INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

ESTUDO DE CAMADAS FINAS TRATADAS POR LASER EM ANÉIS DE PISTÃO

FELIPE DE OLIVEIRA

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

**Orientador :
Dr. Jesualdo Luiz Rossi**

**SÃO PAULO
2011**

Dedico esta dissertação aos meus pais

Gentil e Adenil,

que sempre estiveram presentes

em minhas realizações.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Jesualdo Luiz Rossi pela valiosa orientação.

Aos meus pais e namorada agradeço o estímulo e o suporte durante a realização deste trabalho.

Ao amigo Edmo Soares Júnior, com quem pude compartilhar as dificuldades tão comuns neste tipo de trabalho, agradeço a força e principalmente o apoio.

Ao Prof. Dr. Jan Vatauvuk, pela fundamental ajuda e orientação.

Aos Profs. Drs. Wagner de Rossi e José Roberto Berretta pelo pronto suporte durante o trabalho.

À empresa MAHLE Metal Leve S/A que me permitiu explorar o trabalho cedendo laboratórios e materiais ao longo do seu desenvolvimento.

Aos amigos Almir de Carvalho e André Ferrarese por participarem com seus incentivos e conhecimentos que foram fundamentais para o trabalho.

Ao CLA / IPEN que cedeu o laboratório onde foi realizado parte dos estudos experimentais.

Aos demais colegas e amigos que direta ou indiretamente ajudaram a tornar possível este trabalho, meus sinceros agradecimentos.

“ Se você quer ser bem sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si mesmo”.

Ayrton Senna da Silva

ESTUDO DE CAMADAS FINAS TRATADAS POR LASER EM ANÉIS DE PISTÃO

Felipe de Oliveira

RESUMO

Os desenvolvimentos de novos motores têm resultado no aumento constante dos carregamentos mecânicos e térmicos dos componentes. Além de estarem expostos a condições desfavoráveis ao desgaste, os novos componentes do motor devem garantir desempenho similar, ou muitas vezes superior, aos dos componentes atuais. Para os anéis de pistão, o desempenho é dado pela sua capacidade de vedação e raspagem, que podem ser mensurados em motor pelos resultados de consumo de óleo lubrificante (COL) e fluxo de gases para o cárter (*blow-by*). Sendo assim, a proposta desse trabalho foi a de avaliar-se a influência do tratamento superficial a laser para endurecimento da pista de desgaste do anel de pistão de segundo canaleta, em termos do desempenho de vedação e raspagem. Foram comparados dois protótipos, utilizando como padrão um anel de pistão de produção corrente, comercialmente fornecido a clientes. O efeito do tratamento térmico a laser nos anéis foi avaliado em relação a distorções dimensionais. Após isto, foram realizados testes tribológicos de bancada com o objetivo de conhecer o comportamento do anel depois do tratamento laser. De maneira geral o tratamento superficial por laser na superfície de anéis de pistão mostraram resultados significativos no aspecto aumento de dureza, com alguns deméritos no aspecto dimensional que pode interferir na boa funcionalidade do sistema tribológico anel – lubrificante – cilindro.

THIN LAYER STUDY TREATED BY LASER IN PISTON RINGS

Felipe de Oliveira

ABSTRACT

The new engine developments are providing engine mechanical and thermal loads increase on the components. Besides the unfavorable wear conditions, the components should provide similar or improved performance compared with current baselines. For piston rings, the performance is given by the ring capacity of sealing and scrapping. These performances can be measured in a engine by the results of lube oil consumption (LOC) and Blow-by. So, the proposal of this work is to evaluate the influence of laser hardening on the second ring wear and verify the sealing and scrapping performance. It was compared two prototypes, being as parameter the current piston ring supplied to customer. Firstly, it was compared the dimensional of the laser hardening effect. After that, it were tested these prototypes in bench tests in order to know the ring performance after laser hardening. In general terms, the superficial treatment by laser on the piston rings surface have showed significant results in the hardness aspects, with some demerits in the dimensional aspect that can interfere in the good functionality of the tribological system, piston rings – lubricant – cylinder liner.

SUMÁRIO

	<i>Página</i>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO DO TRABALHO.....	5
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	6
3.1 Anéis de pistão.....	6
3.2 Desgaste.....	10
3.3 Tratamento superficial com laser.....	14
3.3.1 Tratamento superficial com laser com fusão de material.....	17
3.3.2 Laser Nd:YAG.....	18
3.4 Material.....	19
3.4.1 Ferro fundido.....	19
3.4.2 Tratamento térmico.....	19
3.4.2.1 Nitretação.....	22
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
4.1 Escolha do anel de pistão e material.....	24
4.2 Microestrutura.....	25
4.2.1 Grafita.....	25
4.2.2 Matriz.....	25
4.2.3 Camada nitretada.....	25
4.3 Propriedades mecânicas.....	25
4.3.1 Dureza.....	25
4.3.2 Módulo de elasticidade.....	26
4.4 Equipamentos de metrologia e metalurgia.....	26
4.5 Equipamento laser.....	26
4.6 Equipamentos para teste de engripamento.....	27
4.6.1 Procedimento do ensaio de engripamento.....	29
4.6.2 Lubrificante.....	30
4.6.3 Parâmetros para o ensaio.....	30
4.7 Equipamento para teste de desgaste.....	31

4.7.1 Procedimento do ensaio de desgaste.....	33
4.7.2 Metrologia antes do ensaio.....	34
4.7.3 Lubrificante.....	34
4.7.4 Parâmetros para o ensaio de desgaste.....	35
4.7.5 Metrologia após ensaio.....	35
4.8 Preparação de amostras para a aplicação do laser.....	36
4.8.1 Obtenção dos anéis.....	36
4.8.2 Verificação e adequação aos parâmetros de laser ideais.....	37
4.8.3 Dimensional.....	38
4.8.4 Irradiação das amostras.....	38
5 RESULTADOS.....	39
5.1 Caracterização dos materiais.....	39
5.2 Resultados dimensionais.....	59
5.2.1 Dimensional nas amostras AN36135 com material base de ferro fundido sem nitretar, antes e após o endurecimento superficial com laser.....	60
5.2.2 Ovalização das amostras AN36135 com material base de ferro fundido sem nitretar, antes do endurecimento a laser.....	62
5.2.3 Ovalização das amostras AN36135 com material base de ferro fundido sem nitretar, após o endurecimento.....	65
5.2.4 Dimensional nas amostras AN36136 com material base de ferro fundido nitretado, antes e após o endurecimento.....	67
5.2.5 Ovalização das amostras AN36136 com material base de ferro fundido nitretado, antes do endurecimento.....	69
5.2.6 Ovalização das amostras AN36136 com material base de ferro fundido nitretado, após o endurecimento.....	72
5.2.7. Resultados de endurecimento superficial indesejados.....	75
5.3 Resultados de testes de bancada.....	77
5.3.1 Avaliação de performance em engripamento – Block on Ring (BoR).....	77
5.3.2 Avaliação do coeficiente de atrito e desgaste – UMT.....	78
5.3.3 Resultados gráficos de perfis.....	82

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	90
7 CONCLUSÃO.....	93
8 TRABALHOS FUTUROS/ ATIVIDADES SUGERIDAS.....	95
ANEXO A.....	96
ANEXO B.....	97
ANEXO C.....	98
ANEXO D.....	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Conseqüências para componentes e tendências de mercado.	2
Tabela 2: Composição química do material base (% em massa): projeto atual e propostas.	24
Tabela 3: Especificação de dureza para as propostas.	25
Tabela 4: Módulo de elasticidade para as propostas.	26
Tabela 5: Características do óleo lubrificante do teste de engripamento.	30
Tabela 6: Características do óleo lubrificante do teste de desgaste.	34
Tabela 7: Partículas abrasivas de alumina e quartzo usadas no ensaio de desgaste..	34
Tabela 8: Parâmetros utilizados no endurecimento das laterais dos anéis de ferro fundido AN36135 não nitretado das amostras 9 e 11.....	41
Tabela 9: Medidas de dureza Vickers em diferentes profundidades para as amostras #9 e #11 de ferro fundido não nitretado.....	43
Tabela 10: Parâmetros utilizados no endurecimento das laterais dos anéis de ferro fundido nitretado AN36136.	46
Tabela 11: Medidas de dureza Vickers em diferentes profundidades para as amostras #4 e #6 de ferro fundido nitretado.....	48
Tabela 12: Parâmetros utilizados no endurecimento da face de contato dos anéis de ferro fundido AN36135 e ferro fundido nitretado AN36136.	54
Tabela 13: Identificação das amostras da figura 44.....	55

Tabela 14: Parâmetros utilizados no endurecimento das laterais dos anéis de ferro fundido AN36135 não nitretado, das amostras #1 e #4.....76

Tabela 15: Parâmetros utilizados no endurecimento das laterais dos anéis de ferro fundido AN36136 nitretado, das amostras #1 e #8.....77

Tabela16: Identificação de atrito e desgaste para os anéis estudados. 79

Tabela 17: Visão geral de ovalização do anel de material base não nitretado. 91

Tabela 18: Visão geral de ovalização do anel de material base nitretado. 91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tendências relacionadas a potência específica e cargas mecânicas para o desenvolvimento de motores a Diesel.	3
Figura 2: Representação do anel de pistão (ISO6621 -1 – 1984).	6
Figura 3: Célula de potência típica (Ferrarese e Panelli – 2003).	6
Figura 4: Distribuição de pressão radial em forma de ovalização positiva.	7
Figura 5: Distribuição de pressão radial em forma de ovalização negativa.	7
Figura 6: Pressão do gás de combustão entre os anéis.	9
Figura 7: Distribuição típica da temperatura de um pistão de motor a diesel.	10
Figura 8: Descrição genérica de entradas e saídas de um tribosistema	11
Figura 9: Representação esquemática dos elementos de um tribosistema.	11
Figura 10: Esquema para os modos de lubrificação.	13
Figura 11: Evolução do perfil da face de contato do anel com o desgaste.	14
Figura 12: Exemplo de endurecimento por laser com aplicação em um eixo virabrequim.	17
Figura 13: Diagrama de equilíbrio de fases do ferro-carbono.	21
Figura 14: Gráfico de dureza em relação a quantidade de carbono para diferentes microestruturas do aço.	22

Figura 15: Diagrama de equilíbrio Fe-N.	23
Figura 16: Máquina de ensaio de engripamento.	27
Figura 17: Detalhe da máquina de ensaio de engripamento.	28
Figura 18: Corpo-de-prova para teste de engripamento.	28
Figura 19: Instalação do corpo-de-prova no bloco para a montagem no equipamento.	29
Figura 20: Universal Microtribometer (UMT).	31
Figura 21: Instalação do corpo-de-prova no suporte do equipamento UMT.....	32
Figura 22: Instalação do contra-corpo no equipamento UMT.....	33
Figura 23: perfil da face de contato sobreposto.	36
Figura 24: Detalhe do anel de produção normal, com material base de ferro fundido e cobertura de cromo cerâmico.	36
Figura 25: Detalhe do projeto 1, proposta de anel de ferro fundido com tratamento superficial com laser na face de contato.	37
Figura 26: Detalhe do projeto 2, proposta de anel de ferro fundido nitretado com tratamento superficial com laser na face de contato.	37
Figura 27: Representação do anel em corte, indicando a parte inferior como superfície crítica.	38
Figura 28: Vista da superfície lateral do anel AN36135 de ferro fundido não nitretado sob influência de diferentes parâmetros de irradiação.	39

Figura 29: Vista das secções de corte do anel AN36135 de ferro fundido não nitretado sob influência de diferentes parâmetros de irradiação.	40
Figura 30: Micrografia óptica mostrando o detalhe #9 da secção de corte do anel AN36135 de ferro fundido não nitretado sob influência do parâmetro de irradiação escolhido e mostrado na Tab.8.	42
Figura 31: Micrografia óptica mostrando o detalhe #11 da secção de corte do anel AN36135 de ferro fundido não nitretado sob influência do parâmetro de irradiação escolhido e mostrado na Tab.8.....	42
Figura 32: Curva de dureza HV em função da profundidade das secções #9 e #11 do anel AN36135 de ferro fundido não nitretado sob influência de diferentes parâmetros de irradiação.Foram plotados valores médios sem desvio padrão	43
Figura 33: Vista da superfície lateral do anel AN36136 de ferro fundido nitretado sob influência de diferentes parâmetros de irradiação.	44
Figura 34: Micrografias ópticas mostrando a vista das secções de corte do anel AN36136 de ferro fundido nitretado sob influência de diferentes parâmetros de irradiação.	45
Figura 35: Micrografia óptica mostrando o detalhe #4 da secção de corte do anel AN36136 de ferro fundido nitretado sob influência do parâmetro de irradiação, mostrado na Tab.10	47
Figura 36: Micrografia óptica mostrando o detalhe #6 da secção de corte do anel AN36136 de Ferro fundido nitretado sob influência do parâmetro de irradiação, mostrado na Tab.10	47
Figura 37: Curva de dureza das secções #4 e #6 do anel AN36136 de ferro fundido nitretado sob influência de diferentes parâmetros de irradiação.	48

