou seja, modificação que afete a superfície conseqüentemente compromete as características de desgaste.

A seguir serão apresentados as relações do desgaste com alguns dos seus principais mecanismos.

2.2. Mecanismos de Desgaste

De acordo com a norma DIN 50320, o desgaste pode ser classificado em quatro principais mecanismos, conforme descritas por WRIGHT[20] e ZUM GAHR[9], e representado pela figura 6.

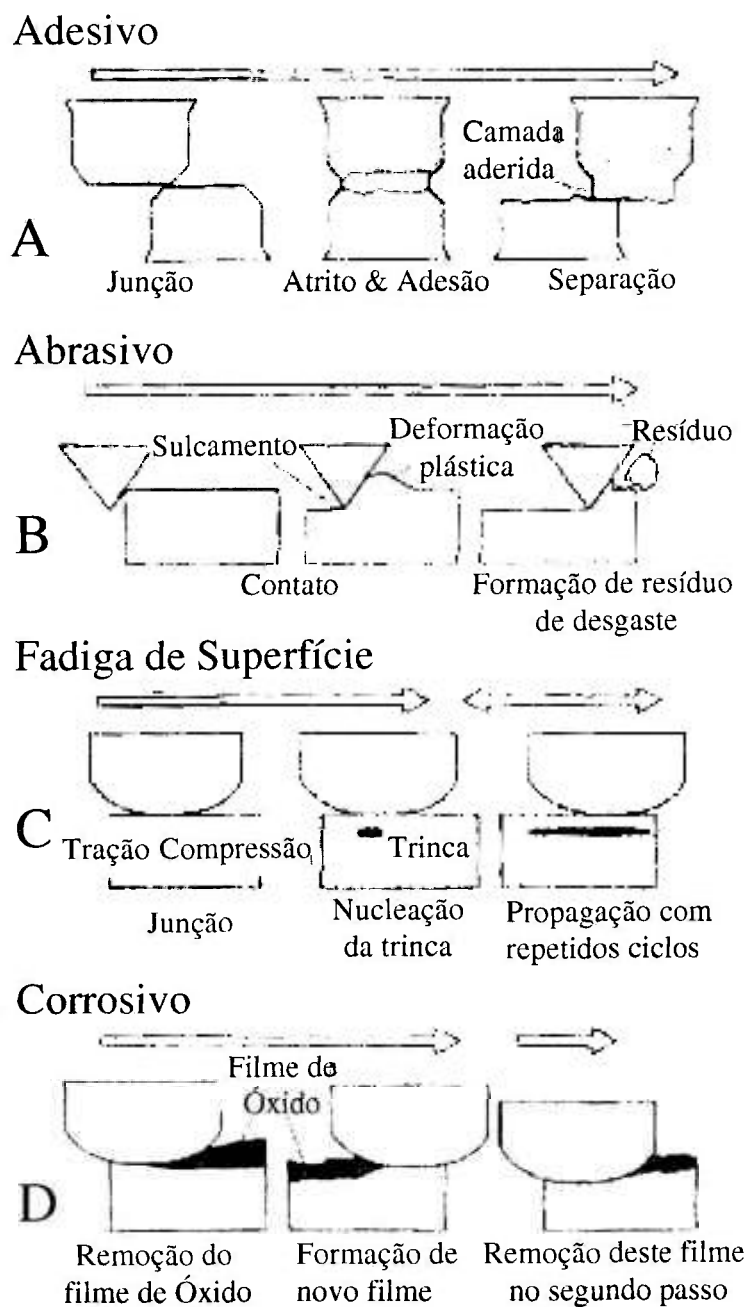


Figura 6 – Mecanismos de desgaste:

A) Adesivo, B) Abrasivo, C) Fadiga de Superfície e D) Corrosivo

Uma dificuldade em analisar o desgaste em função do mecanismo é que o processo de desgaste em sistemas deslizantes comporta mecanismos simultâneos, que dependem das condições de operação e do meio, além de mudanças dinâmicas como a variação de rugosidade ou o encruamento superficial, sendo esta simultaneidade a principal dificuldade na descrição do desgaste. Entretanto, um conhecimento do fenômeno de modo a caracterizar cada mecanismo poderá favorecer os estudos sobre o comportamento dos pares de materiais quanto à resistência ao desgaste em diferentes parâmetros de funcionamento.

2.2.1 Adesivo

O termo adesão ou coesão se refere à habilidade das estruturas atômicas formarem ligações superficiais com outros átomos ou superfície, com os quais estabelece uma junção interfacial. A resistência à adesão entre duas superfícies depende de propriedades metalúrgicas, como dureza, estrutura cristalina, capacidade de deformação, encruamento, entre outras. Esses fatores, associados com a carga normal, afetam a área real de contato a uma dada temperatura[9].

Na prática, os fatores que interferem no estado das superfícies são as contaminações por elementos pertencentes ao meio e a conseqüente formação de filmes superficiais. Desta forma, uma adesão mensurável se manifesta somente quando as superfícies são carregadas ou são submetidas a movimentos de translação que causam o rompimento dos filmes superficiais.

Condições térmicas e dinâmicas instáveis permitem um crescimento rápido dos elementos de transferência, resultantes da remoção de material, como ilustrado pela figura 7.

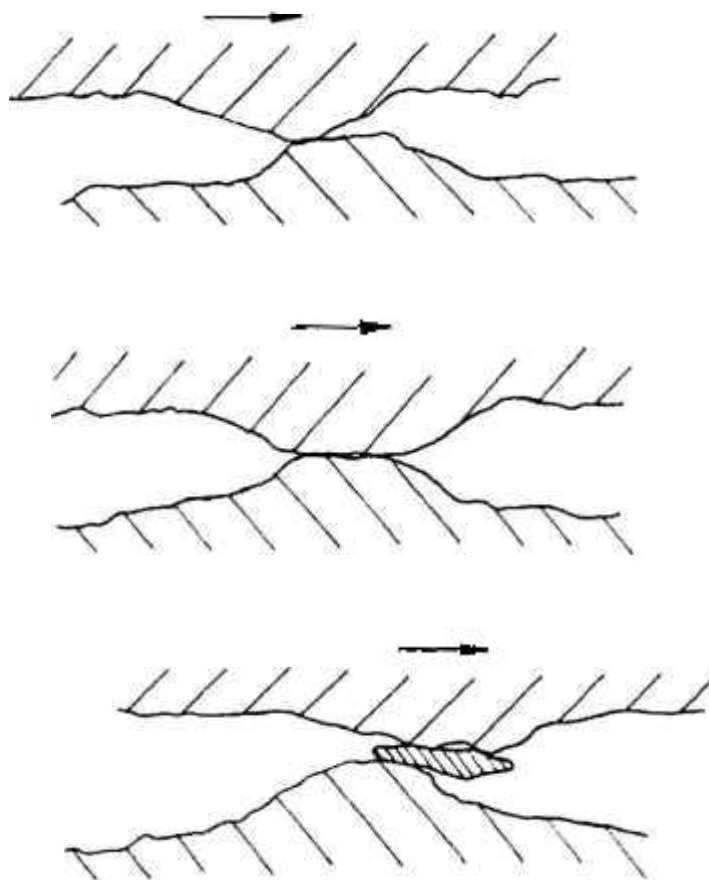


Figura 7 – Esquema de geração de partículas como resultado do mecanismo de desgaste adesivo

É muito comum a ocorrência de deformação plástica nas áreas de contato em função do carregamento localizado, que permite o rompimento do filme de óxidos.

Desde que a força de atrito requerida para o cisalhamento da região unida seja proporcional a área total e a carga sob contato plástico e elástico, existe uma relação direta entre essas duas forças (cisalhamento pelo atrito em função da força normal). A razão entre as duas forças é denominada de coeficiente de atrito de adesão ou μ_{ad} para superfícies rugosas, considerando ainda a parcela de atrito devida à deformação plástica provocada pelo sulcamento ou μ_{def} , sendo este o modelo para o coeficiente de atrito de BOWDEN e TABOR[22] [23].

Entretanto, é importante considerar que o coeficiente de atrito não é uma propriedade intrínseca de um par de materiais, desde que altas forças de atrito podem ser estabelecidas sem carga normais e as superfícies limpas estiverem com uma determinada capacidade adesiva intrínseca. A capacidade adesiva pode resultar de forças de atração (magnética ou eletrostática), através de ligações químicas, ou ainda do ponto de vista metalúrgico ser decorrente da difusão de átomos através da rede cristalina.

O estabelecimento de uma união ou solda a frio seria somente do primeiro estágio deste mecanismo de desgaste e não resulta diretamente na perda de material do sistema. A união formada pode ser endurecida devido à deformação plástica, podendo ocorrer um cisalhamento, que permite que fragmentos de materiais sejam transferidos de uma superfície para a outra. Se na fratura de uma união ocorrer a transferência de material, então nenhum desgaste ocorre até que algum mecanismo secundário promova uma remoção superficial em passes subseqüentes. Desta forma, o material transferido poderá ser destacado para fora da superfície, promovendo o desgaste, podendo também permanecer aderido, ou então voltar à região de origem.

Uma explicação para a ocorrência do destacamento de material esta relacionada à baixa energia de superfície, considerando que o equilíbrio dinâmico seja estabelecido entre a condição de adesão e a somatória das energias livres de superfície devido às ligações químicas.

Um equacionamento teórico para a força de adesão é baseado na equação modificada de DUPRÉ, descrita a seguir:

$$\gamma_{ad} = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB} \quad [2-1]$$

onde:

γ_{ad} = energia de adesão

γ_A , γ_B , γ_{AB} = energias livres de superfície dos materiais em contato A, B e da interface formada por AB.

Observa-se que quanto maior a energia das superfícies, maior a energia para a adesão, ou seja, a adesão é favorecida. As deformações plásticas aumentam a energia das superfícies, tendo um papel importante na formação das junções.

Uma dificuldade para a aplicação direta do equacionamento acima em casos práticos é o desconhecimento da medição destas energias. Para obter-se uma aproximação de valores, podem-se adotar valores teóricos aproximados de energias superficiais de ligações químicas dos materiais.

Mas todas as superfícies e as energias de superfície são fortemente influenciadas pelo meio, como umidade, reações de oxidação ou reações de lubrificante, e em geral, as superfícies tendem a se constituir com uma configuração de menor energia superficial. Portanto, esta influência diminui a tendência de adesão das superfícies.

2.2.1.1 Scuffing

É um mecanismo de dano repentino que pode ocorrer dentro do processo de desgaste e é caracterizado por severa deformação plástica e enrugamento superficial localizados. É descrito na literatura como um mecanismo de adesão acentuado, devido à sua principal característica de ocorrer em sistemas lubrificados, em função do rompimento do filme de óleo lubrificante.

No dano por *scuffing* pode ou não ocorrer adesão e transferência de material. Experimentos para a determinação de regimes de lubrificação e posteriormente critérios para a condição de *scuffing* foram realizados por LEE e LUDEMA[26][25], utilizando monitoramento de mudanças nas rugosidades superficiais, condutividade elétrica através do contato e atrito para diversas condições de lubrificação, dureza de materiais, microestrutura e rugosidade iniciais. Foi observado que a mudança nas características da superfície ocorreu por duas causas isoladas: deformação plástica ou perda de material.

O atrito e a condutividade elétrica durante o enrugamento por deformação plástica se mantiveram em baixos níveis para maioria dos ensaios, indicando que o contato direto metal-metal ou adesão não foram a razão do enrugamento. Pequenas regiões de perda de material surgiram nos primeiros 50 ciclos, sugerindo o mecanismo de fadiga de baixo ciclo. Além disso, foi observada uma grande correlação entre os ciclos de contato para a primeira indicação de falha, ou limite de fadiga no deslizamento, e as propriedades dos metais que correlacionam a vida do material com a fadiga devido à deformação plástica cíclica.

Os sinais mais evidentes da ocorrência de *scuffing* em ensaios de laboratório são os saltos repentinos na força de atrito com um aumento nos níveis de ruído e vibração, como observado por LEE e CHENG[26], em experimentos para a detecção de *scuffing* utilizando disco-contra-disco em direções transversais.

Foi observado que, continuando o movimento esse tipo de dano sempre leva à falha catastrófica, ou seja, ao engripamento do sistema.

Na figura 8, observa-se uma fotografia ampliada (25x) da superfície de anel de pistão cromado com *scuffing*, reproduzida de um trabalho de HAYNES[27][51]. Observa-se uma região escurecida, característica de anéis que apresentam esse tipo de dano, provocado provavelmente pelo alto índice de deformação plástica na região, e conseqüente aquecimento.

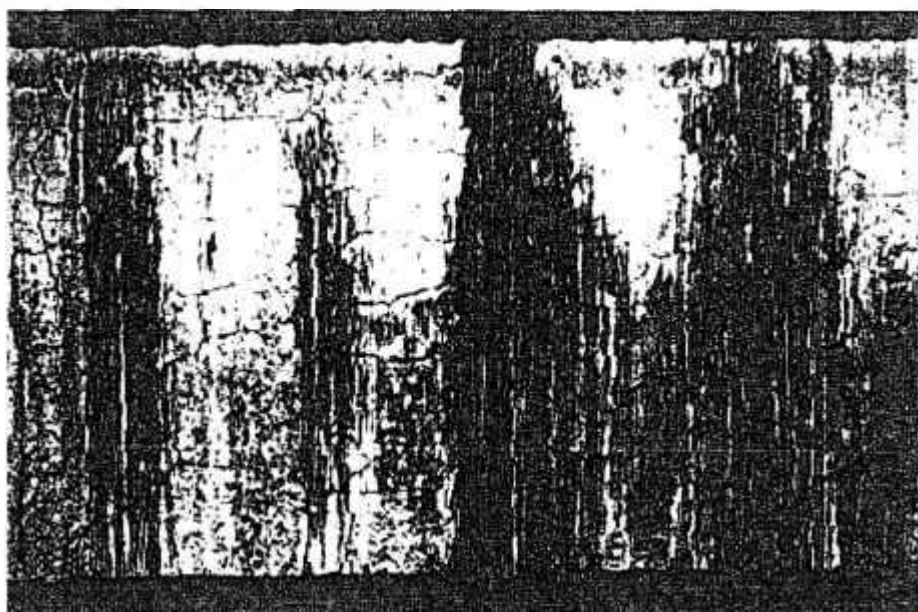


Figura 8 – Superfície de anel cromado com *scuffing* [50]

2.2.2 Abrasivo

Geralmente, a categoria de desgaste abrasivo pode ser caracterizada pelo termo corte ou sulcamento e ocorre quando partículas duras suspensas em fluidos ou projetadas de uma superfície sobre pressão contra outra superfície, sendo a característica principal os riscos na direção do deslizamento [18], representado pela figura 9.

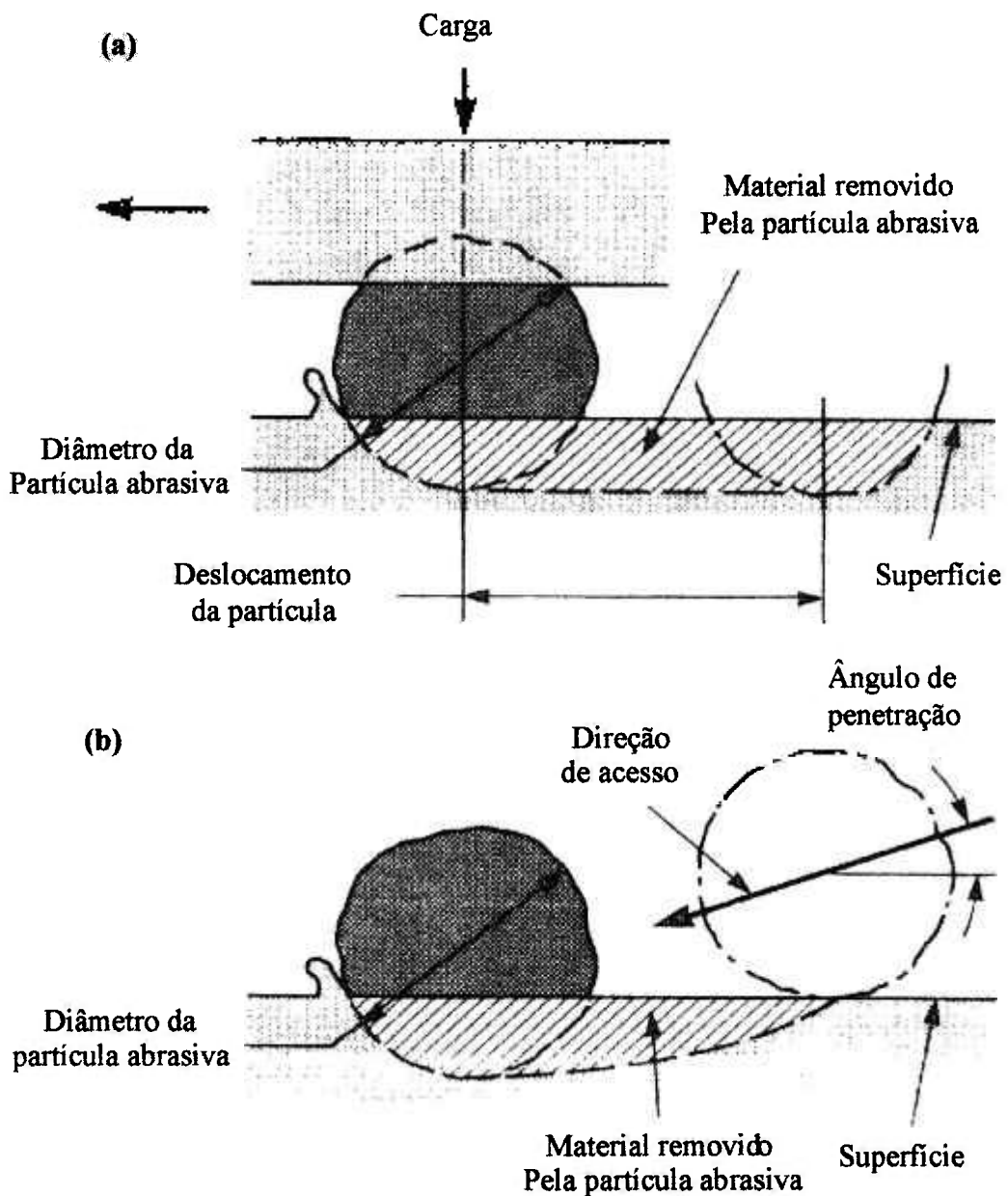


Figura 9 – Representação do mecanismo de abrasão (a) observação de partícula sobre pressão, característica do processo de usinagem, (b) ação de uma partícula suspensa que penetra através da superfície

A figura 10 apresenta a foto da superfície de anel de pistão cromado com mecanismo de desgaste por abrasão, 860x aumento, provocado por partículas duras presentes na interface entre os materiais.



Figura 10 – Aspecto do mecanismo de desgaste abrasivo em superfície de anel cromado [19]

Quando as superfícies atritantes forem abrasivas em relação à outra, o desgaste é denominado abrasivo a dois corpos, e caso ocorra a remoção de material resultando em partículas livres na interface do sistema, denomina-se então neste caso como sendo abrasivo a três corpos.

No caso do sistema anel de pistão e cilindro, as partículas duras presentes na interface podem ser originadas por:

- 1- Entrada de impurezas pelo sistema de admissão do ar para a câmara de combustão, conforme descrito por DEMARCHI[28];
- 2- Destacamento de partículas duras do próprio material das superfícies, quando há corrosão preferencial da matriz, como destacado por VATAVUK[10];
- 3- Fragmentos de desgaste encruados advindos de outros mecanismos, como adesão ou fadiga de superfície.

Nos dois últimos casos, a abrasão é dita secundária, por se manifestar devido a um outro mecanismo de desgaste (adesivo, fadiga de superfície ou triboquímico). O desgaste triboquímico, particularmente, pode originar abrasão secundária a dois corpos, quando as partículas duras do material de uma das superfícies ainda estão presas à matriz, ou três corpos quando as partículas duras são destacadas da matriz, indo para o meio interfacial.

Sistemas a dois corpos tem desgaste de 10 a 1000 vezes maior que o sistema a três corpos segundo TYLKZAK e OREGON[29].

O riscamento superficial pode ocorrer por um mecanismo de abrasão denominado microcorte, ou simplesmente corte, que ocorre quando a dureza do abrasivo for maior que a dureza das superfícies. Esse mecanismo é bastante eficiente para materiais dúcteis. A dureza e outras propriedades dos materiais metálicos, como tensão de escoamento é fortemente influenciada pela ação da temperatura.

A ação do corte provoca encruamento superficial devido à deformação plástica, podendo alterar sensivelmente a dureza da superfície de desgaste. Segundo WRIGHT[30], a resistência ao desgaste é indicada pela dureza, que quando maior, não permite um eficiente corte do abrasivo.

Existe um ângulo de cunha crítico do abrasivo que também influi na perda do corte, o mecanismo de abrasão muda de corte, com a formação de cavaco semelhante à usinagem em uma escala reduzida e não uniforme, e pelo encruamento próximo a região de sulcamento. Nesse caso, o destacamento de material pode ocorrer por fadiga de superfície das camadas deformadas plasticamente e encruadas, podendo ocorrer também o mecanismo de adesão.

O mecanismo de sulcamento também acontece em sistemas com baixas cargas, mas não resulta em desgaste. Ocorrem inicialmente danos na superfície por encruamento e então uma provável atuação do mecanismo de fadiga superficial, devido a sucessivos tensionamentos nas regiões encruadas.

O desgaste por abrasão é acelerado quando o meio é corrosivo, pois novas superfícies são constantemente geradas pela ação da abrasão e rapidamente corroídas, formando uma camada de óxido que é sucessivamente removida[29].

2.2.3 Fadiga de Superfície

O mecanismo de fadiga de superfície, representado pela figura 11, mostra elementos sob pressão, ambos com a mesma tensão de contato (compressiva) nas superfícies.

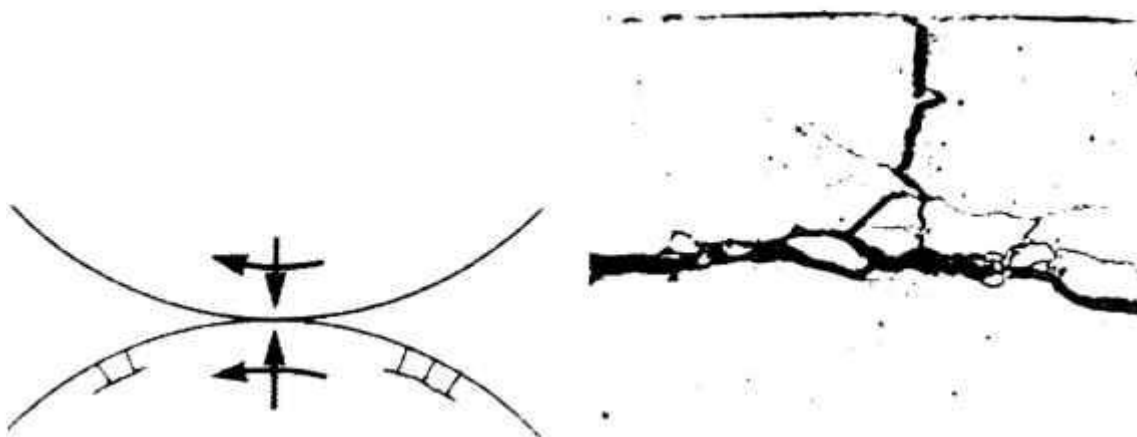


Figura 11 – Apresenta trincas de fadiga paralela e perpendiculares à superfície [18]

A figura 12 apresenta a superfície de anel nitretado que apresentou fadiga de superfície. As trincas superficiais representam a principal característica deste mecanismo de desgaste.



Figura 12 – Aspecto da superfície de anel de pistão nitretado com fadiga de superfície

Durante o deslizamento, uma contínua deformação plástica é induzida na superfície, tanto pela parcela de adesão quanto pelo sulcamento.

Na interface de deslizamento, uma camada de transferência de finas partículas pode ser encontrada e, próxima a essa superfície tensionada desenvolve-se uma estrutura formada por camadas alongadas pela deformação plástica, resultando em uma sub-estrutura que varia de acordo com a profundidade. Os fragmentos de desgaste são formados quando ocorre a fratura do material encruado. Este é um dos mecanismos que pode ocorrer em materiais dúcteis.

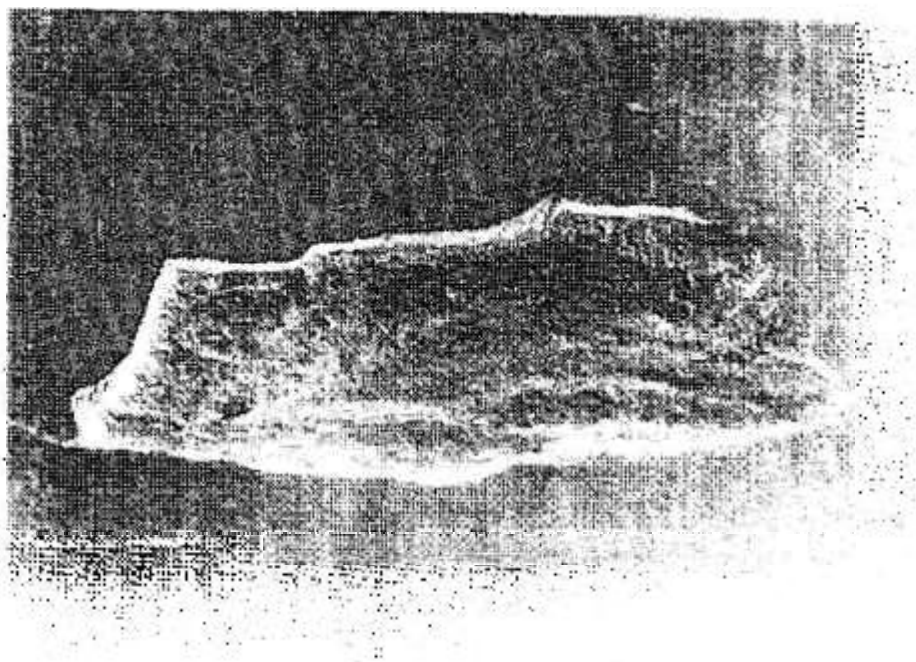
Para materiais frágeis, tais como metais muito duros, ferros fundidos cinzentos ou superfícies recobertas com material duro, nos quais o crescimento de trincas ocorre sob reduzida deformação plástica, a mecânica de fratura linear elástica pode ser aplicada para a propagação de trincas que leva ao desgaste[9].

As trincas podem ser iniciadas em um simples ou em múltiplos contatos durante o deslizamento, em pontos onde existem inclusões, contornos de grãos fragilizados ou lamelas de grafita. Em recobrimentos, as tensões residuais presentes na camada dura favorecem o aparecimento de trincas até mesmo na fase de produção.

As trincas pré-existentes favorecem o destacamento de material por fadiga de superfície quando estão em movimento relativo sob condição de atrito. Tensões cíclicas favorecem o aparecimento de novas trincas e também a propagação das mesmas, levando à fratura das camadas encruadas pela deformação plástica.

Regiões de contato com determinados tratamentos superficiais também apresentam tensões residuais e sob solicitação severa, podem favorecer o aparecimento de trincas.

A figura 13 mostra a superfície de um anel de pistão com tratamento termoquímico de nitretação após ensaio em motor Diesel. Observa-se o aparecimento de trincas que provavelmente ocorreram devido a um sobre aquecimento ou sobre carga advindos de lubrificação deficiente.



**Figura 13 –Aspecto da Fadiga de superfície
em anel de pistão nitretado**

2.2.3.1 Delaminação

O mecanismo de delaminação proposto pela teoria de SUH[31], permite identificar o desgaste da superfície, sendo as quatro etapas para o mecanismo de delaminação representadas pela figura 14.

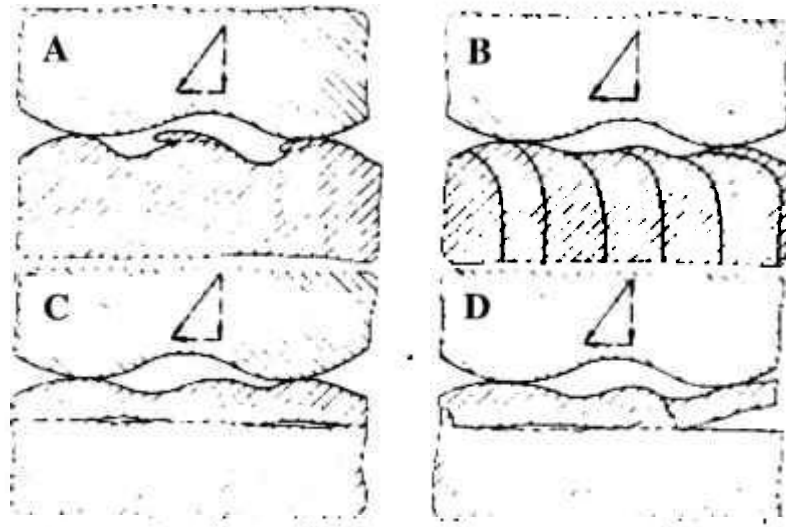


Figura 14 –Etapas do mecanismo de delaminação

A seqüência de eventos de acordo com a figura, pode ocorrer:

- Alisamento da superfície menos dura devido à deformação ou remoção de asperezas;
- As asperezas mais duras induzem deformação plástica sobre a superfície menos dura e a mesma se acumula durante o repetido carregamento que ocorre durante o deslizamento;
- O aumento da deformação leva à nucleação de trincas abaixo da superfície. Trincas ou vazios pré-existentes aumentam com o contínuo carregamento e deformação. As trincas tendem a se propagar paralelas à superfície, a uma profundidade que depende das propriedades do material e do coeficiente de atrito, entre outros fatores;

- d. Em certas posições favoráveis, ou seja, em regiões menos resistentes, as trincas se propagam para a superfície, originando fragmentos delaminados.

A propagação é explicada através de uma análise do campo de tensões atuantes no contato. À frente da região de contato, tem-se uma deformação devido às tensões de tração, que também determina a propagação das trincas.

Na maioria dos tribossistemas práticos, existe uma interação entre os mecanismos de adesão e fadiga de superfície. O primeiro está relacionada à deformação plástica, cisalhamento das junções e transferência com e sem retorno do material à superfície de origem. O segundo também está relacionado à deformação plástica, seguida de formação e propagação de trincas, que resulta em fadiga. Outros mecanismos que envolvem deformação plástica podem também estar inter-relacionados.

HUTCHINGS observa que existem tentativas de se modelar o desgaste por deslizamento de metais com um processo de fadiga, porém os mesmos não são bem determinados. Existem modelos de propagação de trincas sub superficiais sob tensões de cisalhamento cíclicas, além de outros que consideram que a remoção das asperezas é resultado de fadiga de baixo ciclo. Existem evidências experimentais de que há trincas de fadiga sub superficial sob certas condições de deslizamento em alguns materiais, porém não se tem certeza se a iniciação das trincas ou sua propagação ocorrem devido a um mecanismo de fadiga de alto ciclo.

2.2.4 Triboquímico

O desgaste triboquímico está associado a superfícies que apresentam óxido e pode ser relacionado ao desgaste oxidativo em contato não lubrificado, ou camadas produzidas por certas reações triboquímicas em contatos lubrificados.

A ocorrência de desgaste oxidativo é determinada pelos efeitos combinados de carga normal e velocidade de deslizamento, pois interferem na temperatura superficial, devido ao aquecimento em função do atrito[32]. A figura 15 representa uma seqüência para a ocorrência do desgaste corrosivo.

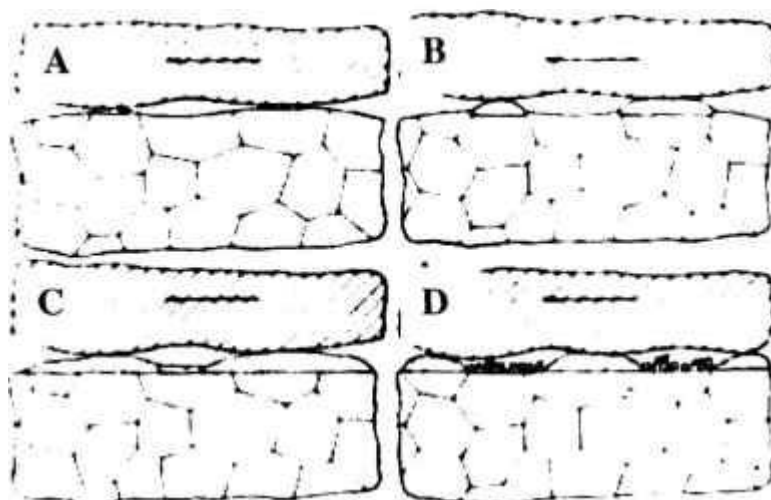


Figura 15 –Seqüência para a ocorrência do desgaste corrosivo

- a. Representa a formação das ilhas, ou platôs de óxido, devido à temperatura de contato promovida pelo atrito. QUINN menciona que esses platôs têm área de aproximadamente 10^{-2}mm^2 e altura de 2 a 3 μm ;
- b.c.Representam o crescimento das ilhas ou platôs formados;
- d. Representa a destruição dos platôs de óxidos primários, após atingirem determinada espessura crítica. Como os platôs têm trincas superficiais perpendiculares à direção de deslizamento.

