ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA POR APROVADA 30 PELA COMISSÃO JULGADORA EM

Profa. Cecilia A. C. Zavaglia Dep. Eng. Materiais F.E.M. UNICAMP 1.F. 07010-6

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ROBÉRIO RODRIGUES JUNIOR

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE RECOBRIMENTOS SUPERFICIAIS PARA TUCHOS DE VÁLVULA ATRAVÉS DE ENSAIOS DE DESGASTE

Campinas, 2010

114/2010

Robério Rodrigues Junior

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE RECOBRIMENTOS SUPERFICIAIS PARA TUCHOS DE VÁLVULA ATRAVÉS DE ENSAIOS DE DESGASTE

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Automobilística.

Área de Concentração: Materiais

Orientadora: Profa. Dra. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia

Campinas 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

1

R618a	Rodrigues Junior, Robério Avaliação comparativa de recobrimentos superficiais para tuchos de válvula através de ensaios de desgaste / Robério Rodrigues JuniorCampinas, SP: [s.n.], 2010.
	Orientador: Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia. Dissertação de Mestrado (Profissional) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.
	1. Nitruração. 2. Implantação iônica. 3. Desgaste mecânico. 4. Motores. I. Zavaglia, Cecília Amélia de Carvalho. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Comparative evaluation of surface coatings for valve lifters through wear tests Palavras-chave em Inglês: Nitriding, Ion implantation, Mechanical wear, Engines Área de concentração: Materiais Titulação: Mestre em Engenharia Automobilística Banca examinadora: Carlos Alberto Fortulan, Maria Clara Filippini Ierardi Data da defesa: 30/07/2010 Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE RECOBRIMENTOS SUPERFICIAIS PARA TUCHOS DE VÁLVULA ATRAVÉS DE ENSAIOS DE DESGASTE

Autor: Robério Rodrigues Junior Orientador: Prof. Dra. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof^a. Dra. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia, Presidente Universidade Estadual de Campinas - Unicamp

Prof^a. Dra. Maria Clara Filippini Ierardi Universidade Estadual de Campinas - Unicamp

Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Campinas, 30 de julho de 2010.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que durante toda minha vida incentivaram e apoiaram os meus estudos, dando a isto a prioridade máxima, independentemente de qualquer dificuldade ao longo da minha formação.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, meus irmãos e minha namorada, pela compreensão durante a minha ausência, física e de espírito durante a realização deste trabalho.

À minha orientadora, Prof^a. Dra. Cecília A. C. Zavaglia, pela paciência, pelo apoio, e por todo o suporte, imprescindível para a conclusão de mais esta etapa em minha vida.

À MWM INTERNATIONAL Motores, pela oportunidade de aprendizado e crescimento. E aos colegas Adilson Souza Teixeira e Edson Marcos Vilela pelo suporte com as amostras para os ensaios.

À Prof^a. Dr^a. Maria Clara Filippini Ierardi, pela disponibilização de seu laboratório para os ensaios de desgaste.

Ao Prof^o. Dr. Carlos Alberto Fortulan, pelas discussões sobre os ensaios de desgaste e também pela disponibilização de seu laboratório para os primeiros experimentos que foram realizados.

Aos colegas, Lonetá Laura Lima, Felipe Toloi Gastaldo, Solange Tâmara Fonseca e Maria Aparecida Larosa, pelo suporte prestado para a execução dos ensaios e na utilização dos laboratórios.

Ao Sr. Carlos Salles Lambert, pelo suporte técnico e ajuda na obtenção dos recobrimentos.

À Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas.

"Temos o destino que merecemos. O nosso destino está de acordo com os nossos méritos." *Albert Einstein*

RESUMO

Com o intuito de avaliar a eficiência de diferentes recobrimentos superficiais aplicados a tuchos de válvulas - um componente utilizado em motores à combustão - foram propostos alguns recobrimentos que foram comparados a um recobrimento já utilizado pela indústria. Para as avaliações foram realizados ensaios de microdureza, ensaios de desgaste micro-abrasivo e avaliações da microestrutura dos recobrimentos. Os recobrimentos estudados foram: nitretação a gás convencional, esta já utilizada pela indústria; implantação iônica por imersão em plasma (IIIP) de nitrogênio; IIIP de nitrogênio sobre a camada já existente de nitretação a gás convencional; e confrontada com uma amostra sem nenhuma camada de recobrimento superficial aplicada. Os ensaios de desgaste micro-abrasivo foram realizados em um equipamento do tipo esfera contra bloco, utilizando solução abrasiva de carboneto de silício (SiC), e variando a carga normal aplicada, sendo elas de 1, 2 e 3N. Os resultados mostram que a nitretação a gás convencional obteve o mais elevado nível de microdureza na superfície e também o mais elevado nível de desgaste por micro-abrasão; este resultado prevaleceu nesta amostra para todas as cargas normais aplicadas. Em geral, a amostra que obteve o melhor nível de desgaste, ou seja, o menor volume desgastado foi a amostra que não tinha nenhum tipo de recobrimento.

Palavras chave: Nitretação, implantação iônica por imersão em plasma, resistência ao desgaste micro-abrasivo, motores.

ABSTRACT

With the intention to evaluate the efficiency of different coatings applied to valve tappets – a component used in combustion engines – was proposed some coatings that was compared to an coating already known by the industry. For the evaluations were performed micro hardness tests, micro abrasive wear tests and studies of the microstructure of the coatings. The coatings studied were: conventional gas nitriding, this one already used by the industry; ionic implantation by plasma immersion (IIPI) of nitrogen; IIPI of nitrogen over the layer already existing of conventional gas nitriding; against a sample that was tested without any layer of coating. The micro abrasive tests were performed in an equipment named ball-on-block, using abrasive solution of silicon carbide (SiC), and varying the normal load from 1, 2 and 3N. The results showed that the conventional gas nitriding performed the highest level of micro hardness on the surface, and also the highest level of micro abrasion wear; this result prevailed in this sample in all the normal load applied. Generally, the sample that obtained the best level of wear, in other words, the lowest worn volume was the sample whithout any coating.

Keywords: Nitriding, ionic implantation by plasma immersion, micro abrasive wear resistance, engines.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura	Nome da figura	Pág.
2.1 -	Ciclo de funcionamento de motores a quatro tempos	5
2.2 -	Sistema de "trem de válvulas"	6
2.3 –	Modelos de acionamento com o eixo de comando localizado no cabeçote do motor	7
2.4 –	Modelo de acionamento com o eixo de comando localizado no bloco do motor	7
2.5 –	Sistema de acionamento de vávulas por varetas	8
2.6 -	Distribuição do consumo da energia em um veículo, gerada por um motor a combustão	9
2.7 –	Distribuição da energia total em um motor a combustão	10
2.8 –	Regimes de lubrificação em componentes de motores e a relação típica de atrito	12
2.9 –	Dimensões típicas dos regimes de lubrificação	14
2.10 -	Ilustração esquemática dos quatro principais mecanismos de desgaste	16
2.11-	Formação de junções por adesão	17
2.12 –	Formas de desgaste físico entre as partículas e as superfícies dos materiais	19
2.13 –	Micrografias típicas das superfícies de sólido que sofreram desgaste abrasivo: a) micro-sulcamento, b) micro-corte e c) micro-trincamento	20
2.14 -	Desgaste por abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos	21
2.15 -	Diagrama de fases Fe-C (com a grafita em vez de cementita como fase estável)	24
2.16 -	Micrografias de ferros fundidos	25
2.17 -	Comparação de usinabilidade entre os principais tipos de ferros fundidos	26
2.18 -	Do diagrama de fases Fe-C, a faixa de composição comercial	28

utilizada para obtenção dos ferros fundidos

2.19 -	a) Camada nitretada no aço carbono; b) Camada nitretada no aço ligado	32
3.1 -	Ilustração do molde para fundição e coquilhamento da região do tucho, molde de areia injetada	37
3.2 -	Ilustração e dimensões gerais do tucho de válvulas após o processo de usinagem	38
3.3 -	Região do prato do tucho em contato com o eixo comando- Acionamento das vávulas por varetas	38
3.4 -	Foto do equipamento do IFGW onde foi realizado o tratamento IIIP	40
3.5 -	Foto do microscópio óptico Olimpus GX51	41
3.6 -	Foto do microdurômetro Shimadzu HMV-2	42
3.7 -	Foto do equipamento para ensaio de desgaste micro-abrasivo	43
3.8 -	Ilustração de medição do diâmetro da calota formada pelo desgaste micro-abrasivo	45
4.1 -	Microscopia óptica das camadas superficiaisdas amostras	46
4.2 -	MEV da amostra A em 4 aumentos diferentes. Carga de 3 [N]	48
4.3 -	MEV da amostra B em 4 aumentos diferentes. Carga de 3 [N]	49
4.4 -	MEV da amostra C em 4 aumentos diferentes. Carga de 3 [N]	50
4.5 -	MEV da amostra D em 4 aumentos diferentes. Carga de 3 [N]	51
4.6 -	Gráfico das medições de microdureza	52
4.7 -	Gráfico do volume desgastado para as cargas de 1, 2 e 3N	53
4.8 -	Gráfico de desgaste percentual referenciado	54
4.9 -	Gráfico analítico dos principais efeitos para a resposta de desgaste	55
4.10 -	Gráfico analítico de interação entre os parâmetros de teste	56

LISTA DE TABELAS

Tabela	Nome da tabela	Pág.
3.1-	Composição química do ferro fundido especificada conforme norma MWM	37
3.2 -	Identificação das amostras conforme recobrimento aplicado	40
3.3 –	Parâmetros utilizados para os ensaios de desgaste	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Letras latinas

A ^o -	Angstron
b -	Diâmetro da calota esférica medida após os ensaios
C -	Carbono
Fe -	Ferro
h -	Espessura do filme lubrificante
N -	Newton
mm -	Milímetro
nm -	Nanômetro
R -	Raio da esfera
V -	Volume de desgaste