Figura 38: Face de contato do anel AN36135 de ferro fundido e material base sem nitretar, em condição antes do laser.....	49
Figura 39: Face de contato do anel AN36136 de ferro fundido e material base nitretado, em condição antes do laser.....	50
Figura 40: Face de contato do anel AN31582 de produção corrente de ferro fundido coberto com cromo cerâmico, em condição de acabado.	51
Figura 41: Face de contato do anel AN36135 de ferro fundido e material base sem nitretar, em condição de acabado.	52
Figura 42: Face de contato do anel AN36136 de ferro fundido e material base nitretado, em condição de acabado.	53
Figura 43: Representação da divergência de um feixe laser com qualidade M^2	54
Figura 44: Mapeamento do corpo-de-prova com os embutimentos.	55
Figura 45: Caracterização metalográfica dos embutimentos mostrando a microestrutura e profundidade afetada pelo laser.	56
Figura 46: Ampliações de detalhes da micrografia #1 da Fig. 45, mostrando a região termicamente afetada pela irradiação laser.....	57
Figura 47: Ampliações de detalhes da micrografia#2 da Fig. 45, mostrando a região termicamente afetada pela irradiação laser.....	58
Figura 48: Curva de dureza dos anéis AN36135 (#1) de ferro fundido, AN36136 (#2) de ferro fundido nitretado após o laser e a referência de dureza do núcleo.	59
Figura 49: Diferenças de O.L.D. entre antes e depois do tratamento laser em amostras de ferro fundido sem nitretar, AN36135.	60

Figura 50: Diferenças de O.S.D. entre antes e depois do tratamento laser em amostras de ferro fundido sem nitretar, AN36135.	60
Figura 51: Diferenças de abertura livre, entre antes e depois do tratamento laser em amostras de ferro fundido sem nitretar, AN36135.	61
Figura 52: Diferenças de folga entre pontas, entre antes e depois do tratamento LASER em amostras de ferro fundido sem nitretar, AN36135.	61
Figura 53: Gráfico de ovalização antes do laser – AN36135 amostra 01.....	62
Figura 54: Gráfico de ovalização antes do laser – AN36136 amostra 02.....	63
Figura 55: Gráfico de ovalização antes do laser – AN36135 amostra 03.....	63
Figura 56: Gráfico de ovalização antes do laser – AN36135 amostra 04.....	64
Figura 57: Gráfico de ovalização antes do laser – AN36135 amostra 05.....	64
Figura 58: Gráfico de ovalização após o laser – AN36135 amostra 01.....	65
Figura 59: Gráfico de ovalização após o laser – AN36135 amostra 02.....	65
Figura 60: Gráfico de ovalização após o laser – AN36135 amostra 03.....	66
Figura 61: Gráfico de ovalização após o laser – AN36135 amostra 04.....	66
Figura 62: Gráfico de ovalização após o laser – AN36135 amostra 05.....	67
Figura 63: Diferenças de O.L.D., entre antes e depois do tratamento laser em amostras de ferro fundido nitretado, AN36136.	67

Figura 64: Diferenças de O.S.D., entre antes e depois do tratamento laser em amostras de ferro fundido nitretado,AN36136.	68
Figura 65: Diferenças de abertura livre, entre antes e depois do tratamento laser em amostras de ferro fundido nitretado, AN36136.	68
Figura 66: Diferenças de folga entre pontas, entre antes e depois do tratamento laser em amostras de ferro fundido nitretado, AN36136.	68
Figura 67: Gráfico de ovalização antes do laser – AN36136 amostra 01.....	69
Figura 68: Gráfico de ovalização antes do laser – AN36136 amostra 02.....	70
Figura 69: Gráfico de ovalização antes do laser – AN36136 amostra 03.....	70
Figura 70: Gráfico de ovalização antes do laser – AN36136 amostra 04.....	71
Figura 71: Gráfico de ovalização antes do laser – AN36136 amostra 05.....	71
Figura 72: Gráfico de ovalização após o laser – AN36136 amostra01.....	72
Figura 73: Gráfico de ovalização após o laser – AN36136 amostra 02.....	72
Figura 74: Gráfico de ovalização após o laser – AN36136 amostra03.....	73
Figura 75: Gráfico de ovalização após o laser – AN36136 amostra04.....	73
Figura 76: Gráfico de ovalização após o laser – AN36136 amostra 05.....	74
Figura 77: Detalhes de endurecimento indesejados nas amostras de ferro fundido não nitretado.....	75

Figura 78: Detalhes de endurecimento indesejados nas amostras de ferro fundido nitretado.....	76
Figura 79: Coeficientes de engripamento para os materiais estudados.	78
Figura 80: Curva de Stribeck para os diferentes materiais.....	80
Figura 81: Comparação do coeficiente de atrito.	81
Figura 82: Desgaste da camada do anel para os diferentes materiais.	81
Figura 83: Desgaste do cilindro com interface dos diferentes materiais.	82
Figura 84: Perfil antes e após teste da amostra 01 com material base nitretado.....	83
Figura 85: Perfil antes e após teste da amostra 02 com material base nitretado.....	83
Figura 86: Perfil antes e após teste da amostra 03 com material base nitretado.....	84
Figura 87: Perfil antes e após teste da amostra 04 com material base nitretado.....	84
Figura 88: Perfil antes e após teste da amostra 05 com material base nitretado.....	85
Figura 89: Perfil antes e após teste da amostra 01 de referência.	85
Figura 90: Perfil antes e após teste da amostra 02 de referência.	86
Figura 91: Perfil antes e após teste da amostra 03 de referência.	86
Figura 92: Perfil antes e após teste da amostra 04 de referência.	87
Figura 93: Perfil antes e após teste da amostra 05 de referência.	87

Figura 94: Perfil antes e após teste da amostra 01 com material base sem nitretar....88

Figura 95: Perfil antes e após teste da amostra 02 com material base sem nitretar....88

Figura 96: Perfil antes e após teste da amostra 03 com material base sem nitretar....89

1. INTRODUÇÃO

O posicionamento estratégico das empresas é reconhecido hoje como o fator predominante para a geração de vantagens competitivas sobre a concorrência, fundamental para sobrevivência de uma empresa em longo prazo. As empresas podem adotar estratégias diferentes de posicionamento que, de maneira geral, classificam-se em dois extremos: o primeiro de vantagem competitiva por preço e o segundo de geração de vantagem por diferenciação [1].

O contínuo aumento da potência específica de motores a combustão interna acarreta maiores carregamentos termomecânicos e conseqüentemente tribológicos. Com isto, a crescente competitividade que o setor automobilístico está enfrentando, provocou um grande aumento na busca de componentes de motores a combustão interna, com massa reduzida. Esta busca pela redução de dimensões e da massa tem gerado uma diminuição na rigidez dos componentes, expondo os mesmos a algumas condições de operação muito desfavoráveis e propiciando o surgimento de um número maior de falhas por desgaste. Isto permitiu um expressivo aumento da possibilidade de ocorrências de danos por desgaste nos componentes. Sendo assim, as soluções relacionadas ao desgaste tomaram grandes proporções e estão cada dia mais relevantes, por consequência, um diferencial competitivo significativo para as empresas.

Estas alterações devem-se à globalização da economia mundial, que exigiram constantes melhorias no desempenho e, aliadas à queda no preço final de mercado dos produtos [2], impuseram uma competitividade acirrada entre as empresas e tornaram não mais suficiente ter apenas um produto inicial no mercado, mas sim, possuir a capacidade de atualizá-lo rapidamente [3].

Algumas legislações específicas têm sido criadas para a redução de emissões de poluentes, como NOx e de material particulado [4]. Por sua vez, o desenvolvimento de combustíveis alternativos tem sido focado em materiais orgânicos como cana-de-açúcar no Brasil e milho nos EUA. A exploração de alguns novos conceitos como, por exemplo, hidrogênio e eletricidade como fonte de energia para veículos estão também em desenvolvimento. Quanto ao aumento da potência específica, isto se deve em especial à injeção eletrônica ter avançado rapidamente no ambiente industrial. Isso tornou possível alcançar limites de avanço e tempo de ignição do motor abaixo de fenômenos prejudiciais à integridade do mesmo, como a

detonação [5]. A redução da massa e do tamanho do motor, além de contribuir para um melhor desempenho, também resulta em um possível aumento do espaço interno do automóvel, o que sugere melhor conforto ao motorista sem alteração do tamanho do veículo.

A grande parte do desenvolvimento de motores a combustão interna está na área de materiais. A durabilidade do motor está também bastante associada à durabilidade do pacote de anéis, fazendo-se necessário o conhecimento tribológico destes componentes. A Tab. 1 mostra resumidamente as conseqüências para os componentes e algumas das tendências de mercado.

Tabela 1: Conseqüências para componentes e tendências de mercado [6].

		Influência no motor	Impacto nas características operacionais dos motores	Impacto nos componentes
Diretivas legais	Redução na emissão de poluentes e de materiais particulados	Redução do atrito	Redução da viscosidade do óleo	Maior desgaste
		EGR (recirculação dos gases de escape)	Contaminação do óleo	Maior desgaste
		Aumento do pico de pressão cilindro (PCP)	Maiores carregamentos mecânicos	Maiores carregamentos
	NVH	Redução nas vibrações	Blocos reforçados	Deformação nos alojamentos
	Materiais banidos	Componentes sem chumbo	Não contemplado	Materiais sem chumbo
Requisitos dos clientes	Aumento de potência	Aumento da ventilação	Maiores temperaturas e rotações	Superaquecimento
		Aumento do pico de pressão cilindro (PCP)	Maiores carregamentos mecânicos	Maiores carregamentos
	Redução no consumo	Redução do atrito no motor	Redução da viscosidade do óleo	Maior desgaste
		Redução do peso do motor	Componentes mais leves	Distorções
	Aumento nos intervalos de tempo entre trocas de óleo	Não contemplado	Contaminação e degradação do óleo	Maior desgaste e corrosão
	Durabilidade e confiabilidade	Maior quilometragem	Não contemplado	Reprojeto

No Brasil duas demandas adicionais se colocam: a adequação a motores *flex-fuel* e ao uso de biodiesel [7]. As futuras demandas nos motores a combustão interna exigem soluções tecnológicas quanto a anéis de pistão que por um lado precisam suportar as crescentes pressões de combustão e em paralelo reduzir o atrito, conseqüentemente o consumo de combustível. A Fig. 1 mostra uma tendência de desenvolvimento de motores a diesel.

Figura 1: Tendências relacionadas a potência específica e cargas mecânicas para o desenvolvimento de motores a diesel [8].

Desde o primeiro motor a combustão interna, os engenheiros buscam melhorias em relação à resistência ao desgaste em anéis. Estas melhorias vêm sendo alcançadas com o desenvolvimento de camadas que reduzem o desgaste na superfície de contato com a camisa e conseqüentemente aumentam a vida útil do componente anel. O desenvolvimento de camada e superfícies pode ser dividido em quatro partes: desenvolvimento do processo, avaliações iniciais, otimização da camada e/ou superfície tratada e testes de desempenho [9].

Vários fatores podem influenciar a ocorrência de desgaste, os principais são: cargas e velocidades variáveis; presença de partículas abrasivas geradas na combustão; escolha inadequada de aplicação da camada na superfície do anel; temperatura de funcionamento do motor e *design* do anel. Outro fator muito importante é adequação às leis ambientais, onde se torna necessário uma maior

circulação de gases dentro dos motores, principalmente em motores diesel com alto carregamento HDD (*heavy duty diesel*) se faz necessário camadas com maiores resistências, devido a uma maior quantidade de impurezas concentradas dentro do sistema de um motor [10].

A alta compressão, injeção direta, recirculação do gás de exaustão, redução do uso do óleo lubrificante do motor e outros tratos da engenharia, levam o anel de pistão a tal caminho que a vida útil não pode ser garantida com coberturas e tratamentos que não suportam tais condições [11]. A demanda por componentes mais resistentes ao desgaste e à corrosão tem promovido um interesse crescente pela engenharia de superfícies, que desenvolve processos alternativos de melhoria nas propriedades tribológicas e triboquímicas [12]. Entretanto, o custo e o tempo associados a estes desenvolvimentos tornam-se muitas vezes proibitivos [12].

2. OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo do presente trabalho é conhecer e comparar o desempenho tribológico de anéis de pistão de segundo canaleta de motores diesel, submetidos a tratamento superficial por laser. Este trabalho de pesquisa foi direcionado para as variáveis de desgaste e engripamento.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Anéis de pistão

O anel é definido pela ISO6621-1984 [13] como uma peça metálica de determinada forma que, quando confinada no cilindro, aplica uma força de vedação contra a parede do mesmo, vide Fig. 2.

Figura 2: Representação do anel de pistão (ISO6621 -1 – 1984) [13].

Os anéis de pistão normalmente são montados em conjunto de três anéis em cada pistão. Esses anéis são denominados pela sua posição em relação ao topo do pistão, vide Fig. 3. O primeiro anel é montado na canaleta, normalmente acima da região do pino e o topo do pistão. Os anéis acompanham o movimento alternado do pistão, exercendo uma ação de raspagem na parede do cilindro [15].

Figura 3: Célula de potência típica (Ferrarese e Panelli – 2003) [14].

Complementando, os anéis de pistão são elementos circulares elásticos com elevada força tangencial. Eles têm como principais funções: promover a vedação dos gases na câmara de combustão, fazer o controle do filme de óleo lubrificante na parede do cilindro e servir como elemento de transmissão de calor do pistão para o cilindro [16, 17]. O anel de pistão desloca-se em alta velocidade ao longo da parede do cilindro, sob condições adversas de temperatura. O segundo anel, raspador, impede que uma quantidade excessiva de óleo chegue ao topo do pistão onde seria queimada [18].