A formação dos filmes de óxido é substancialmente acelerada pelo contato no deslizamento, se comparada à formação dos mesmos em temperatura ambiente. A quantidade de óxido aumenta com a umidade do ambiente.

O primeiro requisito para haver o desgaste oxidativo é a reação da superfície com o oxigênio. Um outro requisito para haver desgaste oxidativo é que os materiais devem ter alta resistência a altas temperaturas, pois se o óxido é formado sobre a superfície, o substrato deve resistir sem ocorrência de deformação plástica. Se o material abaixo da superfície tem a sua resistência diminuída pela alta temperatura no pico das asperezas e sofrer massiva deformação plástica, poderá ocorrer desgaste severo.

Em contatos lubrificados, aditivos EP (Extrema Pressão) são amplamente utilizados e agem formando camadas superficiais, tais como ditiofosfatos metálicos (ZnDTP, NiDTP, MoDTP, etc), sobre as áreas de contato. Essas camadas diminuem o atrito e o desgaste, por evitar o contato metal-metal. O uso de aditivos muito reativos pode causar reação inversa à proteção, devido a uma possível tendência de corrosão acentuada da superfície.

VATAVUK descreve um processo interativo do mecanismo de corrosão com abrasão. Em ambientes corrosivos, o riscamento provocado pela abrasão leva a formação de nova superfície, sujeita ao ataque direto pelo ambiente corrosivo, aumentando dessa forma o desgaste da superfície. Em superfícies que apresentam partículas duras, tais como carbeto de cromo em ferro fundido de matriz perlítica, em ambientes corrosivos ocorre um ataque da matriz projetando as partículas, que podem promover abrasão a dois corpos. Segundo EYRE, et al.[32], o ataque corrosivo ocorre preferencialmente nos contornos das partículas duras, facilitando o destacamento das mesmas da matriz.

2.3 Desgaste em Sistemas Deslizantes

De modo geral, o desgaste de sistemas deslizantes pode ser definido como “perda progressiva de material, resultante da interação mecânica entre duas superfícies em contato”, e o desgaste ocorre por causa de falha mecânica localizada em zonas interfaciais altamente tensionadas e o modo de falha é influenciado pelas condições de operação ou fatores ambientais, além das condições dos materiais e parâmetros do tribossistema[20].

Uma equação que descreve o desgaste em contatos deslizantes é a equação de desgaste de ARCHARD [9] [38].

$$w = K \cdot \frac{W}{H} \cdot s \quad [2-2]$$

onde:

w = perda por desgaste em volume

K = coeficiente de desgaste expressa a probabilidade de formação de partículas de desgaste, adimensional, não necessariamente constante

W = carga normal

H = dureza do material menos duro

s = distância de deslizamento

O maior problema no uso da equação de desgaste de ARCHARD é o desconhecimento do valor de K, que é determinado experimentalmente ou através de aproximações de modelos teóricos.

ZUM GAHR expressa formulações teórica para o valor de K em função do mecanismo de desgaste atuante no sistema;

K para desgaste por mecanismo de adesão depende do trabalho de adesão γ_{ad} .

K para o desgaste por mecanismo de fadiga de superfície depende do número de ciclos até a falha, que é função da deformação plástica para a falha, se o contato é predominantemente plástico, ou tensão para a fratura, em contatos predominantemente elásticos.

K do desgaste por mecanismo de ação triboquímica, particularmente de oxidação, depende da espessura do óxido, densidade do óxido na área de contato, da temperatura do contato, da energia de ativação para a oxidação parabólica, entre outros parâmetros.

K para o desgaste por mecanismo de abrasão não é definido dentro de desgaste por deslizamento. Entretanto, no capítulo que trata de abrasão chega-se a mesma formulação de ARCHARD, onde K depende da fração de material deslocado que é realmente removido e da geometria dos abrasivos.

A ocorrência de transições de regimes de desgaste que ocorrem com o aumento da carga devido a mudanças na natureza do contato, bem como o encruamento advindo da deformação plástica a que o material é submetido, não são previstos pela equação de ARCHARD, porém, o valor de K indica a severidade do desgaste.

Segundo LUDEMA, sistemas deslizantes possuem na prática K menor ou iguais a 10^{-7} e valores muito altos (não aceitável) de taxas de desgaste apresentam K em torno de 10^{-3} . Em desgaste abrasivo a dois corpos, valores típicos estão entre $5 \cdot 10^{-3}$ e $50 \cdot 10^{-3}$. Para abrasão a três corpos, K varia de $0,5 \cdot 10^{-3}$ a $5 \cdot 10^{-3}$.

Um ponto a ser enfatizado é que não há equação que possa ser genericamente aplicada para todos os sistemas de desgaste, uma vez que os sistemas tribológicos são influenciados por inúmeros fatores, determinados pelos parâmetros do tribossistema.

2.4 Desgaste do Par Tribológico Anel - Cilindro

O desgaste do par tribológico anel-cilindro pode ser classificado como desgaste por deslizamento, podendo ser considerado de moderado e severo[9] [33].

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

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

A lubrificação é uma das exigências mais importantes e de fundamental influência nos mecanismos de desgaste[34] [35]. Se um contínuo filme de óleo estiver presente, o desgaste por atrito será negligenciado. Contudo, se o filme for rompido poderá ocorrer o desgaste crítico dos cilindros confinado no ponto morto superior, região de inversão da velocidade dos anéis de primeiro canaleta, formando uma depressão e conseqüentemente um polimento desta região, principalmente no caso dos motores do ciclo Diesel.

As fases de desgaste atribuídas ao sistema deslizante anel-cilindro estão descritas no próximo capítulo.

2.4.1 Etapas de Desgaste

Os sistemas de desgaste geralmente compreendem duas fases de assentamento ou amaciamento e o progressivo.

A primeira fase ocorre nas superfícies ainda não deformadas, e o desgaste promove um alisamento com a diminuição da rugosidade inicial e acomodação entre as superfícies. Além disso, NEALE[34] observa que no período de amaciamento são formadas as camadas encruadas, camadas protetoras de óxido ou filmes adsorvidos.

Durante o período de amaciamento ou conformação entre as superfícies, o carregamento não pode ser excessivo. Se houver uma lubrificação deficiente e os veios de grafita não estiverem expostos, no caso de ferro fundido, poderá ocorrer o contato metal-metal e o mecanismo de *scuffing* poderá se manifestar em uma eventual sobrecarga.

Segundo HEILMANN e RIGNEY[37], as mudanças que ocorrem na superfície e também nas camadas sub superficiais provocam deformações plásticas, mudando com isso a microestrutura e a textura cristalográfica. Essas mudanças ocorrem devido ao processo dissipativo de energia devido ao atrito, e o aumento decorrente da temperatura afeta as propriedades mecânicas.

O tempo de amaciamento para motores em dinamômetro e veículos de estrada tem duração de aproximadamente 12 horas. Após o período de amaciamento, ocorre o período de desgaste progressivo com taxas menores e praticamente constantes.

2.5 Parâmetros que Influenciam no Desgaste de Sistemas Deslizantes

Baseado nos artigos de ZUM GAHR[9] e CZICHOS[39], definiu-se para este trabalho descrever um modelo de desgaste e atrito em sistemas deslizantes lubrificados, como representado pela figura 16.

DESGASTE E ATRITO EM SISTEMAS DESLIZANTES				
Sistema		Parâmetros		
		Estrutural	Interface	Funcional
Componentes (Par tribológico)	Características	Macrogeométrica Microgeométrica Material	Triboquímica	Carga Velocidade Temperatura
	Requisitos	Forma Perfil Topografia Trat. Superficial	Ar Água Combustível Lubrificante Elétrico	Performance Durabilidade (Ruídos)

Figura 16 – Modelo de desgaste e atrito em sistemas deslizantes

Os parâmetros definidos para os sistemas deslizantes lubrificados são classificados como estrutural, de interface e funcional. Para cada parâmetro, determinaram-se as características do par tribológico e seus respectivos requisitos.

No entanto, vale lembrar que a predominância de um ou outro mecanismo de desgaste, bem como o comportamento do atrito depende das condições de funcionamento (carga, velocidade e temperatura), das condições de interfaces (propriedade e/ou presença de contaminantes do meio lubrificante, presença de partículas duras) e das condições estruturais (microestrutura do material, topografia, geometria), que definem o conjunto de parâmetros do tribossistema que afetam o desgaste.

O exemplo clássico é a influencia da carga normal e da velocidade sobre os regimes de desgaste, pois os mesmos influem na taxa de deformação plástica e temperatura induzida por atrito nas superfícies, que podem vir a mudar a constituição microestrutural e alterar as propriedades mecânicas das superfícies, ou ainda, modificar a taxa de oxidação superficial. Nesse caso, envolve também a temperatura nas quais os materiais estariam submetidos.

Dependendo das condições de operação e das modificações microgeométricas ocorridas na superfície, a área real de contato se altera, bem como o efeito hidrodinâmico parcial da lubrificação causado pelas asperezas, e também as forças que agem nos pontos de contato podem mudar, provocando modificações nas características do desgaste.

Em seguida serão determinadas as características de cada parâmetro e os respectivos requisitos para o desempenho do par tribológico anel-cilindro.

2.5.1 Parâmetros Estruturais

2.5.1.1 Anéis de Pistão

Ovalização

É definida pela norma DIN 70907[41], como a diferença entre os diâmetros medidos na direção da folga entre pontas (diâmetro d_3) e a 90° da mesma (diâmetro d_4), conforme apresenta a figura 17.

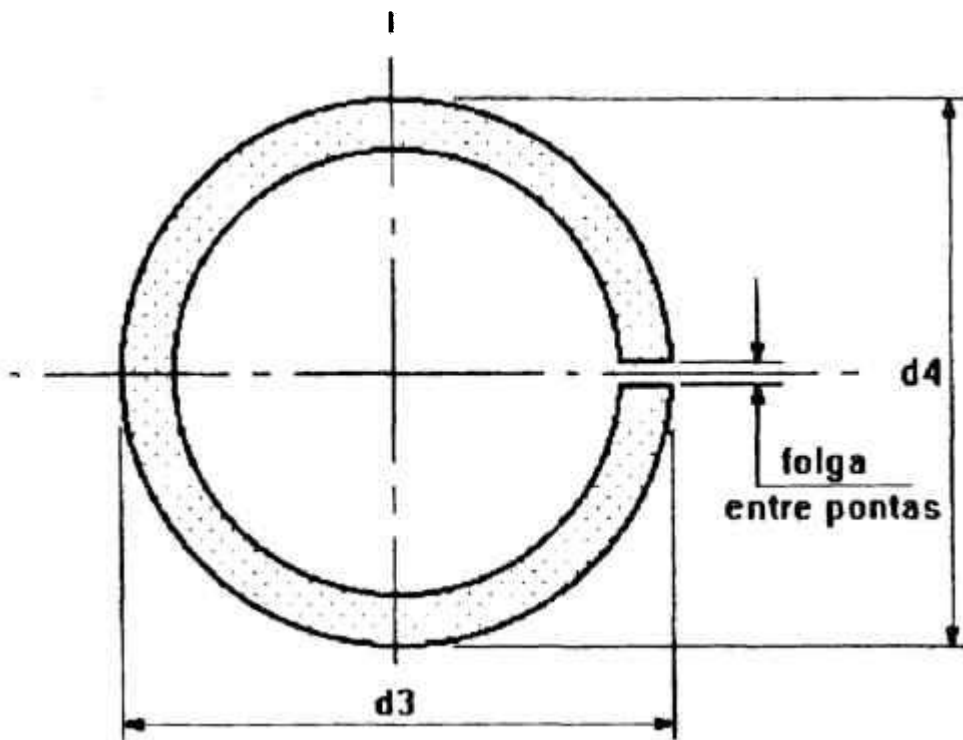


Figura 17 – Diferença entre os diâmetros na folga entre pontas

A ovalização é dita positiva se o diâmetro d_3 for maior que d_4 , e negativa se for menor ou nula se for igual, como ilustra a figura 18.

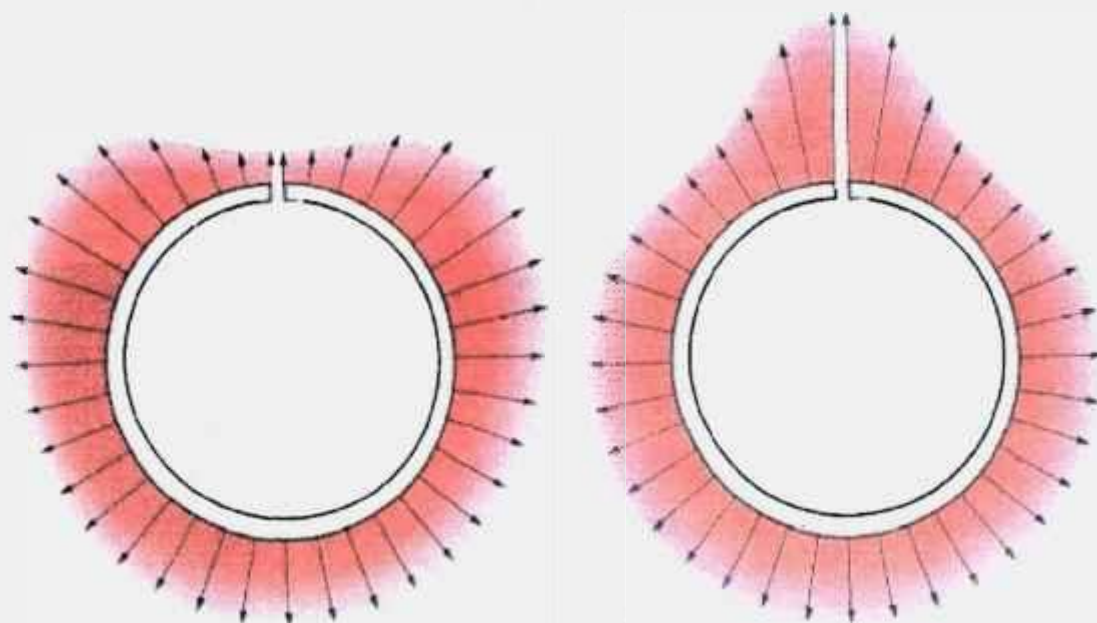


Figura 18 –Ovalização negativa e positiva de anéis de pistão

Perfil da face de contato

Para a geometria formada pelo contato anel de pistão e cilindro, tem-se a superfície do anel, abaulada simétrica ou assimétrica. Assemelha-se a uma geometria cilindro-plano, apresentada na figura 19, pode-se obter a área de contato e a pressão máxima de contato através das formulas citadas por CZICHOS.

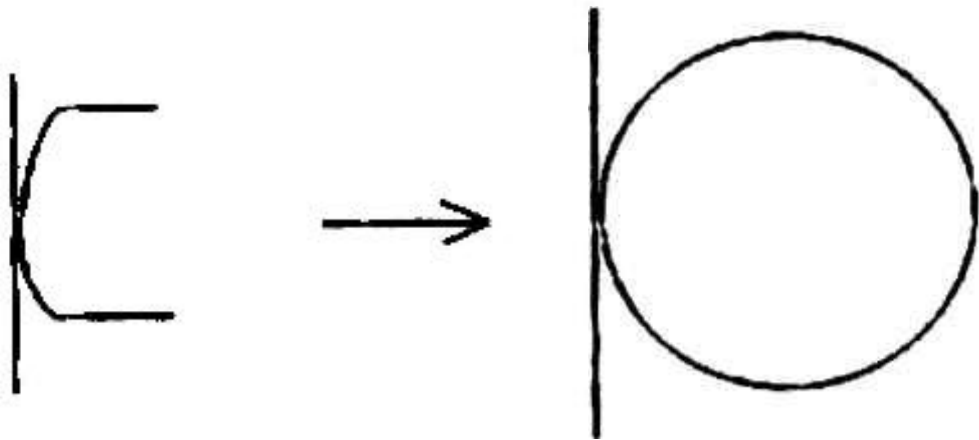


Figura 19–Semelhança do perfil com a geometria cilindroplano

A hipótese para a aplicação das equações do contato e o campo elástico de deformação do sistema em estudo, depende basicamente das propriedades mecânicas dos materiais e da forma das superfícies próxima ao contato. As fórmulas para a área de contato e a pressão máxima para a geometria cilindro-plano são:

$$b = 1,6 \left(\frac{p \cdot R}{E} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [2-3]$$

$$p_h = 0,798 \left(\frac{p \cdot E}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [2-4]$$

$$\frac{1}{3} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad [2-5]$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad [2-6]$$

Onde:

b = largura de contato

p = carga normal por unidade de comprimento

E_i = módulo de Young do corpo i

ν_i = coeficiente de Poisson do corpo i

R_i = raio de curvatura do corpo i

Índice $i = 1$:anel (cilindro)

Índice $i = 2$:cilindro (plano)

O perfil de contato é uma característica de grande importância na capacidade do anel em controlar a espessura da película de óleo lubrificante presente na parede do cilindro. Os anéis de primeiro canaleta com concepção mais antiga possuíam face de contato paralela à parede do cilindro. No entanto, devido à deformação do pistão sob carregamento da pressão dos gases e dos gradientes de temperatura, o contato com a parede do cilindro desloca-se para a parte superior do anel. Esse fato não é desejável, uma vez que o pistão em seu movimento ascendente raspa o óleo em direção à câmara de combustão, onde será queimado, aumentando os valores de consumo de óleo e emissão de poluentes pelos gases de escape.

Para minimizar o contato da região superior da face do anel com a parede do cilindro, utiliza-se uma face de contato abaulada.

Acabamento Superficial

O acabamento superficial contribui na eficiência da lubrificação sob condições críticas da superfície e deve ter uma molhabilidade de óleo lubrificante combinado aos pequenos reservatórios de óleo. Estes reservatórios, contudo, não devem comprometer a capacidade de vedação dos gases de combustão. Grande parte dos acabamentos superficiais dos anéis tem sido através de recartilhamento, eletrodepósito de cromo poroso, por laser, jateamento, e mais atualmente retífica e lapidação.

Tais processos devem ser desenvolvidos para promover uma superfície característica que reúna os seguintes requisitos:

- ♦ superfície lisa, com distribuição não direcional de reserva de óleo;
- ♦ o reservatório de óleo deve ter uma profundidade efetiva, de forma que contribuam durante o período de amaciamento;
- ♦ a rugosidade superficial deve adequar-se para uma eficiente vedação dos gases de combustão;
- ♦ uma certa quantidade de vales (*plateaus*) deve ser promovida; ausência de picos muito protuberantes;
- ♦ evitar que partículas abrasivas sejam destacadas da superfície.

Os processos de fabricação deixam determinadas texturas de picos e vales sobre a superfície e, devido a essas texturas, as superfícies possuem rugosidade e ondulação. A rugosidade e a ondulação podem estar superpostas com outros desvios de forma geométrica, tais como planicidade ou linearidade, cilindridade, etc., e os equipamentos empregados por ocasião de caracterização dessas superfícies devem conter filtros, que possibilite obter perfis representativos.

Material Base

Considerado o responsável pela resistência mecânica, muito importante durante a operação de montagem do anel de pistão, e também pela resistência ao desgaste da altura axial. O movimento alternado do pistão provoca elevadas forças de inércia nos anéis, fazendo com que ocorram choques entre as faces laterais do anel e as paredes laterais do canaleta do pistão, decorrentes da folga entre o anel e o canaleta[44].

Movimentos secundários do pistão decorrente da folga entre o pistão e o cilindro provocam movimento relativo entre o anel e o canaleta na direção radial, este impacto na direção axial e no movimento relativo na direção radial tem seus efeitos ampliados em função das elevadas pressões provenientes dos gases atuantes sobre os anéis em determinados períodos do ciclo. Recentemente, emprega-se ferro fundido nodular com partículas duras dispersas na matriz martensítica como uma alternativa na fabricação de anéis de primeiro canaleta com revestimento ou para os anéis de segundo e terceiro canaletes sem revestimento[45].

Anéis de aço e mesmo em aço nitretado estão sendo utilizados em algumas aplicações onde se deseja componentes com alturas bastante reduzidas, alta resistência ao desgaste e excelentes propriedades mecânicas[46].

Tratamento Superficial

Os anéis de pistão devem resistir a longos períodos de funcionamento no motor. Para isso recebem tratamentos superficiais na face de contato, que podem ser compostos por um ou mais materiais com propriedades de resistência ao desgaste. As três geometrias básicas que tem sido utilizada nos anéis de pistão estão representadas pela figura 20. Observa-se na maioria dos anéis de pistão submetidos a tratamentos termoquímicos uma camada em todo perímetro da secção transversal.

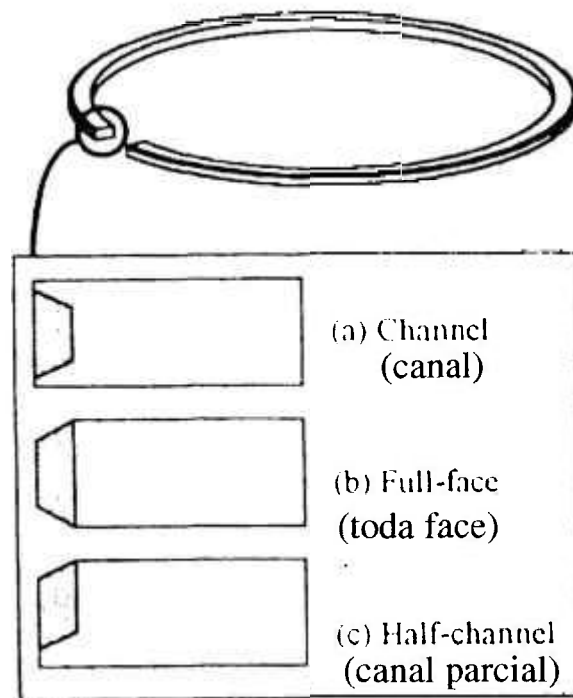


Figura 20 – Perfis dos tratamentos superficiais na região de contato dos anéis de pistão

De grande importância para a vida útil dos anéis de primeiro canaleta, os tratamentos superficiais visam sempre o aumento da resistência ao desgaste. A seguir, serão descritas algumas destas tecnologias.

Os revestimentos à base de molibdênio existentes são aplicados pelo processo de metalização por plasma. A camada resultante apresenta aspecto lamelar devido à solidificação das gotículas aspergidas sobre a superfície de contato[6].

A grande maioria dos materiais pode ser fundida por este processo, se as partículas dos pós estiverem disponíveis em granulações, formatos e dimensões adequadas, sendo então convertida em revestimento de elevada qualidade, o qual tem assumido grande importância técnica e econômica na produção de superfície sujeitas ao desgaste.

A figura 21 ilustra o processo de aspersão térmica:



Figura 21 – Processo de aspersão térmica em anéis de pistão

Seqüência do processo de aspersão térmica:

- 1) Material líquido de revestimento em movimento no espaço.
- 2) Impacto com a superfície considerada.
- 3) Transferência de calor para o material base.
- 4) Solidificação e contração do material de revestimento.
- 5) Ligação mecânica devido a contração em consequência da solidificação.
- 6) Fusões localizadas.

O tratamento termoquímico de nitretação utilizado nos anéis de pistão atualmente apresenta um menor desperdício de matéria prima, gera menos disposição de resíduos, consome menos energia na produção, e resulta em um produto com maior resistência ao desgaste.

Existem diferentes processos de nitretação que são diferenciados pelos meios utilizados para promover a difusão de Nitrogênio ao interior da peça. Os meios utilizados são em pó, líquido, gasoso ou plasma também conhecido como iônico.

Estes processos envolvem a introdução de Nitrogênio atômico para o interior do reticulado cristalino em um intervalo de temperatura entre 500 e 590°C.

Na superfície da peça ocorre uma contínua alimentação de Nitrogênio e quando todos os espaços interatômicos dos cristais da superfície estão preenchidos (limite de solubilidade), começa a ocorrer a formação de diferentes compostos intermetálicos como[63][64]:

As mudanças que ocorrem na superfície do substrato, peça a ser nitretada, podem ser entendidas utilizando o diagrama de fases Fe-N representado pela figura 22. Nas temperaturas usuais de nitretação, a máxima solubilidade de nitrogênio, no estado sólido, na ferrita é de 0,1%. Quando a quantidade de nitrogênio excede este valor, inicia-se a formação de compostos intermetálicos denominados "nitretos". O primeiro nitreto a se formar é denominado, γ' , (Fe_4N), e mantém-se estável até o teor de 6,1% de N. Acima de 6,1%, ocorre a formação do nitreto ϵ , (Fe_{2-3}N), que pode dissolver até 11,0% de N.

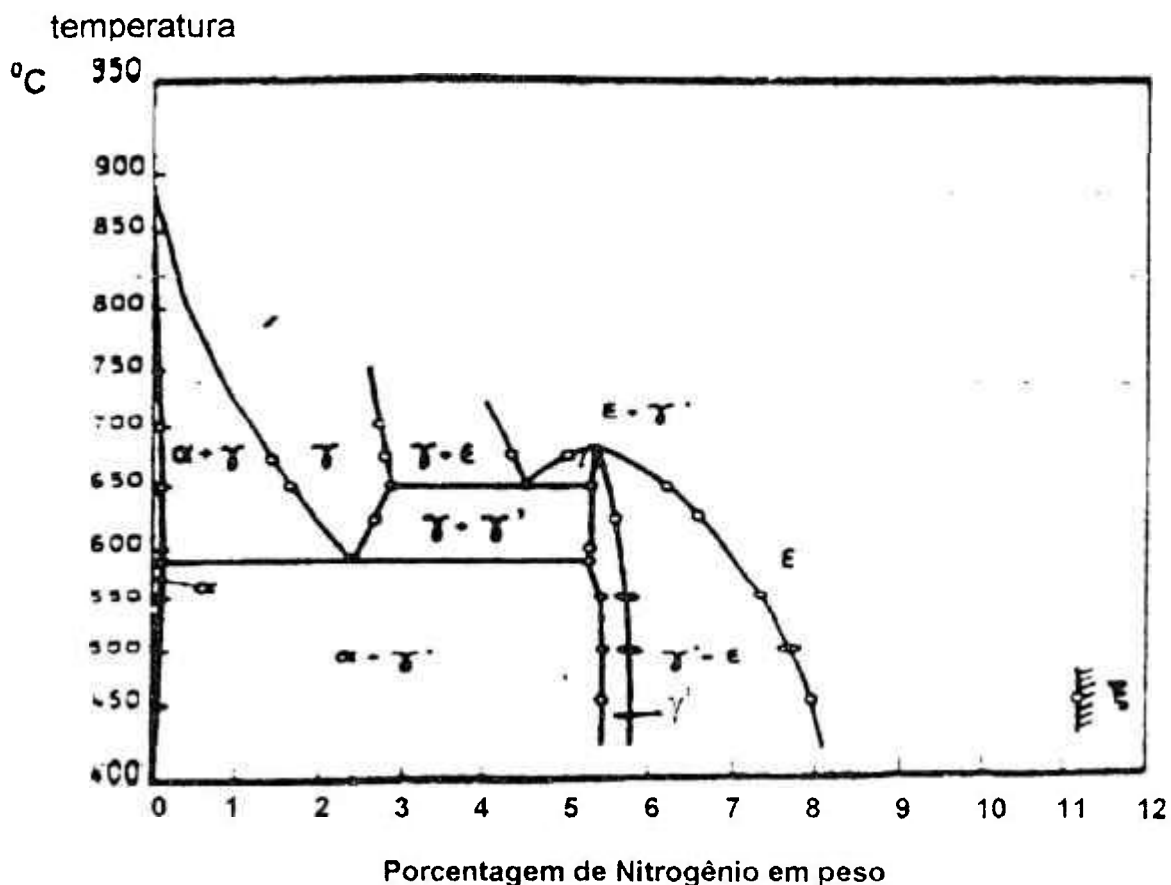


Figura 22 – Diagrama de fase Ferro-Nitrogênio

Para motores convencionais de baixa solicitação, utiliza-se a deposição de cromo, que surge juntamente com as grandes quantidades de hidrogênio, sendo parte desse elemento depositado como cromo na forma de hidretos, que são instáveis e se decompõe na forma de hidrogênio gasoso e Cromo metálico. Esta decomposição resulta em uma diminuição do volume, superior a 15%, gerando tensões internas na camada.

Durante a eletrólise, quando se atinge uma determinada espessura de cromo, a somatória das tensões internas supera a resistência própria do cromo, provocando a quebra do fino filme metálico, formando as fissuras. O fenômeno se repete durante o tempo de cromação, e deste modo à película superficial da camada apresenta menor número de fissuras em relação aos pontos mais internos do depósito.

O tratamento superficial de cromo compósito compreende o seguinte processo eletrolítico[50][64].

- @ Deposição da primeira camada de cromo.
- @ Abertura da rede de microfissuras através da reversão de corrente
- @ Inclusão das partículas cerâmicas de Óxido de Alumínio.
- @ Encravamento das partículas nas microfissuras.
- @ Fechamento das redes de microfissuras.
- @ Deposição da próxima camada, e assim sucessivamente até a espessura especificada.

A figura 23 ilustra as características da camada de Cromo compósito.

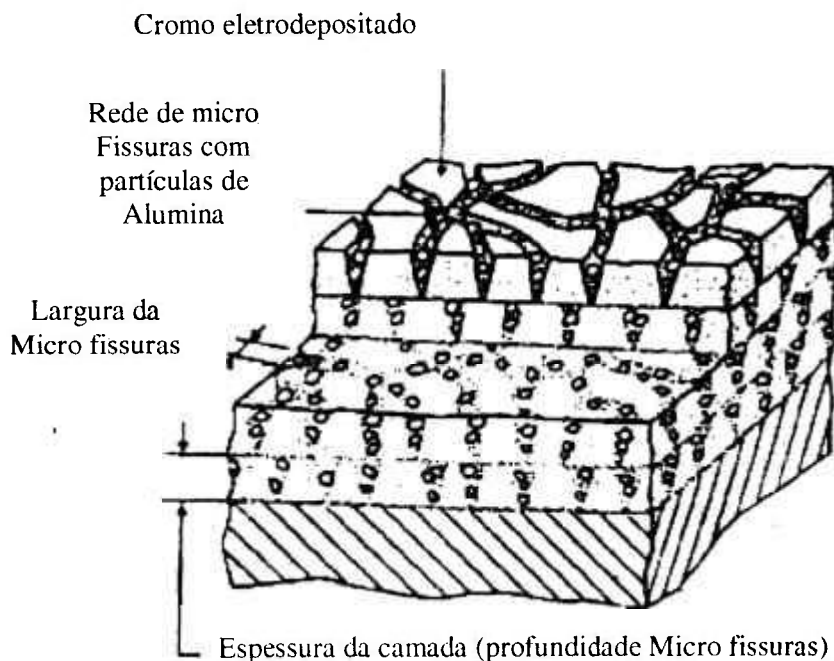


Figura 23 Principais características da camada de cromo compósito

A figura 24 ilustra o desenvolvimento de uma estratégia baseada em três tecnologias de tratamento superficial de anéis de pistão, que buscam as mais importantes características para motores diesel médio (MRD)[15].