Letras gregas

γ -	Austenita
δ -	Ferrita delta
λ-	Proporção da espessura do filme lubrificante
σ-	Fase sigma; tensão; rugosidade das superfícies

Siglas

ASTM -	American Society for Testing and Materials
DEMA -	Departamento de Engenharia de Materiais
LABIOMEC-	Laboratório de Biomateriais e Biomecânica
FEM -	Faculdade de Engenharia Mecânica
UNICAMP -	Universidade Estadual de Campinas
UFRGS -	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
IFGW -	Instituto de Física Gleb Wataghin, da UNICAMP
MO -	Microscopia Óptica
MEV -	Microscopia Eletrônica de Varredura
III P & D -	Implantação Iônica por Imersão em Plasma
DIN -	Deustscher Institut fur Normung (Instituto de normas técnicas
	da Alemanha)
TR -	Technical Regulations

SUMÁRIO

1.	INTRODU	JÇÃO	1
2.	REVISÃO) DA LITERATURA	4
	2.1. MOT	ORES DIESEL	4
	2.1.1.	SISTEMA DE TREM DE VÁLVULAS	6
	2.1.2.	PERDAS DE ENERGIA EM MOTORES	8
	2.1.3.	TRIBOLOGIA DO MOTOR	11
	2.1.4.	ENGENHARIA DE SUPERFÍCIES	14
	2.2. DESC	GASTE	16
	2.2.1.	DESGASTE POR ADESÃO	17
	2.2.2.	DESGASTE POR ABRASÃO	
	2.2.3.	DESGASTE POR FADIGA SUPERFICIAL	21
	2.2.4.	DESGASTE POR REAÇÃO TRIBO-QUÍMICA	22
	2.3. FERF	RO FUNDIDO	23
	2.4. RECO	OBRIMENTOS SUPERFICIAIS	31
	2.4.1.	NITRETAÇÃO	31
	2.4.2.	IMPLANTAÇÃO IÔNICA POR IMERSÃO A PLASMA	34
3.	MATERIA	AIS E MÉTODOS	
	3.1. SUBS	STRATO DOS CORPOS DE PROVA	36
	3.2. RECO	OBRIMENTOS E CONDIÇÕES DE DEPOSIÇÃO	
	3.3. ANÁ	LISE DA MICROESTRUTURA	41
	3.4. ENSA	AIO DE DESGASTE MICRO-ABRASIVO	42
4.	RESULTA	ADOS E DISCUSSÕES	46
	4.1. MICF	ROSCOPIA ÓPTICA	46

	4.2. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	.47
	4.3. MICRODUREZA	51
	4.4. RESISTÊNCIA AO DESGASTE MICROABRASIVO	52
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	.57
	5.1. CONCLUSÕES	57
	5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	.58

1. INTRODUÇÃO

Um dos assuntos que mais preocupa a humanidade atualmente é o consumo crescente de energia. Os aspectos causadores desta preocupação são o aumento da demanda por energia, relacionada com o crescimento da população e sua necessidade de consumo; o fato de muitas fontes serem não-renováveis; e também o fato de que em muitos casos a geração de energia se torna cada vez mais custosa, seja este custo o investimento para criação de usinas e novas tecnologias, ou o custo do impacto ambiental agregado à geração e consumo de energia.

A busca de fontes alternativas e da redução do consumo de energia é foco em diversos fóruns, sendo um deles a redução de consumo de combustíveis em motores de combustão, muitas vezes movidos à combustíveis derivados do petróleo. O objetivo neste caso é desenvolver motores cada vez mais econômicos, que produzam a mesma potência e torque, e/ou reduzir as perdas térmicas e mecânicas, aumentando desta forma a sua eficiência e diminuindo o consumo de combustível.

Além dos fatores apontados, como escassez de combustíveis fósseis e impacto ambiental, a economia de energia se faz necessária também devido ao impacto econômico para o usuário final de veículos movidos a motores de combustão. Segundo Oliveira [2000], o custo do combustível pode representar mais da metade do custo operacional em uma frota de tratores, mas considerando que o consumo de combustível se dá pelo motor, que são similares independente da aplicação, estes valores também são válidos para frotas de outros tipos de veículos, como por exemplo ônibus e caminhões. Sendo assim, a redução do consumo de combustível impacta diretamente nos resultados financeiros de empresas de transporte e usuários de veículos ou equipamentos movidos à motores de combustão.

Em busca de soluções para a economia de combustíveis, desenvolvedores e fabricantes de veículos automotores têm realizado estudos no desenvolvimento de novos recobrimentos superficiais que reduzam o atrito dos componentes dos motores e transmissões.

Estes sistemas, motores e transmissões (englobando caixas de câmbio, mancais, rolamentos, eixos diferenciais), são apontados como vilões em um veículo automotor ao serem responsáveis por grandes perdas mecânicas provenientes do atrito entre as partes móveis.

Este trabalho tem por objetivo geral a caracterização de recobrimentos superficiais quanto aos seus aspectos tribológicos, para a utilização em componentes de motores, visando a redução de desgaste. Além disso, busca ainda analisar a possibilidade de utilização do tribômetro (*esfera-bloco*) como ferramenta de testes para desenvolvimento de superfícies de componentes de motores, visando reduzir o tempo e os elevados custos dos testes de durabilidade em dinamômetros e/ou em veículos.

Neste trabalho o componente escolhido como foco dos estudos foi o tucho de válvula, presente em motores Diesel em quantidade proporcional ao seu número de cilindros, é um componente do sistema de acionamento das válvulas que sofre atrito em contato direto com o eixo de comando. Por esta característica, este componente deve ser desenvolvido com a capacidade de suportar cargas diversas sem que ocorram deformações plásticas em qualquer região do seu corpo, resistir ao desgaste nas regiões de contato com outros componentes e oferecer baixo coeficiente de atrito.

Além dos motivos já citados, outro fator que motivou o estudo do referido componente foi o desgaste acentuado encontrado esporadicamente em tuchos, removidos de motores com elevadas horas de teste.

Com o intuito de estudar a eficiência de recobrimentos superficiais, foi selecionado um componente existente na indústria recoberto por uma camada nitretada - o tucho de válvula-, que foi comparado ao mesmo componente sem a camada nitretada, e ainda à duas outras amostras tratadas por Implantação Iônica por Imersão em Plasma e Deposição (IIIP&D).

Em ensaios de desgaste realizados em um tribômetro, foram quantificados os desgastes de corpos de prova obtidos a partir de tuchos de válvula com quatro propostas de superfície.

2

Os tuchos de válvula, tanto os nitretados quanto os sem nitretação, foram obtidos junto ao produtor através de processo de fabricação em larga escala que fornece componentes para a indústria de motores e para o mercado de reposição e foram tirados diretamente da linha de produção, apenas os tuchos sem a camada de nitretação foram solicitados ao fabricante o fornecimento antes da etapa de nitretação (última etapa do processo de fabricação).

O tratamento via Implantação Iônica por Imersão em Plasma e Deposição foi aplicado aos respectivos corpos de prova em equipamento disponível no Instituto de Física Gleb Wataghin da Unicamp. Este tratamento foi aplicado sobre a camada nitretada já existente no componente disponível no mercado, e também sobre uma amostra isenta de nitretação.

Foram avaliadas as características de cada recobrimento superficial utilizando as seguintes análises:

- Medição da micro-dureza da superfície dos corpos de prova;

- Avaliação da existência de camadas definidas de cada recobrimento no substrato;

- Avaliação da resistência ao desgaste dos corpos de prova, realizado em um tribômetro "esferabloco";

- Identificação do tipo de desgaste micro-abrasivo através de visualização das amostras em MEV após o ensaio de desgaste;

- Análise gráfica observando os principais efeitos e possíveis interações entre as características.

Com estas avaliações, foi possível identificar as características de superfície que estão correlacionadas com os menores valores de desgaste obtidas no tribômetro.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1.MOTORES DIESEL

Os motores Diesel funcionam com o princípio de ignição por compressão. O ar entra no cilindro através da abertura das válvulas de admissão, podendo ser admitido através da depressão gerada no cilindro pelo movimento de descida do pistão, ou também pode ter o auxilio de um turbocompressor, que aumentando a densidade do ar admitido e conseqüentemente permite a queima de uma maior quantidade de combustível em um mesmo volume. Após a fase de admissão, as válvulas de admissão se fecham, inicia-se a fase de compressão e o pistão no movimento de subida comprime o ar na câmara de combustão, aumentando a sua pressão e temperatura. O combustível é então injetado, neste momento ocorre o início da combustão, o combustível entra em ignição devido à alta temperatura do ar comprimido. Na fase de combustão dá-se início à expansão dos gases, que força o pistão para baixo gerando a potência do motor. Por último, as válvulas de escape se abrem, e o pistão em um novo movimento de subida empurra os gases resultantes da combustão para o sistema de escape [Challen, Bernard, 1999]. Estas quatro fases totalizam um movimento rotativo de 720° do virabrequim, conforme a Figura 2.1.



Figura 2.1 – Ciclo de funcionamento de motores a quatro tempos [http://www.mecanica.ufrgs.br/mmotor/4tempos.jpg]

2.1.1. SISTEMA DE TREM DE VÁLVULAS

Um motor a combustão pode ser subdividido em sistemas, sendo eles o sistema de lubrificação, combustão, trem de válvulas, injeção, refrigeração, etc. Sendo o tucho de válvulas o componente escolhido como foco deste estudo, é necessário então entender o funcionamento do sistema onde ele é aplicado, no caso, o sistema de Trem de Válvulas.

O sistema denominado "trem de válvulas" mostrado na Figura 2.2 inclui as válvulas (admissão e escape), molas de válvula, retentores de válvula, parafusos de regulagem, balanceiros, tuchos, varetas e eixo de comando.