O anel de pistão, quando está fora do cilindro não possui um raio constante. A sua forma é de tal maneira que quando está dentro do cilindro faz com que ele produza uma pressão uniformemente distribuída sobre a parede do cilindro, assumindo uma forma circular. Estas formas de ovalização são chamadas de negativa e positiva e podem ser consideradas como bons requisitos para a distribuição de pressões [16].

Figura 4: Distribuição de pressão radial em forma de ovalização positiva [16].

Figura 5: Distribuição de pressão radial em forma de ovalização negativa [16].

O contato entre o anel e o cilindro é lubrificado, porém existem situações durante o trabalho dos anéis que no seu deslizamento sobre o cilindro o filme de óleo lubrificante fica fino, como por exemplo, as zonas de inversão do movimento do pistão. Assim, o contato anel-cilindro ocorre sob um regime de lubrificação mista, no qual parte da carga de vedação do anel contra o cilindro é suportada pelo contato metal-metal e parte é suportada pela ação hidrodinâmica do óleo lubrificante. Existem situações no curso dos anéis em que a lubrificação é hidrodinâmica, por exemplo, no meio curso onde a velocidade é máxima.

Os fabricantes de motores, em geral, especificam o tipo de óleo a ser usado em seus equipamentos, segundo especificações próprias, especificações militares ou segundo a classificação SAE. O óleo automotivo é um produto altamente especializado para desempenhar importantes funções como por exemplo, prevenir o desgaste reduzindo o atrito, reduzir os depósitos na câmara de combustão e proteger as peças do motor contra corrosão [19].

Dadas essas condições, são as principais funções dos anéis:

- vedar a câmara de combustão, minimizando a passagem de gases provenientes da combustão para o cárter (*blow-by*);
- extrair calor do pistão, impedindo a sobrecarga térmica;
- controlar o filme de óleo entre o anel e a parede do cilindro, minimizando a quantidade extraída do sistema – queimada ou arrastada (consumo de óleo lubrificante - COL).

Além destas funções, outros requisitos são importantes ao pacote de anéis, como por exemplo, durabilidade, baixas perdas por atrito e baixa carbonização [20, 21]. No caso da durabilidade, é exigido que os anéis mantenham o desempenho do motor quanto a “*blow-by*” e COL dentro de limites determinados para o sistema ao longo de toda a sua vida [5, 21]. Parte da durabilidade do motor está associada à durabilidade do pacote de anéis, fazendo necessário conhecimento tribológico dos componentes. A minimização da perda de potência devido ao atrito do par anel-cilindro deve ser tal que não comprometa o desempenho satisfatório de raspagem dos anéis. Para os motores a diesel, as folgas entre anel e canaleta são as grandes

responsáveis pela carbonização. Nesse caso, o anel possui desenho geométrico específico para auxiliar na quebra dessa carbonização, sendo trapezoidal o formato da seção transversal do anel.

Os três anéis normalmente presentes no pistão têm desempenhos diferenciados para o cumprimento das funções anteriormente descritas. As condições de contorno do anel de primeira canaleta são as mais carregadas em termos mecânicos e térmicos (ver Figs. 6 e 7). Por ser o primeiro anel abaixo da câmara de combustão, ele está exposto ao calor proveniente da combustão e à pressão de combustão ao longo do ciclo de trabalho. Quanto ao anel de segundo canaleta, também denominado de anel raspador, este possui como principal função raspar o excesso de óleo deixado na parede do cilindro. Por isso, com o intuito de prover maior eficiência de raspagem, seu perfil de face de contato com o cilindro é usualmente cônico. Apesar das aplicações do anel de segundo canaleta com coberturas ou tratamentos serem menores se comparadas às aplicações do anel de primeiro canaleta, suas condições tribológicas não são tão leves assim. Há o efeito da pressão dos gases com valor máximo em torno de 20% do valor da pressão encontrada na combustão [22].

Figura 6: Pressão do gás de combustão entre os anéis [22].

Figura 7: Distribuição típica da temperatura de um pistão de motor a diesel [23].

3.2. Desgaste

O desgaste pode ser definido como dano de uma superfície sólida, geralmente envolvendo perda progressiva de material, devido a movimento relativo entre duas superfícies [24]. É importante lembrar que um desgaste anormal no cilindro pode aumentar o consumo de óleo lubrificante em motores diesel. Geralmente o maior desgaste no cilindro está associado em posições onde a velocidade do sistema é próximo de zero [25, 26, 27].

Desgaste é um mecanismo que pode danificar as superfícies dos componentes. Vibração, aquecimento, mudanças geométricas podem causar atrito e desgaste. Isto pode resultar na perda da função do componente e pode ou não levar a uma falha catastrófica. Outra fonte [28], define desgaste como a ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo. Isto leva a entender que o desgaste não é intrínseco ao material e sim ao sistema tribológico.

O desgaste ocorre em muitas situações diferentes como por exemplo, maquinário agrícola, rolamentos, componentes de motores, engrenagens, freios e também na vida diária em facas, sapatos, roupas, mobília, escadas e em ossos humanos. A solução para um determinado problema de desgaste depende da exata identificação da natureza do problema. Dependendo dos parâmetros de um tribosistema, podem acontecer diferentes mecanismos de desgaste [28]. Mecanismos de desgaste mostram interações energéticas e de materiais entre os elementos de um tribosistema. O tipo de movimento relativo entre o contato dos corpos também pode ser usado para classificar diferentes processos de desgaste.

Muitas técnicas diferentes são aplicadas para testar o desgaste. Ao contrário de outros testes mecânicos, nenhuma especificação padrão está disponível para

testar o desgaste. Mas, várias técnicas recebem aceitação em laboratórios do mundo todo. A razão para a grande variedade de técnicas de teste é a grande variedade de sistemas de desgaste que acontecem em prática. As Figs. 8 e 9 mostram uma descrição genérica de um tribossistema.

Figura 8: Descrição genérica de entradas e saídas de um tribossistema [28].

Figura 9: Representação esquemática dos elementos de um tribossistema [28].

O desgaste não é propriedade básica do material. Os materiais podem se

desgastar por vários mecanismos. Entre eles, estão adesão, abrasão e oxidação. Eles são influenciados por fatores como temperatura, condições de carga e condições de interface. O desgaste adesivo é a remoção ou deslocamento de material de uma superfície por solda entre duas superfícies que se escorregam entre si sob pressão. O desgaste abrasivo é a remoção ou deslocamento de material de uma superfície quando partículas duras escorregam sobre uma superfície sob pressão. As partículas podem estar soltas ou podem ser parte de outra superfície. Também há o desgaste catastrófico que acontece rapidamente, causando dano e muitas vezes mudança de forma de um forte grau que a vida de serviço é encurtada ou sua função é destruída [28]. O desgaste de fadiga é causado quando acontece um desgaste de uma superfície sólida causado por fratura que surge da fadiga de material [24].

Segundo a Vatavuk, o desgaste abrasivo pode ocorrer em duas situações:

- a) Perda de material por parte de uma superfície, quando atritada com outra de maior dureza.
- b) Partículas duras com movimento relativo em relação a duas superfícies atritantes, gerando maior remoção de material na de menor dureza. Neste caso, as partículas podem ser incrustadas em uma das superfícies, gerando abrasão na outra.

Existem os tipos de abrasão primária e secundária. A abrasão primária é gerada por partículas oriundas da atmosfera, na forma de pó ou areia. Atribui-se a esta abrasão uma maior responsabilidade no desgaste em motores a combustão interna, de onde a importância dos filtros de ar e de óleo nestes motores. Já a abrasão secundária, esta pode ser gerada por partículas de metal duro geradas pelo atrito em uma superfície de maior dureza.

O desgaste corrosivo é um tipo de desgaste, no qual uma reação química ou eletroquímica com o meio contribui para o aumento da taxa de desgaste. O componente de desgaste corrosivo pode ser acentuado nos motores a combustão interna, pela diminuição da temperatura de funcionamento [30]. Já o desgaste adesivo é mais freqüente em condições de atrito seco, ou não lubrificado, onde as duas superfícies de contato são metálicas. O desgaste adesivo pode ocorrer em contato lubrificado, porém, em escala muito mais reduzida do que na ausência de lubrificação [30].

A evolução dos motores associou-se a uma elevação das temperaturas de

funcionamento. O tempo necessário para atingir as temperaturas operacionais de funcionamento dos motores também foi reduzido.

A lubrificação é o meio mais eficiente para reduzir o desgaste. O mecanismo de desgaste predominante na presença de lubrificação é o abrasivo, gerando riscos finos na direção do movimento relativo das superfícies atritantes. As partículas geradas pelo desgaste ficam em suspensão no óleo, podendo ser analisadas via espectroscopia.

Um importante fator que determina o nível de atrito do anel de pistão é a condição de lubrificação que o anel se encontra. De acordo com o digrama de Stribeck, lubrificação limite e mista ocorre para o anel nos pontos de inversão dentro do cilindro, onde a velocidade é baixa [31, 32].

Os modos de lubrificação podem ser definidos através da Fig. 10.

Figura 10: Esquema para os modos de lubrificação [29].

No regime de lubrificação “*boundary*” ou contorno existem condições extremas de lubrificação. O filme pode se tornar tão fino a ponto de permitir o contato direto entre os sólidos. Neste caso qualquer separação das superfícies é dependente das moléculas aderidas às mesmas. Nestas condições severas é usual aditivar os lubrificantes. Eles somente serão efetivos se forem aderentes.

Na lubrificação elastohidrodinâmica a soma das asperezas das superfícies atinge o valor da espessura do filme lubrificante, formando um filme de óleo muito

fino entre as superfícies mais próximas. Isto não acontece na lubrificação hidrodinâmica, onde o filme de óleo lubrificante que separa as superfícies possui espessura maior do que a rugosidade combinada das duas, eliminando seu contato, minimizando o desgaste. O atrito neste caso é consequência do cisalhamento do filme lubrificante [29]. A espessura da película de óleo ao longo da parede dos cilindros é mínima nas posições de reversão de movimento dos anéis, e máxima a meio curso onde a velocidade é máxima.

O desgaste dos anéis de pistão é normalmente mensurado pelas variações dimensionais de alguns parâmetros. A principal delas é a da variação da folga entre pontas [33]. Como o desgaste leva à remoção de material da face do anel e o contato anel-cilindro é mantido, ocorre um aumento da folga entre pontas. Outra forma de se avaliar desgaste de anel de pistão é o gráfico do perfil de raspagem, como analisado em [34], ver Fig. 11.

Figura 11: Evolução do perfil da face de contato do anel com o desgaste [34].

3.3. Tratamento superficial com laser

A palavra laser significa amplificação da luz por emissão estimulada da radiação. Einstein, em 1917, postulou pela primeira vez, de forma teórica, a emissão estimulada. Em 1951, C. H. Townes desenvolveu a primeira possibilidade de aplicação desse fenômeno: a amplificação de micro-ondas, sua confirmação experimental, veio pelas mãos do próprio Townes em 1954 [35, 36, 37].

O laser, equipamento polivalente que oferece soluções originais e

competitivas, continua a estimular o desenvolvimento de novas aplicações, como o recozimento de supercondutores, a produção de ligas ou a microtêmpera, que eram desconhecidas há mais de uma década [37]. Por esses motivos, o laser tem aplicações nas mais variadas áreas: no setor industrial, em transformação de materiais, microeletrônica, telecomunicações, instrumentação, fotoquímica, na área médica, no setor nuclear, nas aplicações militares e na informática.

O princípio de funcionamento de um laser pode ser descrito como um meio ativo que se localiza em uma cavidade óptica, denominada ressonador óptico, que se constitui de espelhos refletor paralelos, colocados frente a frente. Esses espelhos refletem a onda eletromagnética gerando múltiplas passagens de ida e volta pelo meio ativo, amplificando o campo eletromagnético na cavidade. Sob influência de bombeamento, há a inversão da população e os átomos são levados ao estado excitado, ocorrendo emissão espontânea em todas as direções, inclusive na direção do eixo óptico do ressonador. O feixe luminoso seguirá um trajeto originado pelas múltiplas reflexões entre os espelhos, no qual a radiação amplifica-se por emissão estimulada a cada passagem pelo meio ativo. Um dos espelhos sendo semitransparente permite que uma parte da potência do feixe laser flua em direção ao exterior. Desta forma, certa fração refletida mantém-se na cavidade, no trajeto ao longo de eixo óptico, para o aumento da intensidade da radiação. Este processo repete-se inúmeras vezes, resultando em regeneração da radiação [38].

A irradiação de superfícies com laser é considerada uma boa técnica pela sua grande versatilidade na modificação das propriedades de superfícies de um aço. Este processo envolve o uso de alta intensidade de radiação de laser para aquecer rapidamente a superfície de um material. Durante o período que esta região permanece a esta temperatura a microestrutura austenítica é homogeneizada por difusão de estado sólido. No resfriamento, a austenita se transforma em martensita com uma distribuição de carbono e dureza uniforme [39]. Devido à alta taxa de transferência de calor, há a formação de martensita sem a necessidade de um tratamento térmico externo em função do rápido resfriamento através da condução [40]. A profundidade da camada endurecida pode alcançar de 0,05 a 3 mm, dependendo das condições de irradiação [35].

