

EFEITO DO ALTO CARREGAMENTO NAS CARACTERÍSTICAS SUPERFICIAIS DOS ANÉIS DE PISTÃO ENSAIADOS EM DIFERENTES MATERIAIS DE CAMISA DE CILINDRO*

William Lemos Bevilaqua¹
Luciano Caldeira Vilanova²
Fernando Mariano Bayer³
Cristiano José Scheuer⁴
Afonso Reguly⁵

Resumo

No presente trabalho foi avaliado, por meio de ensaios dinamométricos em um motor de combustão interna, o desempenho dos anéis de compressão em diferentes materiais de camisa de cilindro, sob alto regime de carga. Dois materiais foram utilizados nas camisas: Ferro fundido cinzento e um revestimento eletrodepositado de Níquel carbeto de silício. Os ensaios tiveram duração de quatro horas com cada configuração anéis/camisa. Parâmetros de análise, como a rugosidade média (Ra) e o aspecto superficial foram aferidos antes e após os testes. Os resultados apontam que o primeiro anel ensaiado na camisa revestida de Ni-SiC apresentou maior redução de Ra na condição estudada.

Palavras-chave: Anéis de pistão; Camisa de cilindro; Ensaios.

EFFECT OF HIGH LOADING ON THE SURFACE CHARACTERISTICS OF PISTON RINGS TESTING IN DIFFERENT CYLINDER LINER MATERIALS

Abstract

In the present work the performance of piston rings of an internal combustion engine with different cylinder liner materials under high load conditions was evaluated in a dynamometric bank test. Two types of liner materials were applied: Grey cast iron and coated Nickel silicon carbide. The tests was carried per four hours with each ring/liner configuration. Average rugosity (Ra) and surface analysis parameters measuring before and after tests. The results show first ring testing in Ni-SiC liner has high Ra reduction for applied condition.

Keywords: Piston ring; Cylinder liner; Tests.

¹ *Tecnólogo em Fabricação Mecânica, Professor no Departamento de Mecânica do Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.*

² *D. Engenheiro Mecânico, Diretor do Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Departamento de Mecânica, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.*

³ *M. Engenheiro Mecânico, Professor no Departamento de Mecânica, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.*

⁴ *M. Engenheiro Mecânico, Professor no Departamento de Mecânica, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.*

⁵ *D. Engenheiro Metalúrgico, Professor no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Desde o princípio do desenvolvimento do motor de combustão interna, os anéis de pistão representaram o maior desafio em termos de materiais e confiabilidade, sendo um dos componentes mais complexos em termos de solicitações mecânicas e térmicas. Em apenas um ciclo, os anéis estão sujeitos a grande variação de carga, velocidade, temperatura e lubrificação disponível [1]. As estratégias para redução de emissão de poluentes adotadas, como o constante aumento da potência específica dos motores, redução da espessura efetiva dos anéis e a localização dos mesmos mais próximo à câmara de combustão para redução dos hidrocarbonetos não queimados, aumentaram significativamente suas condições de trabalho. O desgaste dos anéis tem um efeito direto nas emissões de poluentes, no rendimento do ciclo termodinâmico e na consequente vida útil do motor. Inúmeros trabalhos vem sendo publicados sobre desgaste de componentes automotivos, representando um amplo e importante campo de pesquisa, sendo a interação do conjunto pistão/anéis/camisas de cilindro um dos principais temas abordados. Contudo, poucos trabalhos abordam testes em escala real em motores de combustão interna. Tendo em vista a importância de se estudar o desempenho dos anéis pistão frente a condições de trabalho mais severas, no presente trabalho foram realizados testes dinamométricos em escala real em um motor de combustão interna, avaliando o desempenho de um mesmo conjunto de anéis de pistão em diferentes materiais de camisa de cilindro sob condição de alto carregamento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Motor de Combustão Interna

As características do motor de combustão interna utilizado nos ensaios estão listadas na Tabela 1. Parâmetros como velocidade de trabalho, controle da carga e relação de mistura (λ) foram monitorados e controlados por meio de um módulo de gerenciamento eletrônico. O óleo lubrificante utilizado foi o SAE 20W50. O motor foi montado e instrumentado em uma bancada dinamométrica de absorção elétrica. O combustível utilizado foi o álcool etílico hidratado combustível (AEHC) com grau INPM de 96%.