Figura 2.2 – Sistema de "Trem de válvulas" [Adaptado de Modern Tribology Handbook, 2000]

A função principal deste sistema é transformar o movimento rotativo do eixo de comando no movimento linear das válvulas que controlam o fluxo de entrada e saída dos gases tanto na fase de admissão como na fase de escape.

O sistema de trem de válvulas pode permitir algumas variações em sua configuração como ilustrado nas Figuras 2.3 e 2.4, porém todas estas configurações ilustradas possuem uma característica em comum, os movimentos de abertura e fechamento das válvulas são invariavelmente controlados pelo eixo de comando que por sua vez tem o seu movimento atrelado ao virabrequim, assegurando desta forma a sincronização do movimento das válvulas com o ciclo de combustão e o movimento dos pistões.



Figura 2.3 – Modelos de acionamento com o eixo de comando localizado no cabeçote do motor [Adaptado de Modern Tribology Handbook, Vol. 1, 2000]



Figura 2.4 – Modelo de acionamento com o eixo de comando localizado no bloco do motor [Adaptado de Modern Tribology Handbook, Vol. 1, 2000]

A Figura 2.5 ilustra o sistema de acionamento das válvulas por Haste de Válvula e Tuchos com o Eixo de Comando localizado no bloco do motor.



Figura 2.5 – Sistema de acionamento de válvulas por varetas. [Arquivo Próprio]

2.1.2. PERDAS DE ENERGIA EM MOTORES

Para entendermos a importância do assunto, é interessante compreender a distribuição da energia derivada da combustão em um motor. Segundo Andersson, [1991], na distribuição da energia para um veículo de passeio médio em um ciclo de utilização urbano, apenas 12% da energia entregue pelo combustível está disponível para mover as rodas, outros 15% desta energia é dissipada como perdas mecânicas, principalmente pelo atrito.

Através dos dados publicados por Andersson, [1991], uma redução de 10% nas perdas mecânicas levaria à uma economia de combustível de cerca de 1,5%.



Figura 2.6 – Distribuição do consumo da energia emum veículo, gerada por um motor à combustão (Adaptado de Nakasa, 1995)

A Figura 2.6 nos dá a distribuição do consumo da energia em um veículo, gerada por um motor (Nakasa, 1995), onde o próprio motor é o maior consumidor da energia por ele gerada, cerca de 41%.

Podemos observar na Figura 2.7 a distribuição da energia total em um motor a combustão típico (Richardson, 1999). Esta figura mostra que de 4 a 15% da energia total é dissipada através de atrito mecânico. O gráfico disposto na Figura 2.6 considera também como perda pelo motor, a energia dissipada pela exaustão, superfícies do motor e refrigeração dos cilindros, enquanto o gráfico da Figura 2.7 considera estas como "outras perdas", resultando em 15% de perda por atrito no motor.



Figura 2.7 – Distribuição da energia total em um motor a combustão. (Adaptado de Richardson, 1999)

Melhorias no desempenho tribológico dos motores podem nos levar à redução do consumo de combustível, aumento da potência disponível no motor, redução de consumo de óleo lubrificante, contribuições à redução dos níveis de emissão de poluentes, aumento da durabilidade e confiabilidade do motor, e por fim a redução da necessidade de manutenção e aumento dos intervalos de serviço.

Considerando a enorme quantidade de veículos automotores e outras máquinas movidas a motores de combustão em funcionamento no mundo inteiro, mesmo a menor melhoria realizada na eficiência do motor, pode nos levar à efeitos de grande impacto na economia mundial e ao meio ambiente no médio e longo prazo (Taylor, 1998). Para se estudar os meios de caracterização de superfícies, com o foco em identificar materiais que reduzam o atrito e o desgaste, é necessário entender o sistema tribológico do conjunto a ser estudado.

Para compreender o sistema tribológico, é necessário conhecer o contexto onde os corpos em contato estão situados, qual é o ambiente onde está localizado e sua interface. Também é necessário conhecer a descrição funcional deste sistema, quais são os sinais de entrada e saída, tais como, movimento, trabalho, vibração, calor, etc. Portanto para compreensão do sistema tribológico é preciso entender todas as variáveis que possam afetar os componentes em funcionamento. [Vicente, 2005]

Para uma correta caracterização do sistema tribológico deste trabalho serão discutidos nos próximos tópicos os regimes de lubrificação e os mecanismos de desgaste.

2.1.3. TRIBOLOGIA DO MOTOR

Assim como em qualquer mecanismo que opera com lubrificação líquida, o parâmetro tribológico a se observar em um motor é a espessura do filme de lubrificante que separa os componentes em atrito. Pode-se definir este parâmetro como a grandeza relativa entre o filme lubrificante comparado com a rugosidade das duas superfícies, ou a proporção da espessura do filme, ou λ . [Modern Tribology Handbook, 2000]

$$\lambda = \frac{h}{\left(\sigma_{\text{surface 1}}^2 + \sigma_{\text{surface 2}}^2\right)^{1/2}}$$

Equação 1 - Relação filme lubrificante pela rugosidade combinada entre as superfícies

Onde h representa a espessura do filme calculado através da hipótese de superfícies lisas, e σ a raiz quadrada da soma dos quadrados das rugosidades das superfícies. Uma versão análoga

desta equação utiliza o valor médio das rugosidades das superfícies (Ra_{surface1}+Ra_{surface2}) no denominador no lugar do termo raiz da soma dos quadrados.

A Figura 2.8 mostra um gráfico da relação entre o coeficiente de atrito e o parâmetro λ . O diagrama acima do gráfico proporciona um exemplo visual da lubrificação entre duas superfícies em movimento relativo separadas pelo filme de lubrificante. À esquerda a ilustração é do contato entre as superfícies, à direita um filme do fluido lubrificante separa as superfícies, e ao meio destes extremos, ocorre um contato parcial ou intermitente entre as superfícies. Não é possível delinear exatamente os limites de cada regime ilustrado a seguir.



Figura 2.8 – Regimes de lubrificação em componentes de motores e a relação típica de atrito (Modern Tribology Handbook, 2000)

A - Lubrificação por Filme Fluido (ou Hidrodinâmica)

Ocorre quando o filme de fluido lubrificante tem espessura suficiente para evitar o contato entre os corpos. Trata-se de uma situação ideal, o comportamento do atrito está totalmente relacionado com as características físicas do lubrificante e as características das superfícies pouco influenciam. [Vicente, 2005]

B - Lubrificação Limítrofe.

Quando as superfícies dos corpos entram em contato direto, sem a separação por um filme lubrificante, ou seja, há um contato similar a seco. Neste caso as características do atrito estão relacionadas com as propriedades dos sólidos e do lubrificante. As propriedades físicas e químicas do lubrificante influenciam no atrito. [Vicente, 2005]

C - Lubrificação Mista.

Neste caso ocorre a combinação entre a lubrificação hidrodinâmica e limítrofe. Esta condição é comumente encontrada em diversos elementos de máquinas, como mancais, anéis de motores e engrenagens. [Vicente, 2005]

D - Lubrificação Elasto-Hidrodinâmica.

Ocorre nas mesmas regiões após ter ocorrido a lubrificação limítrofe. Devido ao atrito direto, e as pressões superficiais entre os materiais, ocorre uma deformação elástica nas superfícies dos sólidos. Também com esta pressão de contato, a viscosidade do lubrificante aumenta e isto facilita a formação de um filme lubrificante efetivo. [Vicente, 2005]

A Figura 2.9 ilustra as dimensões das espessuras dos filmes para os regimes de lubrificação discutidos.



Figura 2.9 – Dimensões típicas dos regimes de lubrificação (Taylor, 1993)

2.1.4. ENGENHARIA DE SUPERFÍCIES

Verificando-se em um motor a existência dos diversos regimes de lubrificação, onde as características do atrito estão relacionadas com as propriedades dos sólidos e parâmetros de suas superfícies, é importante que estas propriedades estejam de acordo com as situações de interação e ambiente à que serão expostas. As propriedades das superfícies de contato afetam diretamente a área de contato, o atrito, o desgaste e a lubrificação. [Freitas, 2006]

A superfície dos componentes pode ser caracterizada pelas suas propriedades físicas e geométricas. Como propriedades mecânicas têm-se a dureza, a resistência à fadiga, como propriedades tribológicas têm-se a resistência ao desgaste e o coeficiente de atrito, e dentro das

propriedades geométricas, têm-se a forma e o acabamento superficial (topografia) que podem influenciar as suas propriedades físicas. A forma e o acabamento de uma superfície, contida em um ambiente de contato e atrito, são fundamentais para os resultados tribológicos, e o seu controle entra no campo da metrologia. Através do conhecimento das funções e das solicitações, podem ser definidas algumas propriedades de interesse ao sistema tribológico. [Freitas, 2006]

Segundo Clark e Grant [1992], as superfícies são normalmente fabricadas para aplicações específicas com características de desempenho estudadas apropriadamente como segue.

- a) Ela deve reter óleo lubrificante?
- b) O atrito é uma consideração importante? Se assim for, qual é a causa ou requisito?
- c) O desgaste é um problema potencial?
- d) A tensão de compressão é uma preocupação relevante?
- e) O ambiente de trabalho produzirá a remoção de material da superfície como nas aplicações de ferramentas de corte ou estampagem?
- f) Existe a necessidade de um recobrimento ser resistente ao desgaste, e que possa ser efetivamente aplicado?
- g) O acabamento da superfície afeta a tolerância e o ajuste das peças?

Portanto, antes da caracterização de uma superfície, é necessário conhecer as funções às quais a mesma será aplicada e os aspectos que serão exigidos para que se tenha um bom desempenho.