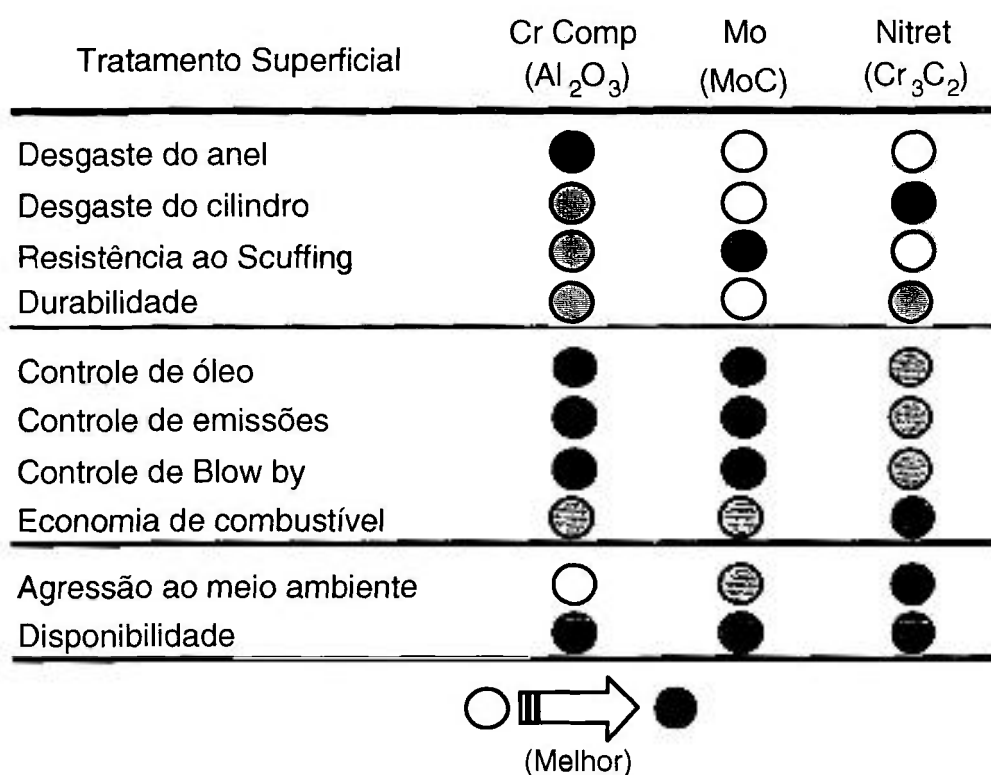


Figura 24 –Estratégia tecnológica para os tratamentos superficiais de anéis de primeiro canaleta em motores MRD

2.5.1.2 CILINDRO

Características Macrogeométricas

Ovalização dos cilindros

A geometria do cilindro não é perfeitamente circular em função das tolerâncias de máquinas, da montagem e carga de operação que causam desvios da forma circular. Caso os anéis não consigam compensar os efeitos das deformações, ocorrerá falta localizada de contato e conseqüentemente um aumento no *blow by* e consumo de óleo lubrificante[49].

Por esta razão, durante o projeto do motor é desejável conhecer profundamente as deformações do cilindro, evitando que o anel de pistão seja montado sem a devida e uniforme região de contato.

Análises de elementos finitos são utilizadas, assim como ferramentas dimensionais de precisão para medir as distorções dos cilindros durante o processo de desenvolvimento do motor.

As componentes de deformação são descritas em função da ordem, como segue:

§ 0 (zero) significa que tem variação no diâmetro;

§ 1, uma excentricidade do centro (movimento de corpos rígidos)

§ 2 até n, são onde afetam a conformabilidade dos anéis.

Os *lobes* são representados pela ordem sendo que o de 2º ordem de deformação seria similar a uma elipse, e o de 3º ordem apresenta três *lobes* e assim sucessivamente.

Diferentes equações são aplicadas para calcular a deformação máxima dos cilindros na qual ocorrerá a conformação dos anéis de pistão. Estas equações não consideram a folga entre pontas e ovalização dos anéis, pressão dos gases e a forma original do cilindro, mas apenas o máximo de sua amplitude.

Os desvios da forma circular da secção transversal do cilindro estão indicados pela figura 26, e ser matematicamente descritos pela fórmula de Fourier:

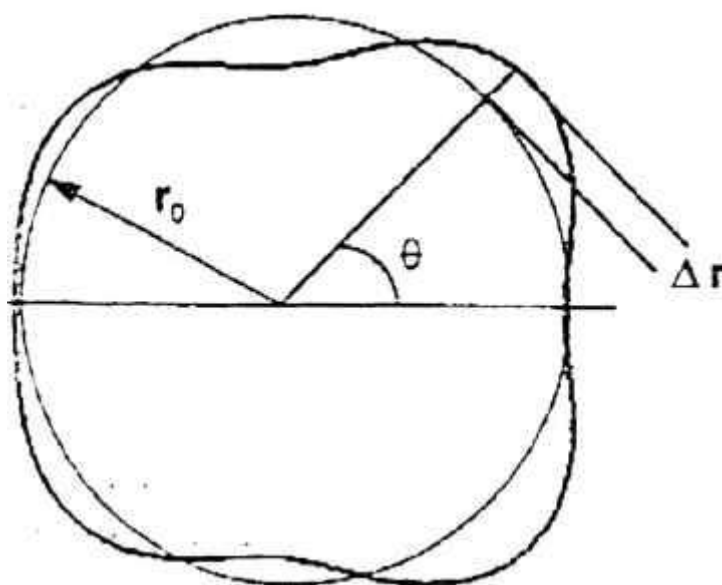


Figura 25 –Desvios de forma da secção transversal do cilindro

$$\Delta r = A_0 + A_1 \cos(\theta) + A_2 \cos(2\theta) + \dots + A_i \cos(i\theta) + B_1 \sin(\theta) + B_2 \sin(2\theta) + \dots + B_i \sin(i\theta) \quad [2-7]$$

onde:

Δr : desvio radial do círculo

A_i, B_i : coeficiente de *Fourier*

θ : posição angular

i : ordem da deformação

É importante lembrar que as deformações são usualmente medidas com o motor ou bloco novo, ou seja, não rodado. Para a condição depois de rodado, a deformação do cilindro considerando o deslizamento dos anéis é alta, e pode ser estimada pela Análise de Elementos Finitos (FEA) ou através de equipamentos sofisticados, como o da figura 26, que apresenta um exemplo de deformação do cilindro após ensaio em motor.

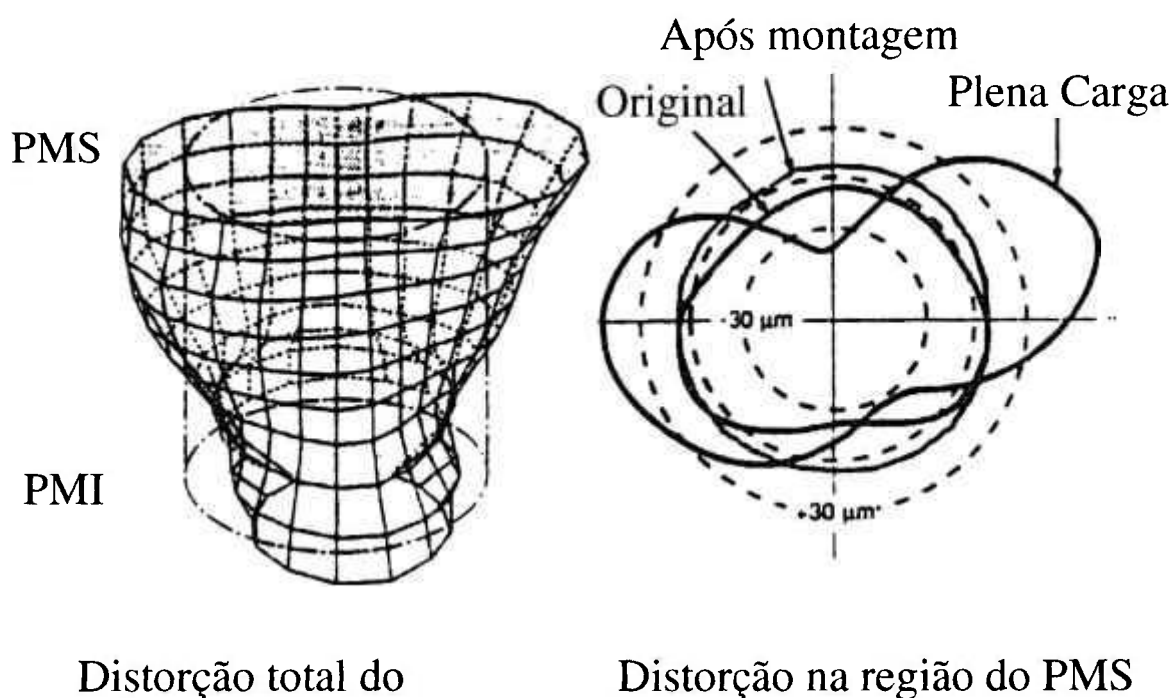


Figura 26 – Deformação de cilindro após teste de motor

Características Microgeométricas

Brunimento

O acabamento superficial da parede do cilindro é obtido por uma operação de usinagem denominada brunimento[50]. Este acabamento é de extrema importância para um bom desempenho e durabilidade do motor, uma vez que é o responsável pela retenção da película de óleo na parede do cilindro e, desta forma influencia no amaciamento do motor, consumo de óleo, desgaste dos anéis e tendência do motor à ocorrência de *scuffing*.

Uma boa condição do brunimento depende da utilização de variáveis de processo adequadas, tais como: tipo de pedra abrasiva, granulometria dos abrasivos da pedra, pressão da pedra contra o cilindro, velocidade de retirada de material, fluxo e tipo do fluido refrigerante usado durante o processo.

Vários parâmetros devem ser analisados para caracterizar o brunimento. Existem diversas faixas de especificação para estes parâmetros, porém pode-se listar como os mais importantes:

- Rugosidade da superfície: indica-se para motores ciclo Otto um valor de rugosidade R_z na faixa de 2 a 5 μm e para motores ciclo Diesel na faixa de 4 a 8 μm [50].
- Ângulo do brunimento: é determinado pela relação entre a velocidade do movimento alternativo e de rotação do cabeçote de brunir. Este ângulo é medido diretamente na superfície da peça pelas marcas deixadas pelos grãos abrasivos ou através de replica de acetato. Recomenda-se uma faixa de 40° a 65°[50][51].
- Porcentagem de apoio a 2 μm de profundidade: é a porcentagem de superfície de apoio ou *plateau* em relação ao total quando se faz um corte imaginário a uma determinada profundidade (no caso 2 μm) do perfil de rugosidade da superfície. Recomenda-se uma faixa de 60% a 75%.

- Qualidade de corte: é muito importante que a superfície apresente traços resultantes da operação de brunimento bem definidos, com corte limpo, regularmente espaçados, sem direção preferencial e sem material dobrado ou rebarbas[52]. Este aspecto da superfície permitirá a formação da película de óleo de forma uniforme, sem a ocorrência de regiões com baixa retenção de lubrificante.

Os veios de grafita que afloram na superfície devem ser mantidos expostos, mesmo após a operação de brunimento, para garantir lubrificação sólida em condições críticas de lubrificação.

O fenômeno da formação de um filme de grafita foi amplamente estudado por SUGISHITA; FUJIYOSHI[53], apresentaram as vantagens obtidas com a formação de um filme de grafita para evitar contato metal-metal em atritos de deslizamento, onde se tem condições de lubrificação deficiente.

Material Base

A figura 27 indica os requisitos necessários para as camisas de cilindro. As paredes do cilindro sofrem carregamento mecânico provenientes das altas pressões de gases e dos contatos com os anéis de pistão, assim como carregamento térmico devido às temperaturas dos gases.

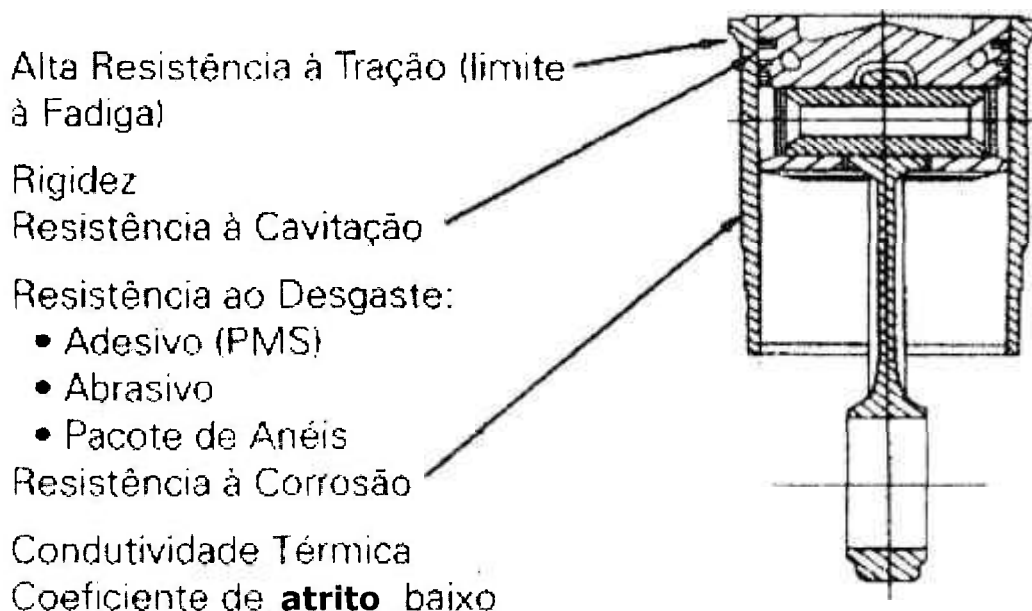


Figura 27 –Requisitos necessários para camisa de cilindro

Tais carregamentos são de natureza cíclica em decorrência dos processos de trocas de gases e movimentos alternativos característicos de um motor de combustão interna, implicando na necessidade de utilização de materiais com boa resistência mecânica para evitar deformações excessivas ou fadiga. Por outro lado, também são necessária boa resistência ao desgaste e ao *scuffing*, uma vez que o contato metal-metal ocorre nas regiões de inversão no movimento dos anéis.

A grande maioria dos blocos de motor e camisas de cilindro são confeccionados com ferro fundido cinzento.

Segundo TING[55], é necessária a adição de elementos de liga tais como: níquel, cromo, cobre e molibdênio para aumentar a resistência mecânica das camisas de cilindros.

2.5.1.3 PARÂMETROS DE INTERFACES

Característica Triboquímica

Combustão

O essencial detalhe do processo de combustão de motores diesel (compressão-ignição), como já representado na introdução (figura 2), segue alguns estágios. O combustível é injetado pelo sistema de injeção para dentro do cilindro do motor ao fim do estágio de compressão, pouco antes do início da combustão. O líquido combustível é usualmente injetado em altas velocidades através de pequenos orifícios ou esguicho com um ou mais jatos, que são atomizados em pequenas gotas e penetram no interior da câmara de combustão. O combustível é vaporizado e mistura-se na condição de alta temperatura e pressão com o ar do cilindro. Desde que a temperatura do ar e a pressão estejam acima do ponto de ignição do combustível[3], a ignição espontânea de parte da mistura combustível e ar ocorre depois de um período atrasado de poucos graus do ângulo do virabrequim. A conseqüente compressão da porção não inflamada em virtude de curtas mudanças e pelo atraso antes da ignição do combustível e ar permite que ocorra uma queima instantânea.

Lubrificação

Em sistemas que utilizam óleo lubrificante, ocorrem reações triboquímicas entre as superfícies e o elemento lubrificante, que resultam na formação de um fino filme na superfície de desgaste. Estes filmes são continuamente produzidos e removidos através do mecanismo de abrasão.

O lubrificante é um produto que interposto entre duas superfícies sólidas com movimentos relativos, tende a diminuir o atrito, desgaste e a temperatura.

Para modificar ou incrementar as características de óleo lubrificante são adicionados aditivos ao óleo básico, proporcionando um aumento ou reforço na qualidade do lubrificante.

Em motores utilizam-se na formulação do óleo os seguintes aditivos: antioxidante, detergente, dispersante, anticorrosivo, antiespumante, antidesgaste, melhorador do índice de viscosidade e abaixador do ponto de fluidez.

Para assegurar um perfeito funcionamento do sistema, o óleo lubrificante deve cumprir funções como:

- ♦ Redução do atrito e desgaste
- ♦ Proteção contra ferrugem e corrosão
- ♦ Resistência a altas temperaturas
- ♦ Refrigeração
- ♦ Vedação

As elevadas pressões dos gases no interior dos cilindros de motores tem consequência direta sobre os anéis de pistão, resultando em altas temperaturas do óleo lubrificante e consequentemente na diminuição da viscosidade, o que varia a espessura do filme de óleo durante os ciclos de admissão, compressão, expansão e exaustão. Esta variação na espessura do filme de óleo ao longo de um ciclo é a razão das alterações do regime de atrito dos anéis de pistão, desde condições de lubrificação limite até o hidrodinâmico[7].

A espessura do filme de óleo pode ser calculada em função da velocidade, através de programas de simulação computacional, como representa a figura 28.

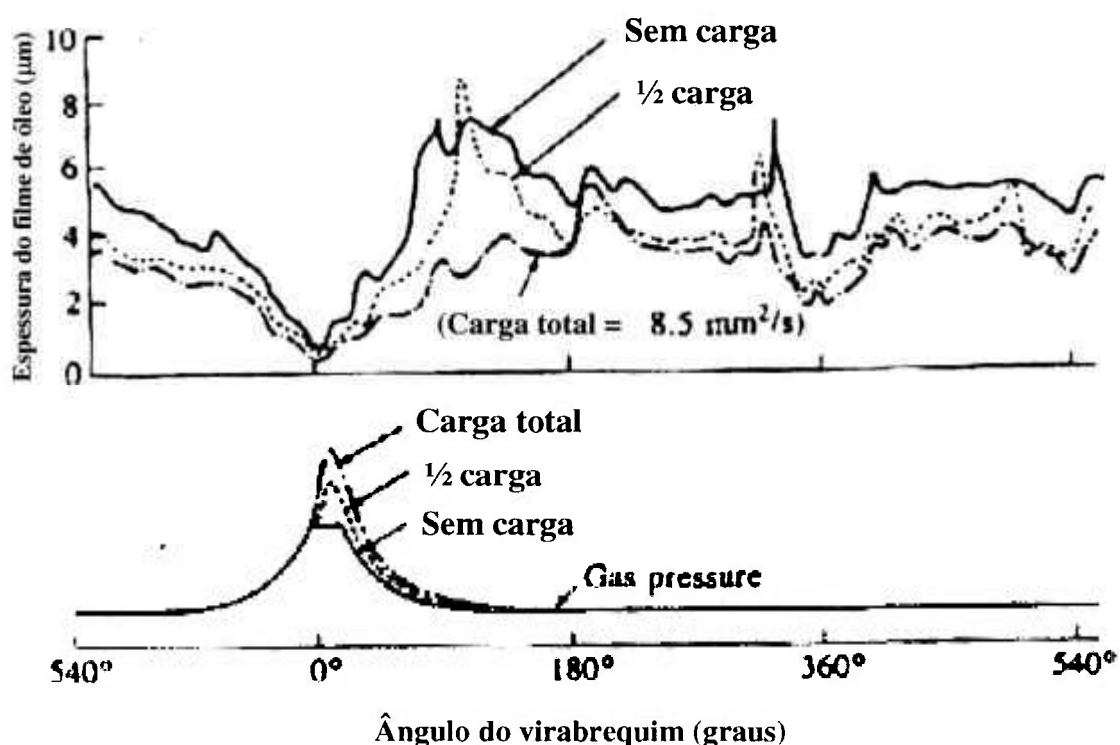


Figura 28 – Simulação da espessura do filme de óleo lubrificante

- ♦ Lubrificação hidrodinâmica – as superfícies são separadas por um filme fluido espesso se comparado com as asperezas.
- ♦ Lubrificação elastohidrodinâmica – refere-se a casos onde pressões locais são tão altas e o filme de lubrificante muito fino, ocorrendo deformação elástica das asperezas.
- ♦ Lubrificação limite – as superfícies são separadas apenas pelos filmes adsorvidos, e pode ocorrer apreciável contato entre asperezas, com formação de junções.

A curva de Stribeck expressa o coeficiente de atrito em função dos valores de $\eta v / w$, onde:

η = viscosidade dinâmica

v = velocidade de deslizamento

W = carga normal

O coeficiente de atrito na curva também pode ser representado em função de λ , razão entre a mínima espessura de filme $h_{\min}$ e a rugosidade quadrática das superfícies σ :

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{\sigma}, \text{com} \quad [2-8]$$

$$\sigma = \sqrt{(R_{q1}^2 + R_{q2}^2)} \quad [2-9]$$

Onde:

R_{qi} = rugosidades médias quadráticas das superfícies.

Segundo HUTCHINGS, a espessura média do filme de óleo no regime elastohidrodinâmico pode ser calculada por formulas empíricas, levando-se em consideração a carga, velocidade de deslizamento, características do lubrificante e características das superfícies (rigidez, geometria das asperezas, perfil de contato).

A figura 29 apresenta a curva de Stribeck em função de λ .

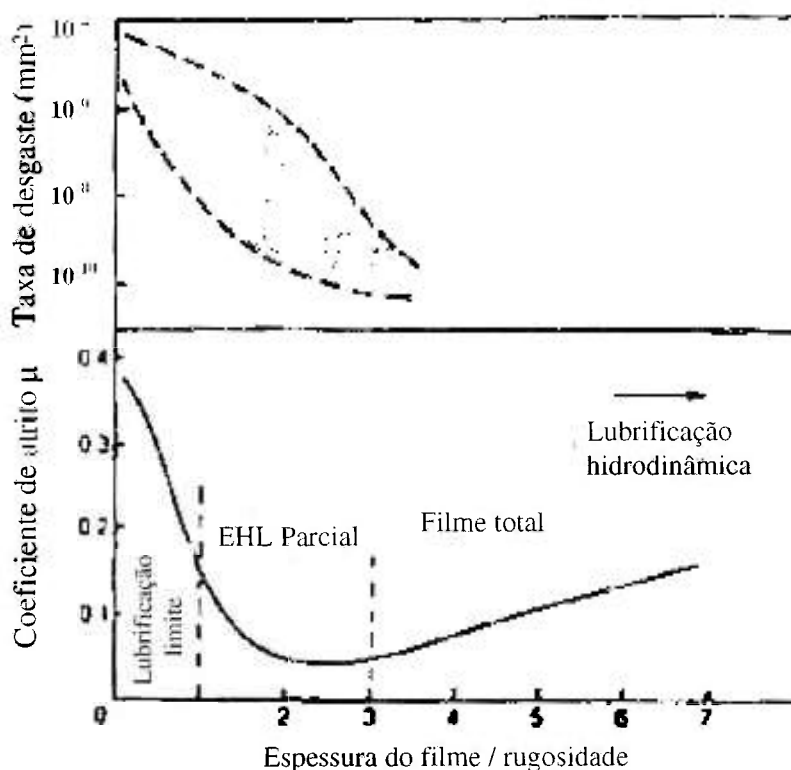


Figura 29 Curva de Stribeck em função de λ

O valor de λ é uma medida da severidade da interação entre as asperezas em um deslizamento lubrificado.

Os regimes podem ser identificados em função do valor de λ :

$\lambda > 3$: o filme separa completamente as duas superfícies, contatos entre asperezas são desprezíveis, o desgaste é baixo e a pressão é suportada pela viscosidade do lubrificante. É necessário considerar propriedades físicas do lubrificante principalmente quanto à viscosidade.

$1 < \lambda < 3$: ($1 < \lambda \leq 5$, segundo DOWSON[55]) O regime passa a ser elastohidrodinâmico ou misto, onde ocorre algum contato entre as asperezas. Nesse regime, é necessário considerar tanto as propriedades físicas do lubrificante (viscosidade) como as interações químicas entre o lubrificante ou aditivos e as superfícies dos materiais. Nesse regime, a ocorrência de um colapso do filme com a diminuição da espessura está associado a um aumento acentuado no atrito bem como um decréscimo na quantidade $\eta U/W$. O colapso do filme lubrificante nesse regime também pode ser devido a efeitos térmicos, através da taxa de dissipação de energia devida ao atrito.

$\lambda \leq 1$: Denominado regime de lubrificação limite, o comportamento do sistema depende criticamente das propriedades dos filmes adsorvidos, que foram originados de reações entre o lubrificante, aditivos propriamente para essa condição de solicitação severa, e a superfície do metal. Em cargas extremamente altas ou baixas velocidades de deslizamentos, pode haver uma diminuição na espessura do filme, com a ocorrência de dano superficial severo, comumente denominado *scuffing*.

Caso venha a ocorrer algum contato metálico é desejável que o lubrificante contenha aditivos, que permitiram a formação de filmes protetores, evitando que as superfícies entrem em contato. Por exemplo, para metais podem ser adicionados ácidos graxos ao óleo, que reagem com as superfícies formando sabões metálicos superficiais[34].

Caso o lubrificante contenha componentes clorados ou sulfurados reativos como os aditivos de extrema pressão, ocasionará uma reação química formando cloretos e sulfetos, sendo que a ação desses filmes evita o contato metal-metal e diminuir o atrito. A diminuição do atrito deve estar relacionada à facilidade de cisalhamento desses filmes, com sucessivas remoções e reposições. Entretanto, aditivos muito reativos podem causar certo grau de corrosão.

Para superfícies que tem contato parcial e estão operando com lubrificantes aditivados, como ácidos graxos, o coeficiente de atrito é da ordem de 0,05 a 0,1 e a taxa de desgaste pode ser 1000 a 10.000 vezes menor, se comparado ao desgaste das superfícies não lubrificadas. Vale salientar que este comportamento ocorre quando o filme adsorvido está na forma condensada. Quando a temperatura aumenta, esses filmes poderão ser fundidos ou sofrer um processo de dissorção.

Para a maioria dos casos, os filmes deixam de ser eficientes como agentes redutores de atrito e desgaste quando a temperatura superficial atinge 150 a 200°C. Para temperaturas maiores, utilizam-se aditivos EP, que contém fósforo, enxofre ou cloro. Neste caso, o coeficiente de atrito é da ordem de 0,1 a 0,2.

2.5.3 PARÂMETROS FUNCIONAIS

Pressão de Combustão

As forças atuantes no anel de compressão quando em funcionamento no motor, estão representadas pela figura 30.

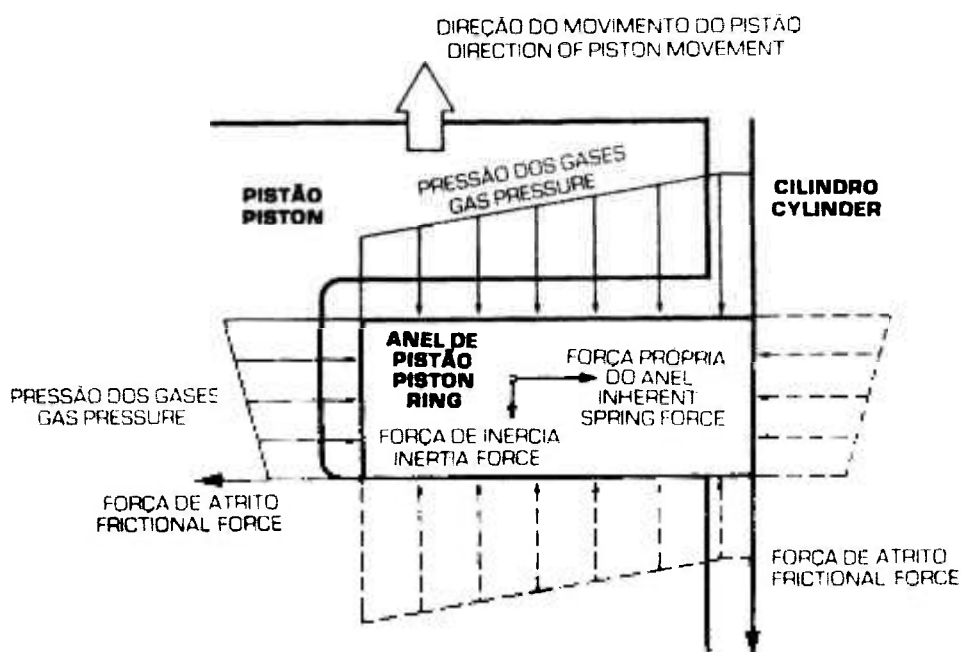


Figura 30 – Esquema representativo das forças atuantes no anel de pistão de primeiro canaleta

Dependendo da resultante destas forças, tanto na direção radial quanto na direção axial, pode ocorrer uma instabilidade no anel quando em funcionamento em altas rotações do motor, conhecida como flutuação[8]. Devido a esta instabilidade, o anel perde sua capacidade de vedação dos gases e ocorre um repentino aumento nos valores de *Blow by*⁽¹⁾ e queda na potência desenvolvida pelo motor. Uma variável de grande importância neste fenômeno é a diferença da pressão de gases agindo acima e abaixo do anel, sendo que quanto menor for esta diferença mais suscetível à flutuação estará o anel.

⁽¹⁾ *Blow by* – quantidade de mistura ar-combustível queimada e não queimada, fluindo para o cárter entre os pistões, anéis e cilindros.

Para determinar o perfil de desgaste dos cilindros por cálculos teóricos, TING[11] relaciona o desgaste do cilindro com a carga normal de contato.

Na figura 31, tem-se a distribuição de carga de contato ao longo da parede do cilindro, que é devida à pressão de contato total acumulada em um ciclo de trabalho do pistão, compreendendo os quatros tempos do motor.

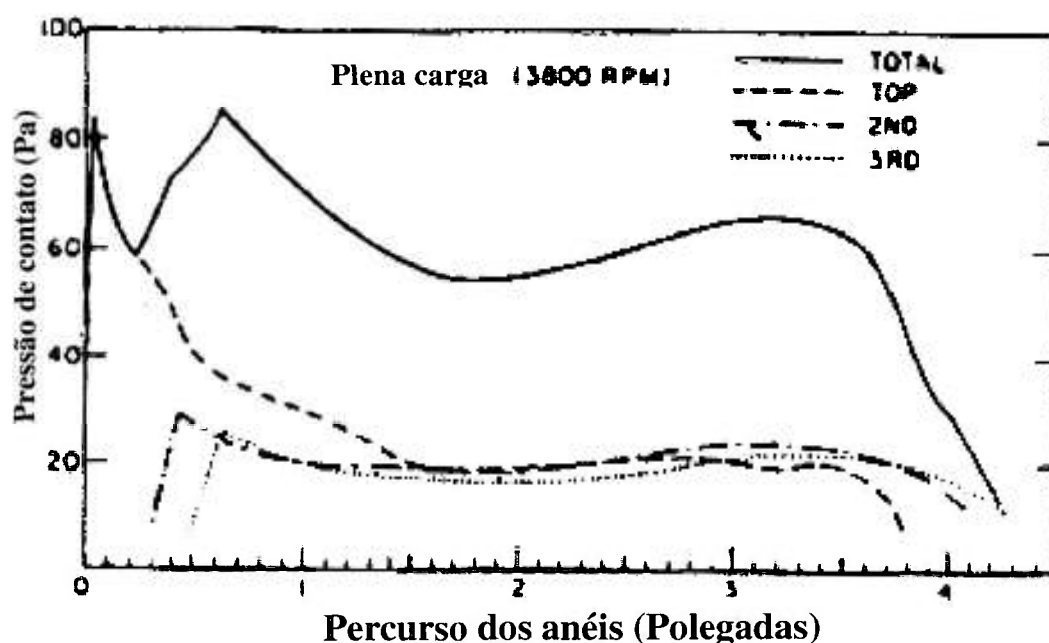


Figura 31 : -Distribuição da carga de contato ao longo da parede do cilindro

Essa distribuição de carga acumulada foi obtida teoricamente por TING, assumindo que a carga normal devida à pressão de contato é a somatória das variações de carga ao longo de um ciclo de trabalho, quando a espessura do filme de óleo for menor que a espessura mínima para lubrificação hidrodinâmica, sendo esse fato considerado como o limite para haver contato entre as superfícies e conseqüentemente o desgaste.

O cálculo da pressão do gás foi realizado através de um labirinto ligado por orifício quadrado, representado pelas folgas entre pontas dos anéis de pistão.

TING calcula o desgaste do cilindro baseado na equação de desgaste de ARCHARD e compara com resultados obtidos do ensaio em veículo, com 76.115 km rodados. A figura 32 apresenta o resultado obtido para o desgaste simulado e real medido.