Tabela 1. Características do motor de combustão interna utilizado nos ensaios dinamométricos

Tipo	Monocilindro, 4 tempos, refrigerado a ar
Diâmetro x curso (mm)	56,5 x 49,5
Potência máxima (kW)	8,085 / 9000 min ⁻¹
Relação de compressão	9,2 : 1
Torque máximo (Kgf)	0,94 / 7500 min ⁻¹
Volume deslocado (cm ³)	124
Pressão média efetiva (KPa)	933,7

2.2 Materiais dos Anéis de Pistão e Camisas de Cilindro

Dois cilindros de mesmas características geométricas e material base (liga de Alumínio fundido) foram utilizados separadamente para os testes no motor de combustão interna. O primeiro cilindro é constituído por uma camisa de Ferro fundido cinzento (FFC), o segundo possui um revestimento de Níquel carbeto de silício (Ni-SiC) eletrodepositado diretamente no cilindro de alumínio. A Tabela 2

apresenta as características das camisas. Os anéis de pistão utilizados são originais do propulsor, classificação do tipo face plana [2], sendo o primeiro anel de compressão revestido com Cromo em sua face de trabalho. A Tabela 3 descreve as características dos anéis de pistão. Na figura 1 são mostradas as microestruturas das seções transversais das camisas de cilindro e anéis de pistão.

Tabela 2. Características gerais das camisas de cilindro utilizadas

	Espessura da camisa	Dureza HV _{0,05}	Brunimento (°)	Rugosidade (Ra) (μm)
FFC ^a	3,5 mm	308 ± 7,36	35	1,32 ± 0,06
Ni-SiC	90,3 μm	512 ± 13,55	35	1,25 ± 0,02

^a Orientação predominante da grafita lamelar tipo D com teor mínimo de perlita de 95%.

Tabela 3. Características gerais dos anéis de pistão utilizados

	Material	Microestrutura	Espessura do revestimento	Dureza HV _{0,05}
1º Anel	Ferro fundido nodular	Martensita revenida	66,58 μm	1068 ± 17,1 ^(b)
2º Anel	Ferro fundido cinzento ^(a)	Martensita revenida	-	310 ± 8,84

^a Orientação da grafita lamelar tipo B.

^b Dureza do revestimento de Cromo.