Com o controle dos parâmetros da irradiação tem-se efeitos induzidos na superfície do material, que podem ser separados em três grupos de aplicações. No primeiro grupo tem-se o aquecimento da superfície a uma temperatura que não

exceda o ponto de fusão do material, mas é suficiente para que ocorram transformações da fase. Pelo controle do processo de aquecimento e resfriamento é possível obter-se diferentes efeitos na camada superficial tais como têmpera, revenimento e recozimento. Isto acontece sem modificações nas dimensões iniciais e sem alteração da rugosidade [41]. No segundo grupo tem-se o aquecimento da superfície em uma temperatura entre a do ponto de fusão e a do ponto de evaporação do material. Pelo controle das variáveis do processo, pode-se obter, na superfície, uma estrutura temperada, uma estrutura amorfizada ou uma superfície microligada. No terceiro grupo o método tem como fator característico a vaporização de um revestimento do material na interação da radiação laser na amostra, o qual é realizado com pulsos de nano segundos, gerando a uma onda de choque que leva ao endurecimento superficial do material [41].

A técnica de radiação de superfície com laser permite realizar tratamentos localizados, aplicados em áreas bem definidas do material. O laser é utilizado em processamento de materiais por diversos fatores, como por exemplo, processamento em altas velocidades, obtenção de peças com tolerâncias apertadas, fornecendo um acabamento de boa qualidade e é considerado um processo versátil e silencioso.

Processamento laser depende de jogo de variáveis da fonte de laser (comprimento de onda, modo de operação, intensidade e diâmetro do feixe de laser) e do material (geometria, propriedades físicas). Se o processo de tratamento de laser for utilizado na indústria será necessário selecionar, para um determinado material, a melhor combinação dos parâmetros [42, 43]

O tratamento térmico superficial com laser, principalmente o endurecimento de metais existe com o objetivo de se buscar uma superfície dura com interior flexível. Muitas aplicações de engenharia solicitam peças com superfícies resistentes ao desgaste, e que ao mesmo tempo exigem uma boa resistência à fadiga. Estes requisitos só podem ser cumpridos pelo endurecimento superficial do material.

Figura 12: Exemplo de endurecimento por laser com aplicação em um eixo virabrequim [44].

As propriedades do material influenciam no endurecimento. A composição do material e a geometria são fatores que influenciam na distribuição do fluxo de calor. A absorção é outra propriedade fundamental. Uma superfície metálica polida reflete entre 90 e 98% da luz de um feixe laser de CO_2 incidindo perpendicularmente. O aumento da absorção pode ser feito por aumento da rugosidade da superfície. Outra propriedade importante é o comprimento de onda. Com a diminuição do comprimento de onda do feixe, a absorção da superfície dos metais aumenta [38].

Vale salientar que a absorção aumenta drasticamente com o aumento da temperatura, e é quase total para o material na fase líquida ou de vapor. Assim, esta alta refletividade se torna um problema somente para o início do processo [45].

3.3.1. Tratamento superficial com laser com fusão de material

Endurecimento a laser com fusão da superfície difere do endurecimento sem fusão da superfície pelas dimensões da zona de interação do laser e da maior heterogeneidade da estrutura na região alterada, que contém pelo menos três camadas. Fusão da superfície com laser e subsequente resolidificação rápida, é um meio de se produzir uma microestrutura refinada ou metaestável em áreas localizadas de um componente.

A fusão de superfície com laser engloba a família de processos que inclui formação de ligas na camada superficial e injeção de partículas na superfície. Ligas ferrosas, aços alta liga e ferro fundido respondem bem a este tipo de tratamento. Dentro da região modificada, a transformação depende da cinética dos mecanismos de transformação. Estes mecanismos estão associados com técnicas de processamento de materiais com laser, que podem endurecer a superfície sem ou com fusão do material. As principais propriedades da superfície que são melhoradas por este método são dureza, desgaste e fadiga. Os princípios do endurecimento com laser são similares ao processo de endurecimento convencional, embora a escala de tempo envolvida seja uma ordem de grandeza menor [39].

3.3.2. LASER Nd:YAG

O LASER Nd-YAG é provavelmente o laser de estado sólido mais usado. O YAG ou cristal iônico de alumínio e ítrio dopado com neodímio tem qualidades ópticas e é termicamente condutivo. Ele funde a 1970°C [36].

O íon de Nd^{3+} quando dopante em um cristal de estado sólido produz uma emissão muito forte de radiação a um comprimento de onda de 1,064 μm . O laser de Nd tem provavelmente mais diferentes tipos de aplicação que os muitos outros tipos de laser. Talvez a maior aplicação esteja nas várias formas de processamento de materiais [46, 37]. Os lasers diferem radicalmente entre si em numerosos aspectos, tais como as propriedades do feixe e as limitações de operação. Evidentemente, diferem também pelo preço. Existem lasers que são objetos de aplicações de natureza científica ou industrial.

O laser de neodímio (Nd) situado no infravermelho de $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ é um laser de estado sólido [37, 44]. A matriz isolante pode ser cristalina (YLF, YAG), que funciona em regime contínuo ou pulsado, ou amorfo (vidro dopado), que funciona essencialmente em regime pulsado. O laser de neodímio está entre os mais importantes, pois desempenha papel de destaque em numerosas aplicações industriais e científicas.

A condutibilidade térmica do YAG é elevada, o que permite taxas de repetição de várias dezenas de Hertz e funcionamento contínuo. A energia que pode ser liberada por um laser Nd:YAG é limitada pela capacidade de armazenamento de energia da barra de cristal [35].

3.4. Material

3.4.1. Ferro fundido

A designação “ferro fundido” refere-se a um extenso grupo de ligas que contém basicamente ferro, carbono e silício, e que se caracterizam por apresentarem reação eutética (líquido transformando-se em dois tipos de sólido) durante sua solidificação. Os ferros fundidos geralmente são classificados em brancos, cinzentos, mesclados, nodulares, maleáveis e vermiculares.

Neste trabalho foram utilizados os ferros fundidos cinzentos. Nestes materiais, as fases formadas pela reação eutética são austenita e grafita. Sua solidificação se dá segundo o diagrama de equilíbrio estável, resultando em fratura de coloração acinzentada característica. Nessas ligas obtém-se grafita interconectada em forma de lamelas, sendo necessário distinguir-se os teores de carbono na forma de grafita e o carbono combinado, cuja soma fornece o teor total de carbono contido nos ferros fundidos [47, 48, 49].

3.4.2. Tratamento térmico

O tratamento térmico é a relação entre a temperatura e o tempo do resfriamento para obter-se determinada microestrutura. Ele é um ciclo de aquecimento e resfriamento realizado nos metais com o objetivo de alterar as suas propriedades físicas e mecânicas, sem mudar a forma do produto. Normalmente associado com aumento de resistência do material.

O tratamento térmico às vezes acontece inadvertidamente, como “efeito colateral” quando:

- Um processo de fabricação causar aquecimento ou resfriamento no metal, como nos casos de soldagem e de forjamento.
- Aplicação do componente quando alcança a temperatura em que ocorre alteração de microestrutura e consequentemente das propriedades mecânicas [38].

A transformação da austenita em martensita é uma transformação de fase

sem difusão. Ela ocorre rapidamente, em velocidades que se aproximam da velocidade do som no material. Como o volume da martensita é superior ao da austenita, ocorre uma expansão dimensional após a transformação martensítica. As fases constantes do diagrama Fe-C são classificadas conforme descrito a seguir, vide Fig. 13:

- Ferrita, (do latim *ferrum*) que consiste em uma solução sólida intersticial de C (com até 0,022%) no ferro CCC. A ferrita é magnética e apresenta baixa resistência mecânica, cerca de 300 MPa, excelente tenacidade e elevada ductilidade.
- Austenita (do nome do metalurgista inglês Robert Austen), que consiste em uma solução sólida intersticial de C (com até 2,11% em massa) no ferro CFC. Em aços ao carbono e aços baixa liga só é estável acima de 727 °C. Apresenta resistência mecânica em torno de 150 MPa e elevada ductilidade e tenacidade. A austenita não é magnética.
- Cementita Fe_3C (do latim *caementum*), é a denominação do carboneto de ferro Fe_3C contendo 6,7% de C em massa e estrutura cristalina ortorrômbica. Apresenta elevada dureza, baixa resistência, baixa ductilidade e baixa tenacidade.
- Perlita (nome derivado da estrutura da madre pérola observada ao microscópio), que consiste na mistura mecânica das fases ferrita (88,5% em massa) e cementita (11,5%) formada pelo crescimento cooperativo destas fases. Apresenta propriedades intermediárias entre a ferrita e a cementita dependendo do tamanho e espaçamento das lamelas de cementita [50-51-52].

Figura 13: Diagrama de equilíbrio de fases do ferro-carbono [50].

Se o resfriamento for lento dentro de condições próximas do equilíbrio, a austenita se transformará em uma mistura de ferrita e cementita, denominada perlita. Se o resfriamento for rápido, não haverá tempo suficiente para a formação da perlita e, conseqüentemente, a austenita se transformará numa fase metaestável denominada martensita, de estrutura tetragonal de corpo centrado. Cada uma dessas transformações determina as bases dos tratamentos térmicos aplicados nos aços. Assim, a eventual alta temperatura de estabilidade da austenita na liga ferro carbono e a transformação de estado sólido da austenita no resfriamento cria várias oportunidades para otimizar a forma, a microestrutura e as propriedades para diversas aplicações.

A Fig. 14 mostra a variação da dureza em função do teor de carbono para os vários tipos de microestrutura. Em todos os tipos de microestrutura a dureza aumenta com o aumento da quantidade de carbono, mas a microestrutura martensítica é aquela que mostra um aumento mais representativo. Define-se ferro fundido como liga ferro-carbono com mais de 2,11%C [50-51-52].

Figura 14: Gráfico da variação da dureza em relação a quantidade de carbono para diferentes microestruturas do aço.

3.4.2.1. Nitretação

O processo de nitretação consiste em um tratamento termoquímico responsável pela formação de uma camada através da difusão do nitrogênio da superfície para o interior da peça, alterando as propriedades superficiais dos materiais, como dureza e resistência ao desgaste. Do ponto de vista termoquímico a nitretação é um tratamento que envolve a introdução de nitrogênio na forma atômica no interior do reticulado cristalino de ligas ferrosas, geralmente no campo de estabilidade da ferrita, em temperaturas normalmente na faixa de 500 a 590 °C [53]. A camada de difusão é usualmente composta de nitretos, carbonetos e nitrogênio em solução sólida na matriz ferrosa, sendo associada a resistência a fadiga e propriedades ligadas a resistência ao desgaste e seus respectivos fenômenos.

O entendimento dos diagramas de equilíbrio Fe-N e Fe-N-C é de extrema importância para que se entendam as possíveis alterações que venham ocorrer na superfície das peças a serem nitretadas. O diagrama de equilíbrio Fe-N é mostrado na Fig. 15.

Figura 15: Diagrama de equilíbrio Fe-N [53].

Pela análise do diagrama de equilíbrio Fe-N, nota-se que, na faixa entre 500 e 570 °C, usuais nos processos de nitretação, a máxima solubilidade do nitrogênio em estado sólido na ferrita é inferior a 0,1%. Quando a quantidade de nitrogênio excede este valor, inicia-se a formação de compostos intermetálicos denominados nitretos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados anéis com material base de ferro fundido e ferro fundido nitretado submetidos a um endurecimento superficial com laser.

4.1. Escolha do anel de pistão e material

Foi escolhido o anel de pistão que é montado no motor Mercedes Benz, OM460 EPA2007 6 cilindros por ele se encaixar com a proposta do presente trabalho. Esta aplicação foi escolhida devido a empresa MAHLE, cooperadora do trabalho, possuir corpos de prova auxiliares para este motor, como também uma plataforma de teste. Partindo de um projeto de anel já homologado pela empresa foi possível comparar e verificar o desempenho tribológico alterando o projeto atual, endurecendo a superfície com o laser.

O material base utilizado foi o ferro fundido. Para adicionar conhecimento nesta pesquisa foram também avaliadas amostras de ferro fundido nitretado. Sendo assim, foi possível comparar três tipos de materiais:

- Atual: anel de produção normal, com material base de ferro fundido e cobertura de cromo cerâmico.
- Proposta 1: anel protótipo, com material base de ferro fundido.
- Proposta 2: anel protótipo, com material base de ferro fundido nitretado.

As propostas 1 e 2 sofreram tratamento superficial com laser, enquanto o projeto atual foi utilizado apenas como referência.

Tabela 2: Composição química (% em massa) do material base: projeto atual e propostas.

Elemento	Especificado	Encontrado	Elemento	Especificado	Encontrado
C	3,20 – 3,60	3,22	Cr	0,40 – 0,70	0,44
Si	2,70 – 3,40	3,26	Mo	0,80 – 1,30	0,97
Mn	0,50 – 0,80	0,62	Cu	0,80 – 1,20	0,88
P	0,35 max.	0,19	V	0,10 – 0,30	0,12
S	0,08 max.	0,043	Nb	0,10 – 0,30	0,12
Ni	0,50 – 0,80	0,67			

4.2. Microestrutura

4.2.1. Grafita

Para o projeto atual, proposta 1 e 2: a fase grafita é predominante tipo D e E, de acordo com a norma ASTM A247-67.

4.2.2. Matriz

Para o projeto atual, proposta 1 e 2: a matriz é estrutura martensítica temperada com finos carbonetos uniformemente distribuídos. Não possui ferrita.

4.2.3. Camada nitretada

A camada nitretada da proposta 2 apresenta-se uniforme e a espessura continua ao longo da periferia do anel.

4.3. Propriedades mecânicas

4.3.1. Dureza

A Tab. 3 apresenta as propriedades mecânicas retiradas de norma interna
Tabela 3: Especificação de dureza para as propostas.