2.2.DESGASTE

Segundo Zum Gahr [1987], o desgaste pode ser definido como sendo a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido, causada por ação mecânica, decocrrente do contato e do movimento relativo com outro corpo sólido, líquido ou gasoso.

As normas DIN 50320 [1997] e a ASTM G40-10 [2010] classificam as formas de desgaste em quatro mecanismos principais, sendo eles o desgaste por adesão, abrasão, fadiga de superfície e reação tribo-química. A Figura 2.10 ilustra estes mecanismos, que pode existir isoladamente ou combinadamente em um processo de desgaste.



Figura 2.10 - Ilustração esquemática dos quatro principais mecanismos de desgaste [Vicente, 2005. Zum Gahr, 1987]

O desgaste dos materiais se baseia, além das condições ambientais e cargas aplicadas, nas características do par tribológico, sendo elas, a rugosidade, dureza, ductilidade e

formação de filme óxido. Os estudos para minimizar o desgaste devem levar em conta estas características. [Kato, 2000]

2.2.1. DESGASTE POR ADESÃO

Segundo Roberts [2002], este é o principal tipo de desgaste quando o atrito entre as partes ocorre à seco (sem lubrificação). As altas pressões localizadas entre as rugosidades provocam deformações elasto-plásticas, em seguida ocorre a adesão e conseqüente formação de micro-soldas localizadas. Se estas micro-soldas não forem rompidas no ponto original de interface, o material será então removido e transferido para a contra-superfície, ou eventualmente após sucessivas repetições, o material pode se desprender de ambos os corpos tornando o mecanismo de desgaste do tipo abrasivo a três corpos. [Rabinowicz, 1995]

A Figura 2.11 ilustra os diferentes aspectos de como as micro-soldas podem se comportar na interface.



Figura 2.11 - Formação de junções por adesão [Rabinowicz, 1995]

(a) A quebra das junções se dá na interface entre os materiais, não há perda de material,(b) ocorre remoção de material somente do corpo A. Nos casos (c) e (d) há remoção de material

em ambos os corpos, vide a área hachurada. Após o destacamento, o mecanismo de desgaste pode tornar-se do tipo abrasivo a três corpos.

Os seguintes sistemas estão sujeitos ao desgaste adesivo:

- Eixos de comando e tuchos
- Ferramentas de extrusão
- Guias de deslizamento
- Engrenagens
- Mancais e ferramentas de corte

2.2.2. DESGASTE POR ABRASÃO

O desgaste por abrasão ocorre quando há retirada de material causada pela presença de partículas duras. Estas partículas podem estar aprisionadas na interface entre as duas superfícies em movimento, ou serem protuberâncias que fazem parte da rugosidade de uma das superfícies. Uma partícula dura pode ser produto de um processo, um fragmento desgastado (resultante por exemplo, do desgaste adesivo), ou advindo de enventuais partículas de fora do sistema tribológico, como impurezas.

Os seguintes sistemas estão sujeitos ao desgaste abrasivo:

- Sistemas hidráulicos contaminados com partículas duras.

- Extrusoras.
- Ferramentais de sinterização.

- Superfícies em atrito com presença de asperidades ou com lubrificante contaminado por partículas.

O desgaste abrasivo pode ser ilustrado conforme a Figura 2.12, sendo dividido segundo Zum Gahr [1987] como micro-sulcamento, micro-corte, micro-fadiga e micro-trincamento.



Figura 2.12 – Formas de desgaste físico entre as partículas e as superfícies dos materiais [Zum Gahr, 1987]

Em um caso ideal, o micro-sulcamento formado por um passe da partícula não resulta em remoção de material.

No caso do micro-corte puro, o volume de material retirado é igual ao volume da ranhura causada pela partícula.

A micro-fadiga é resultado de vários passes de partículas abrasivas nas vizinhanças de uma mesma ranhura e a perda de material é dada pela fadiga causada por sucessivas deformações plásticas e elásticas do material.

O micro-trincamento ocorre em corpos frágeis e a perda de material decorre da propagação de trincas devido à baixa ductilidade da superfície do material.

A Figura 2.13 mostra alguns destes tipos de desgaste abrasivo.



Figura 2.13 – Micrografias da superfície dos sólidos que sofreram desgaste abrasivo (a) micro-sulcamento, (b) micro-corte (c) micro-trincamento – [Zum Gahr, 1987]

O desgaste abrasivo pode também ser classificado de acordo com o tipo de contato, sendo eles a dois ou a três corpos, sendo que o modo a três corpos pode resultar em desgaste de duas a três vezes menor do que a abrasão à dois corpos. [Zum Gahr, 1987]

Na abrasão a dois corpos, as partículas abrasivas estão incrustadas em uma das superfícies, esta então sofrerá menor desgaste em relação à segunda superfície, onde as partículas estarão efetivamente removendo material pelo movimento relativo existente. Já na abrasão à três corpos, as duas superfícies encontram um terceiro corpo, que movimenta-se livremente de ambas as superfícies. [Trezona, 1999]

A Figura 2.14 ilustra o desgaste por abrasão a dois e três corpos.



Figura 2.14 – Desgaste por abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos [Zum Gahr, 1987]

2.2.3. DESGASTE POR FADIGA SUPERFICIAL

O desgaste por fadiga superficial pode ser caracterizado pela formação e propagação de trincas e lascamento do material, causado por carregamentos cíclicos [Zum Gahr, 1987]. Os sistemas tribológicos sujeitos à fadiga superficial são:

- Trilhos.

- Ferramentas de laminação.
- Engrenagens.
- Bombas envolvendo impacto de partículas ou cavitação.
- Eixos de comando e tuchos.

A fadiga dos materiais ocorre pela seqüência de deformação elasto-plástica, endurecimento, inicialização e propagação de trincas.
2.2.4. DESGASTE POR REAÇÃO TRIBO-QUÍMICA

De acordo com Zum Gahr [1987], esta forma de desgaste caracteriza-se pela remoção de material ou degradação das propriedades do mesmo, devido à ação química ou eletroquímica em meios agressivos, ou devido à remoção de material por meios mecânicos, facilitada pela reação química. Os sistemas tribológicos sujeitos ao desgaste por reações tribo-químicas são:

- Junções entre partes fixas de mancais de rolamento ou deslizamento.
- Rebites.
- Eixos montados por interferência.
- Rebites de correntes.
- Molas de suspensão.

2.3. FERRO FUNDIDO

Dentre as ligas ferro-carbono, os ferros fundidos constituem um grupo de ligas de importância fundamental para a indústria, não só devido às características inerentes ao próprio material, como também pelo fato de, mediante introdução de elementos de liga, aplicação de tratamentos térmicos adequados e pelo desenvolvimento do ferro fundido nodular, ter sido viável ao seu emprego em aplicações que, de certo modo, eram exclusivas dos aços. [Chiaverini, 2005]

Pelo conhecimento do diagrama de equilíbrio Fe-C, costuma-se definir *ferro-fundido* como "as ligas Fe-C cujo teor de carbono se situa acima de 2,0% aproximadamente". Face à influência do silício nessa liga, sobretudo sob o ponto de vista de sua constituição estrutural, o ferro fundido é normalmente considerado uma "liga ternária Fe-C-Si", pois o silício está freqüentemente presente em teores superiores ao do próprio carbono. [Chiaverini, 2005]

Segundo Callister [2007], na prática, a maioria dos ferros-fundidos contém entre 3,0 e 4,5% de carbono, e também outros elementos de liga. Em uma breve análise do diagrama de fases Fe-C (Figura 2.15), observa-se que as ligas nesta faixa de composição se tornam completamente líquidas em temperaturas entre aproximadamente 1150°C e 1300°C, que é consideravelmente mais baixa que as temperaturas para os aços. Dessa maneira, os ferros-fundidos são mais fáceis de serem fundidos. Além disto, eles são mais frágeis, e a fundição passa a ser a maneira mais conveniente de fabricação de peças com este material.

O fato do ponto de fusão do ferro-fundido ser cerca de 200°C a 300°C menor que o ponto de fusão dos aços, resulta em uma redução do custo de produção de cerca de 30% a 40%. [Colpaert,1974]

A quantidade de carbono que pode ser retida em solução sólida na austenita pode chegar somente até os 2%, portanto, quantidades superiores resultam em carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita. [Chiaverini, 2005]



Figura 2.15 — Diagrama de fases Fe-C (com a grafita em vez de cementita como fase estável) – Callister, 2007

As micro-estruturas e o comportamento mecânico dos ferros-fundidos variam de acordo com a composição e tratamento térmico aplicados. Os ferros-fundidos mais comuns são o cinzento, nodular, branco e o maleável. [Callister, 2007]

As microestruturas típicas dos ferros-fundidos é mostrada na Figura 2.16.



Figura 2.16 – Micrografias dos ferros-fundidos. (a) Ferro-fundido Cinzento; lamelas de grafita escuras em meio à matriz ferrítica, aumento de 500x. (b) Ferro-fundido Nodular; grafita em nódulos escuros em matriz ferrítica, aumento de 200x. (c) Ferro-fundido Branco; a cementita (regiões claras) está circundada pela perlita, aumento de 400x. (d) Ferro-fundido maleável; grafita na forma de rosetas escuras em matriz ferrítica, aumento de 150x. [Callister, 2007]

Os diferentes tipos de ferros-fundidos apresentam diferentes comportamentos durante o processo de usinagem. A Figura 2.17 mostra uma comparação de usinabilidade entre os tipos de ferros-fundidos. Pode-se verificar nesta figura que a usinabilidade varia muito entre as ligas, pois o ferro fundido branco (contendo carbonetos duros e abrasivos) apresenta uma usinabilidade inferior à do ferro fundido cinzento.