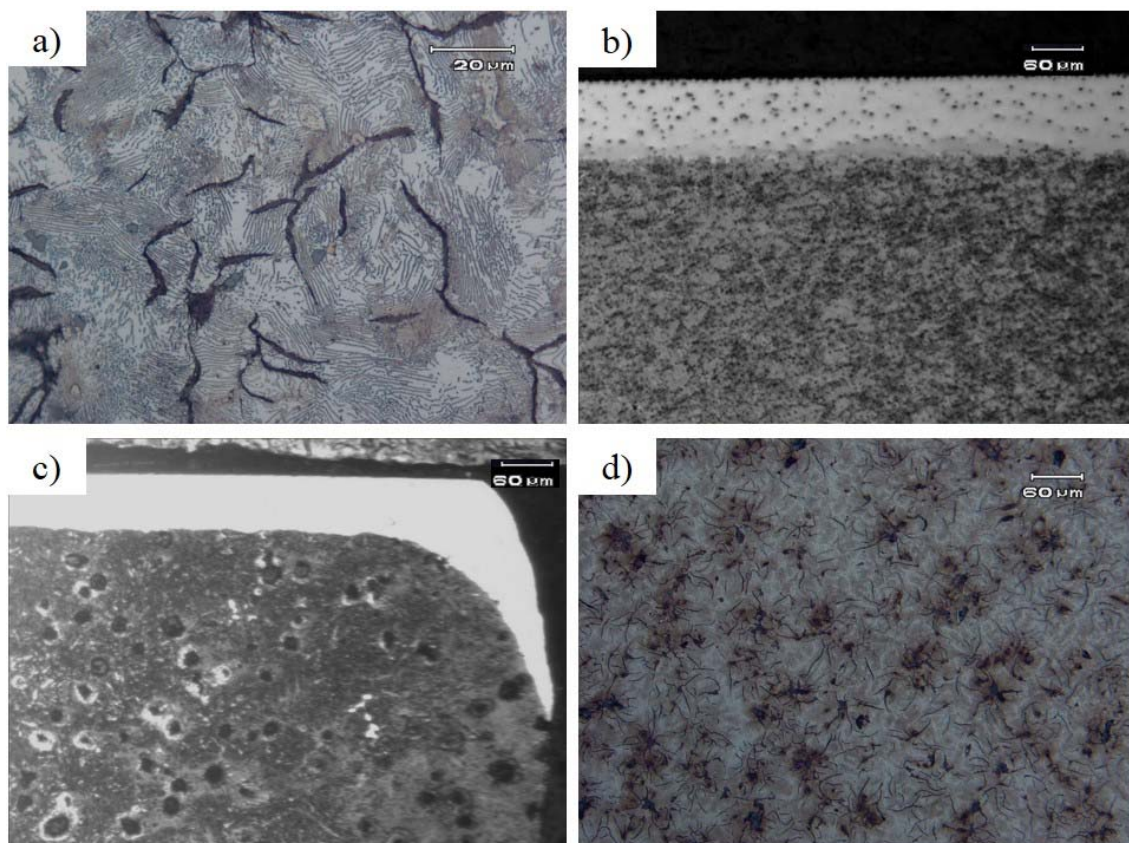


Figura 1. Microestrutura das camisas de cilindro e anéis de pistão: (a) Camisa de cilindro de Ferro fundido cinzento; (b) Camisa de cilindro com revestimento eletrodepositado (Ni 98,40% / SiC 1,60%); (c) 1º Anel de segmento de Ferro fundido nodular revestido com Cromo; (d) 2º Anel de segmento de Ferro fundido cinzento.

2.3 Etapas do Experimento e Análises

O experimento foi conduzido em três etapas. Na primeira o motor foi montado e instrumentado com um jogo de anéis novos juntamente com a camisa de cilindro de Ferro fundido cinzento. Após a montagem realizou-se os testes dinamométricos por quatro horas. A tabela 4 apresenta os parâmetros de ensaio utilizados. Na segunda etapa, o mesmo procedimento foi reproduzido para o cilindro com camisa revestida de Ni-SiC. Na terceira etapa foram realizadas as análises da superfície e rugosidade em todos os anéis ensaiados e nas camisas de cilindro. Foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura Shimadzu, utilizando a técnica de elétrons secundários (SE) para caracterização superficial da região de contato dos anéis com a camisa de cilindro. As imagens adquiridas dos pontos de maior desgaste na circunferência dos anéis foram tratadas posteriormente em um software de análise de imagem, sendo binarizadas de forma a evidenciar o aspecto da retífica remanescente. A rugosidade média (R_a) dos dois anéis de compressão foram aferidas paralelamente a direção de deslizamento em três pontos de suas faces de trabalho com um rugosímetro digital Digimess. Os anéis de controle de óleo não foram analisados. Nas camisas de cilindro, foram analisados quatro locais no ponto morto superior, correspondentes a faixa útil percorrida pelos anéis de pistão no curso de compressão-expansão. Em cada componente foram executadas quinze medições, sendo a média aritmética tomada como valor de referência. A temperatura de operação nas paredes dos cilindros e também do óleo lubrificante foram aferidas e registradas por termopares durante os testes em bancada. Nos cilindros foram inseridos três termopares encapsulados tipo K dispostos verticalmente na parede do mesmo. Durante os ensaios as temperaturas não ultrapassaram 145 °C.