Atual* (MCR24)	Proposta 1 (MF024-S)	Proposta 2 (MF024-N)
800 HV min.	35 – 45 HRC ou 345 – 450 HV	600 HV 0,025 min. @ 0,010 mm 500 HV 0,050 min @ 0,030 mm

* Material base de ferro fundido com cobertura de cromo cerâmico.

4.3.2. Módulo de elasticidade

A Tab. 4 apresenta o modulo de elasticidade retirados de norma interna.

Tabela 4: Módulo de elasticidade para as propostas.

Atual* (MCR24)	Proposta 1 (MF024-S)	Proposta 2 (MF024-N)
---	115.000 – 145.000 MPa (N/mm ²)	115.000 – 145.000 MPa (N/mm ²) (não nitretado)

--- Não medido.

4.4. Equipamentos de metrologia e metalurgia

Os seguintes equipamentos foram usados no presente trabalho:

- *Perthometer Concept*: fornece medidas e análises de contorno e rugosidade de componentes.
- Tridimensional óptica;
- FormTester;
- Microscópio de medição;
- Microscópio óptico, com magnitude até 2000 x;
- Máquina politriz;
- Lixadeira elétrica;
- Máquina de embutir;
- Policorte *cut off*;
- Ataque químico Nital 3% (Ácido nítrico e álcool)
- Microdurômetro, com amplitude de escala Vickers HV (0,001 – 2 kg).

4.5. Equipamento laser

Foi usado um laser de Nd:YAG pulsado com as seguintes características:

- Largura temporal controlada de 0,2 a 15 ms;
- Energia de pulso máxima de 6,0 Joules;
- Taxa de repetição máxima de 500 Hz;
- Potência média máxima de saída no bico de 60 Watts.
- Comprimento focal da lente de focalização de $f = 100$ mm.
- Potência de pico = 3KW

O laser foi acoplado a uma fresadora CNC de quatro eixos (com interpolação em dois eixos). Todo o conjunto, denominado CPML, encontra-se no Centro de lasers e Aplicações CLA-IPEN.

4.6. Equipamento para teste de engripamento

A máquina de “block on ring”, utilizada para verificação de coeficientes de engripamento é mostrada na Fig. 16.

Figura 16: Máquina de ensaio de engripamento.

Figura 17: Detalhe da máquina de ensaio de engripamento.

Os corpos de prova são retirados dos anéis entre 90° e 270° , tendo as dimensões conforme Fig. 18.

Figura 18: Corpo de prova para teste de engripamento.

Os contra-corpos usados são capas de rolamento de marca TIMKEN, devendo atender as seguintes especificações e requisitos dimensionais:

- Material SAE 4620
- Dureza de 58 - 64 HRC
- Rugosidade na face do diâmetro externo, 0.12 - 0.24 $\mu\text{m Ra}$

4.6.1. Procedimento do ensaio de engripamento

Este ensaio verifica a resistência ao *scuffing* dos anéis de pistão em ensaio padronizado. Para o ensaio de engripamento em anéis de pistão adotar as seguintes definições:

- Fixar o corpo de prova em um bloco adequado conforme ilustrado pela Fig. 19 e montá-lo conforme detalhe mostrado na Fig. 17.

Figura 19: Instalação do corpo de prova no bloco para a montagem no equipamento.

- Após a montagem fixar o dispositivo de fixação à máquina.
- Montar o contra-corpo no eixo principal mostrado na Fig. 17, apertando a porca de fixação.
- Medir a excentricidade do contra-corpo, máxima excentricidade permitida 30 μm .
- Os corpos de prova e contra-corpos devem ser limpos antes de serem fixos à máquina.

Depois de iniciado, o programa chamado SP Tronic passa a monitorar a temperatura e a força de atrito.

4.6.2. Lubrificante

Para ensaio de engripamento é utilizado um óleo lubrificante industrial cujas propriedades são apresentadas na Tab. 5.

Tabela 5: Características do óleo lubrificante do teste de engripamento.

Classificação ISO	100
Ponto de fulgor (COC), °C	272
Densidade relativa	0,877
Viscosidade cSt @ 40 °C, mm ² /s	100
Índice de viscosidade (D2270)	98

4.6.3. Parâmetros para o ensaio

Os parâmetros do ensaio de engripamento são:

- a) Velocidade de 500 rpm
- b) Para anéis com Ø inferior a 100 mm são usadas massas padrões de 44,5 N e para Ø superior a 100 mm são usadas massas padrões de 133,3 N.
- c) É aplicada uma massa padrão cada 30 segundos.
- d) Temperatura ambiente.
- e) Uma gota de lubrificante SAE30, aplicado com uma micropipeta sobre o contra-corpo (Test Ring), do lado direito do corpo de prova.
- f) A duração deve ser até o engripamento ($\mu > 0,3$) ou 1068 N (máxima carga)

Os resultados de carga de *scuffing* do corpo de prova são tabelados e expressos na forma de gráfico utilizando um método estatístico para estimar um intervalo de confiança de 90% para a média da população.

4.7. Equipamento para teste de desgaste

O ensaio de desgaste é realizado em uma máquina denominada Universal Microtribometer (UMT). Seu sistema funciona a partir de um computador que por meio de um programa específico o usuário possa ajustar ou modificar qualquer parâmetro do ensaio.

Figura 20: Microtribometro Universal (UMT).

O corpo-de-prova é instalado no dispositivo de fixação esquematizado conforme indicado na Fig. 21 e ajustado à curvatura do corpo-de-prova através do parafuso de ajuste para que haja um contato perfeito com seu contra-corpo não devendo ocorrer passagem de luz entre as partes.

Figura 21: Instalação do corpo de prova no suporte do equipamento UMT

O contra-corpo é montado em um alojamento no reservatório de óleo fixado a máquina conforme mostrado na Fig. 22.

Figura 22: Instalação do contra corpo no equipamento UMT

Após as montagens foram realizados pequenos ajustes para garantir a reprodutibilidade e uma perfeita interação entre a superfície periférica do corpo-de-prova com contra-corpo em movimento relativo durante o ensaio.

4.7.1. Procedimento do ensaio de desgaste

Para o ensaio de desgaste em anéis de pistão foi adotado as seguintes definições:

- Corpo-de-prova: amostra retirada de anéis de pistão.
- Face de contato: nomenclatura da face de contato do anel.
- TOP: lado de referência do anel para a montagem na aplicação, onde ocorre a pressão de combustão.
- Contra-corpo: amostras retiradas de camisa de pistão ou cilindro do bloco de motor.

Para cada tipo de anel ou material fez-se 10 ensaios para uma melhor estimativa dos resultados.

Os corpos-de-prova foram retirados dos anéis entre 90° e 270°, e foram

identificados numericamente na face lateral para a identificação do lote de acordo com o material e referência e perfil.

4.7.2. Metrologia antes do ensaio

Após a identificação, os anéis foram enviados à metrologia para medir o perfil da face de contato gerando um gráfico do perfil antes do ensaio de desgaste.

4.7.3. Lubrificante

Como forma de se obter um desgaste abrasivo acelerado foi utilizado um óleo lubrificante industrial com partículas abrasivas. A Tab. 6 mostra as características físico-químicas do óleo lubrificante e a Tab. 7 mostra a quantidade em massa e a granulometria das partículas abrasivas.

Tabela 6: Características do óleo lubrificante do teste de desgaste.

Classificação ISO	100
Ponto de fulgor (COC), °C	272
Densidade relativa	0,877
Viscosidade cS t@40 °C, mm ² /s	100
Índice de viscosidade (D2270)	98

Tabela 7: Partículas abrasivas de alumina e quartzo usadas no ensaio de desgaste.

	Alumina (Al ₂ O ₃)	Quartzo (SiO ₂)
Massa	0,06%	0,2%
Tamanho mediano da partícula	0,05µm	10µm

Para garantir que a mistura do lubrificante com as partículas abrasivas fosse homogênea procedeu-se da seguinte forma:

- Adicionou-se 700 mL (590 g) de lubrificante em um béquer graduado
- Adicionou-se ao lubrificante 0,4 g de alumina mais 1,3 g quartzo
- A solução foi misturada por no mínimo 30 minutos antes de cada ensaio em um

misturador elétrico.

4.7.4. Parâmetros para o ensaio de desgaste

O objetivo do ensaio foi o de avaliar o desgaste em movimento relativo das superfícies do corpo-de-prova e contra-corpo. Os principais parâmetros do ensaio são mostrados a seguir:

- a) Velocidade 900 rpm
- b) Carga 360 N
- c) Tempo total 4 h
- d) Temperatura ambiente

Após todos os ajustes e fixação do corpo-de-prova e contra-corpo adicionou-se 20 mL de lubrificante e foi dado o início ao ensaio.

4.7.5. Metrologia após ensaio

Todos os corpos de prova e contra-corpos foram então enviados para a metrologia para que fosse traçado o perfil:

- a) Sobrepor os perfis antes e depois do ensaio para que seja medido o desgaste.
- b) O desgaste do corpo-de-prova foi determinado a partir da diferença dos perfis antes e depois do ensaio que foi medido perpendicularmente a partir do ponto médio da largura do desgaste paralela à face lateral do anel conforme mostrado na Fig. 23.
- c) Foram traçados três perfis na região ensaiada da superfície brunida do contra-corpo
- d) Foi medido nos três perfis a maior profundidade em relação à superfície brunida fora da região ensaiada.
- e) O desgaste do contra-corpo foi determinado como a média aritmética da maior profundidade dos três perfis.

Figura 23: Perfil da face de contato sobreposto.

Os resultados de desgaste do corpo de prova e contra-corpo são expressos na forma de gráfico utilizando um método estatístico para estimar um intervalo de confiança de 90% para a média da população.

4.8 Preparação de amostras para a aplicação do laser

4.8.1 Obtenção dos anéis

Os anéis protótipos 1 e 2 foram fabricados na unidade Mahle localizada em Itajubá –MG após serem projetados em Jundiaí-SP. Na Fig. 24 é mostrado o desenho do anel de referência e nas Figs. 25 e 26 são mostrados os desenhos dos projetos.

Figura 24: Detalhe do anel de produção normal, com material base de ferro fundido e cobertura de cromo cerâmico.

Figura 25: Detalhe do projeto 1, proposta de anel de ferro fundido com tratamento superficial com laser na face de contato.

Figura 26: Detalhe do projeto 2, proposta de anel de ferro fundido nitretado com tratamento superficial com laser na face de contato.

4.8.2. Verificação e adequação aos parâmetros de laser ideais

Devido à complexidade do tratamento a laser, foram realizados ensaios nos protótipos onde se alternou algumas variáveis como, velocidade do ponto focal do feixe laser ($V = \text{mm/s}$), energia do pulso laser; largura temporal do pulso ($T_p = \text{ms}$) e taxa de repetição ($F = \text{Hz}$) com o objetivo de se conhecer os melhores parâmetros a serem aplicados nas amostras finais.

Estes ensaios foram realizados na superfície plana lateral dos anéis, uma vez que o propósito é a interação do feixe com o material, no entanto, no momento da irradiação na superfície esférica periférica para a realização das amostras foi observada uma incompatibilidade em relação a estes dois tipos de superfície. Outro aspecto levado em consideração foi o comportamento de aquecimento ocorrido nas amostras. A diferença de temperatura interferiu na região endurecida devido ao tempo de exposição da superfície e a transmissão de calor.

Este fato gerou uma pequena adaptação nos parâmetros para adequar o

endurecimento na superfície periférica dos anéis.

4.8.3. Dimensional

Foram realizados estudos dimensionais antes e depois do endurecimento laser, com o objetivo de se verificar qual o tamanho da influência dimensional que o tratamento laser condiciona aos anéis.

Esta verificação se faz importante devido à forma final que o anel de pistão deve apresentar. Tal forma é processada durante a fabricação do anel em um torno de forma e esta operação acontecer antes da operação de endurecimento a laser proposta neste trabalho. Esta condição de forma do anel é um requisito de aplicação visando um melhor comportamento do anel de pistão em funcionamento.

4.8.4. Irradiação das amostras

As amostras foram irradiadas incidindo-se o feixe laser em pontos bem definidos da superfície. Foi escolhido a faixa inferior do anel para este endurecimento devido a ser uma região crítica de aplicação durante o funcionamento do motor. A Fig. 27 mostra uma representação em corte esquemática da distribuição dos pontos de irradiação na superfície da amostra.

Figura 27: Anel em corte, indicando a parte inferior como superfície crítica.

5. RESULTADOS

5.1. Caracterização dos materiais

Foram registrados os comportamentos de 11 conjuntos de parâmetros para o laser para verificar as variáveis de espessura de camada endurecida, as durezas obtidas e também seu aspecto visual. A Fig. 28 apresenta os traços obtidos pelo tratamento a laser na superfície lateral do anel de material base ferro fundido AN36135 e a Fig. 29 a caracterização metalográfica das secções de corte deste anel.

Figura 28: Vista da superfície lateral do anel AN36135 de ferro fundido não nitretado sob influência de diferentes parâmetros de irradiação.

Figura 29: Micrografias mostrando as vistas das secções de corte do anel AN36135 de ferro fundido não nitretado sob influência de diferentes parâmetros de irradiação. Ataque Nital 3%

Com base nestes resultados foi possível realizar a seleção do conjunto de condições sob as quais obteve-se os melhores parâmetros de irradiação. No caso, foram escolhidas as amostras #9 e #11. A Tab. 8 mostra o conjunto de parâmetros

utilizados no controle do laser para o endurecimento das laterais dos anéis de ferro fundido não nitretado, das amostras #9 e #11. As Figs. 30 e 31 mostram em ampliação as micrografias das amostras #9 e #11.