Figura 2.17 – Comparação de usinabilidade entre os principais tipos de ferros fundidos (Srivastava e Finn, 2004)

A - Ferro Fundido Cinzento

O ferro fundido cinzento é denominado desta forma, pois sua fratura mostra uma coloração escura, caracterizada por apresentar como elementos de liga fundamentais o carbono e o silício e estrutura em que uma parcela relativamente grande de carbono está no estado livre (grafita lamelar) e outra parcela no estado combinado (Fe₃C). [Chiaverini, 2005]

Dentre os ferros fundidos, esta é a liga mais usada, devido às suas características de:

- fácil fusão e moldagem;
- boa resistência mecânica;
- excelente usinabilidade;

- boa resistência ao desgaste;

- boa capacidade de amortecimento.

A quantidade de carbono e silício no ferro-fundido cinzento varia entre 2,5% e 4,0% e 1,0% e 3,0% respectivamente. Para a maioria destas ligas, a grafita está presente em forma de veios ou lamelas, normalmente circundadas pela matriz ferrítica ou perlítica. [Callister, 2007]

A dureza, no aço, é proporcional à quantidade de carbono presente, quanto maior, mais duro e menos dúctil é o aço. Assim também é o ferro fundido, com a diferença de que no ferro fundido existe uma grande quantidade de carbono. Os ferros fundidos são praticamente indeformáveis e não podem ser utilizados onde se necessita boa resistência à tração, flexão ou choque. Por outro lado, estes materiais funcionam muito bem onde se necessita resistência à compressão. No ferro fundido cinzento ocorre a decomposição da cementita (dura) e grande parte do carbono separa-se em forma de grafita, de forma a reduzir o teor de carbono da matriz. A intensidade da grafitização regula a tendência da estrutura tornar-se eutetóide, hipoeutetóide ou hipereutetóide, influenciando as propriedades mecânicas, facilitando a resistência ao desgaste e ao amortecimento das vibrações, [Müller, 2009].

Ferros-fundidos cinzentos com microestruturas diferentes da mostrada na Figura 2.16 podem ser gerados pela alteração da composição e/ou utilizando-se de tratamentos apropriados. Por exemplo, reduzindo a concentração de silício ou aumentando a taxa de resfriamento pode-se prevenir a completa dissociação de cementita que forma a grafita. Sob estas circunstâncias a microestrutura consiste em lamelas de grafita envolta em uma matriz perlítica. A Figura 2.18 compara esquematicamente algumas microestruturas dos ferros-fundidos obtidas variando-se a composição e o tratamento térmico aplicado. [Callister, 2007]



Figura 2.18 – Do diagrama de fases do Fe-C, a faixa de composição comercial utilizada para obtenção dos ferros-fundidos. [Callister, 2007]

B - Ferro Fundido Nodular

O ferro fundido dúctil, ou nodular caracteriza-se pela ductilidade, tenacidade e resistência mecânica. A característica mais importante, entretanto, relacionada com a resistência mecânica, é o limite de escoamento que é mais elevado no ferro fundido nodular do que no ferro fundido cinzento, ferro maleável e mesmo nos aços-carbono comuns (sem elementos de liga). [Chiaverini, 2005]

A grafita do ferro-fundido nodular apresenta-se na forma esferoidal, forma essa que não interrompe a continuidade da matriz tanto quanto a grafita em veios, resultando em melhor ductilidade e tenacidade. A matriz que envolve estas partículas pode ser perlítica ou ferrítica, dependendo do tratamento térmico aplicado (Figura 2.18), sendo normalmente perlítica para uma peça fundida. Entretanto, um tratamento térmico realizado por algumas horas em torno de 700°C irá causar uma transformação de fase no estado sólido, resultando em uma matriz ferrítica como mostrado na mesma figura. [Callister, 2007]

O ferro-fundido nodular é mais resistente e muito mais dúctil do que o ferro-fundido cinzento. Na verdade, o ferro-fundido dúctil tem características mecânicas que se aproximam do aço. Por exemplo, o ferro-fundido ferrítico atinge resistência à tração entre 380 e 480MPa, e ductilidade (porcentagem de alongamento) entre 10 e 20%. Algumas aplicações típicas incluem válvulas, carcaças de bombas, virabrequins, engrenagens e outros componentes de máquinas e automotivos. [Callister 2007]

C - Ferro Fundido Branco

Neste material, praticamente todo o carbono se apresenta na forma combinada de carboneto de ferro Fe3C, mostrando uma superfície de fratura clara. Suas propriedades fundamentais,

devido justamente a alta quantidade de cementita, são elevadas durezas e resistência ao desgaste. Em conseqüência, sua usinabilidade é prejudicada, ou seja, estes materiais são muito difíceis de se usinar, mesmo com os melhores materiais de corte. [Chiaverini, 2007]

Os ferros-fundidos brancos não são fáceis de serem fundidos em relação aos demais, pois possuem temperatura de solidificação muito elevada. [Ferrer, 2006]

D - Ferro Fundido Maleável

Trata-se de um tipo de ferro fundido branco, que posteriormente é submetido a um tratamento térmico, chamado maleabilização, onde a cementita se decompõe em grafita e austenita, adquire maleabilidade. Ou seja, a liga adquire ductilidade e torna-se mais tenaz, características que, aliadas a bons níveis de resistência à tração, dureza, resistência à fadiga, resistência ao desgaste e usinabilidade, permitem importantes aplicações industriais. [Silva, 2007]

Aplicações do ferro fundido maleável:

- Conexões para tubulações hidráulicas;
- Conexões para linhas de transmissão elétrica;
- Correntes;
- Suportes de mola;
- Caixas de direção e de diferencial;
- Cubos de rodas;
- Sapatas de freios;
- Pedais de embreagem e freio;
- Bielas e
- Caixas de engrenagens.

Segundo Callister [2007], quando aquecido a temperaturas entre 800 e 900°C por um tempo elevado e em atmosfera neutra (para evitar a oxidação) o ferro-fundido branco decompõe a cementita, formando a grafita, em forma de rosetas envoltas em matriz ferrítica ou perlítica, dependendo da taxa de resfriamento, conforme Figura 2.18.

2.4. RECOBRIMENTOS SUPERFICIAIS

A principal razão para a modificação da superfície dos materiais é manter as boas propriedades do interior do material, modificando somente a camada superficial (Uzumaki, 2006).

Muitas tecnologias de endurecimento superficial são utilizadas na prática industrial, como tempera por indução, revestimentos duros e, claro, processos de difusão – carbono e nitrogênio.

Os principais objetivos de revestimentos são:

- proteção contra a corrosão

- aumento da dureza superficial
- aumento da resistência ao desgaste
- aumento da resistência ao risco ("scratch")
- diminuição do atrito e
- diminuição dos custos

Existem diversas formas de aplicações de camadas com os objetivos citados. Neste trabalho serão descritos os processos de Nitretação a gás e Implantação Iônica por Imersão à Plasma.

2.4.1. Nitretação

O processo a gás de nitretação é conhecido desde final do século XIX, mas somente no inicio do século XX que a nitretação industrial se tornou um método viável para a indústria.

A camada nitretada é formada pela difusão de átomos de nitrogênio no aço. O nitrogênio atômico é obtido pela dissociação térmica de amônia na superfície do aço. Para baixas concentrações de nitrogênio, forma-se solução sólida com a mesma rede cristalina básica do substrato do material. Os nitretos são formados quando a concentração excede o máximo do limite de solubilidade do material. Quando os nitretos dispersos crescem, uma camada superfícial é formada, sendo conhecida como "camada de compostos", ou "camada branca". Para alguns aços ligados, a seqüência de formação das fases constituindo a camada branca pode ser diferente. O termo "branca" está relacionado com a resistência ao ataque do reagente químico "nital" (acido nítrico diluído em álcool) utilizado para examinar a camada nitretada. [Larisch, 1998]





Figura 2.19 - a) Camada nitretada no aço carbono; b) Camada nitretada no aço ligado. [Larisch, 1998]

Verifica-se que existe diferença substancial entre as camadas nitretadas formadas para aços de diferentes composições e, com efeito, nas suas propriedades. No caso de aço carbono, todas as propriedades estão concentradas na camada branca. O nitrogênio da camada de difusão abaixo da camada branca se apresenta como agulhas de nitretos, mas o efeito disso na dureza é limitado. A camada branca responde, principalmente, pela resistência ao desgaste, sendo normalmente de espessura maior do que a camada de aços ligados e contém alguma porosidade na zona superficial. [Larisch, 1998]

Quando os aços contém elementos formadores de nitretos como Cromo, Manganês, Titânio e Vanádio, a zona de difusão abaixo da camada branca fica endurecida, criando um "gradiente de dureza". A dureza na superfície é elevada e declina com o decréscimo da concentração de nitrogênio. Na maioria dos aços, quando a superfície é adequadamente atacada com um reagente químico, a camada de difusão é vista como uma zona escura. Nos aços ligados a camada branca é a zona primeira, embora não necessariamente, responsável pela resistência ao desgaste. Uma outra importante função desta é a proteção contra corrosão. O incremento de dureza na camada de difusão oferece suporte para a camada branca. [Larisch, 1998]

A camada de difusão é a transição entre a camada muito dura e o núcleo do material. Essa dureza, assim como a profundidade, tem um efeito significativo nas propriedades de fadiga. Resistência à fadiga depende significativamente da dureza do núcleo que é resultado do tratamento térmico precedente ao processo de nitretação.