Tabela 4. Parâmetros de ensaio reproduzidos em bancada dinamométrica

Abertura da válvula de aceleração	Tempo de ensaio	Velocidade de trabalho (rpm ⁻¹)	Relação de mistura (λ)	Temperatura do óleo (°C)
30%	2 h	4500 ± 50	0,90 ± 0,02	90 ± 2
100%	2 h	4500 ± 50	0,90 ± 0,02	90 ± 2

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise do Primeiro Anel de Compressão

Na Fig. 2 são apresentadas as micrografias obtidas no microscópio eletrônico de varredura juntamente com as imagens binarizadas da face de trabalho cromada do primeiro anel de compressão ensaiado por quatro horas nas camisas de Ferro fundido e Ni-SiC. Percebe-se que a superfície do anel testado na camisa revestida de Ni-SiC (Fig. 2 (c)) apresentou a maior perda das linhas verticais de retífica, por meio deste indício, podemos supor que esse anel apresentou visualmente maior desgaste durante os testes. Devido a condição limite de temperatura, pressão e lubrificação sofridas no primeiro anel, pode-se inferir que a camisa de cilindro de Ferro fundido cinzento foi superior em termos de conservação de rugosidade superficial em condições críticas de trabalho. Esse desempenho pode ser relacionado a presença de grafita na matriz do Ferro fundido. A grafita tem uma excelente propriedade de lubrificação similar a um lubrificante sólido e contribui para a diminuição das perdas por atrito [3]. Quando o filme de lubrificante é rompido no primeiro anel de compressão, a grafita garante uma lubrificação temporária para

evitar o contato metal-metal. Contudo se a superfície do Ferro fundido for deformada plasticamente e encobrir a grafita, imediatamente ocorrerá um severo desgaste adesivo [4]. Na camisa de cilindro de Ni-SiC não existe um mecanismo efetivo de lubrificação sólida, ou seja, se o filme de lubrificante for rompido, os anéis podem ter contato direto com as partículas duras de SiC na matriz, o que pode ocasionar um intenso desgaste abrasivo. Como o anel que trabalhou na camisa revestida de Ni-SiC apresentou visualmente maiores perdas dos sulcos (marcas de retífica) em sua superfície, o desgaste deste anel com o decorrer do funcionamento do motor poderá ser acelerado devido à baixa retenção de óleo em sua superfície. Taylor [5] comenta que existem dificuldades de camadas depositadas de cromo em manter e estabilizar o filme de óleo na superfície. Essa desvantagem é extremamente crítica para o primeiro anel de segmento. Em motores modernos a taxa necessária de fluxo de óleo repassada os anéis é extremamente pequena e se aproxima de zero para os motores de automóveis [2].