O conjunto de amostras da Fig. 29 apresenta a estrutura martensítica típica de resfriamento brusco de transformação sem difusão na região do núcleo favorecida pela presença de elementos de liga como Cr, Mo, V e Nb com visível transformação de estrutura na região termicamente afetada pela irradiação do laser.

Tabela 8: Parâmetros utilizados no endurecimento das laterais dos anéis de ferro fundido AN36135 não nitretado, das amostras #9 e #11.

V= 270 mm/s	
Comprimento traço = 15 mm	
Proteção de argônio = 15 L/min.	
Comprimento focal = 100 mm	
Amostra #9	Amostra #11
Tp = 12 ms	Tp = 10 ms
F = 9 Hz	F = 9 Hz
Es = 5,0 J	Es = 5,0 J
Z = - 8	Z = - 9

Onde:

V = velocidade do ponto focal do feixe laser

Tp = largura temporal do pulso

F = taxa de repetição

Es = energia do feixe laser

Z = posição de um ponto focal em relação a superfície irradiada

Figura 30: Micrografia óptica mostrando o detalhe #9 da secção de corte do anel AN36135 de ferro fundido não nitretado, sob influência do parâmetro de irradiação escolhido e mostrado na Tab. 8. Ataque Nital 3%

Figura 31: Micrografia óptica mostrando o detalhe #11 da secção de corte do anel AN36135 de ferro fundido não nitretado sob influência do parâmetro de irradiação e mostrado na Tab. 8. Ataque Nital 3%

Nas figs 30 e 31 é possível observar a região térmicamente afetada pela irradiação do laser aplicado na superfície na ordem de 85μm a 100μm. A zona afetada térmicamente possui um nível de dureza maior do que a média do núcleo, conforme Tab. 9.

Foram utilizadas medidas de microdureza Vickers para investigar as relações entre os vários parâmetros de feixe e o endurecimento resultante do material

irradiado. As medidas de microdureza foram executadas ao longo de uma linha que passa pelo centro do ponto onde incidiu a irradiação laser. Todas as medidas de microdureza foram realizadas com uma carga aplicada de 50 g. A Tab. 9 mostra os resultados das medidas de dureza Vickers para as amostras #9 e #11. Com base na Tab. 9 foi verificado o comportamento da curva de dureza em razão da profundidade, vide Fig. 32.

A máxima dureza superficial localizada na região termicamente afetada pela irradiação do laser apresenta uma dureza de ordem de 70% maior que na região do núcleo.

Tabela 9: Medidas de dureza Vickers em diferentes profundidades para as amostras #9 e #11 de ferro fundido não nitretado

Dureza HV0,05										
no.	10 μ m	20 μ m	30 μ m	40 μ m	50 μ m	60 μ m	70 μ m	80 μ m	90 μ m	100 μ m
#9	575 $\pm$ 3	655 $\pm$ 3	726 $\pm$ 4	644 $\pm$ 3	759 $\pm$ 4	766 $\pm$ 4	613 $\pm$ 3	457 $\pm$ 4	466 $\pm$ 4	453 $\pm$ 4
#11	566 $\pm$ 5	603 $\pm$ 6	623 $\pm$ 3	644 $\pm$ 3	660 $\pm$ 3	644 $\pm$ 3	532 $\pm$ 4	516 $\pm$ 4	532 $\pm$ 4	509 $\pm$ 4

Figura 32: Curva de dureza HV em função da profundidade das secções das amostras #9 e #11, do anel AN36135 de ferro fundido não nitretado sob influência de diferentes parâmetros de irradiação. Foram plotados valores médios sem desvio padrão.

Da mesma forma, foram realizados 8 estudos com o material ferro fundido

nitretado. A Fig. 33 mostra os traços obtidos pela irradiação na superfície lateral do anel AN36136.

Figura 33: Vista da superfície lateral do anel AN36136 de ferro fundido nitretado sob influência de diferentes parâmetros de irradiação.

A Fig. 34 apresenta a caracterização metalográfica das secções de corte das

amostras da Fig. 33. Com base nestes resultados foi possível realizar a seleção do conjunto que direciona quais foram os melhores parâmetros de irradiação. Neste caso, foram escolhidas as amostras #4 e #6.

Figura 34: Micrografias ópticas mostrando a vista das secções de corte do anel AN36136 de ferro fundido nitretado, sob influência de diferentes parâmetros de irradiação. Ataque Nital 3%

As micrografias acima apresentam as mesmas características apresentadas na

Fig. 29, com estrutura martensítica de núcleo de uma região superficial termicamente afetada pela irradiação do laser. Os parâmetros utilizados nas amostras #4 e #6 foram selecionados por apresentar uma região termicamente afetada mais homogênea e uniforme na sua espessura.

A Tab. 10 mostra os parâmetros usados para controlar o laser usado nos tratamentos superficiais do anel de ferro fundido nitretado. A microestrutura das amostras #4 e #6 é mostrada nas Figs. 35 e 36.

Tabela 10: Parâmetros utilizados no endurecimento das laterais dos anéis de ferro fundido nitretado AN36136.

V= 270 mm/s	
Comprimento traço = 15 mm	
Proteção de argônio = 15 L/min.	
Comprimento focal = 100 mm	
Amostra #4	Amostra #6
Tp = 10 ms	Tp = 12 ms
F = 9 Hz	F = 9 Hz
Es = 5,0 J	Es = 5,0 J
Z = + 15	Z = + 12

Onde:

V = velocidade do ponto focal do feixe laser

Tp = largura temporal do pulso

F = taxa de repetição

Es = energia do feixe laser

Z = posição de um ponto focal em relação a superfície irradiada

Figura 35: Micrografia óptica mostrando detalhe #4 da seção de corte do anel AN36136 de ferro fundido nitretado sob influência do parâmetro de irradiação, mostrado na Tab. 10. Ataque Nital 3%

Figura 36: Micrografia óptica mostrando detalhe #6 da seção de corte do anel AN36136 de ferro fundido nitretado sob influência do parâmetro de irradiação, mostrado na Tab. 10. Ataque Nital 3%

Medidas de microdureza Vickers foram utilizadas para investigar as relações entre os vários parâmetros de feixe e o endurecimento resultante do material irradiado do anel AN36136 de ferro fundido nitretado. As medidas de microdureza foram executadas ao longo de uma linha que passa pelo centro do ponto onde incidiu a radiação laser. Todas as medidas de microdureza foram realizadas com uma carga aplicada de 50 g. A Tab. 11 mostra os resultados dessas medidas para as amostras #4 e #6. Com base nesta escolha e com as medições de dureza realizadas foi verificado o comportamento da curva.

A máxima dureza superficial localizada na região termicamente afetada pela irradiação do laser apresenta uma dureza de ordem de 80% maior que na região do núcleo.

Tabela 11: Medidas de dureza Vickers em diferentes profundidades para as amostras #4 e #6 de ferro fundido nitretado.

Dureza HV0,05										
No.	10 μm	20 μm	30 μm	40 μm	50 μm	60 μm	70 μm	80 μm	90 μm	100 μm
#4	825 $\pm$ 5	857 $\pm$ 4	689 $\pm$ 4	655 $\pm$ 5	683 $\pm$ 4	609 $\pm$ 4	575 $\pm$ 3	584 $\pm$ 3	487 $\pm$ 3	478 $\pm$ 4
#6	689 $\pm$ 3	766 $\pm$ 3	766 $\pm$ 3	753 $\pm$ 4	726 $\pm$ 3	726 $\pm$ 4	633 $\pm$ 5	603 $\pm$ 4	478 $\pm$ 3	473 $\pm$ 3

Figura 37: Curva de dureza das seções #4 e #6 do anel AN36136 de ferro fundido nitretado sob influência de diferentes parâmetros de irradiação.

Conforme discutido anteriormente, houve uma pequena diferença nos parâmetros de irradiação laser em razão da diferença de superfície irradiada. A contínua irradiação em toda a periferia dos anéis interferiu nestes parâmetros, aumentando a temperatura da amostra por condução do calor, no entanto, na ocasião do endurecimento nas amostras finais foi possível detectar esta diferença devido ao seu aspecto visual.

Foi possível a adequação dos parâmetros de acordo com a base visual já

conhecida realizada nos testes anteriores. A Fig. 38 mostra seções, de 90 em 90 graus, da superfície da face de contato do anel AN36135 de ferro fundido e material base sem nitretar.

Figura 38: Face de contato do anel AN36135 de ferro fundido e material base sem nitretar, em condição antes do laser.

A Fig. 39 mostra seções de anel de 90 em 90 graus com a superfície da face de contato do anel AN36136 de ferro fundido e material base nitretado.

Figura 39: Face de contato do anel AN36136 de ferro fundido e material base nitretado, em condição antes do laser.

Na Fig. 40 é mostrado a face de contato do anel atual de produção, utilizado como referência neste trabalho.

Figura 40: Face de contato do anel AN31582 de produção corrente de ferro fundido coberto com cromo cerâmico, em condição de acabado.

Figura 41: Face de contato do anel AN36135 de ferro fundido e material base sem nitretar, em condição de acabado.

Figura 42: Face de contato do anel AN36136 de ferro fundido e material base nitretado, em condição de acabado.

A Tab. 12 mostra os parâmetros de controle do laser usados para o tratamento das faces de contato dos anéis.

Tabela 12: Parâmetros utilizados no endurecimento da face de contato dos anéis de ferro fundido AN36135 e ferro fundido nitretado AN36136.

V = 270 mm/s			
Comprimento = 15 mm			
Proteção de argônio 15 L/min			
Comprimento Focal = 100 mm			
AN36135		AN36136	
Tp = 10 ms	Es = 5 J	Tp = 12 ms	Es = 5 J
F = 9 Hz	Z = -12	F = 9 Hz	Z = 14

A Fig. 43 representa a divergência de um feixe laser com qualidade M^2 . (parâmetro para quantificar a qualidade dos feixes de LASER). No equipamento laser utilizado este fator é de aproximadamente 12, ou seja, o feixe tem uma divergência relativamente alta. Com isto, uma pequena variação da posição em relação ao ponto focal pode levar a um aumento grande no diâmetro da área irradiada [47].

Figura 43: representação da divergência de um feixe laser com qualidade M^2 [54]

O próximo passo foi a verificação da espessura das camadas tratadas termicamente com o laser e também dos resultados da variação de dureza. A Fig. 44

conjuntamente com a tab. 14 mostra em detalhes o mapeamento e identificação das amostras nos embutimentos em resina a frio de seções de anel em diferentes condições de tratamento superficial na face de contato.

Figura 44: Mapeamento do corpo-de-prova com os embutimentos.

Tabela13: Identificação das amostras da figura 44.

#01	Ferro fundido: material base sem nitretar, após tratamento a laser
#02	Ferro fundido: material base nitretado, após tratamento a laser
#03	Ferro fundido: material do anel atual de produção, coberto com cromo
#04	Ferro fundido: material base sem nitretar, antes do laser
#05	Ferro fundido: material base nitretado, antes do laser

Figura 45: Caracterização metalográfica dos embutimentos mostrando a microestrutura e profundidade afetada pelo laser. Ataque Nital 3%

Figura 46: Ampliações de detalhes da micrografia #1 da Fig. 45 mostrando a região termicamente afetada pela irradiação laser. Ataque Nital 3%

Figura 47: Ampliações de detalhes da micrografia #2 da Fig. 45 mostrando a região termicamente afetada pela irradiação laser. Ataque Nital 3%

Medidas de microdureza Vickers na superfície e na profundidade foram utilizadas para a caracterização do endurecimento e curvas de dureza.

Para a amostra #01 (linha azul), a máxima dureza superficial localizada na região termicamente afetada pela irradiação do laser está na ordem de 70% maior que na região do núcleo.

Já para a amostra #02 (linha vermelha) a diferença está na ordem de 80%.

A curva da amostra #01 indica uma profundidade de dureza menor (60 μ m) que a curva da amostra #02 (80 μ m). Isto muito provavelmente está relacionado a amostra #01 não possuir uma camada de difusão de nitrogênio, fenômeno que a amostra #02 apresenta.

Figura 48: Curva de dureza dos anéis AN36135 (#1) de ferro fundido, AN36136 (#2) de ferro fundido nitretado após o laser e a referência de dureza do núcleo.

5.2. Resultados dimensionais

Resultados dimensionais em termos de máximo diâmetro externo (O.L.D.) e mínimo diâmetro externo (O.S.D.), antes e depois do endurecimento laser nas amostras com as duas condições de material base foram feitas com o objetivo de verificar qual a influência dimensional o endurecimento causa nas amostras.

5.2.1. Dimensional nas amostras AN36135 com material base de ferro fundido sem nitretar, antes e após o endurecimento superficial com laser.

Figura 49: Diferenças de O.L.D., entre antes e depois do tratamento laser em amostras de ferro fundido sem nitretar, AN36135.

Figura 50: Diferenças de O.S.D., entre antes e depois do tratamento laser em amostras de ferro fundido sem nitretar, AN36135

Figura 51: Diferenças de abertura livre, entre antes e depois do tratamento laser em amostras de ferro fundido sem nitretar, AN36135.

Figura 52: Diferenças de folga entre pontas, entre antes e depois do tratamento laser em amostras de ferro fundido sem nitretar, AN36135.