A camada nitretada em aços inoxidáveis é caracterizada por uma aguda e bem definida borda entre a camada de difusão e o núcleo. Dureza de núcleo em aço austenitico e ferritico, o qual não é endurecível por tratamento térmico, é independente da temperatura do processo de nitretação. O efeito endurecedor devido a nitretação está concentrado desde a camada de difusão, e geralmente é elevada, na faixa de 800 HV a, aproximadamente, 1200 HV. [Larisch, 1998]

Nos aços martensiticos, a camada nitretada tem propriedades similares, mas a dureza de núcleo pode variar, dependendo do tratamento térmico anterior. Deve-se ter em mente que enquanto a nitretação aumenta a resistência à corrosão na maioria dos aços, isto não ocorre para os aços inoxidáveis. Isto é devido ao cromo contido nos aços inoxidáveis, um forte elemento formador de nitretos, podendo prontramente se combinar com o nitrogênio de

difusão, reduzindo o conteúdo de cromo dissolvido na matriz do aço. Esse efeito indesejável pode ser contornado executando-se o processo de nitretação a baixas temperaturas, porém isto demandará tempos longos de processo. [Larisch,1998]

2.4.2. IMPLANTAÇÃO IÔNICA POR IMERSÃO A PLASMA

A "Implantação Iônica por Imersão a Plasma" (IIIP) é uma técnica desenvolvida para modificação de superfícies tridimensionais que permite um tratamento uniforme de peças de formas complexas, sem necessidade de rotacioná-las. O termo IIIP&D (Implantação Iônica por Imersão em Plasma e Deposição) é utilizado para representar a grande família de técnicas de imersão em plasma (incluindo as técnicas de formação de filmes), enquanto o termo IIIP é utilizado para tratamentos de superfície sem formação de filmes. Quando a IIIP&D é utilizada para formar filmes, obtêm-se filmes com adesão superior às técnicas tradicionais, pois o novo processo não gera interface definida (há uma difusão para dentro do substrato) e o revestimento é feito com uniformidade, mesmo na parte interna de tubos ou estruturas porosas.

A IIIP&D possibilita o tratamento uniforme de grandes superfícies com formas irregulares, a baixo custo, e em tempo reduzido (minutos ou poucas horas), com aumento de temperatura restrito à superfície, com economia de tempo e energia. Durante o tratamento, os íons são implantados na peça sob vácuo. Átomos de nitrogênio, oxigênio ou carbono, penetram na superfície do substrato, aumentando a dureza superficial, interferindo assim no desgaste. Pode melhorar as propriedades superficiais dos materiais, sem interferir nas características do substrato. Desde o surgimento da IIIP em 1986, devido à J. R. Conrad e seu grupo da Universidade de Wisconsin, EUA, o interesse por esta técnica tem aumentado.

Neste trabalho, a IIIP&D de nitrogênio foi feita utilizando o Processo de Imersão em Plasma (pertencente à família IIIP&D), por Carlos Salles Lambert (Instituto de Física da UNICAMP). O equipamento foi desenvolvido totalmente no Brasil, e é similar às técnicas

de IIIP&D, mas com parâmetros de deposição essencialmente diferentes. O equipamento está instalado no Depto de Física Aplicada do Instituto de Física da UNICAMP.(Uzumaki et al., 2006a e Uzumaki et al, 2006b)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para se conhecer o comportamento do tucho de válvulas após aplicação dos recobrimentos propostos, foi selecionado um tipo de ensaio que tem como foco observar a resistência ao desgaste micro-abrasivo. Conhecendo-se o par tribológico presente nos motores, o eixo comando e o tucho de válvulas, pode-se dizer que o desgaste micro-abrasivo não é o único meio de desgaste presente, porém, para o estudo proposto, o ensaio micro-abrasivo permite visualizar a eficiência dos recobrimentos comparados entre si em um meio bastante agressivo e de forma acelerada.

O par tribológico presente no motor funciona sob lubrificação constante por óleo, o atrito entre o par deve ser o menor possível evitando-se as perdas de energia e também o desgaste. O desgaste dos componentes é inevitável, porém os componentes devem ser projetados e produzidos de forma a atender os requisitos dos clientes de durabilidade. Recobrimentos superficiais são aplicados comumente pelos fabricantes a fim de reduzir o desgaste deste par tribológico.

3.1.SUBSTRATO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram obtidos a partir de tuchos de válvula utilizados nos motores diesel MWM de 4.8L. Os tuchos foram feitos de ferro-fundido cinzento coquilhado conforme norma MWM [VL 0031], e foram fabricados pela Riosulense (Metalúrgica Riosulense S.A., com fábrica situada em Rio do Sul – SC). O material é fundido em forno elétrico e depois vazado em moldes com o coquilhamento da região do "prato" do tucho, conforme Figura 4.1.



Figura 3.1 – Ilustração do molde para fundição e coquilhamento da região do tucho, molde de areia injetada [Acervo Próprio]

A composição química especificada para o material do tucho segue conforme a Tabela 3.1. [VL 031, 2007]

С	Si	Mn	Р	S	Cr	Cu
3,3 - 3,6	1,7 – 2,7	0,6 – 0,9	Máx. 0,25	Max. 0,25	0,2 - 0,3	0,4 – 0,8

Tabela 3.1 – Composição química especificada conforme norma MWM [VL 0031]

Após o coquilhamento, os tuchos são removidos do molde e usinados em suas dimensões finais (Figura 4.2). Após a usinagem os tuchos são levados para o forno onde é realizado o processo de nitretação em atmosfera controlada, para promover o enriquecimento da concentração de nitrogênio na superfície da peça por difusão. A nitretação ocorre em temperaturas entre 500 e 600°C, depois as peças são resfriadas ao ar ou em salmoura.



Figura 3.2 – Ilustração e dimensões gerais do tucho de válvulas após processo de usinagem [Arquivo próprio]

Para a aplicação dos filmes e realização dos ensaios propostos também foram gentilmente fornecidas pela Riosulense amostras sem a aplicação do processo de nitretação.

A região dos tuchos de válvula estudada neste trabalho é a do "prato" do tucho, que é a região que trabalha em contato com o eixo de comando conforme Figura 3.3. A partir dos tuchos foram cortados os "pratos" para serem utilizados nos ensaios.



Figura 3.3 – Região do prato do tucho em contato com o eixo comando – Acionamento das válvulas por varetas [Acervo Próprio]

3.2. RECOBRIMENTOS E CONDIÇÕES DE DEPOSIÇÃO

Os recobrimentos estudados neste trabalho foram, nitretação a gás convencional e implantação iônica de nitrogênio por imersão em plasma (IIIP&D). Também foram avaliadas amostras sem nenhum recobrimento superficial, obtidas a partir de peças apenas coquilhadas, antes da etapa de nitretação realizada pela Riosulense.

As amostras com nitretação a gás convencional foram obtidas a partir de tuchos que já são utilizados nos motores MWM, preparadas conforme as normas internas da companhia, VL 0031 e TR 117-1. A nitretação é realizada em temperatura entre 500 e 600°C, e o resfriamento subseqüente feito em salmoura.

O processo de IIIP foi realizado em dois tipos amostras, ambas já com o tratamento de nitretação a gás convencional, sendo que a primeira delas foi removida a camada através do processo de lixamento e polimento com diversas lixas até a de granulometria 4000, esta amostra após o processo de IIIP&D resultou em uma camada brilhante. Já a segunda amostra foi obtida sem remover a camada de nitretação a gás convencional, e após o processo de IIIP&D resultou em uma camada visualmente opaca. Para ambas as amostras, o processo de IIIP&D foi aplicado em atmosfera com nitrogênio, durante uma hora de deposição a 300° e 2800 volts.

A Figura 3.4 apresenta uma foto do equipamento do IFGW onde foi realizada essa deposição.



Figura 3.4 – Foto do equipamento de deposição por implantação iônica por imersão à plasma – IFGW, UNICAMP

Os corpos de prova foram identificados conforme a Tabela 3.2.

Denominação	Descrição do tratamento da superfície		
Amostra A	Sem tratamento		
Amostra B	Com nitretação à gás convencional		
Amostra C	Com camada de nitretação à gás convencional e com aplicação de revestimento através do método de IIIP&D		
Amostra D	Camada de nitretação à gás convencional removida por lixamento e com posterior aplicação de recobrimento através do método de IIIP&D		

T-1-1-	2.2	T.1	1	· · · · · · · · · · · · · · · ·		1 ² 1 -
Laneia	12-	Identificação	das amostras	conforme	reconfimento	aniicado
I unciu	U . 	Iuchinicação	und uniobulud	comorme	1 CCONTINUENCO	upincuuv
		3				

3.3.ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

As amostras foram cortadas transversalmente, embutidas e preparadas pelo processo tradicional para metalografia, sendo lixadas até a lixa de granulometria 1200 e em seguida polidas com pasta de diamante de 6 e 1 μ m. Após serem lavadas em equipamento de ultrassom por aproximadamente 2 minutos, as amostras foram atacadas quimicamente com reagente Nital em concentração de 2% por 2 segundos. As amostras foram analisadas em um microscópio ótico OLYMPUS modelo GX51 (Figura 3.5), pertencente ao LABIOMEC, UNICAMP.



Figura 3.5 - Foto do microscópio óptico - OLYMPUS GX51 - LABIOMEC, UNICAMP

A análise da microdureza Vickers foi realizada em um microdurômetro SHIMADZU modelo HMV-2 (Figura 3.5), pertencente ao LABIOMEC, UNICAMP. A microdureza foi avaliada nas superfícies do prato dos tuchos seguindo a norma ASTM E 384 [2008].



Figura 3.6 - Foto do microdurômetro - SHIMADZU HMV-2 - LABIOMEC, UNICAMP

3.4. ENSAIO DE DESGASTE MICRO-ABRASIVO

Este ensaio foi aplicado para avaliar a eficiência dos tratamentos propostos e do tratamento disponível na indústria, contra o desgaste abrasivo. Para estes ensaios foi utilizada uma máquina de desgaste por micro-abrasão que utiliza o método de esfera contra bloco (ou esfera contra placa) conforme Figura 3.7.