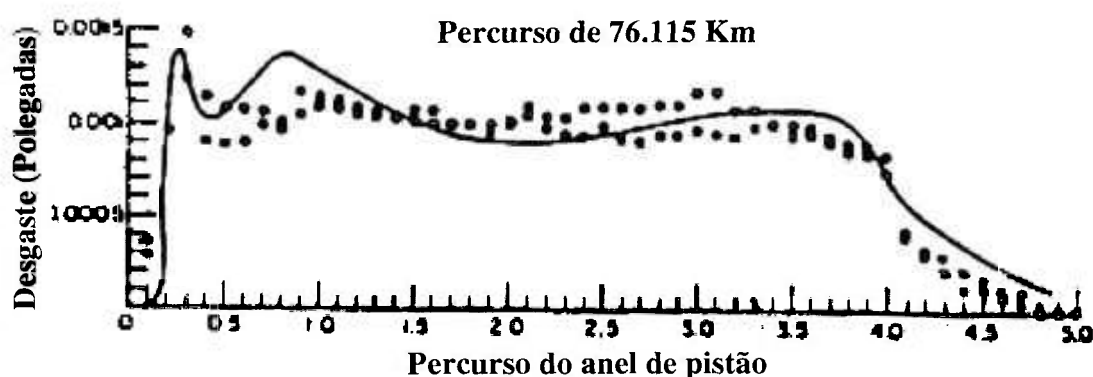


Figura 32 –Resultado de desgaste simulado e real, após veículo rodar 76.115 km

O desgaste foi calculado pela equação de desgaste de ARCHARD modificada para tornar o cálculo analiticamente possível.

$$P_{desg} = K \cdot \frac{w}{H \cdot A} \cdot 4 \cdot x \cdot N \quad [2-10]$$

Onde:

$P_{desg} = w/A$ = profundidade média de desgaste

A = área aparente de contato

x = comprimento do curso dos anéis

N = número de ciclos completos

Sendo que:

$$N = \frac{2}{60} \cdot v(rpm) \cdot \frac{dist.percor.(km)}{v(km/h)} \quad [2-11]$$

N = número de ciclos completos realizados

v(rpm) = velocidade em rotações do motor

v(km) = velocidade linear média do veículo

Velocidade

Esse fator é importante para determinar mudanças nas superfícies de contato. No que tange a formação de óxidos superficiais, tem-se que aumentando a velocidade de deslizamento, diminui-se o tempo disponível para a formação do óxido, mas favorece o aumento da temperatura superficial, que por sua vez pode favorecer a dissorção de eventuais filmes protetores fracos presentes na superfície, ou contrariamente, favorecer a reação de oxidação, dependendo de outras condições como regime de lubrificação e carga.

Em motor, na extensão do curso percorrido pelo pistão durante o movimento, existe sempre a interdependência da velocidade com a carga e, se houver ainda a ocorrência do regime de lubrificação misto podendo atingir a condição limite, a carga passa a fazer efeito no sentido de aumentar a temperatura superficial, devido ao aumento de atrito, chegando ao rompimento dos filmes protetores.

O desgaste do cilindro, na região de baixa velocidade dos anéis de motores Diesel, particularmente na região do ponto morto superior do anel de 1º canaleta, onde há altas cargas. Nesta região, a menor velocidade pode estar associada ao maior desgaste, acentuando a formação de calo ou aumentando a área polida, ou seja, isenta de brunimento.

De maneira geral, uma velocidade média de deslizamento menor pode ser interpretada como um intensificador de desgaste no anel e no cilindro, pois a região com baixa velocidade de deslizamento se tornará relativamente maior. Fato este foi comprovado por SCHNEIDER[58] e apresentado na figura 33, através de ensaio em motor Diesel a plena carga. Um método de ativação de superfícies (técnica radioativa), foi utilizado nesse estudo para a medição de taxas de desgaste dos anéis. Observa-se que há um desgaste maior quanto menor a velocidade de rotação.

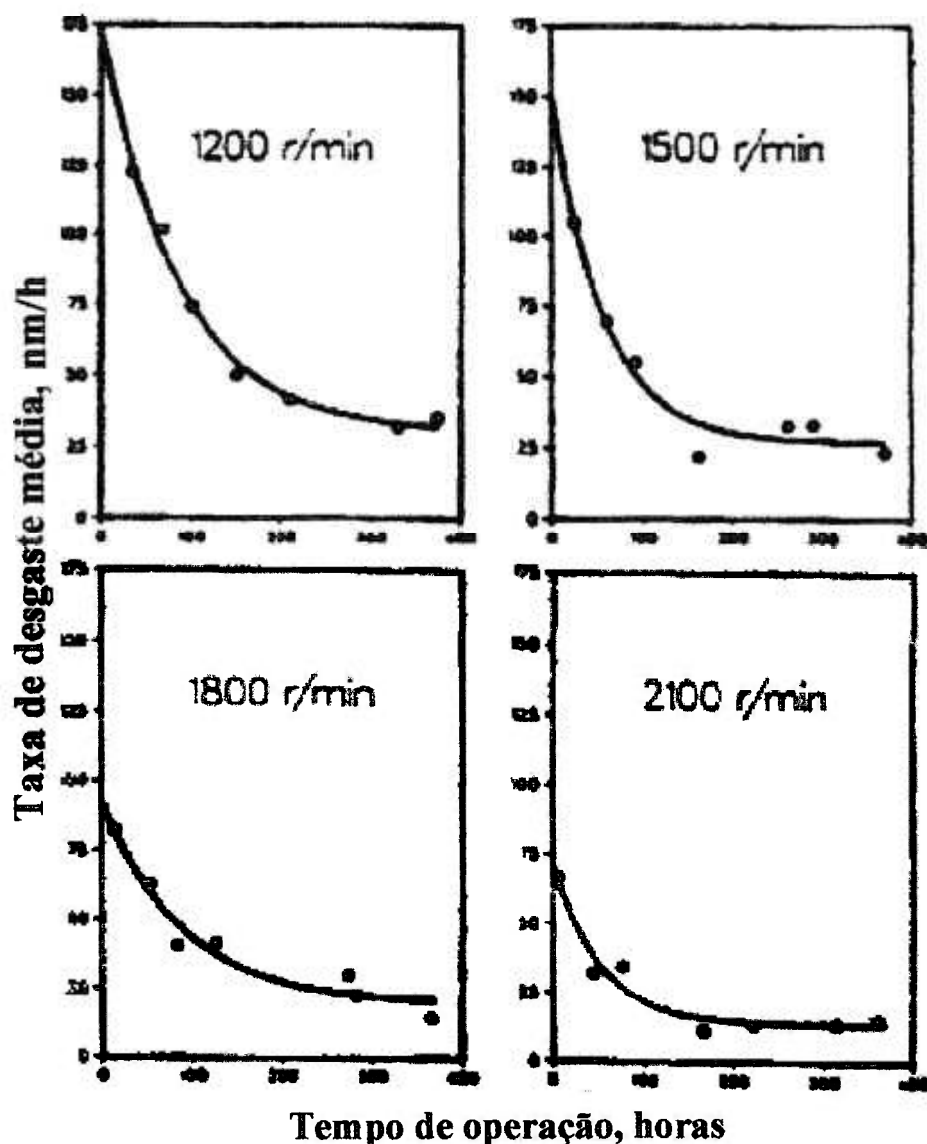


Figura 33 -Influencia da velocidade na taxa de desgaste

O gráfico indica que a taxa de desgaste é maior quanto menor a velocidade de rotação no período inicial de amaciamento. O desgaste progressivo é alcançado mais rapidamente quanto maior a velocidade de rotação do motor, pois o mesmo percurso é percorrido mais vezes em um mesmo tempo de ensaio. Além disso, nota-se que o período progressivo têm-se as menores taxas de desgaste quanto maior a velocidade de rotação do motor, novamente porque em baixas velocidades de deslizamento o percurso é menor.

Temperatura

Há de se conhecer a dissipação de energia térmica devida ao atrito gerado no deslizamento e o valor da temperatura para que ocorra uma aceleração significativa no processo de oxidação ou dissorção de filmes, pois são fatores que afetam o desgaste.

Em determinadas temperaturas, ocorre a dissorção de filmes protetores, porém acelera-se a formação de óxidos, protegendo a superfície de contato. Em temperaturas menores, os óxidos não são formados tão rapidamente, assim como os filmes não sofrem dissorção. Porém, se a temperatura for tal que haja a dissorção dos filmes e o óxido não possa ser formado rápido o suficiente, então a superfície estará desprotegida e um desgaste pronunciado poderá ocorrer por processo adesivo.

SO[32], em seu estudo de desgaste oxidativo de aço não lubrificado com equipamento pino-sobre-disco, observou que em geral, quando a temperatura média da área de contato aparente atingia uma faixa de 140° a 400°C, ocorria o desgaste oxidativo. A taxa de desgaste dependia da taxa de destacamento das camadas de óxido devido a um processo de fadiga.

Também verificou que o tipo de óxido variava com a temperatura. Na maioria dos casos, quando a temperatura média da superfície atingia 400°C, o desgaste mudava de severo para moderado, devido a formação de óxidos. Para temperatura menor que 140°C ocorre formação de $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$, nas faixas de 140 a 280°C ocorre Fe_3O_4 e acima de 280°C observa-se à presença de FeO .

Somente a temperatura não é um fator importante no desgaste, além das mudanças químicas mencionadas, pode provocar mudanças metalúrgicas e alterar as propriedades mecânicas como a dureza e tenacidade das superfícies envolvidas.

Elevadas pressões de combustão nos motores resultam em altas cargas nos anéis de pistão, e também em altas temperaturas do óleo lubrificante e conseqüentemente na diminuição da viscosidade, que reduz a espessura do filme de óleo durante os ciclos de admissão, compressão e exaustão. Esta grande variação na espessura do filme de óleo ao longo de cada ciclo é a razão das alterações do regime de atrito dos anéis de pistão, em condições de lubrificação limite até o hidrodinâmico.

2.6 Simulação do Mecanismo de Desgaste e Atrito

Entende-se por testes tribológicos aqueles que envolvem o estudo de atrito, lubrificação e desgaste de materiais ou componentes. De acordo com a norma DIN 50322[8], os testes ou simulação de desgaste podem ser divididos em seis categorias diferentes:

A figura 34 exemplifica testes em componentes de motor de acordo com esta classificação.

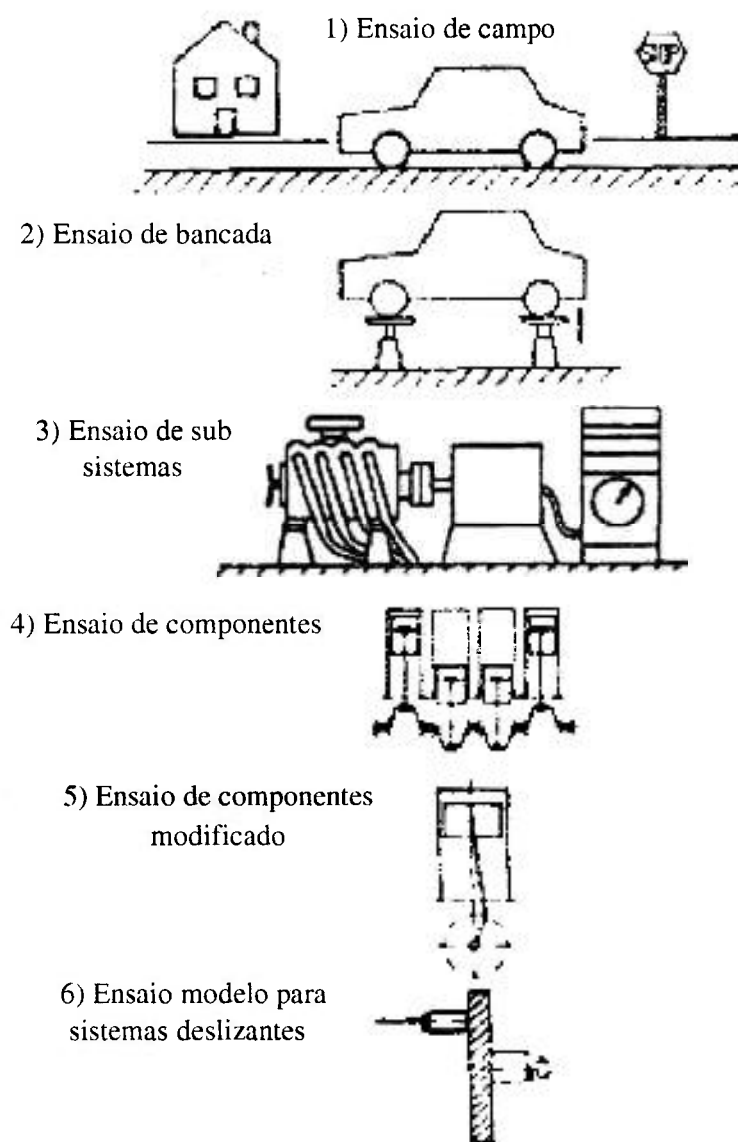


Figura 34 –Categorias de ensaio e simulação de desgaste

Ensaaios de campo ou dinamométricos para a avaliação do comportamento quanto ao desgaste e atrito de componentes de motores têm altos custos e consomem muito tempo. Assim, o uso de simuladores de laboratório é uma alternativa significativa.

Os testes com modelos padronizados são realizados em períodos mais curtos e sob cargas ou velocidades mais elevadas, a fim de avaliar os materiais ou lubrificantes sob condições extremas. Contudo, os procedimentos utilizados nestes testes podem fazer que a transferência dos resultados obtidos para o caso real se torne incerta. Nos testes padronizados, não ocorrem somente grandes taxas de desgaste, mas tem-se a atuação de diferentes mecanismos de desgaste. A possibilidade de transferir os resultados para o caso real só pode ser atingida se as mesmas condições de carregamento, a mesma estrutura do sistema tribológico e os mesmos mecanismos de desgaste predominarem.

Vários esforços tem sido feito para simular o comportamento tribológico de anéis e camisas, tentando-se chegar às condições reais de um motor. Diversas configurações de corpos de prova dotados de movimento de escorregamento são utilizados nos testes, entre ele o pino – disco[59], bloco – anel[60], anel – anel, esfera no plano, quatro esferas e arruelas[61] que giram sob determinada pressão.

Uma das dificuldades em se escolher um procedimento para testes de simulação está em como avaliar as condições impostas que representam a realidade. Várias abordagens têm sido utilizadas para a validação dos ensaios, uma delas baseia –se no surgimento da camada branca, microconstituente encontrado em superfícies de aços e ferros fundidos que sofreram *scuffing*. Entretanto, as relações entre o surgimento da camada branca e a falha por *scuffing* ainda não estão muito claras, portanto, este critério não parece ser muito útil.

2.6.1 Análises da Superfície de Desgaste

De modo geral o desgaste pode analisado por[38]:

- Quantificação
- Análise por mecanismos de desgaste predominantes

2.6.1.1 Quantificação do desgaste

Taxas de desgaste

A quantificação do desgaste é, em geral feita por medição de taxas de desgaste, normalmente por distância percorrida (g/m ou mm/m) ou tempo (mm/h ou g/h).

Um procedimento comum para a obtenção de taxas de desgaste de anéis em motores é a medição de variações lineares e de massa, por determinado tempo de ensaio. Em tribômetros, como são chamadas as máquinas de ensaio de desgaste em laboratório, a medição mais comum é a perda de dimensão linear ou perda de massa, por determinada distância percorrida.

Perfilometria

Uma outra forma de quantificação do desgaste é através de perfilometria da face de contato dos anéis e da medição da forma geométrica do furo dos cilindros. Com este método, é possível observar as regiões que sofreram maior perda de dimensão linear e que, portanto tiveram maior contato durante o ensaio.

Para cilindros, um inconveniente na realização da perfilometria da parede interna está relacionado com a deformação geométrica que essas paredes podem apresentar, por estarem sujeitas a cargas térmicas diferenciadas ao longo da parede durante o ensaio. As deformações mascaram a real perda de material.

Fragmentos

Conhecido também por *wear debris*, no caso de sistemas lubrificados efetua-se análises das partículas presentes no óleo lubrificante por ferrografia. Essa é uma análise difícil, como observado por HUTCHINGS[38], uma vez que sempre surgem dúvidas quanto à origem dos fragmentos, ou seja, não se tem certeza que o fragmento encontrado é uma partícula arrancada de determinado componente do sistema, ou então trata-se de um contaminante. No caso de fragmentos oxidados, torna-se ainda mais complicado uma vez que este pode ser metálico quando arrancado da superfície. Em sistemas lubrificados, o lubrificante pode adsorver a partícula, tornando as informações distorcidas.

Segundo WRIGHT, o desgaste da superfície leva à produção de partículas através de uma série de eventos característicos por adesão e mecanismos de transferência de partículas, ou por um processo mais direto de produção de partículas, semelhante à usinagem ou em certos casos, falha em forma de fadiga superficial.

2.6.1.2 Análises dos Mecanismos de Desgaste

A maneira mais comum de análise dos mecanismos é através da investigação microscópica das superfícies de desgaste, na qual as determinadas regiões são submetidas a análise por microscopia óptica e de varredura eletrônica, conhecida como MEV. Utiliza-se também a microscópio eletrônico de transmissão MET para observar detalhes da estrutura cristalina das superfícies.

A microscopia óptica possibilita a visualização genérica do mecanismo de desgaste predominante, como riscamento, trincamento, formação de *pits* ou alterações térmicas na superfície.

A microscopia eletrônica de varredura tem o recurso de profundidade de foco, que permite uma visão mais detalhada da superfície de desgaste, podendo-se observar as regiões de aderência de material, deformações plásticas, riscamento por partículas duras ou indicações sobre eventuais fenômenos de superfície. A figura 35 mostra de maneira esquemática a interação do feixe de elétrons com a amostra sólida e as profundidades típicas de escape[67].

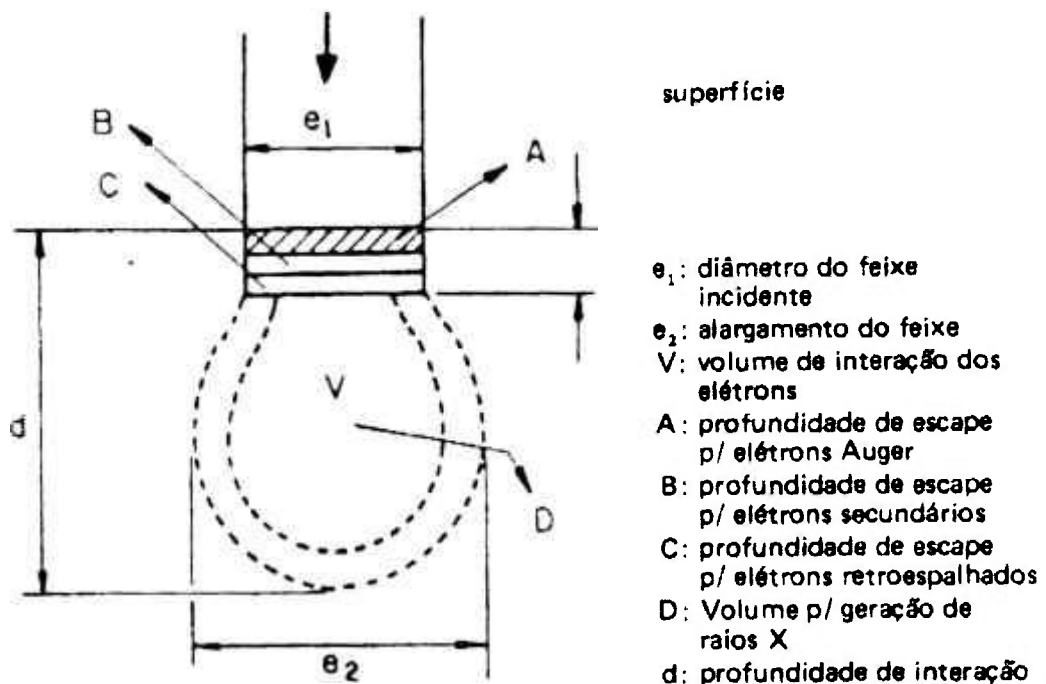


Figura 35 – Esquema da interação do feixe de elétrons com a amostra e as profundidades típicas de escape

A microscopia de transmissão eletrônica é utilizada para estudar as estruturas dos materiais próximo às superfícies de desgaste e também observar possíveis deformações.

Outras técnicas analíticas também são utilizadas, como a Espectrometria por Raios-X (EDS) e por comprimento de Ondas (WDS), para a obtenção da composição química pontual dos materiais identificados durante as análises microscópicas.

O desgaste devido à ações químicas, ou triboquímicas, não é particularmente considerado por WRIGHT como mecanismo de desgaste, pois as reações químicas superficiais, de modo geral, ocorrem em todos os mecanismos de desgaste, e sempre deverão ser acompanhados de ação mecânica que remova os produtos formados, para que se caracterize o desgaste. Ainda, efeitos químicos podem agir de dupla maneira em um processo de desgaste: podem acelerar, através de corrosão, ou ao contrário, reduzir o desgaste, através de formação de filmes protetores que permanecem adsorvidos nas superfícies. Porém, sob esse ponto de vista, a adesão também não seria um mecanismo de desgaste, uma vez que não há destacamento de material em um processo de adesão. A adesão, bem como as ações triboquímica podem ser interpretadas como mecanismo que não promovem, mas sim que causam o desgaste.

No caso do tribossistema anel de pistão – camisa de cilindro, pesquisadores como EYRE, BARBER e LUDMA consideram que o mecanismo principal atuante no desgaste seja a abrasão, devido a característica de riscamento apresentada na superfície de contato.

3 MATERIAIS

3.1 Anéis de Pistão

3.1.1 Material Base

Os tratamentos superficiais de molibdênio e cromo composto utilizaram como material de base o ferro fundido nodular martensítico. Para o tratamento termoquímico de nitretação, foi empregado o aço inoxidável martensítico com alto teor de Cromo. A composição química e as propriedades mecânicas dos materiais base estão descritas nas tabela 1 e 2.

Tabela 3.1 – Composição química dos materiais de base [44]

Material Base	Composição Química Nominal (% massa)									
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cr	V	Mg
Ferro Fundido Nodular	3,80	2,65	0,50	0,08	0,02	0,15	0,35			0,45
Aço Inoxidável Martensítico	0,85	0,17	0,70	0,02	0,15	1,15		17,5	0,1	

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas dos materiais de base[44]

Material Base	Propriedades Mecânicas		
	Dureza	Módulo de Ruptura	Módulo de Elasticidade
	HRC	MPa	MPa
Ferro Fundido Nodular	36	1.300	165.000
Aço Inoxidável martensítico	40	1.230	210.000

As figuras 36 e 37 apresentam as microestruturas de ambos materiais base.

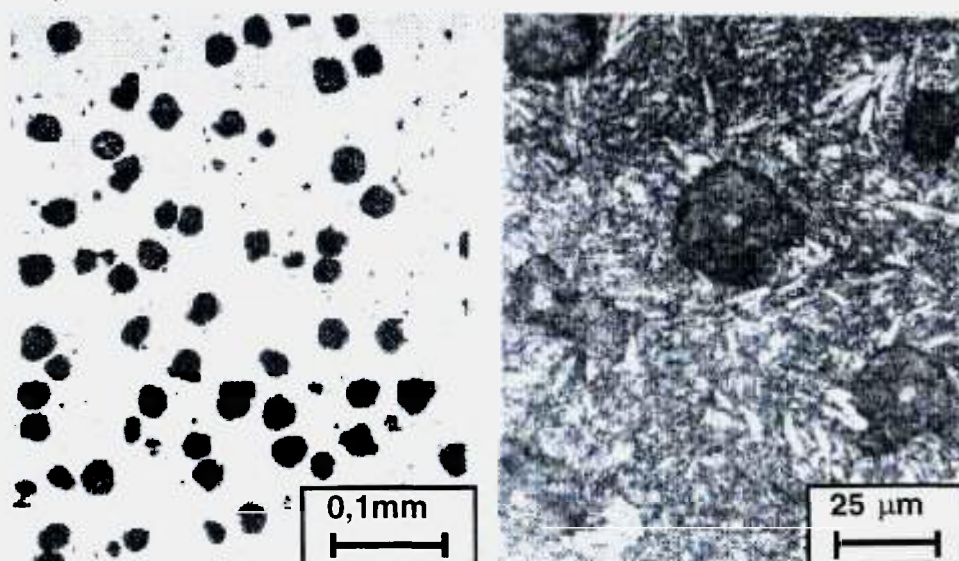


Figura 36 –Microestrutura do ferro fundido nodular sem e com ataque de Nital [44]



Figura 37 –Microestrutura do aço inoxidável martensítico Ataque Marble [44]

3.1.2 Tratamentos Superficiais dos Anéis de Pistão

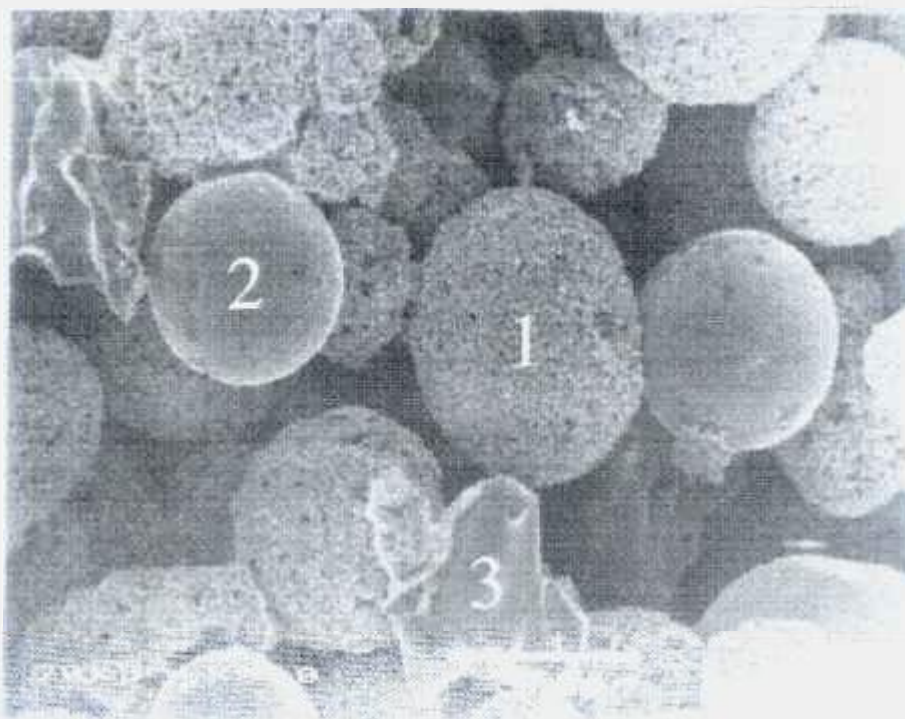
Como os anéis de pistão de primeiro canaleta destinam-se a aplicações de alto desempenho, estudou-se os tratamentos superficiais de três diferentes processos com materiais contendo partículas duras de Carbonetos e Óxidos.

A tabela 3.3 apresenta as principais características dos tratamentos superficiais.

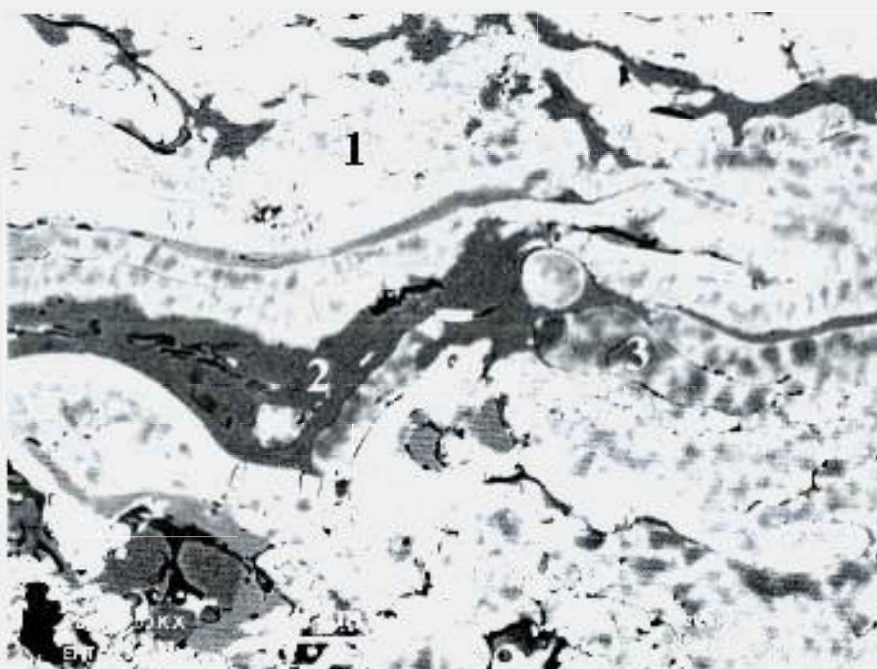
Tabela 3.3 – Principais características dos tratamentos superficiais

Tratamento Superficial	Identificação	Camada			Composição			
		Espessura	Dureza Superficial	Porosidade	Partícula dura	Dureza	Tamanho	Fração volumétrica
		microns	HV	% área		HV	microns	%
Molibdênio	Mo	100	380	3	carbeto de molibdênio	1300	lamelas de 10 a 50	15
Nitretado	Nitret	55	1170	0	carboneto de cromo	1300	1 a 5	12
Cromo compósito	Cr Comp	175	980	20	óxido de alumínio	1500	1 a 2	5

A figura 38 ilustra a forma e composição da mistura de pós Mo-NiCr-MoC e a figura 39 ilustra a seção transversal do tratamento superficial tipo inlaid com a liga após a metalização por plasma.



**Figura 38 – Forma e composição da mistura de pós
(1) Mo (2) NiCr (3) MoC – Imagem de Elétrons Secundários**



**Figura 39 – Aspecto da microestrutura - secção transversal
(1) Mo (2) NiCr (3) MoC – Imagem de elétrons secundários**

As figuras 40 e 41 apresentam a seção transversal da camada nitretada e perfil de microdureza resultante do material tratado pelo processo de nitretação em atmosfera gasosa seguido por um processo químico de fosfatização. A espessura da camada nitretada é determinada na região de transição, ou seja, na posição que a microdureza está em torno de 700 HV em relação a superfície.