5.2.2. Ovalização das amostras AN36135 com material base de ferro fundido sem nitretar, antes do endurecimento a Laser

Figura 53: Gráfico de Ovalização antes do laser – AN36135 amostra 01

Figura 54: Gráfico de Ovalização antes do laser – AN36135 amostra 02

Figura 55: Gráfico de Ovalização antes do laser – AN36135 amostra 03

Figura 56: Gráfico de Ovalização antes do laser – AN36135 amostra 04

Figura 57: Gráfico de Ovalização antes do laser – AN36135 amostra 05

5.2.3. Ovalização das amostras AN36135 com material base de Ferro fundido sem nitretar, após o endurecimento.

Figura 58: Gráfico de Ovalização após o laser – AN36135 amostra 01

Figura 59: Gráfico de Ovalização após o laser – AN36135 amostra 02

Figura 60: Gráfico de Ovalização após o laser – AN36135 amostra 03

Figura 61: Gráfico de Ovalização após o laser – AN36135 amostra 04

Figura 62: Gráfico de Ovalização após o laser – AN36135 amostra 05

5.2.4. Dimensional nas amostras AN36136 com material base de ferro fundido nitretado, antes e após o endurecimento

Figura 63: Diferenças de O.L.D., entre antes e depois do tratamento laser em amostras de ferro fundido nitretado, AN36136.

Figura 64: Diferenças de O.S.D., entre antes e depois do tratamento laser em amostras de ferro fundido nitretado, AN36136.

Figura 65: Diferenças de abertura livre, entre antes e depois do tratamento laser em amostras de ferro fundido nitretado, AN36136.

Figura 66: Diferenças de folga entre pontas, entre antes e depois do tratamento laser em amostras de ferro fundido nitretado, AN36136.

5.2.5. Ovalização das amostras AN36136 com material base de ferro fundido nitretado, antes do endurecimento.

A forma oval no anel é um requisito de projeto, visando as condições de aplicação. Este requisito pode ser observado nos desenhos das amostras usadas no presente trabalho de pesquisa.

Figura 67: Gráfico de ovalização antes do laser – AN36136 amostra 01

Figura 68: Gráfico de ovalização antes do laser – AN36136 amostra 02

Figura 69: Gráfico de ovalização antes do laser – AN36136 amostra 03

Figura 70: Gráfico de ovalização antes do laser – AN36136 amostra 04

Figura 71: Gráfico de ovalização antes do laser – AN36136 amostra 05

5.2.6. Ovalização das amostras AN36136 com material base de ferro fundido nitretado, após o endurecimento.

Figura 72: Gráfico de ovalização após o laser – AN36136 amostra 01

Figura 73: Gráfico de ovalização após o laser – AN36136 amostra 02

Figura 74: Gráfico de ovalização após o laser – AN36136 amostra 03

Figura 75: Gráfico de ovalização após o laser – AN36136 amostra 04

Figura 76: Gráfico de ovalização após o laser – AN36136 amostra 05

5.2.7. Resultados de endurecimento superficial indesejados

Aspectos visuais e micrografias também mostraram que um adequado conjunto de variáveis durante a irradiação é de extrema importância para um bom resultado.

As vistas das secções de corte do anel AN36135 de ferro fundido não nitretado sob influência de diferentes parâmetros de irradiação mostraram grande variação comportamental, que em alguns casos chegaram a levar o material a uma fusão indesejada como nos detalhes 1 e 4 da fig 77 abaixo.

Figura 77: Detalhes de endurecimento indesejados nas amostras de ferro fundido não nitretado

Tabela 14: Parâmetros utilizados no endurecimento das laterais dos anéis de ferro fundido AN36135 não nitretado, das amostras #1 e #4.

$V = 270 \text{ mm/s}$

Comprimento traço = 15 mm

Proteção de argônio = 15 L/min.

Comprimento focal = 100 mm

Amostra #1	Amostra #4
$T_p = 10 \text{ ms}$	$T_p = 10 \text{ ms}$
$F = 9 \text{ Hz}$	$F = 9 \text{ Hz}$
$E_s = 5,0 \text{ J}$	$E_s = 5,0 \text{ J}$
$Z = - 4$	$Z = - 6$

Onde:

V = velocidade do ponto focal do feixe laser T_p = largura temporal do pulso

F = taxa de repetição; E_s = energia do feixe laser; Z = posição de um ponto focal em relação a superfície irradiada

Da mesma forma, micrografias ópticas mostrando a vista das secções de corte do anel AN36136 de ferro fundido nitretado, sob influência de diferentes parâmetros de irradiação também mostraram resultados indesejados.

Figura 78: Detalhes de endurecimento indesejados nas amostras de ferro fundido nitretado

Tabela 15: Parâmetros utilizados no endurecimento das laterais dos anéis de ferro fundido AN36136 nitretado, das amostras #1 e #8.

V= 270 mm/s	
Comprimento traço = 15 mm	
Proteção de argônio = 15 L/min.	
Comprimento focal = 100 mm	
Amostra #1	Amostra #8
Tp = 10 ms	Tp = 12 ms
F = 9 Hz	F = 9 Hz
Es = 5,0 J	Es = 5,0 J
Z = - 10	Z = - 10

Onde:

V = velocidade do ponto focal do feixe laser

Tp = largura temporal do pulso

F = taxa de repetição

Es = energia do feixe laser

Z = posição de um ponto focal em relação a superfície irradiada

5.3. Resultados de testes de bancada

5.3.1. Avaliação de performance em engripamento – *Block on Ring* (BoR)

O objetivo deste ensaio é verificar a resistência ao engripamento das duas amostras estudadas, utilizando como referência o material já homologado no mercado. O coeficiente de resistência obtido para todas as amostras é mostrado na Fig. 79.

Figura 79: Coeficientes de engripamento para os materiais estudados.

5.3.2. Avaliação do coeficiente de atrito e desgaste – UMT

Para este ensaio, foram desconsideradas as avaliações das amostras de ferro fundido com material base sem nitretar (AN36135) devido a ocorrências de engripamento prematuro.

A Tab. 16 mostra os resultados de atrito e desgaste dos anéis estudados.

Foram verificados também os desgastes gerados nas camisas com o objetivo de verificar o desgaste que o anel causa na camisa.

Tabela 16: Identificação de atrito e desgaste para os anéis estudados.

Anel			Valores (90% confiança para a média variação da banda)		
Designação	Cobertura	Número	Coef. de atrito (Vel./Carga = 0,5)	Desgaste do anel (μm)	Desgaste da camisa (μm)
MC024	Cromo	AN31582	$(0,133 \pm 0,01)$	$(2,90 \pm 0,79)$	$(1,31 \pm 1,25)$
MF024	ferro fundido	AN36135	não avaliado*	não avaliado*	não avaliado*
MF024-N	Ferro fundido nitretado	AN36136	$(0,133 \pm 0,01)$	$(9,20 \pm 2,20)$	$(1,90 \pm 0,20)$

* não avaliado material base de ferro fundido sem nitretar devido ao engripamento prematuro ocorrido nos anéis, o que gerou um dano ao equipamento utilizado.

O gráfico da Fig. 80 mostra a curva de Stribeck realizada para os diferentes materiais. Para a condição de baixas velocidades pode-se considerar que não existe diferença no coeficiente de atrito entre os materiais.

Figura 80: Curva de Stribeck para os diferentes materiais.

A Fig. 81 mostra uma comparação de coeficiente de atrito entre as coberturas estudadas. Neste caso foi comparada a cobertura do anel de produção (cromo) com a proposta de ferro fundido nitretado com tratamento laser. Os resultados mostraram uma similaridade entre elas.

Figura 81: Comparação do coeficiente de atrito.

Para o desgaste foram submetidos a teste 6 anéis de cada material. A Fig. 82 mostra o resultado de desgaste para o anel e camisa, ou seja, sua contra-parte.

Figura 82: Desgaste da camada do anel para os diferentes materiais.

A Fig. 83 mostra o desgaste no cilindro submetidos a diferentes coberturas.

Quando se trabalha alterando a variável cobertura do anel, observa-se que o desgaste no cilindro ocorrido em interface com a proposta ferro fundido nitretado foi razoavelmente menor.

Figura 83: Desgaste do cilindro com interface dos diferentes materiais

5.3.3. Resultados gráficos de perfis

Foi também observado o comportamento de desgaste decorrente do gráfico de perfil. A linha verde considera o perfil após o teste. As Figs. 84 a 88 a seguir mostram os resultados das análises nos anéis com material base nitretado (AN36136), considerados nesta análise específica de desgaste.

Figura 84: Perfil antes e após teste da amostra 01 com material base nitretado.

Figura 85: Perfil antes e após teste da amostra 02 com material base nitretado.

Figura 86: Perfil antes e após teste da amostra 03 com material base nitretado.

Figura 87: Perfil antes e após teste da amostra 04 com material base nitretado.

Figura 88: Perfil antes e após teste da amostra 05 com material base nitretado.

As Figs. 89 a 93 a seguir mostram os resultados das análises nos anéis de produção normal (AN31582 - referência), como base comparativa:

Figura 89: Perfil antes e após teste da amostra 01 de referência.

Figura 90: Perfil antes e após teste da amostra 02 de referência.

Figura 91: Perfil antes e após teste da amostra 03 de referência.

Figura 92: Perfil antes e após teste da amostra 04 de referência.

Figura 93: Perfil antes e após teste da amostra 05 de referência.

As Figs. 94 a 96 a seguir mostram os resultados das análises nos anéis com material base sem nitretar (AN36135), desconsiderados nesta análise específica de

desgaste.

Figura 94: Perfil antes e após teste da amostra 01 com material base sem nitretar.

Figura 95: Perfil antes e após teste da amostra 02 com material base sem nitretar.

Figura 96: Perfil antes e após teste da amostra 03 com material base sem nitretar.

Devido a esta condição crítica de teste, o mesmo foi interrompido e reportado apenas 3 amostras.

6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo os resultados serão abordados de uma forma comparativa entre as diferentes propostas, utilizando a referência de um item de série.

Na primeira etapa do experimento foram registrados os comportamentos dos diferentes materiais sob influência da irradiação. Esta verificação foi feita para identificar alguns dos melhores parâmetros de operação do laser e sua interação com os materiais. No entanto, devido principalmente a geometria dos anéis esta verificação ficou comprometida devido à diferença de superfícies. Enquanto na verificação foi utilizada a superfície lateral e apenas um traço, nas amostras finais a região foi periférica em um traço contínuo. Entretanto, foi possível a adequação dos parâmetros de acordo com a base visual já conhecida realizada nos testes anteriores.

Em relação as durezas obtidas, foi possível verificar que o material nitretado apresentou uma camada superficial mais dura após o tratamento a laser. A curva de dureza apresentada na Fig. 37 confirma esta condição de maior dureza no material nitretado em relação ao não-nitretado, mostrado na Fig. 32.

Para as questões dimensionais foram abordados as características consideradas críticas para tal estudo. Estas foram o máximo diâmetro externo (O.L.D.), o mínimo diâmetro externo (O.S.D.), a abertura livre e a folga entre pontas. Todo o dimensional foi realizado em amostras serializadas que conferiram um grau de confiança para os comparativos.

Para o material base sem tratamento de nitretação os resultados O.L.D. e O.S.D. e abertura livre mostraram que após o laser houve um acréscimo de medida. Quando a folga entre pontas pode-se dizer que o tratamento a laser foi indiferente para esta medida. Para este material base foram observados gráficos de ovalização antes e pós-tratamento. Os resultados mostraram que a ovalização pós-tratamento gerou uma forma mais cilíndrica em termos de valores absolutos, porém com uma tendência de “bicos” nas pontas.

Tabela 17: Visão geral de ovalização do anel de material base não-nitretado.

Ovalização – AN36135		
	Antes do LASER	Após o LASER
Amostra 1	- 0,332	- 0,176
Amostra 2	- 0,242	- 0,118
Amostra 3	- 0,252	- 0,094
Amostra 4	- 0,300	- 0,118
Amostra 5	- 0,218	- 0,040

Para o material base nitretado os resultados O.L.D. e O.S.D. e abertura livre também aumentaram após o laser, porém em uma maior escala. Neste caso a folga entre pontas também apresentou um acréscimo, mas de ordem menor. Em relação a ovalização, a diferença entre antes e depois do tratamento foi significativa mostrando uma deformação considerável. Em termos industriais este resultado não é aceitável, porém antes de inviabilizar este processo é preciso mais estudos.

Tabela 18: Visão geral de ovalização do anel de material base nitretado.

Ovalização – AN36136		
	Antes do laser	Após o laser
Amostra 1	- 0,050	+ 0,180
Amostra 2	- 0,114	+ 0,126
Amostra 3	- 0,096	+ 0,432
Amostra 4	- 0,080	+ 0,442
Amostra 5	+ 0,010	+ 0,262

Os testes de engripamento e desgaste mostraram uma diferença entre os materiais quando verificado os resultados de resistência ao engripamento. Pode-se observar na Fig. 77 que o material base nitretado com endurecimento a laser (linha amarela) sofreu engripamento bem depois que o material base não-nitretado (linha lilás). Para um efeito comparativo, o anel de produção, utilizado como referência apresentou um resultado intermediário entre as duas amostras.

Em relação a avaliação de atrito e desgaste, foram desconsideradas as amostras de ferro fundido com material base sem nitretar (AN36135) devido a

ocorrências de engripamento abrupto observado no início dos testes.