Figura 3.7 – Equipamento para ensaio de desgaste micro-abrasivo

Esta máquina foi desenhada pela Prof^a. Dr^a. Maria Aparecida Pinto em seu projeto de pósdoutorado – Processo FAPESP 03/11255-8, e se encontra instalado no Laboratório de Caracterização de Materiais da FEM, na UNICAMP. [Larosa, 2009]

O ensaio consiste em uma esfera metálica de aço-inoxidável de 25mm de diâmetro que gira contra a amostra na presença de uma solução abrasiva. A carga normal é aplicada pela esfera contra a amostra através de contra-pesos.

As amostras foram apenas limpas com equipamento de ultrassom durante três minutos, não sendo aplicado qualquer lixamento ou polimento nas mesmas antes do ensaio micro-abrasivo, desta forma, avaliou-se os corpos de prova exatamente com a capacidade de fornecimento do acabamento superficial disponível na indústria. Outro motivo para não ter sido realizado o

polimento das amostras deve-se ao fato das camadas dos recobrimentos serem muito pequenas, da ordem de 5 a 10µm, e seriam removidas com o polimento.

A esfera de aço-inoxidável é previamente atacada com reagente químico Villela durante 10 segundos, o que ajuda no arrastamento das partículas abrasivas pela esfera. [Trezona, R.I.; Allsopp, D.N.; Hutchings, I.M., 1999].

Os corpos de prova são posicionados sobre a esfera com carga controlada de 1, 2 e 3N, e sobre a esfera em movimento é bombeado, à vazão de aproximadamente 1L/h, uma solução abrasiva, constituída de carboneto de silício – SiC, com partículas de até 5µm, e água destilada, na concentração de 250 g/L.

O ensaio de desgaste foi realizado nas amostras descritas na Tabela 3.2 e os demais parâmetros dos testes estão especificados na Tabela 3.3. Para cada condição de teste foram realizados 4 ensaios.

Parâmetros	Valores	Unidade
Força normal aplicada	1/2/3	Ν
Material da esfera	AISI 420	-
Diâmetro da esfera	25	Mm
Velocidade da esfera	100	RPM
Abrasivo – SIKA ABR 1200	5	Mm
Concentração do abrasivo	250	g/l
Distância percorrida	180	М

Tabela 3.3 – Parâmetros utilizados para os ensaios de desgaste

O ensaio realizado provoca o desgaste em forma de calotas nas amostras e o diâmetro destas calotas foi medido, conforme Figura 3.8, em um microscópio eletrônico de varredura – MEV, pertencente a FEM, UNICAMP, e pode-se então calcular o volume de material removido dos

corpos de prova. A equação utilizada para medir o volume de desgaste é equivalente à equação de Archad para desgaste: [Gastaldo, 2010]



 $V = \frac{\pi b^4}{64.R} [nm^3]$

Figura 3.8 – Medição do diâmetro da calota formada pelo ensaio de desgaste micro-abrasivo. MEV.

Para cada calota, foram realizadas 2 medições do diâmetro b, sendo uma medição perpendicular à outra.

As imagens obtidas através do MEV também permitem observar e assim classificar o tipo de desgaste encontrado, e com estes dados podem-se comparar os efeitos de variação das cargas aplicadas e da resistência ao desgaste de cada recobrimento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. MICROSCOPIA ÓPTICA

Para avaliação da microestrutura e das possíveis camadas de recobrimento existentes sobre os corpos de prova foi realizada a microscopia óptica conforme Figura 5.1. Todas as amostras preparadas e atacadas quimicamente com reagente Nital, em concentração de 2%.



Figura 3.1 – Microscopia óptica da secção transversal das amostras A, B, C e D – Ataque Nital 2%

Pode-se observar a existência de uma fina camada de recobrimento nas superfícies das amostras B, C e D, e conforme esperado, nenhuma camada é observada na amostra A. A variação das microestruturas na região do "prato do tucho" se deve às diferentes características de difusão em função da variação dos parâmetros de deposição aplicados.

4.2. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A microscopia eletrônica de varredura – MEV - foi utilizada para medir o diâmetro das calotas geradas pelo desgaste micro-abrasivo, em seguida com aumentos de 200x, 500x e 1000x, foi possível observar o desgaste causado na superfície das amostras, buscando identificar o mecanismo de desgaste micro-abrasivo resultante. As Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 mostram os resultados obtidos para as amostras nos ensaios com cargas de 3N, as amostras ensaiadas com as demais cargas também foram observadas através do MEV, porém não houve variação significativa no aspecto do desgaste variando-se as cargas; as variações no aspecto visual ocorreram apenas de um recobrimento para o outro.

A amostra A, que não foi submetida a nenhum processo de recobrimento superficial apresentou um misto entre os mecanismos de desgaste por abrasão a dois-corpos e a três-corpos, conforme observado na Figura 4.2. Enquanto poucos riscos aparecem bem definidos, aspecto atribuído ao desgaste abrasivo a dois-corpos, outras regiões se apresentam com aspecto de superfície lisa. A predominância na imagem com aumento de 1000x é de uma superfície lisa, com poucos riscos, caracterizando a predominância da abrasão a três-corpos. Algumas porosidades decorrentes da fundição do material acabam sendo expostas em função do desgaste, estas descontinuidades parecem não afetar o caminho nem a forma dos riscos que por elas passam.



Figura 4.2 - MEV da amostra A em 4 aumentos diferentes. Carga de 3[N].

A Figura 4.3 apresenta o aspecto do desgaste micro-abrasivo para a amostra B, a qual foi submetida ao processo de nitretação convencional a gás. Observam-se nas imagens alguns pontos mais claros, decorrentes da oxidação do material, esta oxidação pôde ser observada poucos instantes após o ensaio micro-abrasivo, estes pontos de oxidação também foram observados na amostra A após o ensaio, porém com uma menor incidência. Os riscos paralelos e contínuos observados na amostra B são mais freqüentes do que na amostra A, mas ainda ocorre um desgaste misto entre abrasão a dois-corpos e abrasão a três-corpos, porém neste caso a predominância é do regime a dois-corpos.



Figura 4.3 – MEV da amostra B em 4 aumentos diferentes. Carga de 3[N].

A Figura 4.4 apresenta o aspecto do desgaste micro-abrasivo para a amostra C, a qual foi submetida ao processo de nitretação convencional a gás e depois ao processo de implantação iônica por imersão a plasma. Os pontos mais claros decorrentes da oxidação já não são observados como nas amostras A e B, o que indica que o processo de recobrimento por IIIP&D contribuiu para reduzir a susceptibilidade à oxidação. A predominância do modo de desgaste abrasivo observada é a três-corpos. Os riscos ainda aparecem, porém a aparência é de uma superfície mais deformada do que riscada, devido às freqüentes passagens de corpos livres entre as superfícies da amostra e da esfera, característica do desgaste por abrasão a três-corpos.



Figura 4.4 - MEV da amostra C em 4 aumentos diferentes. Carga de 3[N].

A amostra D, que teve a camada nitretada removida por lixamento e em seguida recebeu a deposição através do método de IIIP&D, tem as imagens mostradas na Figura 4.5 após o ensaio de desgaste. Assim como na amostra C, os pontos de oxidação ocorrem com muito baixa freqüência, reforçando a teoria de que o método de IIIP&D contribui para evitar a oxidação da camada exposta após o desgaste. Observa-se neste caso também a predominância da abrasão a três-corpos, evidenciada pela presença de poucos riscos bem definidos, e aparência da superfície desgastada de amassamentos e riscos descontínuos.



Figura 4.5 – MEV da amostra D em 4 aumentos diferentes. Carga de 3[N].

4.3. MICRODUREZA

Com a intenção de correlacionar os parâmetros de micro-dureza com os demais resultados obtidos dos ensaios, este parâmetro foi medido conforme a norma ASTM E 384 [2008] e é apresentado no gráfico da Figura 4.6.

Para cada amostra foram re



Figura 4.6 – Gráfico das medições de microdureza na superfície das amostras

Os valores de microdureza Vickers encontrados para as amostras A, B, C e D foram, 732, 838, 754 e 752HV respectivamente. A indentação aplicada pelo microdurômetro foi de 0,5N com duração de 15 segundos.

O recobrimento que gerou a maior microdureza na superfície foi a nitretação convencional, sendo que o processo de IIIP tanto para a amostra C como para a amostra D, elevou a microdureza em cerca de apenas 3% em relação à amostra A que não possui qualquer recobrimento.

4.4. RESISTÊNCIA AO DESGASTE MICRO-ABRASIVO

Através das medições dos diâmetros das calotas geradas pelo processo de desgaste por micro-abrasão, e o posterior cálculo do volume desgastado, foi possível gerar os gráficos apresentados nas Figuras 4.7 e 4.8.



Figura 4.7 – Volume desgastado em nm³ para as cargas de 1, 2 e 3N. Distância percorrida de 100m

O gráfico da Figura 4.7 permite concluir que o volume desgastado aumenta conforme aumenta a carga normal aplicada entre a esfera e o corpo de prova. Porém a variação observada entre o desgaste gerado com a carga de 2N e a carga de 3N é menor se comparada à variação gerada entre ou aumento de carga de 1N para 2N, este efeito também pode ser visualizado na Figura 4.9, onde a curva de efeito da carga para o desgaste sofre uma inflexão entre os pontos de 2 e 3N.

No gráfico da Figura 4.8 considerou-se como referência as amostras com tratamento convencional de nitretação a gás, que apresentaram maior desgaste, correspondendo a 100%. Os valores de desgaste das demais amostras estão representados então como porcentagem em função da referência. Este gráfico permite verificar que a amostra C que possui o duplo tratamento, apresenta significativa melhora na resistência ao desgaste ao elevar a carga normal de 1 para 2 e 3N. Já a amostra A, que não possui recobrimento, apresentou um acréscimo de resistência ao desgaste para cargas mais acentuadas, quando a carga foi aumentada de 2 para 3N, o desgaste relativo caiu de 77,8% para 67,7%.