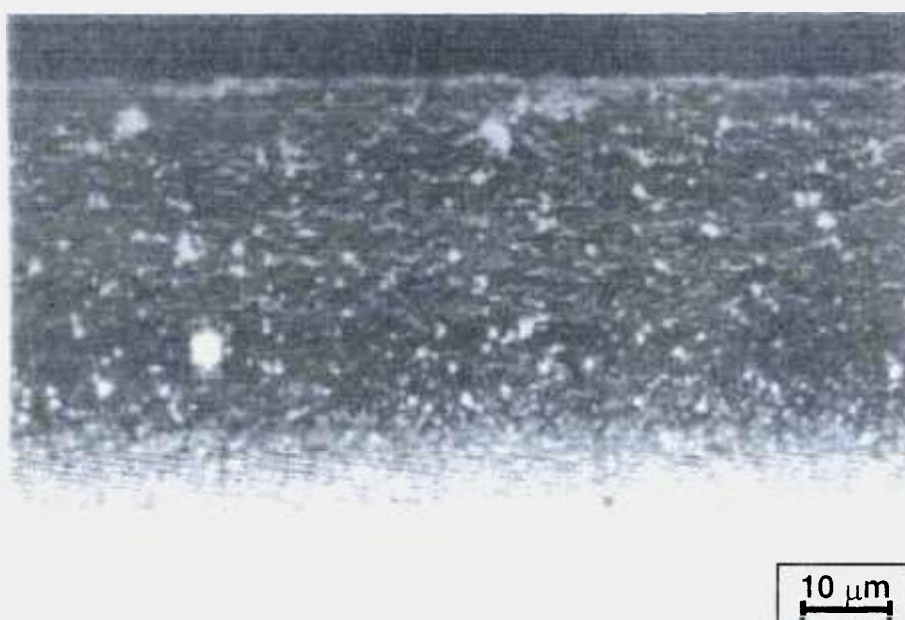


Figura 40 – Aspecto da camada nitretada – Ataque Nital

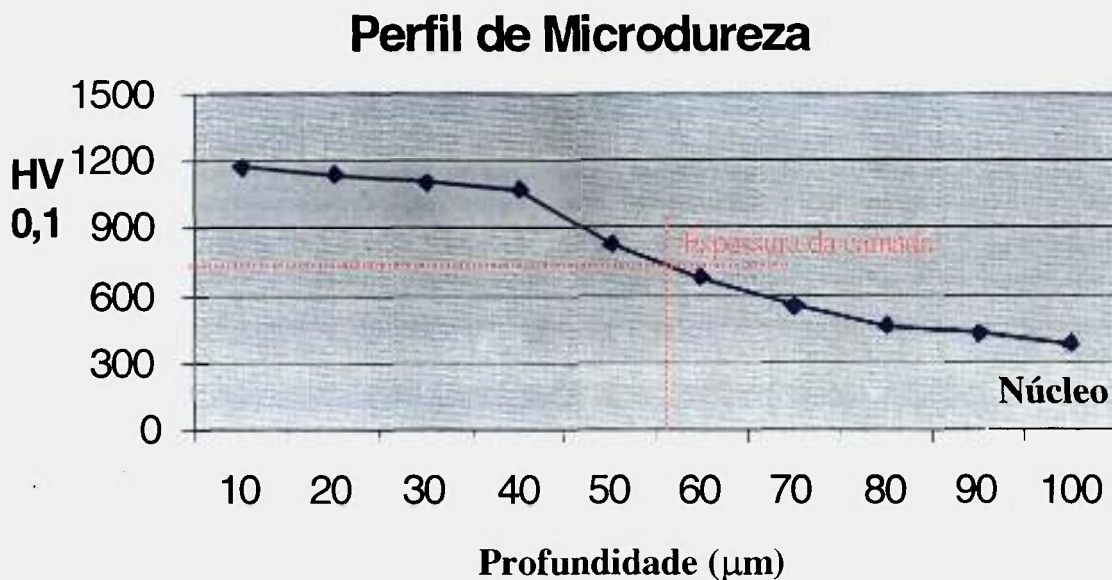
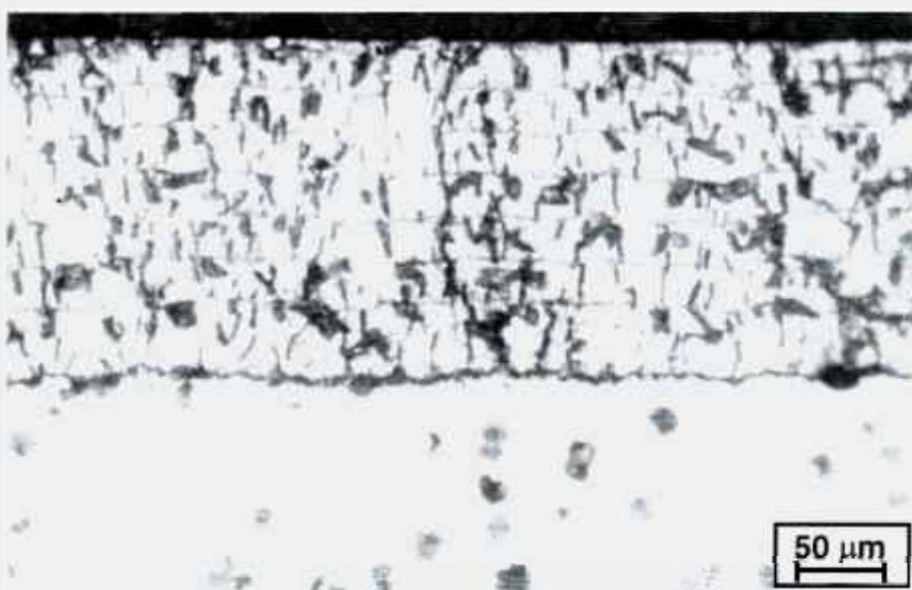


Figura 41– Perfil de microdureza camada nitretada

A figura 42 apresenta a seção transversal do tratamento superficial de cromo compósito, onde se utilizou basicamente o processo de eletrodeposição composto de uma série de camadas sobrepostas e rede de microfissuras com partículas duras impregnadas.



**Figura 42 – Aspecto da camada de Cromo compósito
Ataque HCl 1:1**

3.1.3 Requisitos Geométricos dos Anéis de Pistão

Ovalização dos Anéis de Pistão

A tabela 4 apresenta os valores limites de ovalização na condição de partida dos anéis de pistão e respectivo tratamento superficial de acordo com a ISO 6622-1. A ovalização positiva é a forma recomendada de distribuição de pressão para veículos que trabalham com rotações acima de 6500 rpm.

A ovalização ou circularidade foi medida através do equipamento Formtest – Mahr Perthen utilizando um filtro II e magnitude 100:1, e com grau de incerteza de $\pm 0,04\text{mm}$.

Tabela 3.4 – Valores limites de ovalização dos anéis de pistão (mm)

Especificação	Min.	Max.
ISO 6622-1	+0,05	+0,85
Molibdenio	+0,06	+0,11
Nitretado	+0,45	+0,54
Cromo Composito	+0,05	+0,10

Perfil dos Anéis de Pistão

A figura 43 ilustra os perfis do pacote de anéis de pistão para os três tratamentos superficiais utilizados nos ensaios de motor em dinamômetro.

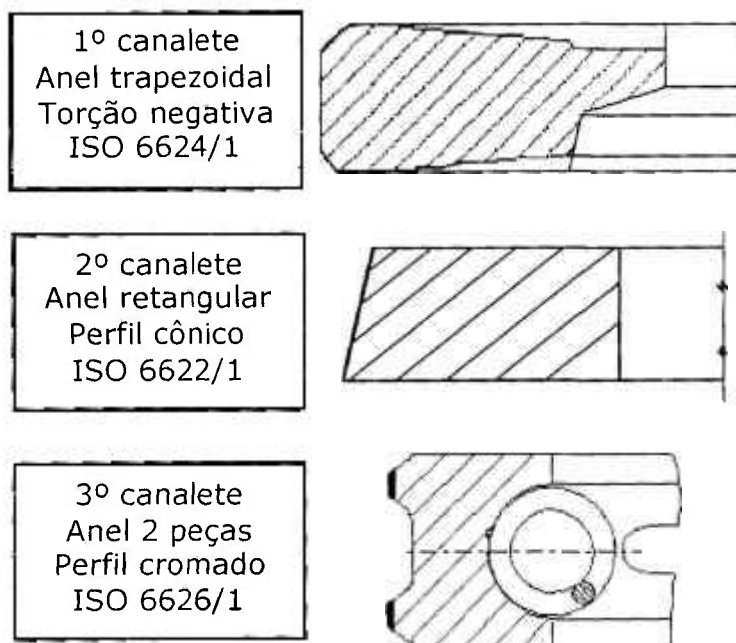


Figura 43 – Perfis do pacote de anéis

O anel de primeiro canaleta tem o perfil abaulado assimétrico obtido por um processo de retifica com rebolo perfilado, seguido por uma lapidação.

Acabamento Superficial dos Anéis de Pistão

As figuras 44 a 46 apresentam o aspecto da superfície de contato de cada tratamento superficial através de imagem de elétrons secundários (MEV).

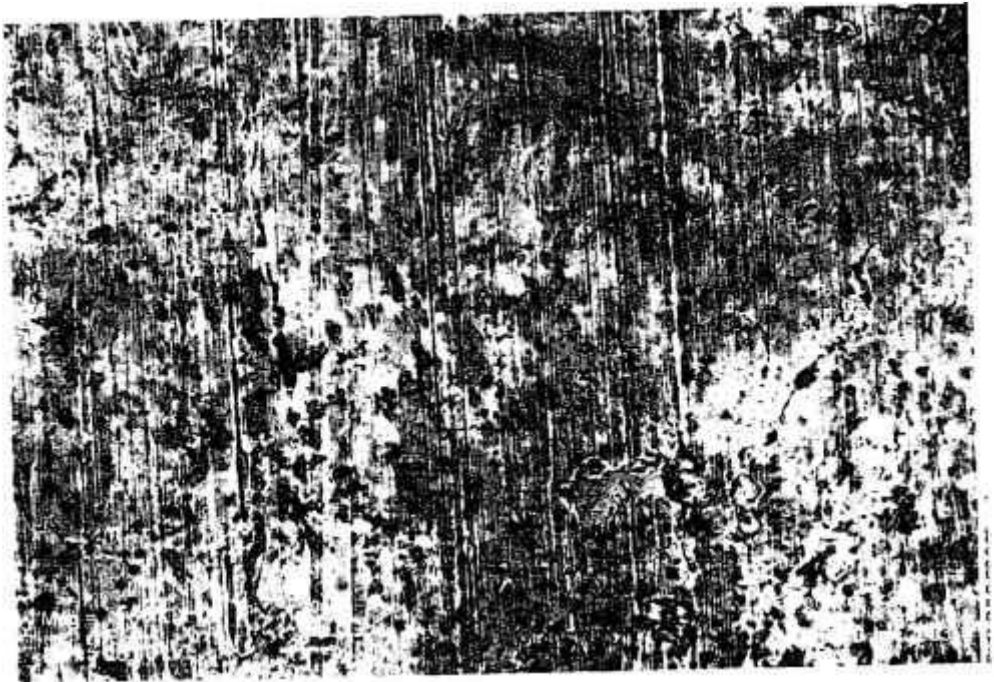


Figura 44 – Aspecto da superfície de contato com tratamento de Molibdênio.

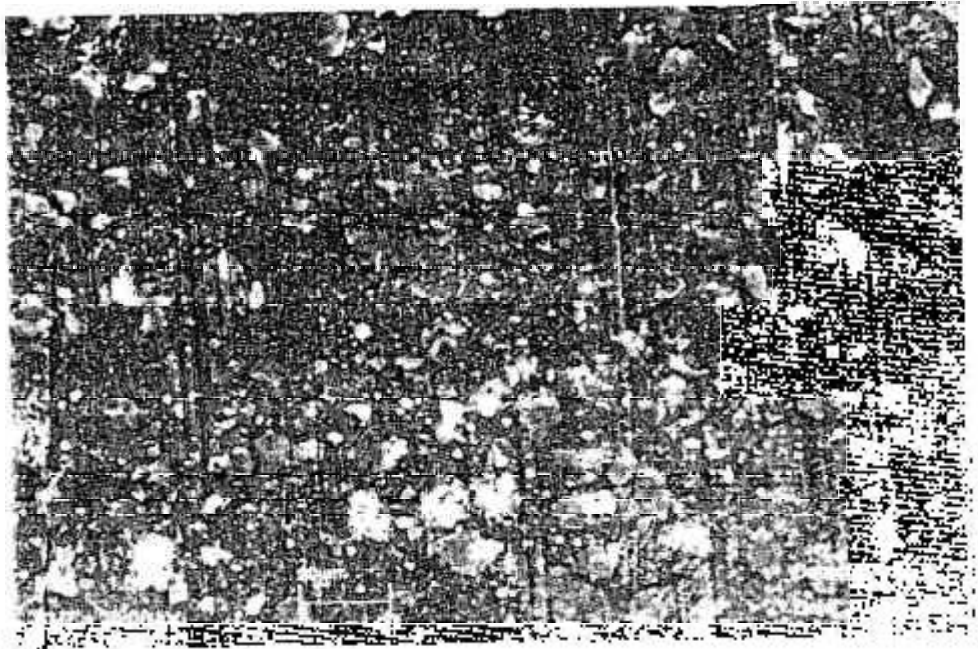


Figura 45 – Aspecto da superfície de contato com tratamento de Nitretação.

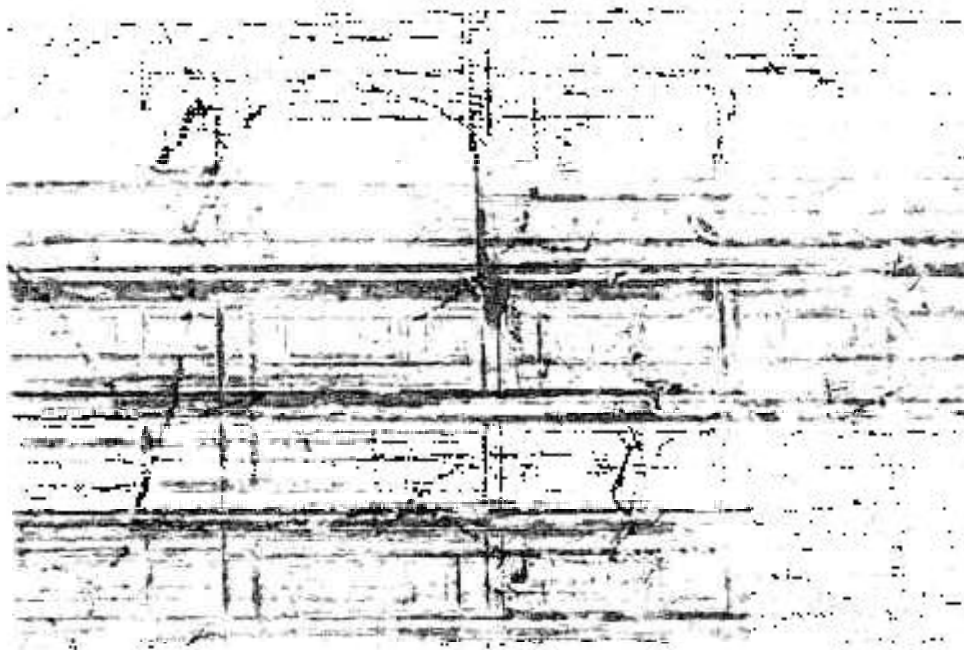


Figura 46 – Aspecto da superfície de contato com tratamento de Cromo composto.

Rugosidade da Superfície de Contato dos Anéis de Pistão

A figura 47 apresenta os perfis de rugosidade, no sentido de deslizamento das superfícies de contato dos três tratamentos superficiais. O equipamento utilizado foi um rugosímetro Perhen S6P.

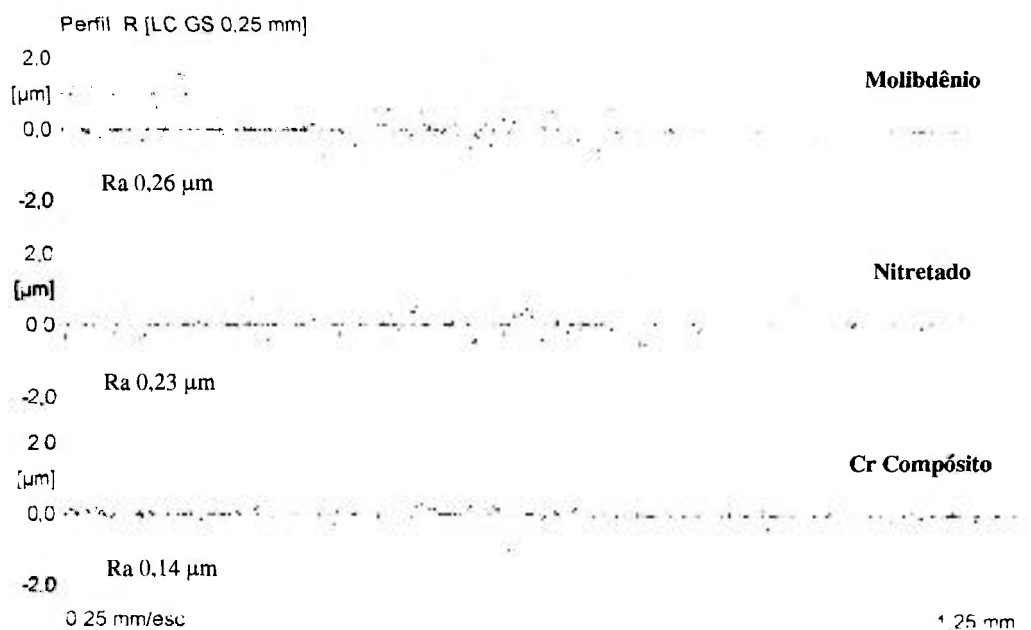


Figura 47 – Aspecto dos perfis de rugosidade dos três tratamentos superficiais

3.2 Camisa de Cilindro

3.2.1 Material Base

As camisas de cilindro foram confeccionadas em ferro fundido cinzento, pelo processo de fundição por centrifugação. A microestrutura está apresentada pela tabela 3.5 e figura 48.

Tabela 3.5 - Composição química (% em massa) [44]

C	Si	Mn	P	S	Cr
3,40	2,3	0,80	0,5	0,06	0,4

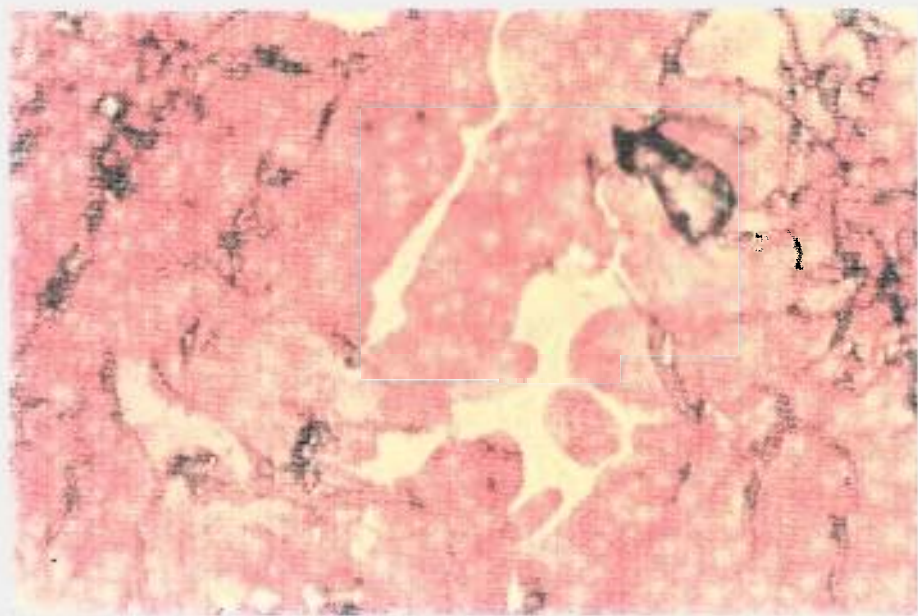


Figura 52 – Matriz de ferro fundido cinzento para cilindro com ataque térmico

Característica da microestrutura [44]

Perlítica com rede aberta de Esteadita, e 5% máximo de Ferrita

Tensão de ruptura 260 MPa

Dureza 250 HB (262 HV)

3.2.2 Requisitos Geométricos das Camisas de Cilindro

Ovalização dos Cilindros

A figura 49 ilustra o gráfico da circularidade típica nas alturas de 30 e 90mm topo (região do flange próximo ao PMS) das camisas de cilindro utilizadas nos ensaios de motor em dinamômetro.



Figura 49 - Gráfico de circularidade nas alturas 30 e 90mm

Acabamento Superficial dos Cilindros

A figura 50 apresenta o aspecto do brunimento para cilindros de motor Diesel. As características do brunimento e os valores médios obtidos estão descritos abaixo:

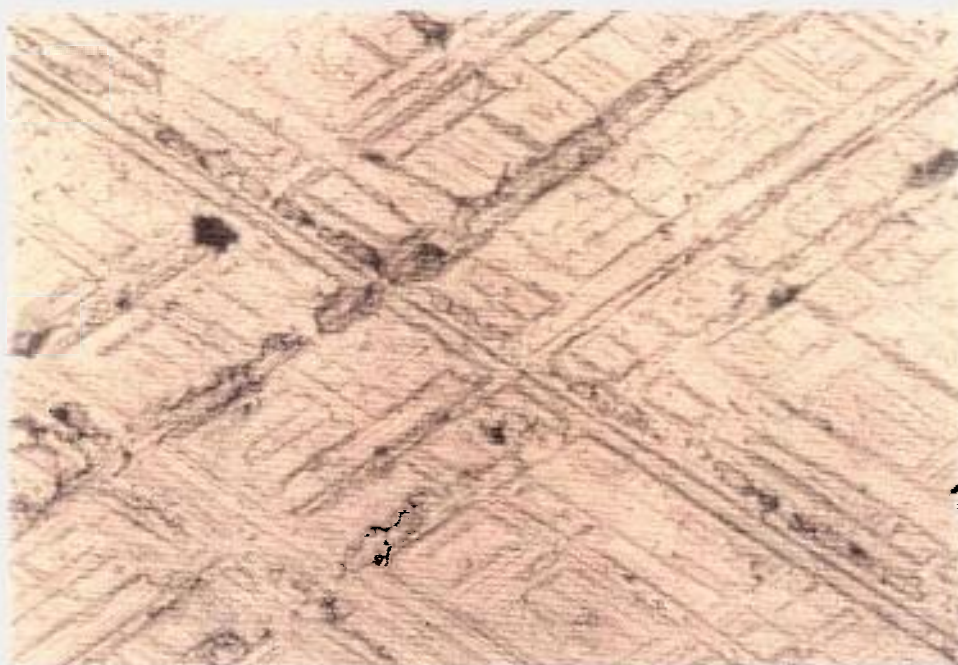


Figura 50 - Aspecto do brunimento 100x

Características do brunimento

Rugosidade (Rz)	=	9,15 μm
Plateau honing	=	40 %
Angulo	=	65°
Tipo de pedra abrasiva	=	Cerâmica

Plateau honing – porcentagem de superfície de apoio em relação ao total quando se faz um corte imaginário a uma determinada profundidade do perfil de rugosidade.

4. Métodos

4.1 Ensaio de motor Diesel em dinamômetro

Nos ensaios de desgaste foi utilizado um motor *Mid-Range Diesel* (MRD) que são conhecidos na América do Norte como *Heavy Duty* (HD), e são mais comumente empregados em caminhões, aplicações industrial e agrícola [16].

O motor MRD 3.9 litros tem quatro cilindros (camisa) em linha, injeção direta com gerenciamento mecânico.

Ciclo:	Diesel – 4 tempos
Torque:	345 Nm a 1600 rpm
Potência:	86 KW a 2800 rpm
Pressão de compressão:	~ 2.0 MPa
Pressão do turbo:	1,3 MPa
Pressão Nominal dos anéis:	0,20 MPa
Diâmetro/Curso do pistão:	0,85
Óleo lubrificante:	SAE 15W40 – API CE
Temperatura do óleo:	110°C
Temperatura de escape:	550°C

Este motor foi acoplado a um dinamômetro Schenk W230 com potência máxima 230 kW, rotação entre 3000 a 7500 rpm e torque máximo de 750 Nm a 3000 rpm. O procedimento de ensaio compreende um ciclo de plena carga com rotação na potência máxima durante um período de 500 horas, o percurso dos anéis de pistão de primeiro foi de 20.160 km.

A configuração dos anéis de primeiro canaleta e estrutura dos ensaios estão descritas na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Configuração e posição de montagem nos cilindros dos anéis de pistão

Motor	Metal Base	Tratamento Superficial	Posição de Montagem
1	Ferro Fundido Nodular	Cr Comp	1 - 3
		Molibdenio	2 - 4
2	Fofo Nodular	Cr Comp	1 - 3
	Aço Inoxidavel Martensitico	Nitretado	2 - 4

Óleo Diesel

O óleo diesel aditivado metropolitano utilizado nestes testes de motor foi fornecido pela Atlantic Ypiranga e tem as seguintes características:

Massa específica a 20°C: 0,8577 Kg/m³

Ponto de fulgor: 53,5°C

Teor de enxofre: 0,3%

Óleo Lubrificante

As características do óleo lubrificante SAE 15W40 API CE utilizado nos testes de motor e bancada, fornecido e analisado pela Shell do Brasil/RJ estão descritas abaixo. A tabela 3.7 apresenta os resultados de análise química do óleo utilizados nos testes tribológicos.

Tabela 3.7 - Análise Química por Emissão Óptica (ppm)

Fe	Cr	Pb	Cu	Sn	Al	Si	Na	Mg	Ca	P	Zn	Mo
2	0	6	7	6	5	6	7	1283	29	887	996	1

Análise Química por Infravermelho

Oxidação 0,01 A/.1mm

Fuligem 0,00 A/.1mm

Água < 0,10 % em peso

Glicol < 0,08 % em peso

Análise Físico-Química

TAN 2,40 mg KOH/g

TBN 6,19 mg KOH/g

Visc. a 40°C 123,1 cSt

Visc. a 100°C 14,35 cSt

Índice de Viscosidade 117

4.1.2 Ensaio de Desgaste e Atrito em Bancada

Os ensaios de bancada foram realizados em equipamento *Falex*, com geometria tipo *block on ring* modificado para fixar um segmento de anel de pistão de aproximadamente 10 mm, testado contra um anel padrão de ferro fundido cinzento perlítico similar ao empregado nas camisas de cilindro, com dureza média de 98 HRB (240 HV), 35mm de diâmetro, retificado com rugosidade de 0,6 μm Ra. A figura 51 representa o equipamento e as condições de montagem para os ensaios de desgaste e atrito.

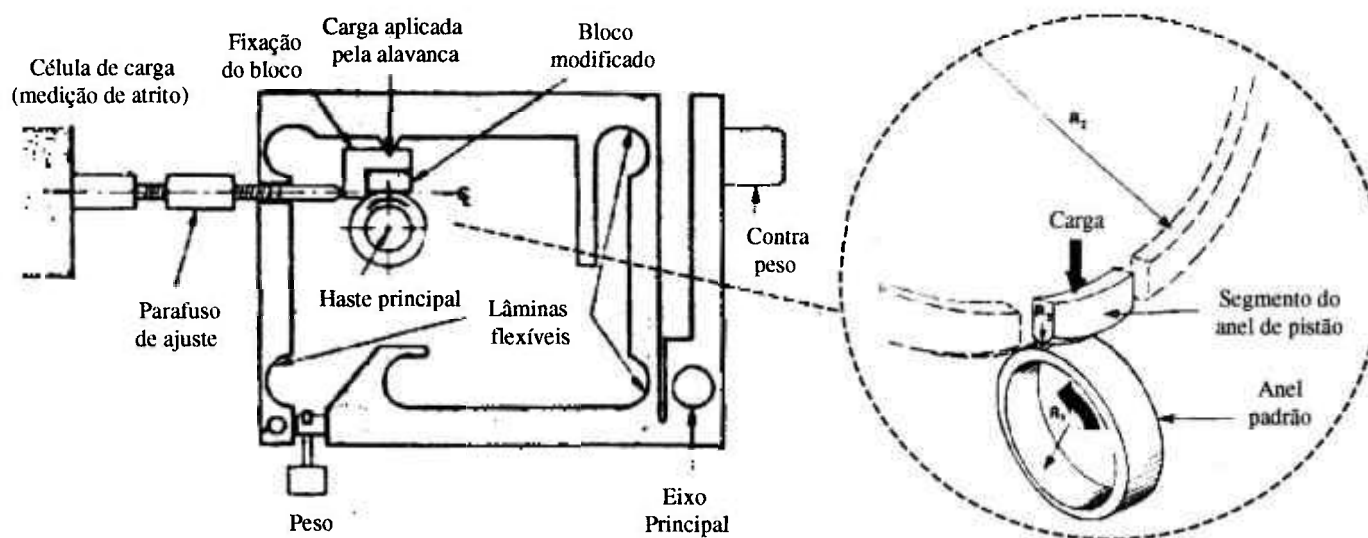


Figura 51 - Esquema de montagem do equipamento Falex, e as condições de fixação do segmento de anel de pistão

4.1.2.1 Ensaio de Atrito

Os ensaios de atrito foram realizados no equipamento Falex, mas como este procedimento que não requer o sistema de lubrificação, aplicam-se apenas algumas gotas de óleo lubrificante entre os pares contra atritantes de modo a contribuir para o início dos testes. O anel padrão empregado foi confeccionado em ferro fundido cinzento, temperado e revenido com dureza em torno de 32 HRC (318 HV).

Condições para o teste de atrito:

Carga	incrementos de 135N a cada 30 segundos
Velocidade	500 rpm
Nº de réplicas	5 unidades

4.1.2.2 Ensaio de Desgaste

A tabela 6 apresenta os modos e os respectivos parâmetros utilizados (fatores) nos testes de desgaste. Neste ensaio, utiliza-se um reservatório de óleo lubrificante no qual o anel padrão fica parcialmente mergulhado (semibanho).

- 4 Fatores
- 2;2;2;3 Níveis dos fatores
- 90 testes
- 5 réplicas
- Percurso de 5,5 Km

Tabela 3.8– Modos de ensaio de desgaste

Modo	Carga (N)	Velocidade (rpm)	Temperatura (°C)	Material
I	334	273	25	Mo
II	334	273	25	Nitret
III	334	273	25	CrComp
IV	334	273	100	Mo
V	334	273	100	Nitret
VI	334	273	100	CrComp
VII	334	820	100	Mo
VIII	334	820	100	Nitret
IX	334	820	100	CrComp
X	667	273	25	Mo
XI	667	273	25	Nitret
XII	667	273	25	CrComp
XIII	667	273	100	Mo
XIV	667	273	100	Nitret
XV	667	273	100	CrComp
XVI	667	820	100	Mo
XVII	667	820	100	Nitret
XVIII	667	820	100	CrComp

Obs: A velocidade linear correspondente para as rotações 273 e 820rpm são respectivamente 0,5 e 1,5 m/s. O valor de temperatura refere-se ao óleo lubrificante no reservatório.

4.2 Metodologia de Análise

Espessura radial dos anéis de pistão

A variação da espessura radial dos anéis de pistão foi medida através de um dispositivo específico, que lê diretamente a espessura radial através de um relógio comparador milesimal e incerteza de 0,002 mm, com medições antes e após os ensaios em 5 pontos distribuídos ao longo da circunferência do anel: 0, 90, 180, 270 e 360 graus da folga entre pontas.

Folga entre pontas dos anéis de pistão

A figura 52 representa a variação da folga entre pontas (*gap*) que determina o desgaste. Colocando-se o anel de pistão em um padrão com o diâmetro nominal do cilindro, tem-se valor do gap através de uma lâmina cônica graduada introduzida entre as extremidades do anel.

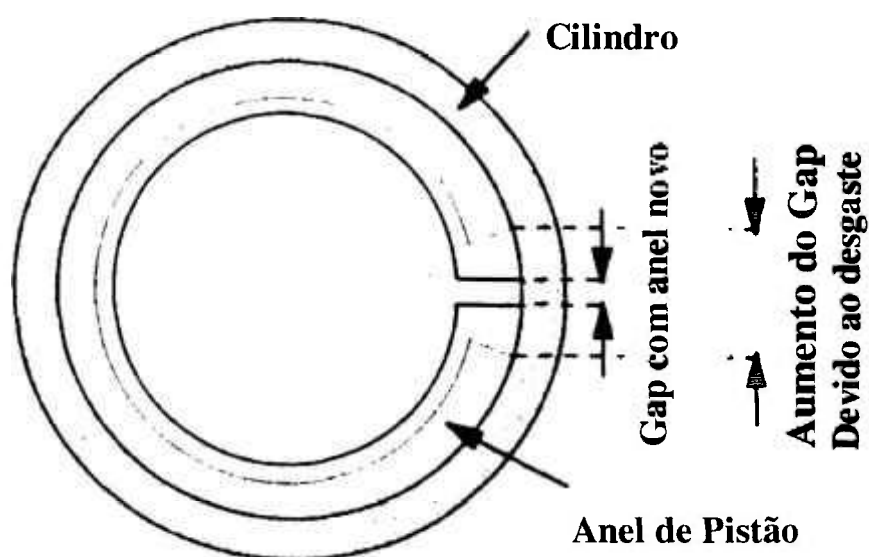


Figura 52 – Determinação da folga entre pontas utilizando padrão com diâmetro nominal do cilindro

Área espelhada das camisas de cilindro

Seciona-se a camisa de cilindro e, com auxílio de um papel vegetal milimetrado, demarca-se as áreas isentas de brunimento. A área espelhada é determinada dividindo-se esta pela área total, considerada pelo diâmetro e o curso do pistão. A figura 53 ilustra as áreas espelhadas nas camisas de cilindro.

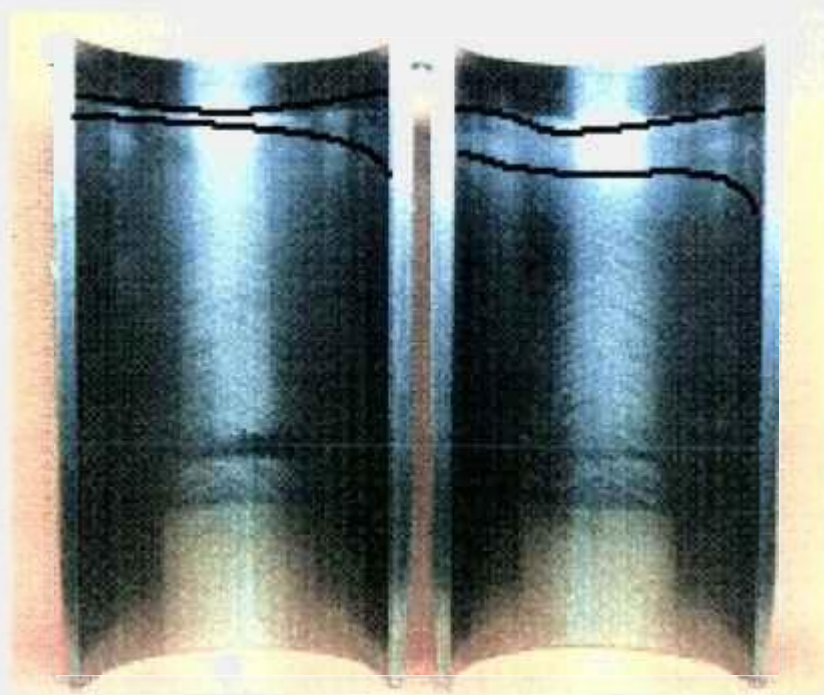


Figura 53 – Aspecto da área espelhada de uma camisa de cilindro

Análise da superfície de contato dos anéis de pistão

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Microscópio eletrônico de varredura Jeol T330
- Sistema de microanálise por raio-X Tracor Northen (figura 54)



Figura 54 – Microscópio Eletrônico de Varredura e o sistema de micro análise por raio X

As análises das superfícies de contato dos anéis de pistão através de microscopia eletrônica de varredura após os ensaios de desgaste em motor e bancada possibilitaram determinar um padrão fotográfico com as características dos mecanismos de desgaste. A figura 55 apresenta o padrão fotográfico com os mecanismos de desgaste dos tratamentos superficiais.