Pode-se notar na Tab. 15, que o anel de produção apresentou um desgaste razoavelmente menor em relação a proposta, porém quando se verifica o desgaste na camisa observa-se uma melhor condição de desgaste quando se utiliza a amostra proposta.

Foi também observado o comportamento de desgaste decorrente do gráfico de perfill. De acordo com o perfil antes e depois, é possível observar um maior desgaste no anel de material base nitretado em relação ao anel de produção. Já o anel de material base não nitretado, como dito anteriormente, não se mostrou adequado para o teste de desgaste. Como pode-se notar nas Figs. 92 a 94, houve uma degradação nas camadas ao invés de desgaste.

Segundo Jan Vatauvuk em [55], a nitrocarbonetação melhora substancialmente a resistência ao desgaste abrasivo e adesivo.

7. CONCLUSÃO

Em termos gerais, o trabalho cumpriu com seu objetivo. Pode-se concluir que existem diferenças entre as propostas. Tais diferenças oscilaram tanto positivamente quanto negativamente dependendo da característica estudada.

➤ Durezas:

As durezas nas amostras finais alcançaram bons e similares resultados nas superfícies e mostraram uma diferença de dureza de acordo com a profundidade medida. O material base nitretado mostrou um caimento defasado em relação ao não-nitretado até atingir um patamar estável, onde se considera a dureza do material base.

➤ Dimensionais / deformações:

As diferenças dimensionais e deformações entre o antes e depois do tratamento a laser foram bem mais significativas no anel com material base nitretado, tanto para dimensões quanto para formas (ovalizações).

➤ Testes de bancada – engripamento:

Os resultados de engripamento mostraram que o material base nitretado, após o tratamento a laser apresentou uma significativa melhor resistência ao engripamento quando comparado ao material base não nitretado. A amostra referência de produção forneceu um resultado exatamente entre os dois.

➤ Testes de bancada – desgaste:

Os resultados obtidos no teste de atrito e desgaste mostraram que o material base nitretado apresentou uma pior condição de desgaste quando comparado ao de produção, porém quando verificado o desgaste da camisa o material proposto mostrou uma melhor condição de desgaste.

O material base não nitretado não foi compatível ao teste proposto. Provavelmente devido a transição abrupta de dureza entre a camada tratada com laser e o núcleo, foi gerado uma falha prematura nas avaliações de desgaste.

➤ Considerações finais:

Como um resultado inicial, pode-se dizer que foi um grande passo para se conhecer o desempenho de um componente de motor submetido a uma técnica de endurecimento superficial com laser. Entretanto, ainda não foi explorado toda a capacidade do processo laser.

8. TRABALHOS FUTUROS/ ATIVIDADES SUGERIDAS

Sugere-se em futuros trabalhos similares um tratamento de revenimento após o laser, com o objetivo de completar as verificações dimensionais impostas.

Também é indicado um estudo detalhado em rugosidades antes do tratamento a laser, que, conforme indicado no presente trabalho, é de bastante importância no processo de absorção do mesmo.

ANEXOS

ANEXO A. Software SP Tronic para ensaio de engripamento em anéis de pistão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PORTER, M. E. *Estratégia Competitiva*. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1985.
- [2] DUARTE Jr., D. *Tribologia, lubrificação e mancais de deslizamento*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2005. 256p.
- [3] SANDERSON, S. W. Design for manufacturing in an environment of continue changes. In: SUSMAN, G. I. *Integrating design and manufacturing for competitive advantage*. New York, Oxford University Press, USA, 1992. p. 36-55.
- [4] MERRION, D. F. Heavy Duty Diesel Emission Regulations – Past, Present and Future. SAE Mundial, SAE-2003-01-0040. Detroit, USA, 2003.
- [5] HEYWOOD, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill International Editions, Automotive Technology Series. EUA, 1988
- [6] KAUFMANN Jr., M. *Bearings Manual*. São Paulo: Mahle Metal Leve S/A, Brasil, 2002.
- [7] TOMANIK, E. 1º Encontro "Uma abordagem fundamental para os desafios tribológicos para filmes finos em motores que empregam biocombustíveis" 18/08/2009, Mahle Metal Leve S/A , - CDMIR – Innovation Management.
- [8] FERRARESE, A. Desafios e soluções – O exemplo em revestimentos de anéis de pistão. Agosto de 2009, Centro Tecnológico MAHLE Brasil.
- [9] BROWN, W. *Development of Piston Ring Coatings*. SAE Mundial, SAE n. 690754 Cleveland, USA, 1969.
- [10] HERBST, C.; MUNCHOW, F. Modern piston ring coatings and liner technology for EGR applications. SAE World, SAE-2002-01-0489, Detroit, USA, 2002.
- [11] FISHER, M. Piston rings comprising a PVD coating. Int. Cl. F16j 9/16 USA n. 0218603 06 Oct. 2005.
- [12] PINEDO, C. E. Nitretação e revestimentos PVD melhoram propriedades tribológicas. Tratamentos superficiais para aplicações tribológicas, p.1 – 3, 2004. Caderno Técnico – Metalurgia & Materiais
- [13] ISO 6621 a 6626. *International Organization for Standardization – Piston Rings*. 1984.
- [14] FERRARESE, A.; PANELLI, R. An innovative oil control ring designed by powder metallurgy techniques. SAE Mundial, SAE-2003-01-1098. Detroit, EUA, 2003.
- [15] LLOYD, T. The hydrodynamic lubrication of piston rings. Tribology Convention 1969. Paper 5, L773h

- [16] GOETZE, A. G. *Piston Ring Handbok*. Publ. n. 893801. Burscheid, Germany, Goetze AG, April 2003
- [17] JENG, Y. R. Friction and lubrication analysis of a piston ring pack. SAE Technical Paper Series 920492. Warrendale, USA, SAE, 1992.
- [18] HOFF, J. C. *Lubrificação Hidrodinâmica em Anéis de Pistão*. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1974.
- [19] ANTONINO, C. *Fundamentos de Lubrificação*. Texaco Lubrificantes de Qualidade, Serviços Técnicos e de Pesquisas, 1994.
- [20] TAYLOR, C. M. Automobile engine tribology – design considerations for efficiency and durability. *Wear* 221, pp. 1-8, 1998.
- [21] FERRARESE, A. *Efeito do desgaste do primeiro anel de pistão no seu desempenho de vedação e raspagem*. Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2004.
- [22] ZOTTIN, W. *Simulação da Dinâmica de Anéis de um Pistão utilizado em Motores de Combustão Interna*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil, 1992.
- [23] GANCZARSKI, A.; SKRZYPEK, J. Thermo-mechanical damage of piston. Third International Congress on Thermal Stresses. Cracow, Polônia, 1999.
- [24] ASM Handbook, *Mechanical Testing* – Volume 8, Ninth Edition.
- [25] ISHIZUKI, Y.; SATO, F; TAKASE, K. Effect of cylinder liner wear on oil consumption in heavy duty diesel engines. SAE Technical Paper Series n. 810931 Warrendale, USA, SAE, 1981.
- [26] TOMANIK, E. Brunimento de cilindros – principais Características. SAE Technical Paper Series n. 921453. São Paulo, Brasil, SAE, 1992.
- [27] HEGEMIER, T.; STEWART, M. Some effect of liner finish on diesel engine operating characteristics. SAE Technical Paper Series n. 930716. Warrendale, USA, SAE, 1993.
- [28] GAHR, Z.; HEINZ, K. *Microstruture and Wear of Materials*. Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V., 1987, Tribology Series, v.10, 560 p.
- [29] VATAVUK, J. *Mecanismos de Desgaste em Anéis de Pistão e Cilindros de Motores de Combustão Interna*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil, 1994.
- [30] Metals Handbook, 8ª. Edição, ASM, Metals Park, 1962, V.10 P.138, 251 e 359]
- [31] HILL, S. H.; NEWMAN, B. A. Piston ring designs for reduced friction. SAE

Technical Paper Series n. 841222. Warrendale, USA, SAE, 1984.

[32] JENG Y. R. Friction and lubrication analysis of a piston ring pack. SAE Technical Paper Series n. 920492. Warrendale, USA, SAE, 1992.

[33] Demarchi, V. *Estudo de Materiais, Geometria e Compatibilidade dos Tribossistemas em Anéis de Pistão para Motores de Combustão Interna*. Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1994.

[34] TOMANIK, E. *Modelamento do Desgaste por Deslizamento em Anéis de Pistão de Motores de Combustão Interna*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil, 2000.

[35] BERRETTA, J. R. *Investigação do processo de endurecimento de materiais via LASER*. 1995. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

[36] KELIN, K. J. *Laser Engineering*. University of Washington Prentice-Hall, Inc - USA, 1998

[37] HECHT, J. *The Laser Guidebook*. Second Edition – Tab Books Blue Ridge Summit, PA, USA, 1992

[38] BERRETTA, J. R. Comunicação pessoal. (berreta@ipen.br)

[39] KENNEDY, E.; BYRNE, G.; COLLINS, D. N. A review of the use of high power diode LASERs in surface hardening. Journal of Materials Processing Technology, p.1 – 5, 2004.

[40] SILVA, E. M. R. *Estudos dos mecanismos envolvidos no processo de endurecimento superficial a LASER de ligas metálicas*. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. 2001.

[41] BERRETTA, J. R.; FERREIRA, P. I.; LIMA, E. A.; ROSSI, W.; VIEIRA, N. D. Estudos de tratamento térmico superficial de materiais via LASER. V Simp. Est. de LASERs e Aplicações, São Paulo, 1992. p. 330 – 332

[42] MONTEIRO, W. A.; SILVA, E. M. R.; SILVA, L. V.; ROSSI, W.; BUSO S. J. Microstructural and mechanical characterization of gray cast iron and AlSi alloy after laser beam hardening. Material Science Forum, 2010.

[43] MONTEIRO, W. A.; SILVA, E. M. R.; SILVA, L. V.; ROSSI, W. Absorption of Nd:YAG laser beam by metallic alloys. Journal of Materials Science Letters 19, 2000. p. 2095.

[44] KOEBNER, H. *Industrial Applications of LASERS*. Interscience Publication, Munich, West Germany, 1984

[45] ROSSI, W. Comunicação pessoal. (wderossi@ipen.br)

[46] SILFVAST, W. T. *LASER Fundamentals*. Second Edition – University of Central Florida, Cambridge University Press, USA, 1998.

[47] BRANCO, C. H. *Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares*. Associação Brasileira de Metais, Rio de Janeiro, 1998.

[48] MAHLE Metal Leve S.A. *MAHLE Material Catalogue – Power Cell Components*. 2002.

[49] Metals Handbook, *Properties and selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys*. Volume 1, Tenth Edition.

[50] SOARES Jr., E. Comunicação pessoal. (edmo.soares@br.mahle.com).

[51] CALLISTER, Jr., W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução*. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, Brasil, 5 ed., 2002, 589p.

[52] MAGNABOSCO, R. *Mecânica da fratura e fadiga em materiais metálicos*. Notas de aula, Fundação de Ciências Aplicadas – FEI, São Bernardo do Campo, SP, 2003.

[53] VATAVUK, J.; SOARES, E.; PANELLI, R.; VENDRAMIM, J.; MATSUBARA, K.; CANOVA, E. Efeito de nitretação no módulo de ruptura e energia absorvida em ensaio de impacto charpy sem entalhe e flexão em 4 pontos dos aços- ferramenta AISI D-2 e H-13. Congresso TTT Maio 2003.

[54] Disponível em:
< http://www.rp-photonics.com/beam_divergence.html>. Acesso em: 28 Março 2011.

[55] VATAVUK, J.; RODRIGUES, D.; CORREA, P. Efeito da Nitrocarbonetação na resistência ao desgaste de ferros fundidos cinzentos. Conf. Int. sobre Avaliação de Integridade e Extensão de Vida de Equipamentos Industriais. Trabalho no.108 – Pouso Alto, MG, 1993. p. 249 - 251

REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES

DE MOURA, E. L. Desgaste em anéis, camisas e eixos em motores a álcool e a gasolina. Relatório Interno P0100 Cofap.

ZAMPIERON, J. V.; ZAMPIERON, S. L. *Os Caminhos para a Pós-graduação*. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005. 107p.

SINATORA, A.; TSCHIPTSCHIN, A. P. Propriedades de Superfícies de filmes e camadas. Metalurgia & Materiais. São Paulo, 2004.

HOGMARK, S.; JACOBSON, S.; LARSSON, M. Design and evaluation of tribological coatings. Wear 246 (2000), Sweden, 1999. p. 20-33.

DEMARCHI, V.; WINDLIN, F.; LEAL, M. The influence of the lubricant oil on the wear of diesel engine components. SAE Brasil, SAE 952253. São Paulo, Brasil, 1995.

VATAVUK, J.; ZALLI, J. R.; PICCILLI, M. R. New concept or wear resistant coatings for piston rings. SAE Brasil, SAE-931672. São Paulo, Brasil, 1993.

[TAYLOR, C. M. Automobile Engine Tribology – design considerations for efficiency and durability. Wear 221, 1998. p. 1-8

DEMARCHI, V.; WINDLIN, F.; LEAL, M. Desgaste abrasivo em motores diesel. SAE Brasil, SAE-962380. São Paulo, Brasil, 1996.

KELIN, K. J. *LASER Engineering*. University of Washington Prentice-Hall, Inc - USA, 1998

HECHT, J. *The LASER Guidebook*. Second Edition – Tab Books Blue Ridge Summit, PA, USA, 1992