Figura 4.8 – Gráfico de desgaste percentual referenciado

Os gráficos da Figura 4.9 foram obtidos através do software MINITAB16®. Trata-se de um gráfico analítico que combina os parâmetros de entrada e saída dos ensaios e neste caso retorna os principais efeitos no desgaste causados pelos parâmetros de recobrimentos (Amostras), dureza e carga normal aplicada. Nos gráficos de títulos amostra e dureza, para cada amostra é calculada a média de desgaste entre as três cargas aplicadas. Nestes gráficos, para cada parâmetro no eixo x, quanto maior for o incremento no eixo y, maior é o efeito da variação em x.



Figura 4.9 – Gráfico analítico dos principais efeitos para a resposta de desgaste

Os gráficos da Figura 4.10 também foram obtidos através do software MINITAB16®, e ilustram as possíveis interações entre os parâmetros avaliados, quando as linhas aparecem praticamente paralelas, significa que não há interação entre os parâmetros. Se houver cruzamento das linhas em algum dos gráficos, significa então que a variação de um parâmetro afeta a tendência de outro parâmetro, ou seja, há interação entre eles. No caso dos itens avaliados neste trabalho, podemos observar que as linhas não se cruzam, podendo ser consideradas praticamente paralelas, portanto não há interação entre os parâmetros dos testes. As interações avaliadas foram: amostra x carga; amostra x dureza; e carga x dureza. Assim como nos gráficos da Figura 4.9, para o gráfico de interação entre amostra e dureza o software considera a média dos valores de desgaste entre as cargas de 1 a 3N.

Do gráfico da Figura 4.10 também pode-se extrair a tendência clara de aumento do volume desgastado em função do aumento da dureza.



Figura 4.10 - Gráfico analítico de interação entre os parâmetros de teste

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1.CONCLUSÕES

- Os recobrimentos propostos pelo método de implantação iônica por imersão a plasma, aplicados às amostras C e D, demonstraram uma tendência de melhora na resistência ao desgaste micro-abrasivo em relação à nitretação convencional, porém a amostra sem nenhum recobrimento foi que apresentou os melhores resultados de resistência ao desgaste. Com o conhecimento dos resultados levantados no presente trabalho, é possível realizar modificações nos parâmetros de deposição, com o objetivo de melhorar estes resultados.
- Os resultados dos recobrimentos C e D foram muito semelhantes, mostrando que só a camada superior é efetiva.
- Para as condições dos ensaios, foi evidenciado que quanto maior a dureza do recobrimento, maior foi o desgaste obtido pelo ensaio de micro-abrasão.
- O tratamento superficial pelo método IIIP&D aumentou a resistência à oxidação da camada exposta após o desgaste, constatação através das observações do MEV.
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Modificar os parâmetros de deposição pelo método de IIIP&D objetivando uma melhoria nos resultados de desgaste.
- Os ensaios realizados em bancada não representam as condições reais dos motores, sugerese realizar ensaios com os mesmos recobrimentos estudados neste trabalho, testando em motores em dinamômetro e comparar os resultados para avaliar a correlação do ensaio de desgaste micro-abrasivo com um teste na real aplicação do componente.
- Realizar ensaios com os mesmos recobrimentos estudados neste trabalho, em outro equipamento de desgaste, por exemplo, pino-disco e comparar os resultados.
- Realizar os mesmos ensaios com outras opções de tratamentos superficiais, como por exemplo o endurecimento superficial a laser.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSSON, B.S. (1991), **Company Perspectives in Vehicle Tribology — Volvo**, in 17th Leeds-Lyon Symposium on Tribology — Vehicle Tribology, Tribology Series, Vol. 18, Elsevier Science, Oxford, U.K., p. 503-506.

ASTM E 384 – 08a, Standard test method for Microindentation hardness of materials, Annual Book of Standards, 2008.

ASTM G40-10, Standard terminology relating to erosion and wear, Annual Book of Standards, v.302, ASTM, 2010.

BHUSHAN, B., Principles of Tribology, Vol.1. **Modern Tribology Handbook**, Columbus, Ohio. Department of Mechanical Engineering, The Ohio State University: CRC Press, p. 1187 – 1270, 2000.

CALLISTER, W. D. Jr., **Ciência e Engenharia de Materiais uma introdução**, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2007, 705p.

CHALLEN, B., Diesel Engine Reference Book, 2nd.Ed., Oxford, Woburn, MA. 1999, 682p.

CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 2005, 599p.

CLARK, J. R., GRANT, M. B.(1992). The Effect of Surface Finish on Component **Performance**, Int. J. Mach. Tools Manufact., v.32, n. 1/2, p.57-66, 1992

COLPAERT, H., 1974, **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3 ed.São Paulo: Editora Edgard Blucher, pg.318.

DEUTSCHER INSTITUT FUR NORMUNG. DIN 50320 - Wear Terms. Sistematic Analysis of Wear Process. 8p, 1979.

FERRER, Jorge Antonio Giles, 2006. Tese de Doutorado, **Uma Contribuição ao Fresamento Frontal de Superfícies Irregulares de Ferro Fundido Cinzento**, Campinas.

GASTALDO, Felipe Toloi, 2010. Dissertação de Mestrado, Efeitos do Tratamento de Superfície a Laser na Microestrutura e na Resistência ao desgaste do Aço Inoxidável Martensítico, Campinas.

FREITAS, Enio da Silva Rodrigues, 2006. Dissertação de Mestrado, **Parâmetros Topográficos para Avaliação, Caracterização e Controle Tribológicos de Superfícies de Engenharia**, São Carlos.

KATO, K., Wear in relation to friction – a review, Wear, v. 241, p.151-157, 2000.

LARISCH B., Spies H.-J., Brusky U., Rensch U.: **Plasma Nitriding of Stainless Steels at Low Temperatures**. Proc. 1st International Automotive Heat Treating Conference, Puerto Vallarta, July, 1998, pp. 221-228

LAROSA, M. A.; PINTO, M. A.; IERARDI, M. C. F. Abrasive Wear Resistance of AISI **420 Stainless Steel After Laser Surface Treatment**. In: Alfons Fischer, Kirsten Bobzin. (Org.). Frction, Wear and Wear Protection. Weinheim: Wiley-VCH, 2009, v., p. 645-653.

MÜLLER, G. I., 2009, Apostila / Anotações do professor Müller: **Aula9_Ferros Fundidos.doc** com referências de: Steel Foundry Melting Practice, Rudolf W. Zillmann, Steel Fonders' Society of America, 1973, 762 p., Steelmaking for Steelfounders, Jackson e Hubbard. http://www.exatec.unisinos.br/~fortis/arquivos/Aula9_FerrosFundidos.doc. Acessado em 11 novembro 2009.

NAKASA, M. (1995), Engine Friction Overview, in Proc. Int. Tribol. Conf., Yokohama, Japan.

MWM INTERNATIONAL MOTORES, 2007. VL 031 - Engineering Technical Document, Designations and Descriptions Technical Instructions for Supply and Product's Release with the Supplier's Specifications. Documento Interno.

MWM INTERNATIONAL MOTORES, 2008. **TR 117-1 – Tratamento Termoquímico – Nitretação**. Documento Interno.

OLIVEIRA, Marli Dias Mascarenhas, 2000. Dissertação de Mestrado, **Custo Operacional e Ponto de Renovação de Tratores Agrícolas de Pneus: Avaliação de Uma Frota,** Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz / USP.

RABINOWICZ, E., Friction and wear of materials, Wiley-Interscience Publication, New York, 1995, p. 315.

RICHARDSON, E.E., 1999, **Review of Power Cylinder Friction for Diesel Engines**, ASME, ICE-Vol.32-3, Paper No.99-ICE-196

ROBERTS, E. W., Space Tribology Handbook. AEA Technology plc. 3rd.Ed., 2002, 466p.

SILVA, Jorge Ayrton da, 2007. Dissertação de Mestrado, **Análise Térmica na Solidificação de Ferros Fundidos Cinzentos Hipoeutéticos**, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

SRIVASTAVA, A. K.; FINN, M. E. Machinability of cast iron. TechSolve – The Manufacturing Solutions Center. Cincinnati, 2004, 7 p.

TAYLOR, C. M., Design for Considerations Efficiency and Durability, Automobile Engine Tribology – Wear 221. 1998, p. 1–8.

TAYLOR, C.M., **Engine Tribology**, Elsevier Science Publishers B.V., 1993 – Amsterdam – Holanda. TREZONA, R. I., ALLSOPP, D. N., HUTCHINGS, I. M., Transitions Between Two-body and Three-body Abrasive Wear: Influence of Test Conditions in the Microscale Abrasive Wear Test. **Wear**, v.98, p. 205-214, 1999.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Web site Mecânica**. Disponível em: http://www. mecanica.ufrgs.br/mmotor/4tempos.jpg . Acesso em: 20 novembro 2009.

UZUMAKI, Emília Tieko. Desenvolvimento de filmes de carbono tipo diamante (DLC) obtidos pelo processo de imersão em plasma para implantes osteoarticulares,. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, 2006.

UZUMAKI, E. T. ; LAMBERT, C. S. ; SANTOS JR, A. R<u>.</u> ; ZAVAGLIA, C. A. C. . Surface properties and cell behaviour of diamond-like carbon coatings produced by plasma immersion. Thin Solid Films, v. 515, p. 293-300, 2006a.

UZUMAKI, E. T. ; LAMBERT, C. S. ; BELANGERO, W. D. ;FREIRE, C. M. A. ; ZAVAGLIA, C. A. C. . Evaluation of diamond-like carbon coatings produced by plasma immersion for orthopaedic applications. Diamond and Related Materials, v. 15, n. 4-8, p. 982-988, 2006b.

VICENTE, Geraldo Cândido Maia, 2005. Dissertação de Mestrado. Caracterização de Filmes DLC com Potencial de Utilização em Motores de Combustão Interna, Curitiba.

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