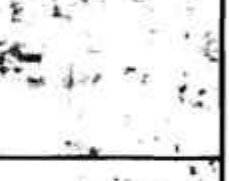
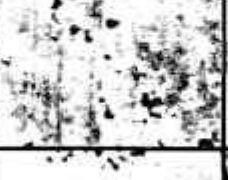
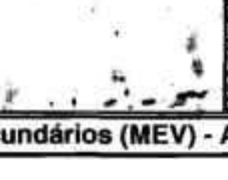
PADRÃO FOTOGRÁFICO - CARACTERÍSTICAS DAS SUPERFÍCIES DE DESGASTE					
Tratamento Superfície	Mecanismo	Abrasivo	Fadiga de Superfície		Triboquímico
	Níveis	Riscamento	Deformação Plástica	Destacamento de Material	Resíduo de Lubrificante
Molibdênio	Baixo				
	Moderado				
	Alto				
Nitretado	Baixo				
	Moderado				
	Alto				
Cromo Compósito	Baixo				
	Moderado				
	Alto				
Imagens de Elétrons Secundários (MEV) - Aumento 1000x					

Figura 55 – Características dos mecanismos de desgaste dos tratamentos superficiais de anéis de pistão

Área de contato elíptica dos segmentos de anéis de pistão

A determinação do raio da elipse para o cálculo da área de contato (desgaste) nos segmentos dos anéis de pistão foram obtidas através do microscópio óptico Leitz Metalloplan com analisador de imagem Bueler Omnimet II.

Perda de massa dos anéis padrão

Os valores de massa dos anéis padrão antes e após o teste de desgaste em bancada foram determinados em uma balança analítica Mettler com resolução de 0,00001 gramas. Com esta resolução permite quantificar a remoção de material da superfície.

Análise Estatística

O Software MINITAB 2000 versão 13 (Figura 56) fornece uma gama de opções para análise estatística de dados. Para este trabalho, utilizou-se o método de comparação múltiplas com intervalo de confiança de 90% e técnicas de planejamento de experimento para determinar os fatores considerados como as formas e interações.



Figura 56 Representação da tela do Software Minitab 2000

Análise de Óleo Lubrificante

As análises foram realizadas pelo laboratório da Shell/RJ, que estabelece e implementa um programa de análises de óleo, para manter o uso dentro de padrões técnicos aceitáveis para uma adequada lubrificação. O diagnóstico de falhas nos componentes de motor são monitorados pela lubrificação, e pode ser comprometida devido ao desgaste e/ou quebra prematura antes do período de troca.

5 RESULTADOS

A legenda abaixo representa as cores indicadas nos gráficos de cada material utilizado nos tratamentos superficiais, sendo que os quadrados com os centros esbranquiçados identificam os anéis padrão e também os cilindros.

Tratamento Superficial	Material	Anel Padrão
	Molibdênio	
	Nitretado	
	Cromo Compósito	

5.1 Teste de Desgaste em Bancada

A tabela 5.1 e a figura 57 apresentam os valores de desgaste referentes ao desgaste dos tratamentos superficiais dos segmentos de anéis de pistão após percorrerem uma distância de 5,5 km de deslizamento, que estão indicados pela área da elipse de desgaste ao final dos ensaios. Os anéis padrão foram avaliados em função da perda de massa. Para ambas grandezas, utilizou-se um nível de 95% de intervalo de confiança.

Tabela 5.1 – Valores de desgaste dos segmentos de anéis de pistão e dos anéis padrão após ensaio de bancada

Resultados dos Testes de Desgaste em Bancada																			
Modos		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII
Área de Contato (mm ²)	Max.	2.56	1.31	0.96	3.54	1.18	1.07	3.26	1.40	1.23	3.26	1.66	1.80	3.81	1.78	1.81	3.41	1.86	1.65
	Min.	2.26	1.07	1.11	2.93	1.01	0.92	2.74	1.08	0.97	3.16	1.37	1.61	3.58	1.53	1.67	3.00	1.60	1.51
Perda de Massa (mg)	Min	0.41	0.93	0.62	0.33	0.68	0.97	0.97	0.63	0.55	1.08	0.70	0.75	0.37	0.75	1.68	0.46	1.00	1.21
	Max.	1.00	1.56	1.04	1.10	0.97	1.46	4.43	1.01	1.88	2.04	2.12	1.02	2.05	1.47	2.22	0.77	1.64	1.98

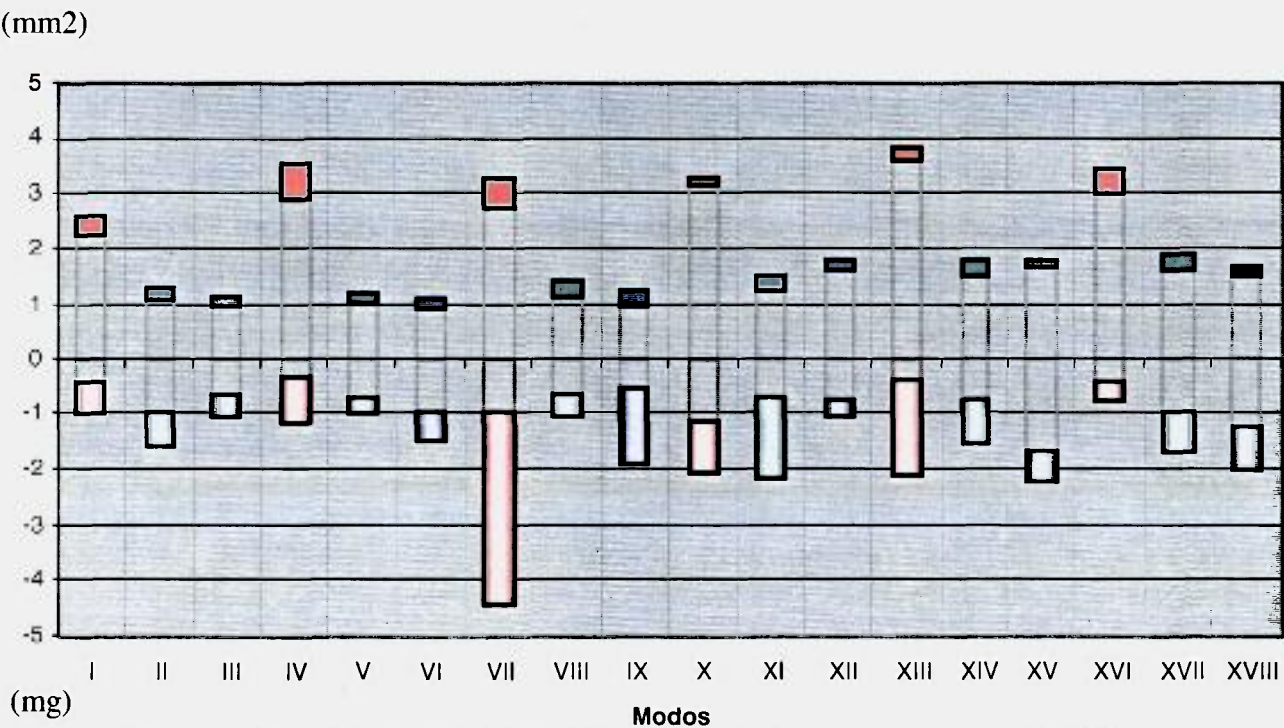


Figura 57 – Desgaste dos diferentes tratamentos superficiais e os respectivos anéis padrão

O maior desgaste do par tribológico foi observado no modo XIII, que integra o revestimento de molibdênio, com os parâmetros 667N, 273rpm e 100°C, enquanto os modos III e V apresentaram proporcionalmente o menor desgaste combinado, ambos utilizando o revestimento de cromo compósito, 334N, 273rpm e diferentes condições de temperatura.

Entre os tratamentos superficiais, observou-se o maior desgaste no modo XIII que utilizou 667N, 273rpm e 100°C com revestimento de Molibdênio, enquanto que os modos III e VI apresentaram os menores desgastes, novamente na condição com 334N, 273rpm e diferentes faixas de temperatura, o que indica uma grande influencia destes parâmetros no comportamento tribológico.

5.1.1 Análise da Superfície de Contato

A tabela 5.2 classifica os mecanismos dos modos de teste de desgaste de acordo com o padrão fotográfico da figura 55, de acordo com o grau de riscamento, deformação plástica, destacamento de material e resíduo de óleo lubrificante.

Tabela 5.2- Classificação dos mecanismos de desgaste pelos modos de ensaio

Característica do Desgaste	M o d o s																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Grau de Riscamento																		
Deformação Plástica																		
Ocorrência de Destacamento																		
Resíduos de Lubrificante																		

Baixo
 Moderado
 Alto

Os modos VIII e XVII apresentam um alto grau de riscamento (figura 58) utilizando tratamento superficial de Nitretação e na condição 820rpm e 100°C, os demais modos apresentaram níveis de riscamento de baixo a moderado.



Figura 58 –Aspecto da superfície de contato do modo VIII após teste de desgaste em bancada

Um alto nível de deformação plástica foi observado nos modos XIII e XVII utilizando revestimento de Molibdênio (figura 59), e Nitretação para o modo XIV, indicando que a condição 667N, 273rpm e 100°C favorece este mecanismo de desgaste. Os demais modos de teste apresentaram deformações plásticas moderada, sendo está baixa apenas no modo XV.



Figura 59 – Aspecto da superfície de contato do modo XIV após teste de desgaste em bancada

O tratamento superficial de Molibdênio apresentou alto nível de destacamento de material nos modos IV e VII (figura 60) na condição 334N e 100°C, e moderado para a condição 334N, 273rpm e 25°C, com os mesmos valores de velocidade e temperatura, e aumentando-se a carga para 667N tem-se um baixo nível de destacamento.



Figura 60 – Aspecto da superfície de contato do modo IV após teste de desgaste em bancada

Todos os modos que utilizaram tratamento superficial de Cromo composto apresentaram resíduos de óleo lubrificante na superfície de contato (figura 61), sendo mais alto nos modos VI e XII, e apenas no modo XI com tratamento superficial de nitretação observou-se a presença moderada deste resíduo.

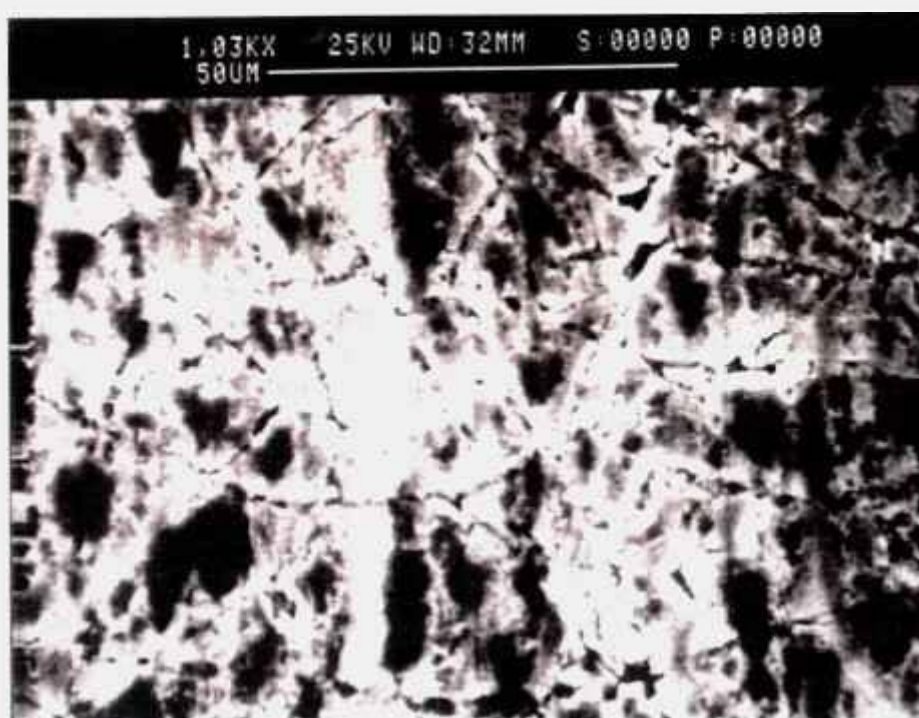


Figura 61 – Aspecto da superfície de contato do modo VI após teste de desgaste em bancada

5.2 Ensaio de Motor em Dinamômetro

Atribui-se a menor resistência ao desgaste quanto maior a variação da espessura radial ao longo do perímetro e da distância entre pontas dos anéis de pistão, e a porcentagem de área espelhada da camisa de cilindro são apresentados pela figura 62 e 63.

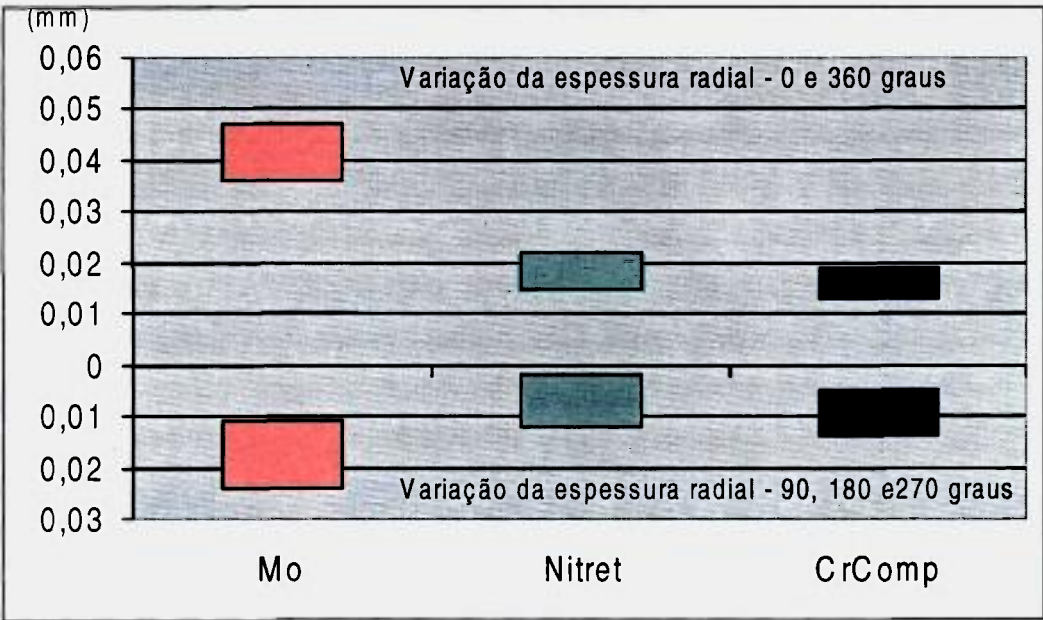


Figura 62 - Variação da espessura radial nas regiões próximas ao gap e ao longo do perímetro do anel de pistão

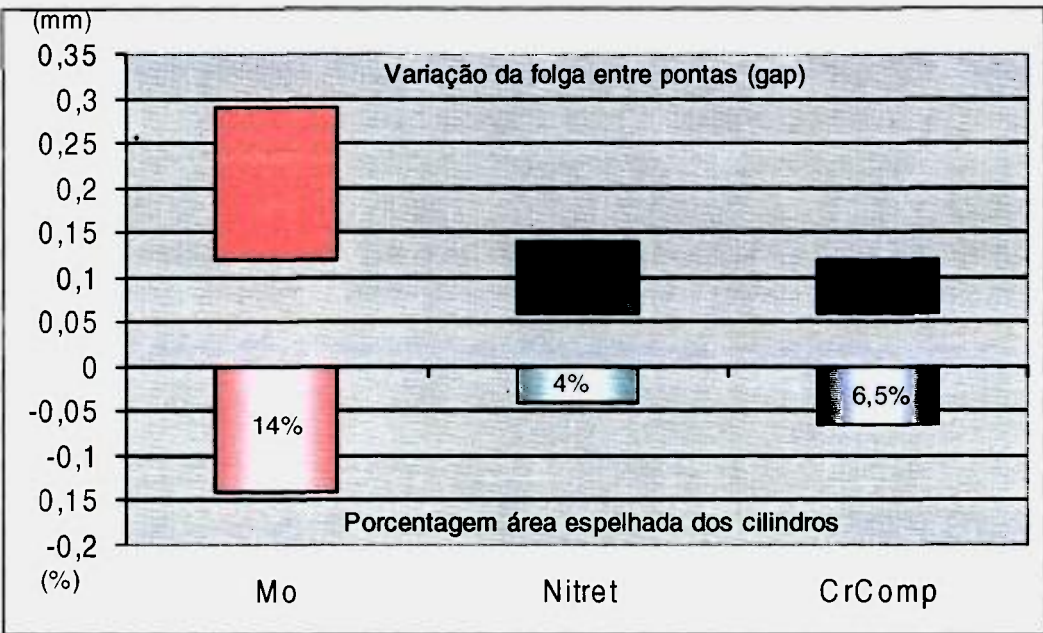


Figura 63 - Variação da folga entre pontas e porcentagem de área espelhada no cilindro

O desgaste mais acentuado na superfície de contato ocorre devido a uma flutuação dos anéis de pistão nas posições 0 e 360° (gap), devido a um aumento deliberado de pressão nesta região.

Observa-se que o segmento de anel com o tratamento superficial com molibdênio apresenta uma maior variação da espessura radial em todo o perímetro do anel, sendo maior nas regiões 0 e 360°. O anel nitretado e o cromo compósito apresentaram variações similares na posição 0 e 360°, nas demais notou-se um ligeiro aumento na variação da espessura radial para o cromo compósito.

Para o desgaste par tribológico considerando a distância entre pontas e a porcentagem de área espelhada, novamente o anel com tratamento superficial com molibdênio apresentou valores mais elevados, comparado ao nitretado e Cromo compósito. Os menores valores foram observados para o tratamento superficial de nitretação e do respectivo cilindro. Os resultados de ensaio de atrito e análise de óleo lubrificante estão em anexo.

5.2.1 Análise da Superfície de Contato dos Anéis de Pistão

A tabela 6 classifica os mecanismos de desgaste de acordo com o padrão fotográfico da figura 58, e as figuras de 64 a 69 apresentam as características do desgaste dos tratamentos superficiais nas regiões próximas às pontas (*gap*) e a 180° em relação ao *gap*.

Tabela 5.3 – Classificação dos mecanismos de desgaste dos tratamentos superficiais após teste de motor MRD

Característica do Desgaste	Mo		Nitret		CrComp	
	Gap	180°	Gap	180°	Gap	180°
Grau de Riscamento						
Deformação Plástica						
Ocorrência de Destacamento						
Resíduos de Lubrificante						

Baixo Moderado Alto



Figura 64 – Superfície de contato do tratamento superficial de Molibdênio após 500 horas - Posição gap



Figura 65 – Superfície de contato do tratamento superficial de Molibdênio após 500 horas - Posição 180°

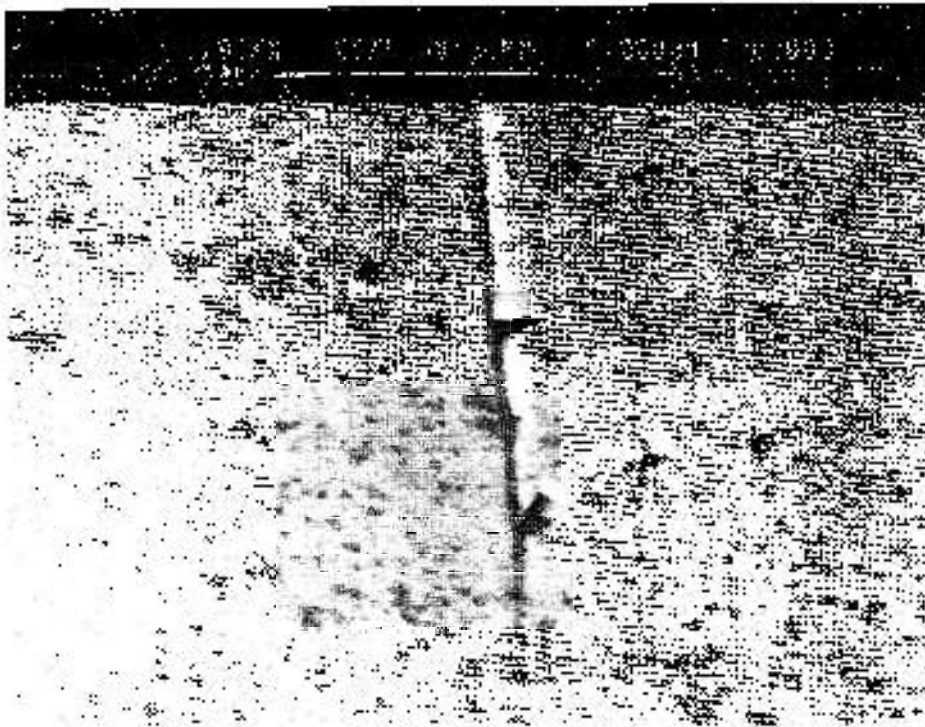


Figura 66 – Superfície de contato do tratamento superficial de Nitretação após 500 horas - Posição gap

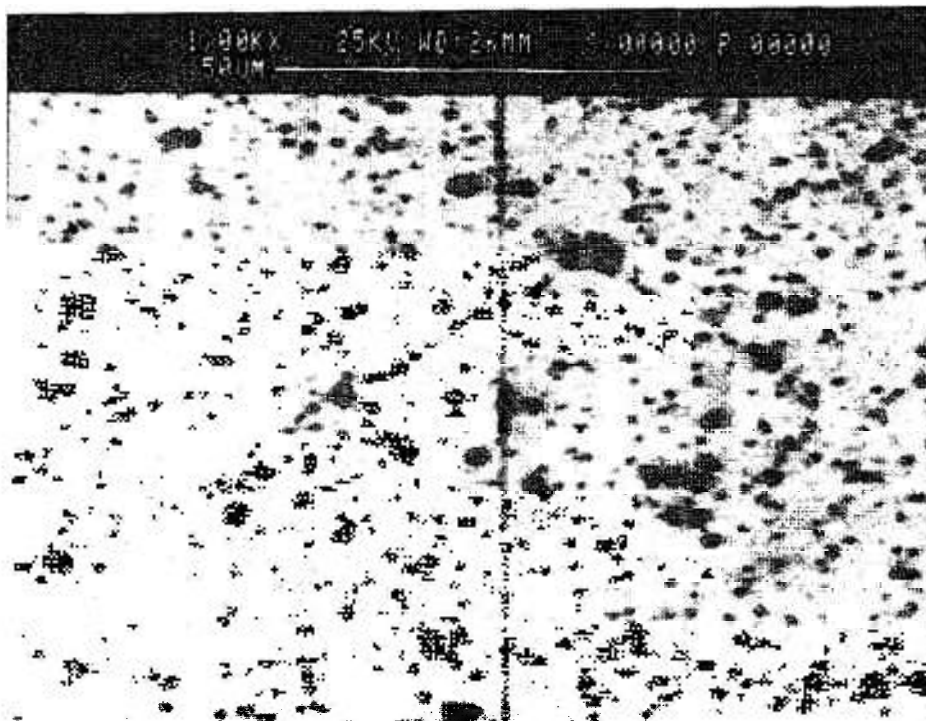


Figura 67 – Superfície de contato do tratamento superficial de Nitretação após 500 horas - Posição 180°

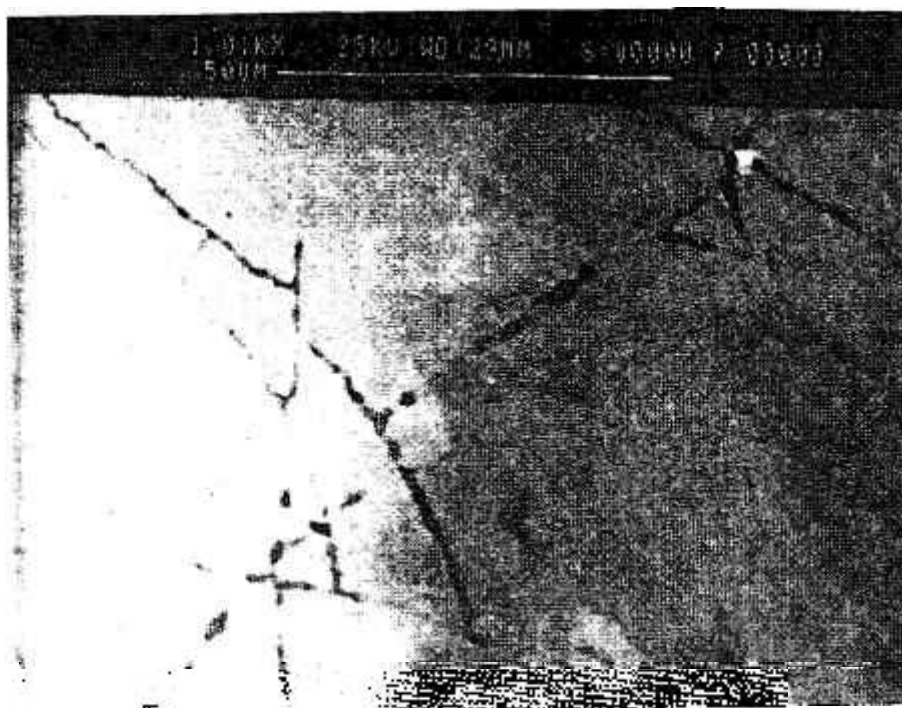


Figura 68 – Superfície de contato do tratamento superficial de Cromo Compósito após 500 horas - Posição gap

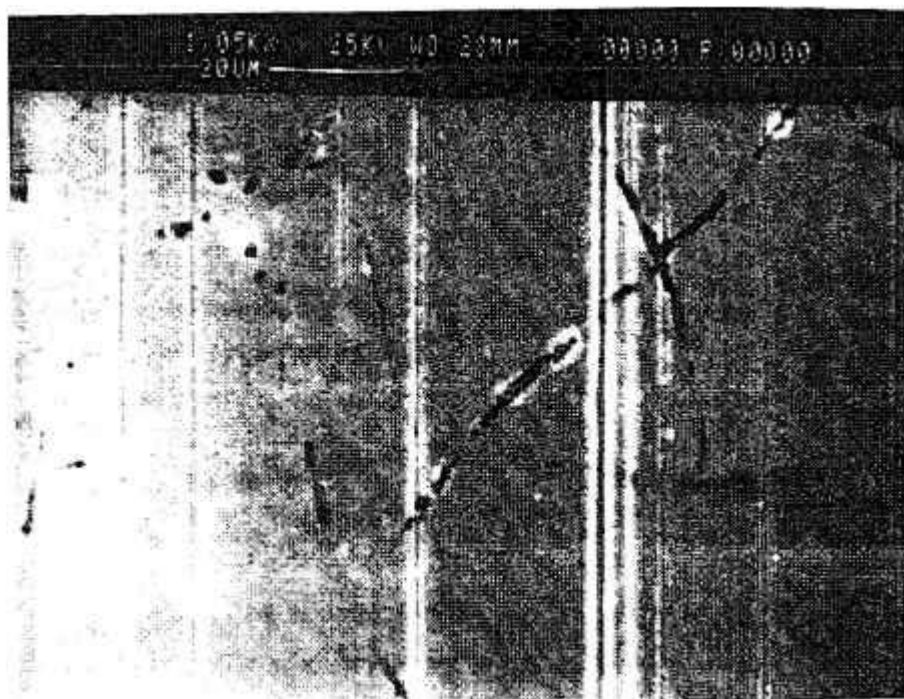


Figura 69 – Superfície de contato do tratamento superficial de Cromo Compósito após 500 horas - Posição 180°

6 DISCUSSÃO

6.1 Ensaio de Desgaste em Bancada

A tabela 6.1 apresenta os principais efeitos e interações significativas dos três tratamentos superficiais e de seus respectivos anéis padrão.

Tabela 6.1 – Principais efeitos e interações significativos nos ensaios de desgaste em bancada

Efeitos Significativos do Par Tribológico Trat. Superficial - Anel Padrão						
Parâmetros	Molibdênio		Nitretação		Cromo Composito	
	TS	AP	TS	AP	TS	AP
C	P	P	P	P	P	P
V	M	P	P	M	M	P
T	P			M		P
CV			P	P	M	P
CT	P		P	M	M	P
TS - Tratamento Superficial AP - Anel Padrão C - Carga V - Velocidade T - Temperatura M - Melhor (*) P - Pior						

(*) Indica a condição de desgaste, considerado o maior nível de cada fator.

MOLIBDÊNIO

Os principais efeitos significativos para este tratamento superficial foram respectivamente temperatura, carga, velocidade, e a interação carga-temperatura. Todos efeitos estão associados a elevados níveis de deformação plástica e destacamento de material da região de contato. O aumento da velocidade foi o efeito que demonstrou os menores índices de desgaste, de acordo com os modos VII e XVI. Após a usinagem final do tratamento superficial de Molibdênio ocorre uma rápida oxidação superficial com a formação de um filme de óxido que melhora a condição de atrito e conseqüentemente o desgaste.

Por outro lado, com aumento da temperatura pode ocorrer uma dissorção do filme de óxido protetivo aumentando as taxas de desgaste, como indicado pelos modos IV e XIII, e como conseqüência o primeiro par tribológico apresentou a menor pressão de contato final.

Com o aumento de carga tem-se uma diminuição do filme de óleo lubrificante, compensado pelas porosidades que permitem a retenção de óleo lubrificante.

O desgaste do anel padrão apresentou como efeito principal a carga e velocidade.

O modo I apresentou o menor desgaste do par tribológico. Nesta condição a região de contato apresentou baixos níveis de riscamento e resíduos de lubrificante.

No processo de desgaste do tratamento superficial de Molibdênio ocorre o desprendimento das fases, e entre estas as lamelas de MoC com tamanho superior a 10 μm e dureza de aproximadamente 1300 HV, possibilitando o aumento do desgaste do par tribológico tanto em bancada como em teste de motor.

NITRETAÇÃO

Os principais efeitos significativos para este tratamento superficial foram respectivamente carga, velocidade e a interação carga-temperatura e carga-velocidade.

Os fatores carga e velocidade estão associados à um alto nível de riscamento, no primeiro tem-se uma diminuição do filme de óleo que indica o maior desgaste nos modos XI, XIV e XVII no qual se observa um alto nível de deformação plástica na região de contato. Os modos VIII e XVII indicam o efeito velocidade ao maior desgaste.

O maior desgaste referente à interação carga-temperatura apresenta um alto nível de deformação plástica e decréscimo no índice de viscosidade (IV).

A temperatura indica o único efeito observado no anel padrão conforme modo V e XIV, sendo que com o aumento deste fator tem-se uma diminuição do desgaste.

O modo V apresenta o menor desgaste do par tribológico com os menores teores de Ferro e Cromo no óleo lubrificante, enquanto que o maior desgaste foi observado no modo XI.

Considerando a maioria das partículas de carboneto de cromo com tamanho de até 1 μm , permite justificar que ocorre um ligeiro desgaste por três corpos, e neste caso a condição de lubrificação esta prejudicada devido à ausência de áreas porosas neste tratamento superficial.

CROMO COMPÓSITO

Os principais efeitos significativos para este tratamento superficial foram respectivamente carga, velocidade e a interação carga-velocidade e carga-temperatura. O maior desgaste de acordo com os modos XII e XV está relacionado ao aumento da carga, que resulta em altos níveis de resíduo de lubrificante e ao aumento do teor de Cromo no óleo lubrificante.

Para a interação carga-velocidade têm-se duas situações à medida que se varia o valor de carga, ou seja, no modo XVIII com o aumento da carga tem-se um alto nível de riscamento resultando em um maior desgaste, sendo menor quanto se diminui o valor desta grandeza, associado a um baixo nível de riscamento e a uma maior pressão de contato final como mostra o modo VIII.

A carga, velocidade e temperatura e a interação carga-temperatura e carga-temperatura são indicados como os efeitos principais no desgaste do anel padrão, sendo que todos estes efeitos estão associados a um baixo nível de riscamento e deformação plástica. Os modos VI e XV apresentam os maiores valores de desgaste de acordo com o aumento de carga e da interação com a temperatura.

Os modos III e VI apresentaram o menor desgaste do par tribológico, a região de contato apresenta um baixo nível de riscamento e um alto nível de resíduo de lubrificante, enquanto que o maior desgaste foi atribuído ao modo XV.

Considerando as partículas de óxido de alumínio de até 2 μm , também permite considerar um ligeiro desgaste por três corpos, mas neste caso tem-se uma quantidade menor de partículas duras e uma área porosa de aproximadamente 20%, que favorece a retenção de óleo lubrificante.

COMPARATIVO ENTRE OS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

O significado de cada nível de um fator com os demais fatores serão apresentados em dois gráficos, o primeiro representando os principais efeitos dos quatro fatores e o segundo apresenta uma matriz com a interação destes fatores, neste mesmo caso quando as linhas estiverem paralelas indica que não há interação.

As figuras 70 e 71 apresentam os principais efeitos e interações significativas, considerando o desgaste dos três tratamentos superficiais e são respectivamente Material, Carga, Temperatura, Velocidade e as interações Carga-Temperatura, Material-Velocidade e Carga-Velocidade.

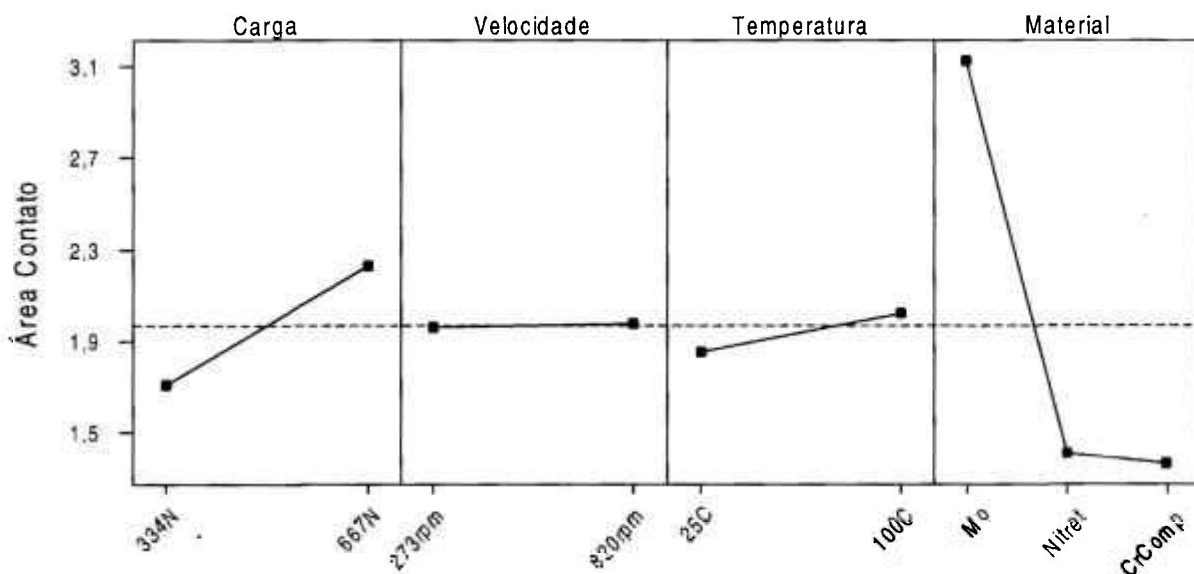


Figura 70 - Principais efeitos da variável área de contato

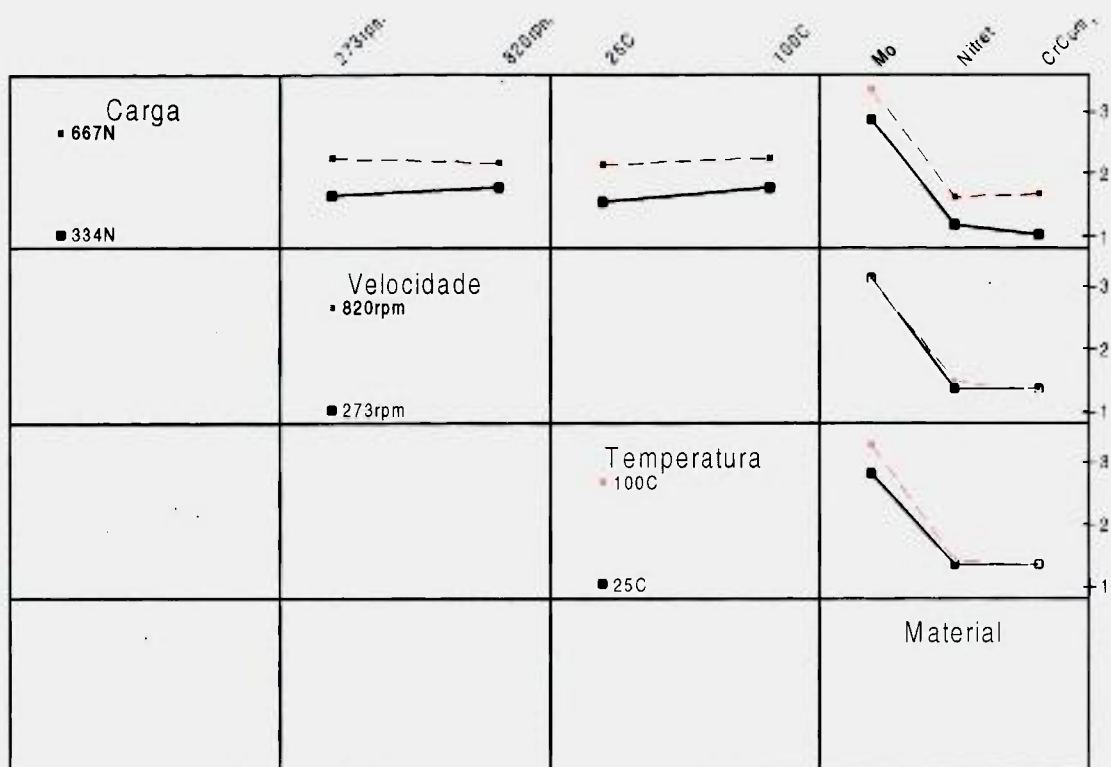


Figura 71 – Principais integrações da variável área de contato

Todos estes fatores e interações estão relacionados a moderados níveis de deformação plástica e destacamento de material da superfície de contato. E atribui-se o maior desgaste aos modos I, IV, VII, X, XIII e XVI utilizando tratamento superficial de Molibdênio, que resultou em elevados teores de fragmentos de molibdênio no óleo lubrificante, o mesmo ocorreu com o teor de cromo oriundo do *blend* da mistura de pós Mo-NiCr-MoC, devido ao aumento de carga.

A interação Carga-Temperatura apresenta maior desgaste nos modos XIII, XIV e XV, assim como a Carga-Velocidade nos modos XVII e XVIII foram observados uma diminuição do teor de Zinco proveniente de aditivos EP do óleo lubrificante.

O menor desgaste está relacionado ao efeito velocidade e na interação material-velocidade, o primeiro indicado pelo modo XVI, neste mesmo teste observou-se os valores de viscosidade a 40 e 100°C estáveis, e teores de Ferro no óleo lubrificante menor na condição de alta velocidade para o tratamento superficial de Molibdênio.

Da mesma maneira que os tratamentos superficiais, o maior desgaste do anel padrão está associado a altos níveis de deformação plástica na região de contato dos tratamentos superficiais, e apresentou como efeito principal a Carga e as interações Material-Temperatura e Carga-Velocidade como mostra as figuras 72 e 73. Observou-se nos modos VI e XV um alto teor de resíduo de lubrificante, enquanto que os modos XVII e XVIII apresentaram altos níveis de riscamento.

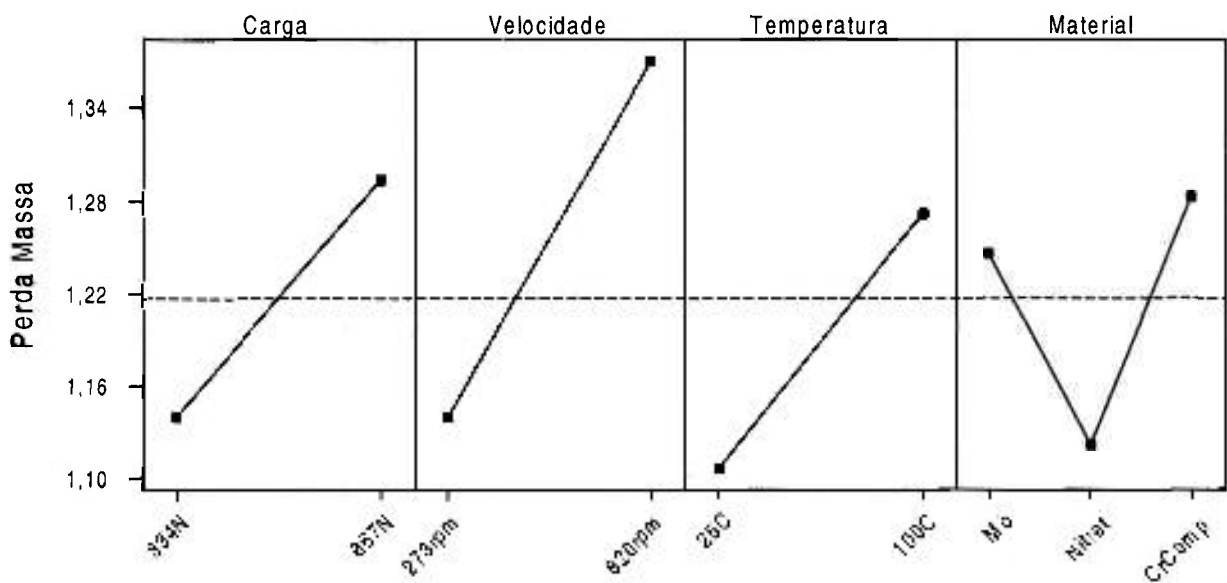


Figura 72 - Principais efeitos da variável perda de massa

Os modos III e V apresentam o menor desgaste do par tribológico indicando os menores teores de Ferro e Cromo no óleo lubrificante, mas por outro lado o maior desgaste foi observado no modo XIII.

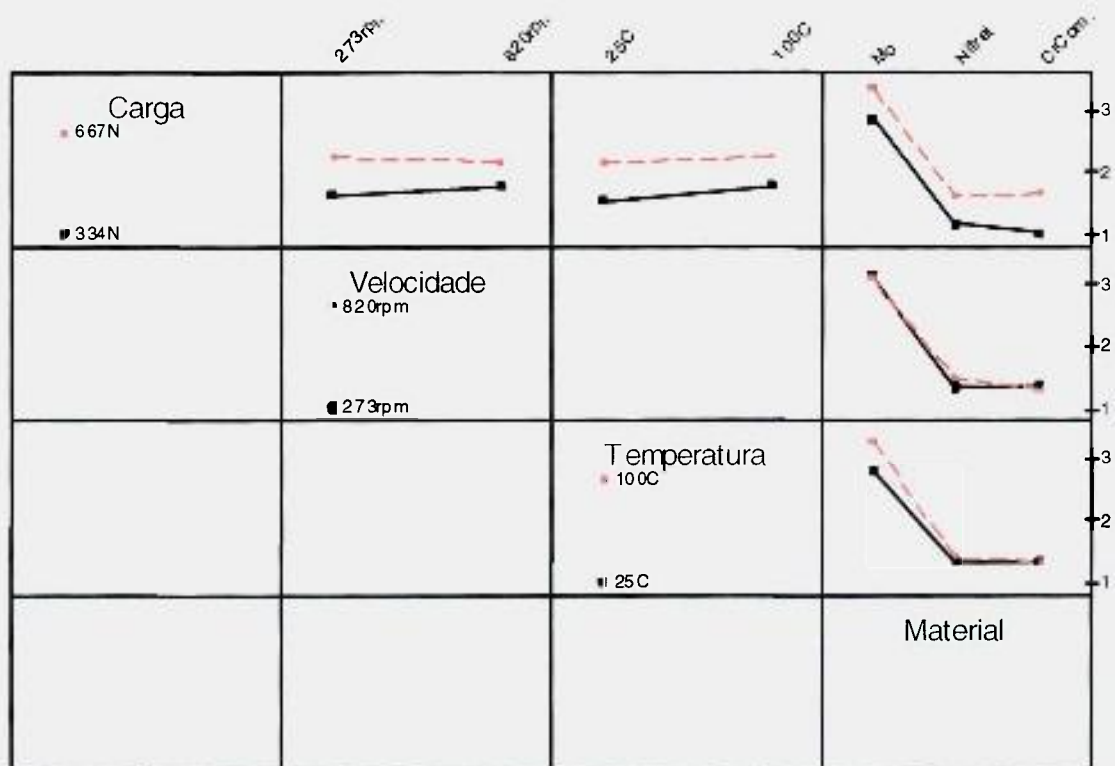


Figura 73 – Principais interações da variável perda de massa

6.2 Ensaio de Motor em Dinamômetro

A melhor resistência ao desgaste do par tribológico durante os testes com motores MRD em dinamômetro foi atribuída aos tratamentos superficiais de Nitretação e Cromo Compósito, sendo que o maior desgaste dos cilindros ocorre na região do ponto morto superior (PMS) devido as altas condições de carga e temperatura associado à diminuição de velocidade dos anéis de pistão.

Observou-se que todos os tratamentos superficiais apresentam deformação plástica moderada nas regiões próxima ao *gap*, e são determinados no caso da Nitretação pelo recobrimento parcial dos Carbonetos de Cromo, e por um ligeiro fechamento das fissuras no Cromo compósito. Alguns riscos nas superfícies revelam a atuação do mecanismo de abrasão por três corpos provenientes da remoção das partículas duras.

O maior desgaste do par tribológico ocorreu utilizando tratamento superficial de Molibdênio, devido à moderada deformação plástica que promove a nucleação de trincas sub superficiais. Tensões residuais resultantes do processo de aspersão térmica e usinagem podem favorecer o surgimento de trincas, assim como a aderência entre as fases devido à fusão das partículas, tais defeitos aumentam e se propagam com o carregamento contínuo até o destacamento de material da superfície.

Para este trabalho, foi considerado que 500 horas de teste de motor em dinamômetro equivalem a aproximadamente 80.000 km em condição veicular, a tabela 6.1 apresenta os resultados das variações radiais e folga entre pontas apresentados nas figuras 62 e 63, e indica a estimativa de vida dos anéis de pistão com os respectivos tratamentos superficiais, atribuindo que a remoção total da camada determine o final da vida útil do componente.

Tabela 6.2 – Determinação da estimativa de vida dos anéis de pistão nos testes considerando 80.000 km em veículo

Tratamento Superficial	Mo	Nitret	Cr Comp
Estimativa de vida (km)	167.000	200.000	583.000
(%)	-71	-66	0

Nota-se que o tratamento superficial de nitretação tem uma estimativa de vida de 200.000 km, ou seja, 66% menor que o cromo compósito, vale lembrar que nos ensaios de motor em dinamômetro estes dois tratamentos superficiais apresentaram resultados similares, mas a longevidade do cromo compósito está associada a maior espessura de camada, sendo 175 μm contra 55 μm do anel nitretado.

Os resultados dimensionais dos anéis de 2º e 3º canaletes apresentaram valores similares de desgaste, para ambos os tratamentos superficiais.

A correlação dos ensaios de desgaste em bancada e motor foram determinadas pelo mecanismo de desgaste, considerando as características de desgaste ponderadas durante as análises através de microscopia eletrônica de varredura das superfícies de contato dos anéis de pistão, principalmente nas regiões próxima ao *gap* (0 e 360º). Quanto aos mecanismos de desgaste de ambos os ensaios tribológicos (motor e bancada), observou-se similaridade nos modos VII e IX com tratamentos superficiais de molibdênio e cromo compósito respectivamente, utilizando parâmetros de 334N, 820rpm e 100°C, e para o Nitretado na condição 334N, 273rpm e 25°C no modo II.

Baseado nesta correlação a tabela 6.3 considerou o tratamento superficial de Cromo Compósito como sendo a referencia devido ao seu melhor comportamento em ambos os testes de desgaste (motor e bancada), e com um valor médio de desgaste 10% maior está o Nitretado, enquanto que para o Molibdênio este índice foi da ordem de 63%.

Tabela 6.3 – Determinação do desgaste nos teste de motor e bancada considerando o mecanismo de desgaste

Teste	Tratamento Superficial		
	Mo	Nitret	Cr Comp
Motor	- 62%	- 12%	0%
Bancada	- 65%	- 8%	0%

Estes resultados mostram que os mecanismos de desgaste direcionam o comportamento dos tratamentos superficiais em ambos os testes tribológicos, indicando ser um caminho para os estudos de engenharia de superfície.

Este trabalho possibilitou identificar que ambos tratamentos superficiais tem limitações para a condição de alta carga, ou seja, deve-se ter cautela para aplicá-las em motores diesel pesado (HD), mas considerando os vários resultados do teste de bancada observa-se que o tratamento de nitretação apresentou desempenho satisfatório, o mesmo ocorrendo para os respectivos pares contra atritantes.

Para aplicações que exigem altas velocidades como os motores diesel rápido (HSD), os experimentos mostraram que o cromo compósito apresentou melhores resultados considerando o par tribológico, da mesma forma também se comportou o Nitretado contra o anel padrão.

Todos os tratamentos superficiais podem ser aplicados em condições moderadas de carga e velocidade, como nos motores diesel médio (MRD), no entanto como se pode observar nos resultados dos ensaios de motor em dinamômetro e nos modos de testes em bancada que o cromo compósito e o nitretado apresentaram os melhores comportamentos quanto ao desgaste dos pares tribológicos.

Atribui-se como desgaste severo apenas para o tratamento superficial de Molibdênio, devido ao destacamento de material (fases) com tamanho acima de 20 μm no sistema deslizante, tanto nos testes de motor em dinamômetro como em bancada, colaborando para as altas taxas de desgaste.

O tratamento de Nitretação apesar das baixas taxas de desgaste apresentou em alguns casos um alto grau de riscamento e deformação plástica de moderada a alta, sendo considerado então como desgaste normal a moderado.

Baseado nos excelentes resultados apresentados em ambos testes de desgaste foi atribuído como sendo desgaste normal para o Cromo compósito, mas poderia também ser considerado moderado devido aos moderados até altos níveis de resíduos de óleo lubrificante na superfície de contato.

7 CONCLUSÕES

- Este trabalho permitiu o estabelecimento de uma metodologia para o estudo de desgaste e atrito em tratamentos superficiais de anéis de pistão, por meio de diferentes ensaios tribológicos e técnicas de análises que contribuíram para a determinação das características de desgaste.
- Nas análises dimensionais realizadas durante os ensaios de motor em dinamômetro, os valores de desgaste do par tribológico anel-cilindro indicou o menor desgaste do tratamento superficial para o anel de pistão nitretação e cromo compósito respectivamente, enquanto que o molibdênio não apresentou bons resultados.
- A estimativa de vida dos anéis de pistão baseados nos resultados dos ensaios de motor e na espessura de camada total foi calculada em 583.000 km para o Cromo compósito, sendo 66% e 71% melhor quanto ao desgaste que os tratamentos superficiais de nitretação e molibdênio respectivamente.
- Os resultados dos ensaios de desgaste em bancada indicaram que os três tratamentos superficiais têm implicações para a condição de alta carga. Dentre os materiais, o principal efeito foi atribuído ao molibdênio, que apresentou o maior desgaste, o nitretado e cromo compósito apresentaram menor desgaste e tiveram comportamentos similares na maioria dos ensaios tribológicos.
- Para os modos de ensaio que utilizaram altas velocidades, os melhores resultados considerando o par tribológico foram atribuídos ao tratamento superficial de cromo compósito. O desempenho mais satisfatório para a condição de alta carga foi apresentado pelo nitretado.

- No desgaste dos anéis padrões contra os tratamentos superficiais foram observados diferentes comportamentos para a maioria dos parâmetros funcionais dos ensaios de desgaste em bancada, sendo o mais significativo e com melhores comportamentos quanto ao desgaste o tratamento de Nitretação.
- após 500 horas de ensaios de motor Diesel em dinamômetro, os tratamentos superficiais dos anéis de pistão apresentaram predominantemente deformações plásticas moderada na superfície de desgaste.
- Da mesma forma, após os ensaios de desgaste em bancada observou-se maior tendência de deformações plásticas moderada em grande parte dos experimentos. As características de desgaste que são similares para os ensaios de motor Diesel em dinamômetro e bancada mostraram que os resultados das análises quantitativas são proporcionais para cada tratamento superficial.

ANEXOS

A.1 Ensaio de Atrito em Bancada

A figura 74 apresenta o gráfico que indica os valores de carga aplicada e força de atrito, monitorado por uma célula de carga a cada *step* até que ocorra um pico que atinja pelo menos três vezes o valor de atrito normal para os três tratamentos superficiais, neste momento tem-se o mecanismo de desgaste adesivo conhecido como *Scuffing*.

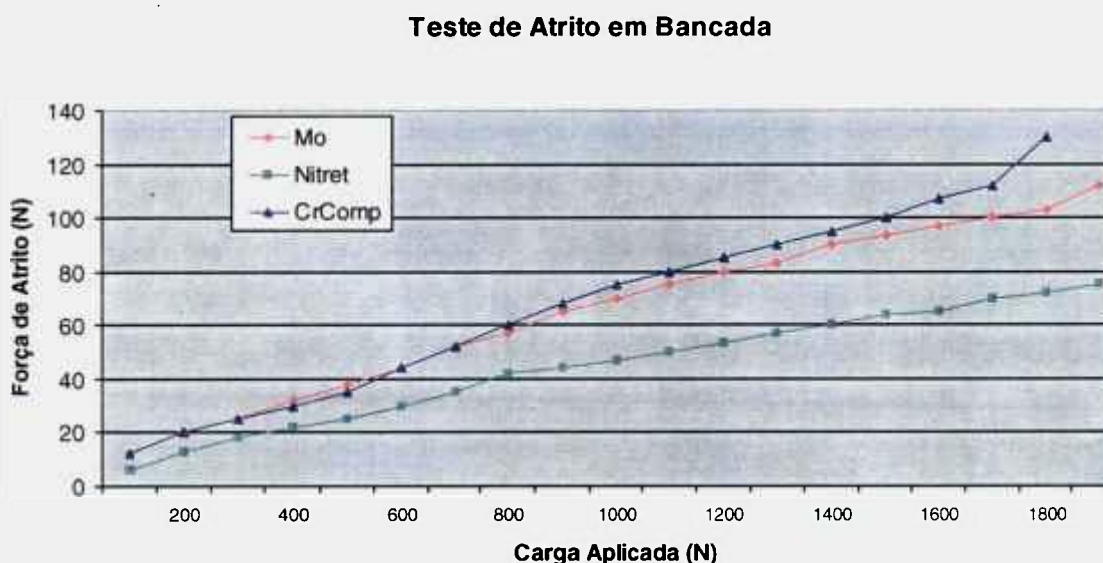


Figura 74 - Gráfico de Carga aplicada x Força de atrito das diferentes tratamentos superficiais

Para este ensaio observa-se que ambos tratamentos superficiais têm comportamento similar quanto ao limite de carga aplicada, em torno de 1900N. No que tange a força de atrito o Nitretado apresentou valores menores comparado aos outros dois tratamentos. As figuras de 75 a 77 ilustram os aspectos das superfícies de contato dos tratamentos superficiais e de seu respectivo anel padrão, notou-se em ambos os segmentos de anel à presença de material incrustado na região de contato.

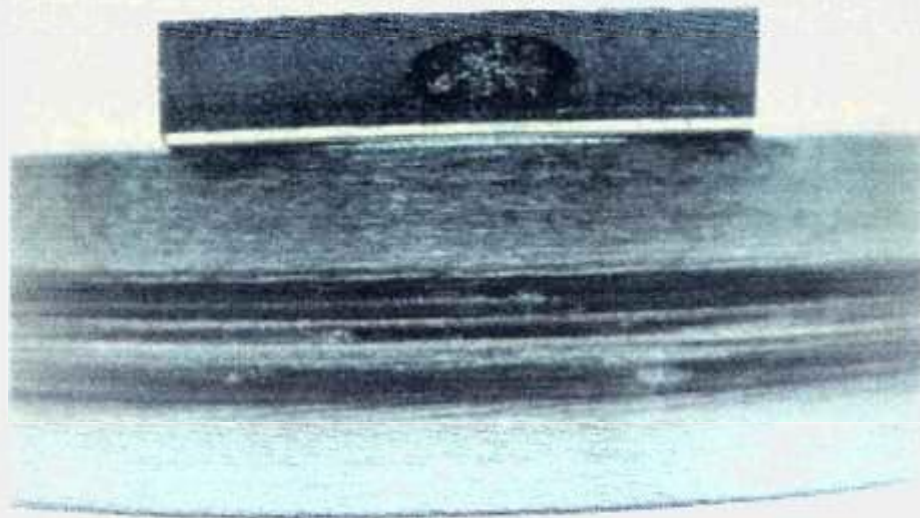


Figura 75 – Aspecto da superfície de contato do Molibdênio e do respectivo anel padrão após teste de scuffing

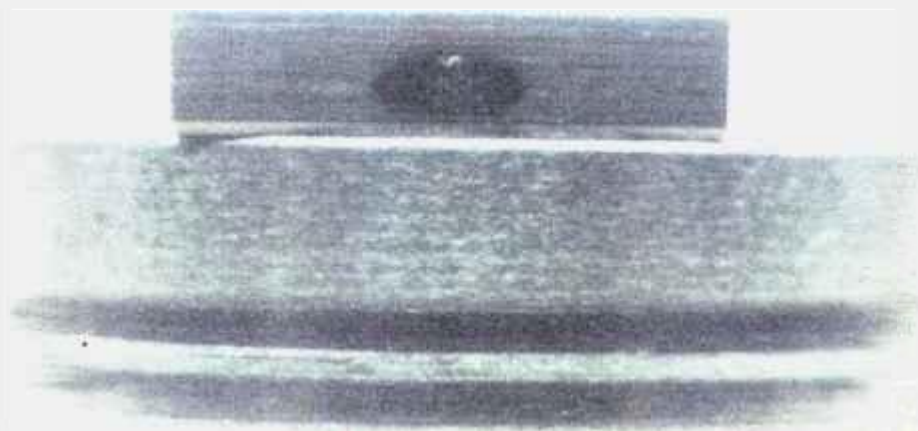


Figura 76 – Aspecto da superfície de contato do Nitretado e do respectivo anel padrão após teste de scuffing

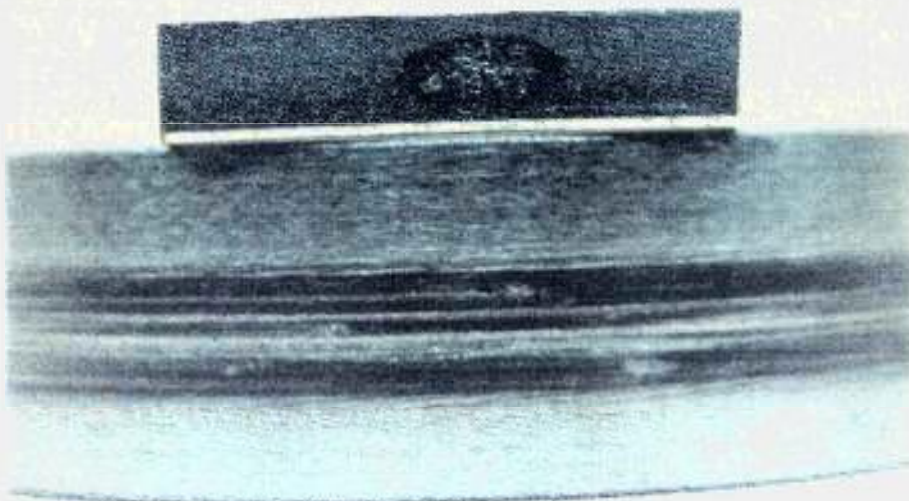


Figura 77 – Aspecto da superfície de contato do Cromo compósito e do respectivo anel padrão após teste de scuffing

As figuras 78 e 79 apresentam as análises por espectroscopia por dispersão de energia (EDS), do material do anel padrão aderido sobre o tratamento superficial do segmento de anel de pistão.



Figura 78 – Aspecto do tratamento de Molibdênio após teste de scuffing, observa-se material incrustado (região cinza)

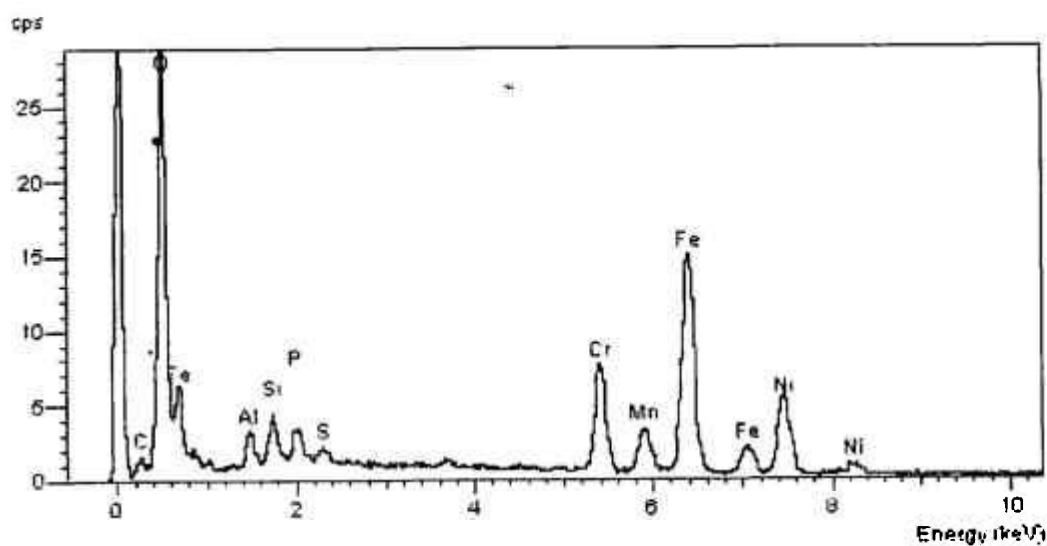


Figura 79 – Espectro de análise via EDS da incrustação observada na figura anterior

A.2 Análise do Óleo Lubrificante

Teste de Motor em Dinamômetro

A tabela V apresenta os resultados das análises físico-químicas do óleo lubrificante após 25 e 500 horas de teste de motor.

Tabela A.2 - Resultados das análises físico-químicas de óleo lubrificante após 25 e 500 horas de teste de motor

Análise		Tempo de Teste	
		25 hs	500 hs
Oxidação	A/.1mm	0,04	0,21
Fuligem	A/.1mm	0,08	0,29
Diluição	(%)peso	< 2,0	< 2,0
TAN	mgKOH/g	4,52	5,37
TBN	mgKOH/g	7,39	5,4
Viscosidade a 40°C	CSt	102,9	118,6

5.3.1 Análise do Óleo Lubrificante

Teste de Desgaste em Bancada

a. Análise Físico – Química

As figura de 80 a 84 apresentam os gráficos com resultados de análises físico - químicas de algumas características presentes no óleo lubrificante, que indicaram variações significantes ao longo dos teste de desgaste.

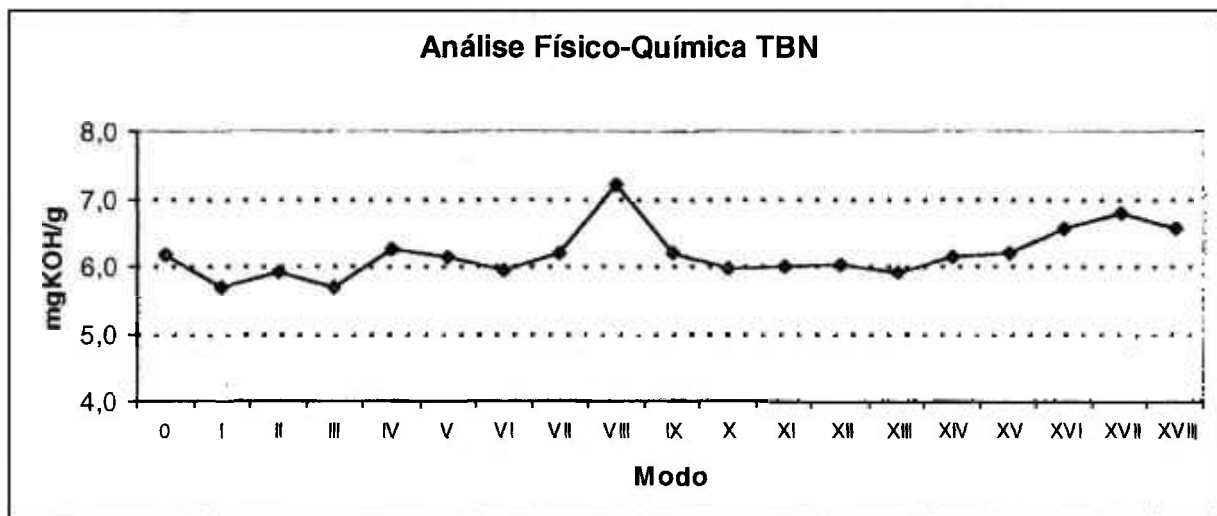


Figura 80 - Análise físico-química TBN

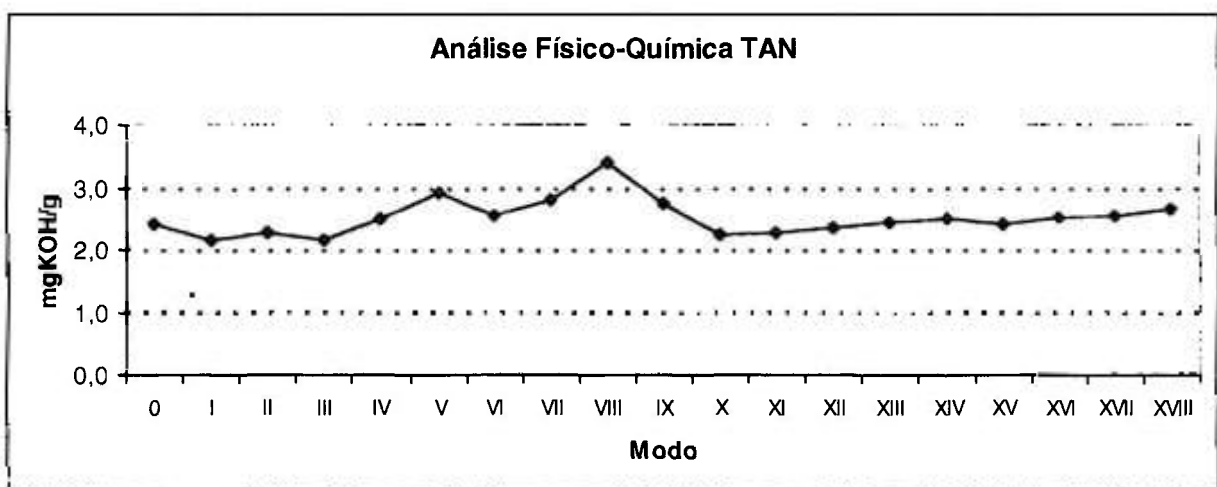


Figura 81 - Análise físico-química TAN

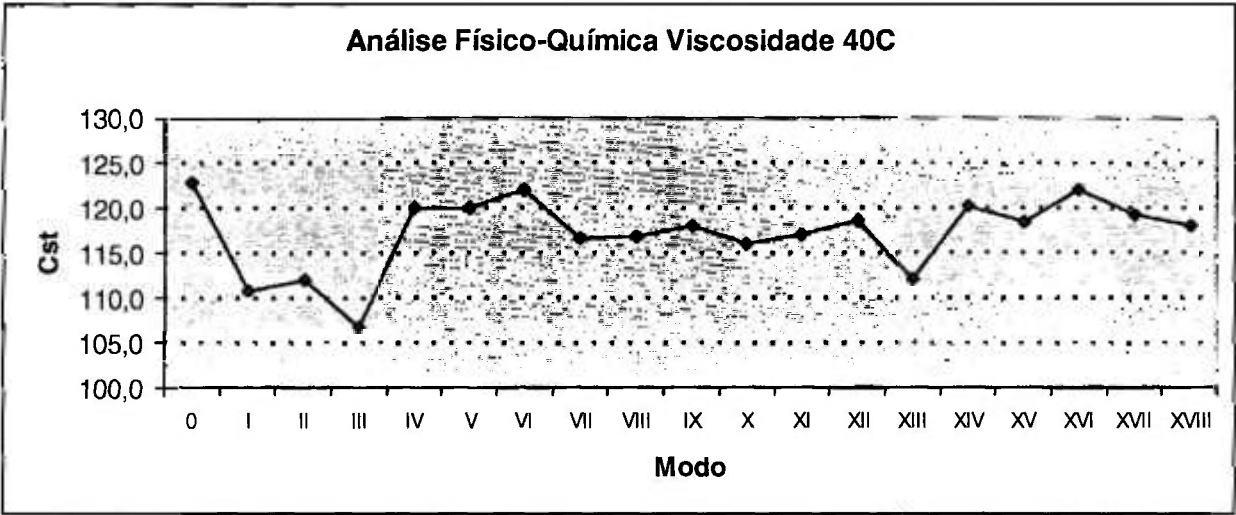


Figura 82 - Análise físico-química Viscosidade 40C

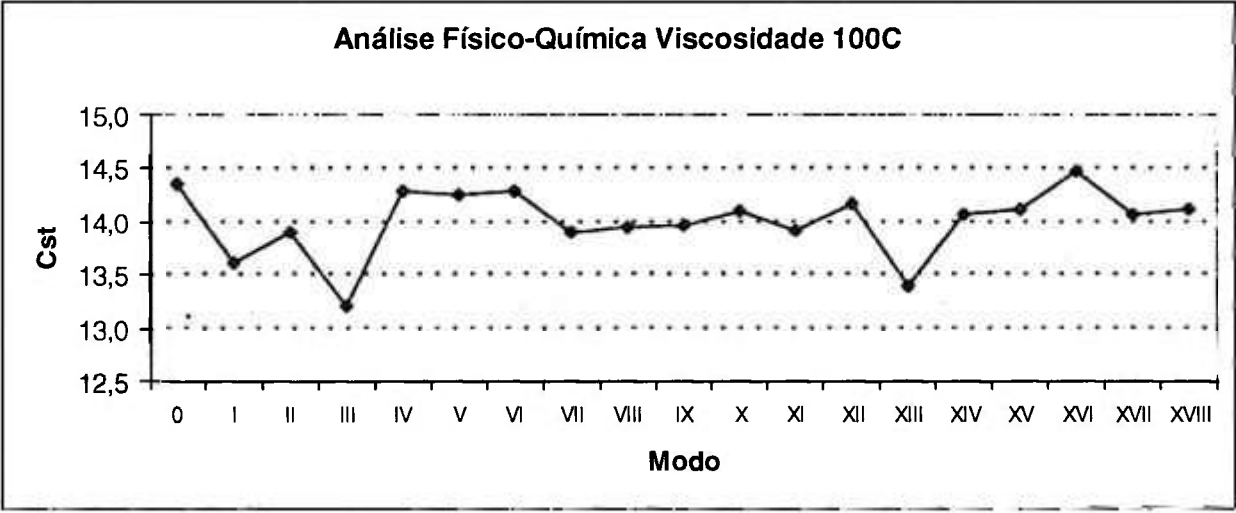


Figura 83 - Análise físico-química Viscosidade 100C

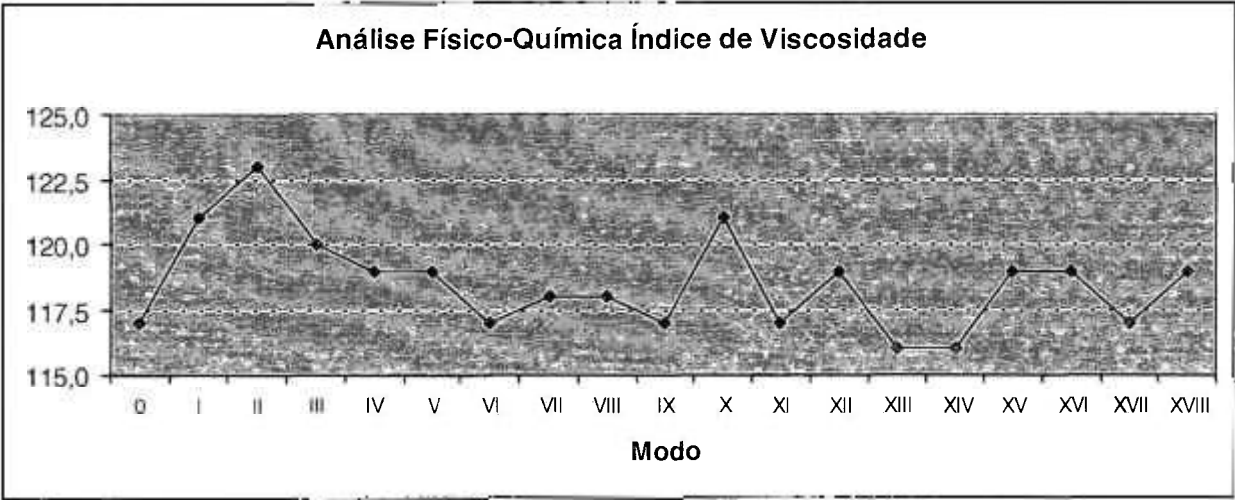


Figura 84 - Análise físico-química IV

b. Análise Química por Emissão Óptica

As figuras de 85 a 89 exibem os gráficos com resultados de análise química por emissão óptica de alguns elementos presentes no óleo lubrificante, que apresentaram variações significantes ao longo dos testes de desgaste. O modo 0 (zero) refere-se à amostra de óleo lubrificante nova, ou seja, condição de partida.

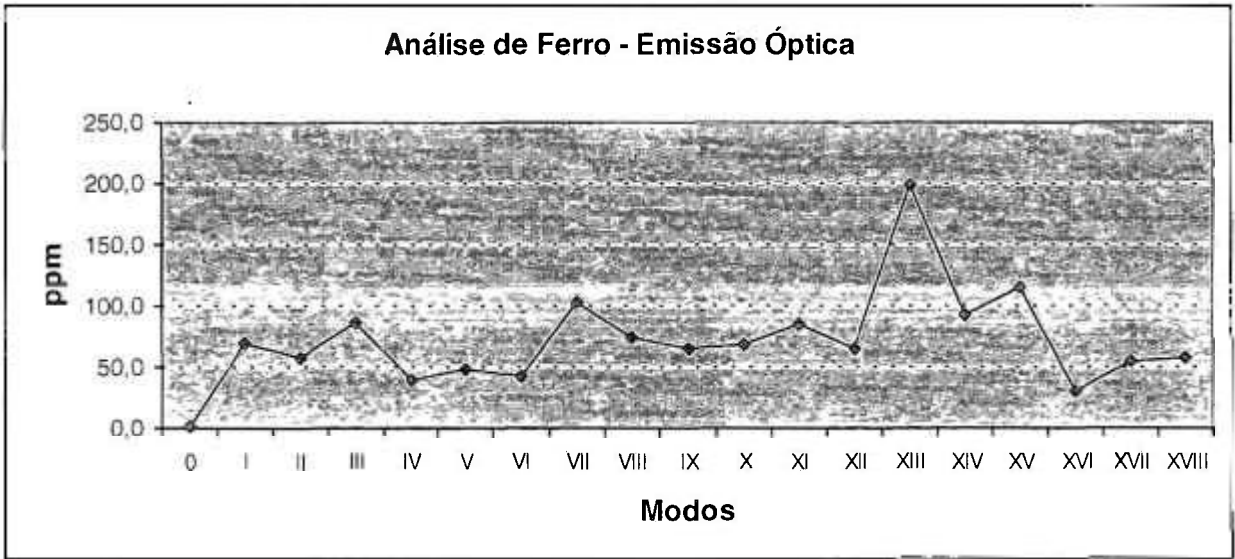


Figura 85 - Análise de Ferro por Emissão Óptica

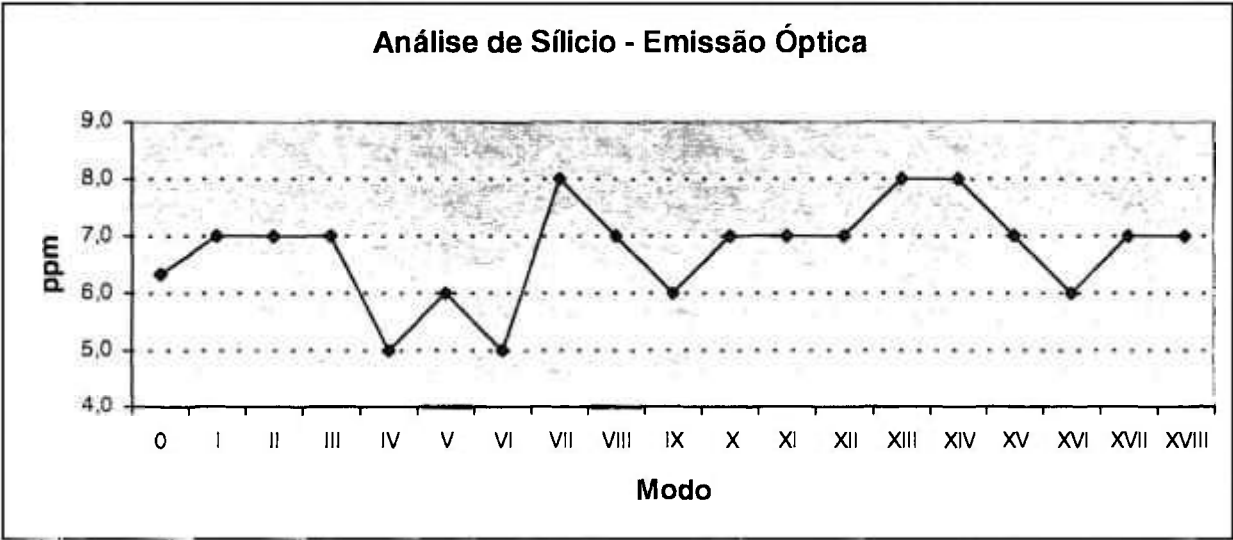


Figura 86 - Análise de Silício por Emissão Óptica

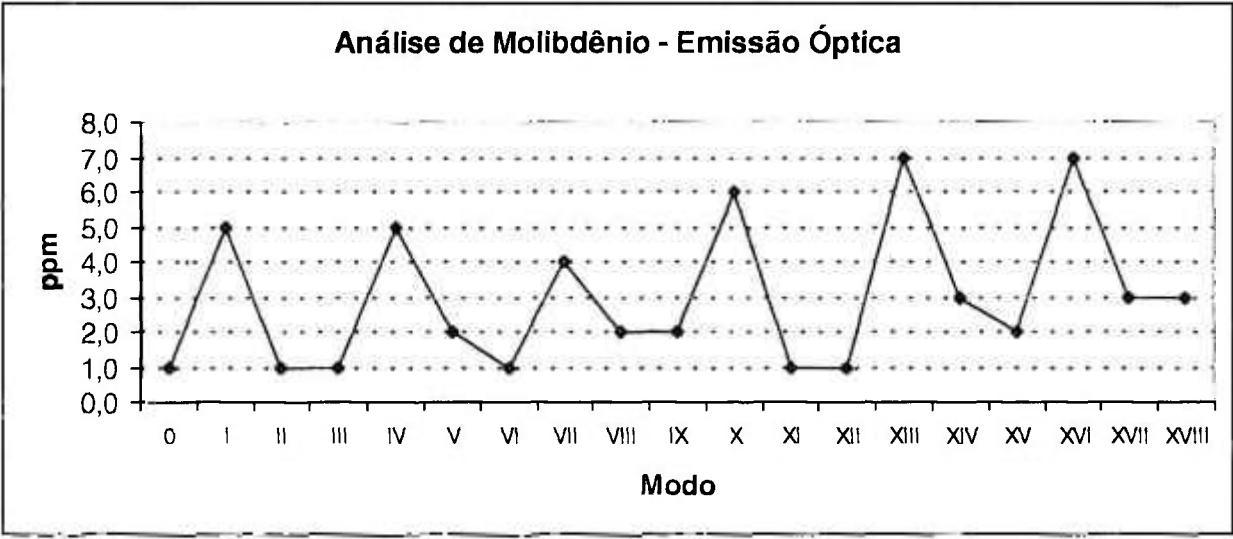


Figura 87 - Análise de Molibdênio por Emissão Óptica

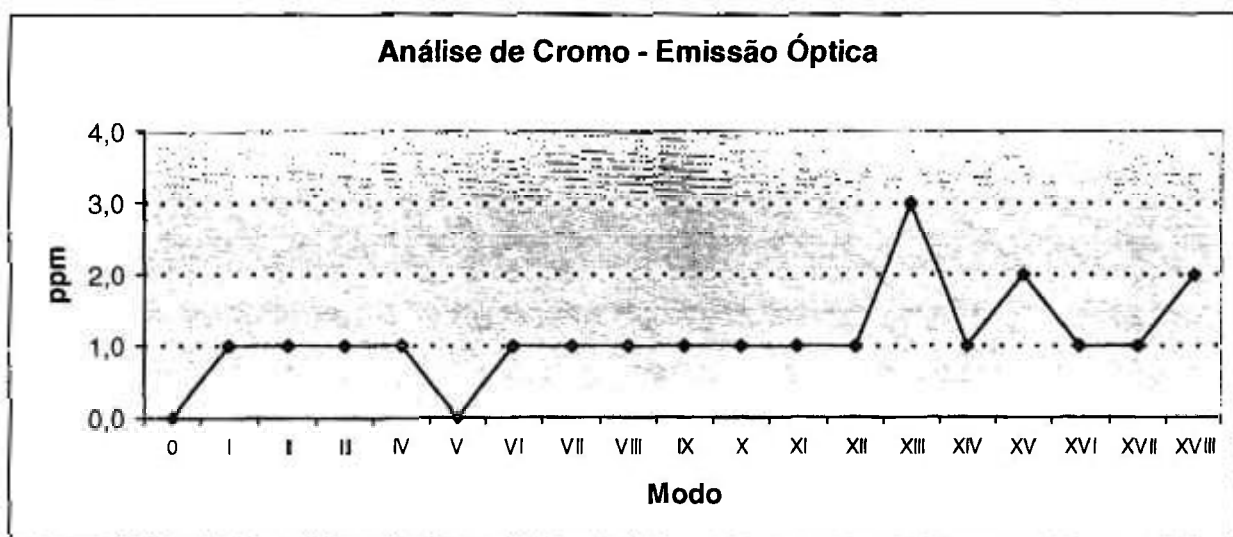


Figura 88 - Análise de Cromo por Emissão Óptica

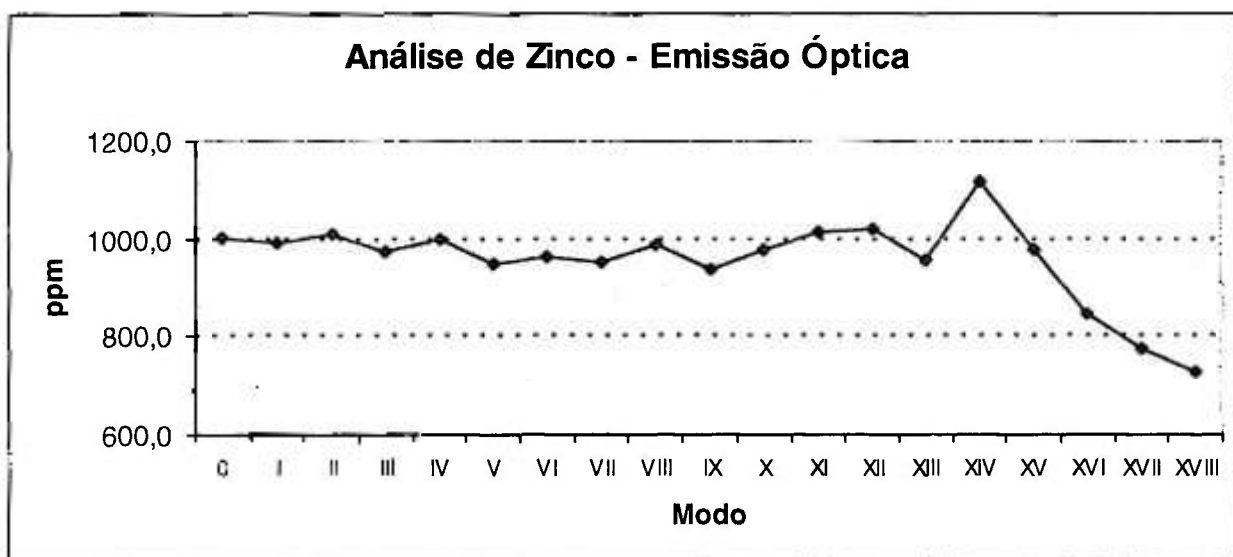


Figura 89 - Análise de Zinco por Emissão Óptica

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. <http://www.howstuffworks.com/diesel.htm>
2. RAMSBOTTOM, J., On na Improved Piston for Steam Engines, Pro. Instn. Mech. Eng. P.70 – 74, 1854.
3. HEYWOOD, J.B. – Internal Combustion Engine Fundamental, Automotive Technology Series, Editora Mc GRAW-HILL.
4. HIKOSAKA, N. – A View of the Future of Automotive Diesel Engines, Isuzu Advanced Engineering Center, Ltd., Society of Automotive Engineers, Inc., 1997.
5. BARTZ, W.J. – Viscosity Influence ou Friction Conditions and Fuel Economy of Automobiles, Technishe Akademie Esslingen, SAE 972858, 1997.
6. VATAVUK, J.; GALVANO, M.; PICCILLI, M.R.; HANAI, O.; - Estudo do Efeito da Adição de Partículas Duras em Coberturas Aspergidas por Plasma, Para Anéis de Pistão, 9º CBECIMAT, p.943 – 946, 1990.
7. PRIEST, M.; TAYLOR, C.M.; - Automobile Engine Tribology – Approaching the Surface, Wear 241, p.193 – 203, Elsevier, 2000.
8. LAUGÊNIO, J.M. – Catálogo de Anéis de Pistão. Centro Tecnológico de Pesquisa de Motores – Cofap, p. 2 – 4.
9. ZUM GAHR, K.H.; - Microstruture and Wear of Materials. Elsevier Science Publishers, USA, 1987.
10. VATAVUK, J. – Mecanismo de Desgaste em Anéis de Pistão e Cilindros de Motores de Combustão Interna. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, p.34 – 39, 1994.
11. TING, L.L. – Lubrificated Piston Rings and Cylinder Bore Wear. In: Peterson, M.B. Winer, W.O; Wear Control Handbook, 1980, ASME.
12. LUDEMA, K.C. – A Review of Scuffing and Running-in Lubricated Surfaces, with Asperities and Oxides in Perspective. Wear 100, p.315, 1984.

13. AE GOETZE – Revestimento Térmicos Resistentes ao Desgaste para Superfícies de Contato de Anéis de Pistão. Paper Goetze K28 (tradução).
14. HERMAN, H.; - Advances in Thermal-Spray Technology. Advanced Materials and Process, v.137, 4, p.41 – 45, 1990.
15. YUST, C.S. –Tribology and Wear. International Review, v.30, p. 141 – 154, 1985.
16. JAKOBS, R.J.; GAZZARD, S.T.; ONGETTA, R.; ROSENBERG, I.S. – Mid-Range Diesel Piston Systems, p.22, T&N Symposium 1995.
17. SHEN, Q. – Development of Material Surface Engineering to Reduce the Friction and Wear of the Piston Ring, SAE 970821, International Congress & Exposition, 1997.
18. LUDEMA, K.C. – Friction, Wear and Lubrication: A Textbook in Tribology, Hardcover, 1996.
19. WULPI, D.J. – Understanding How Components Fail, American Society for Metals, p.163 – 164, 1985.
20. WRIGHT, K.H.R. – Mechanisms of Wear. In: Neale, M.J., Tribology Handbook, Butterworths, London, 1973.
21. MAIR, L.H.; STOLARSKI, T.A.; VOWLES, R.W.; LLOYD, C.H. – Wear: Mechanisms, Manifestations and Measurement. Report of a Workshop, Journal of Dentistry Vol.24, p.141 – 148, 1996.
22. BOWDER, F.P.; TABOR,D. – The Friction and Lubrication of Solids – Part 1, Claredon, Oxford, 1950.
23. TABOR, D. – Friction Mechanisms, Effect of Lubricants. In: Neale, M.J. – Tribology Handbook, Butterworths, London, 1973.
24. PARK, K.B.; LUDEMA, K.C. – Evaluation of the Plasticity Index as a Scuffing criterion. Wear 175, p.123, 1994.
25. LUDEMA, K.C. – A Review of Scuffing and Running-in of Lubricated Surfaces, with Asperities and Oxides in Perspective. Wear 100, p.315, 1984.

26. LEE, S.C.; CHENG, H.S. – Correlation of Scuffing Experiments with EHL analysis of Rough Surfaces. Transactions of the ASME, Journal of Tribology, v.113, 1991.
27. HAYNES, G. – Accelerated Chromium Plate Ring Wear Associated With Liner Pitting. Paper SAE 831280. In: State of the Art on Design and Performance of Diesel Power Cylinder Components. SP552, 1993.
28. DEMARCHI, V. et al. Desgaste Abrasivo em Motores Diesel. Paper SAE 962380, p.1996.
29. TYLCSAK, J.H.; OREGON, A. – Abrasive Wear. ASM Handbook, v.18, Friction, Lubrication and Wear Technology, 1992.
30. VATAVUK, J.; DEMARCHI, V. – The Effect of the Addition of Hard Particles on the Wear of Liner and Ring Materials Running With High Sulfur Fuel. SAE Paper 950527, 1995.
31. SUH, N.P. – The Delamination Theory of Wear. Wear, v.25, p.111 – 124, 1973.
32. SO, H. – The Mechanism of Oxidation Wear. Wear, p.161 – 167, v.184, 1995.
33. EYRE, T.S.; et al. – Characterization and Simulation of Wear Occurring in the Cylinder Bore of the Internal Combustion Engines. Tribology International, v.23, n.1, p.11 – 16, 1990.
34. NEALE, M.J. – Lubrication, A Tribology Handbook, Butterworths, Oxford, 1993.
35. LUDEMA, K.C. – Sliding and Adhesive Wear. In: ASM Handbook, v.18, Friction, Lubrication and Wear Technology, 1992.
36. MEHAN, R.L.; FLYNN, P.L.; GLAMMARISE, A.W. – Evaluation of Piston Ring Materials in Oil Containing an Abrasive Using a Ring on block Test Machine. Wear 147, p.41 – 57, 1991.
37. HEILMANN, P.; RIGNEY, D.S. – Running-in Process Affecting Friction and Wear. In: Dowson, Running-in Process in Tribology, 1981.
38. HUTCHINGS, I.M. – Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Edward Arnold, Great Britain, 1992.

39. CZICHOS, H. – Systematic Diagnosis of Friction and Wear Test Data. In: ASM Handbook, v.18, Friction, Lubrication and Wear Technology, 1992.
40. KIMURA, Y.; SUGIMURA, J. – Microgeometry of Sliding Surfaces and Wear Particles in Lubricated Contact. Wear 100, p.33 – 45, 1984.
41. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. Piston Rings Testing of Quality Characteristics, DIN 70907, Berlin, p.18, 1980.
42. DEMARCHI, V. – Estudo de Materiais, Geometria e Compatibilidade dos Tribossistemas em Anéis de Pistão para Motores de Combustão Interna, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1994.
43. REASSON, R.E. – Surface Topography. In: Neale, M.J., Tribology Handbook, Butterworths, London, 1973.
44. COFAP – CIA FABRICADORA DE PEÇAS, Material Catalogue of Piston Ring and Cylinder Liners. 3rd Edition, Santo André, Brasil, Cofap, 1993.
45. MARIANO, J.R.; VATAVUK, J. – Wear Resistant Nodular Iron for Piston Rings, Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, São Paulo, 1989.
46. RIKEN, High-Power Steel Ring for Modern Engines, Riken Technical Paper. Publicação n.RTP1, Japão, 1991.
47. KRUSHOV, M. – Principles of Abrasive Wear, p. 69 – 88, 28/ 1974.
48. GREENWOOD, J. A. – Nature of Surfaces and Contact. In: Neale, M.J., Tribology Handbook, Butterworths, London, 1973.
49. TOMANIK, E. – Piston Ring Conformability in a Distorted Bore, SAE Technical Paper Series. Publicação 960356, USA, 1996.
50. TOMANIK, E. – Brunimento de Cilindros – Principais Características. SAE Technical Paper Series. Publicação 921453, São Paulo, 1992.
51. GOETZE AG, Piston Ring Manual, Publicação 893801, Burscheid, Germany, 1989.

52. GOETZE AG, Rating Criteria for the Honing Cylinder Running Surfaces, Burscheid, Germany, 1988.
53. HILL, S.H.; SYTSMA, S.J. - A Systems Approach to Oil Consumption. SAE Technical Paper n.910743, Warrendale, USA, 1991.
54. SUGISHITA, J.; FUJIYOSHI, S. - The Effect of Cast Iron Graphites on Friction and Wear Performance, Part. I, II e III, Wear v.66, 68 e 77, 1981/2.
55. TING, L.L. - Lubricated Piston Rings and Cylinder Bore Wear, In: PETERSON, M.B.; WINER, W.O., Wear Control Handbook, p.609 - 665, ASME, USA, 1980.
56. GOLOGAN, V.; EYRE, T.S. - Friction and Wear of Some Engineering Materials Against Hard Chromium Plating, Wear 28, p.49 -57, 1974.
57. DOWSON, D. - Methods of Fluid Film Formation. In: Neale, M. J., Tribology Handbook, Butterworths, London, 1973.
58. SCHNEIDER, E.W.; et al. - Effect of Speed and Power Output on Piston Ring Wear in a Diesel Engine. Paper SAE 880672, 1988.
59. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) - Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, G99-90, Section 3, v.03.02, p. 391 - 395, USA, 1990.
60. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) - Standard Practice for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block on Ring Wear Test, G77-90, Section 3, v.03.02, p. 310 - 321, USA, 1990.
61. PATTERSON, D.J.; HILL, S.H.; TUNG, S.C. - Bench Wear Testing of Engine Power Components, In: Fuel, Controls and After treatment for Low Emissions Engines, v.15, p.123 - 128, ASME, 1991.
62. ASHBY, M.F.; LIM, S.C. - Wear-Mechanisms Maps, Scripta Metalurgia et Materialia, v.24, p.805 - 810, 1990.

63. GHIGLIONE, D.; LEROUX, C.; TOURNIER, C. – Pratique des Traitements Thermochimiques, Nitruration, Nitrocarburation et Dérivés, Traitements Thermiques, v.M4, p.M 1227 – 30, 1995.
64. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS (ABM) – Corrosão e Tratamentos Superficiais dos Metais, p.198 – 200, 1971.
65. GOETZE, Patente Alemã DE3672431 concedida em 23.03.1989.
66. MC GEEHAN, J.A.; et al. – API CI 4: The First Oil Category for Diesel Engines Using Cooled Exhaust Gas Recirculation, ASTM Heavy Duty Engine Oil Classification Panel (HDEOCP), 8th Annual Fuels & Lubes Asia Conference and Exhibition, Singapore, 2002.
67. A.F. PADILHA; F. AMBRÓZIO F^o; Técnicas de Análise Micro Estrutural, Editora Hemus, 1985.
68. Minitab, Statistical Software, Release 13,0, Minitab Inc – Making Data Analysis Easier.
69. AMERICAN SOCIETY OF METALS (ASM) – Metals Handbook 8th edition, Heat Treating, Cleaning and Finishing, Ceramic Coating, v.2, p.590-594.
70. VIEIRA,R.R; VATAVUK,J; GARCIA,M.B – Efeito do Teor de Enxofre no Óleo Diesel na Topografia do Desgaste de Cilindros e Revestimentos de Anéis de Pistão, IV Seminário de Desgaste da ABM,pg.479-501, São Paulo, 1998.