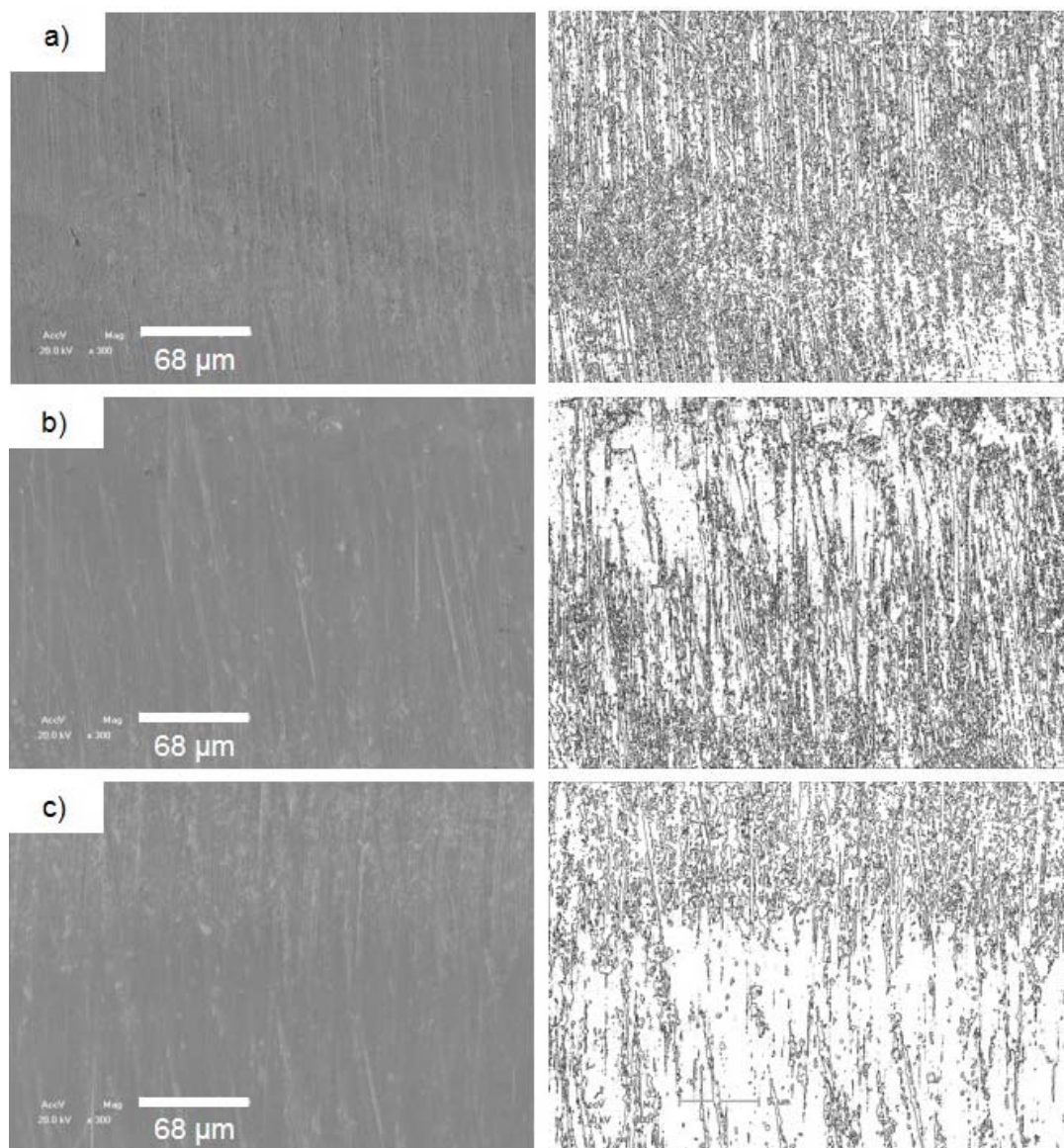


Figura 2. Aspecto superficial da face de trabalho do primeiro anel de segmento cromado após 4 horas de ensaio: (a) anel sem uso; (b) anel testado no cilindro de Ferro fundido; (c) anel testado no cilindro revestido de Ni-SiC.

3.2 Análise do Segundo Anel de Compressão

Na Fig. 3 é mostrada as micrografias do segundo anel de compressão de Ferro fundido cinzento. As imagens são pouco conclusivas a respeito da condição superficial após os ensaios, já que as linhas de retifica foram mantidas, não apresentando redução da profundidade dos sulcos. A pressão dos gases de combustão através do segundo é substancialmente menor do que a do primeiro [6], sendo assim a condição de trabalho é menos severa. Para que ocorra uma mudança superficial mais pronunciada no segundo anel, o tempo de ensaio dinamométrico deverá ser mais longo. Ainda na Fig. 3, as imperfeições presentes na superfície dos anéis, provavelmente são oriundas do processo de acabamento dos mesmos, já que muitas vezes são induzidas irregularidades para retenção de óleo em sua superfície.

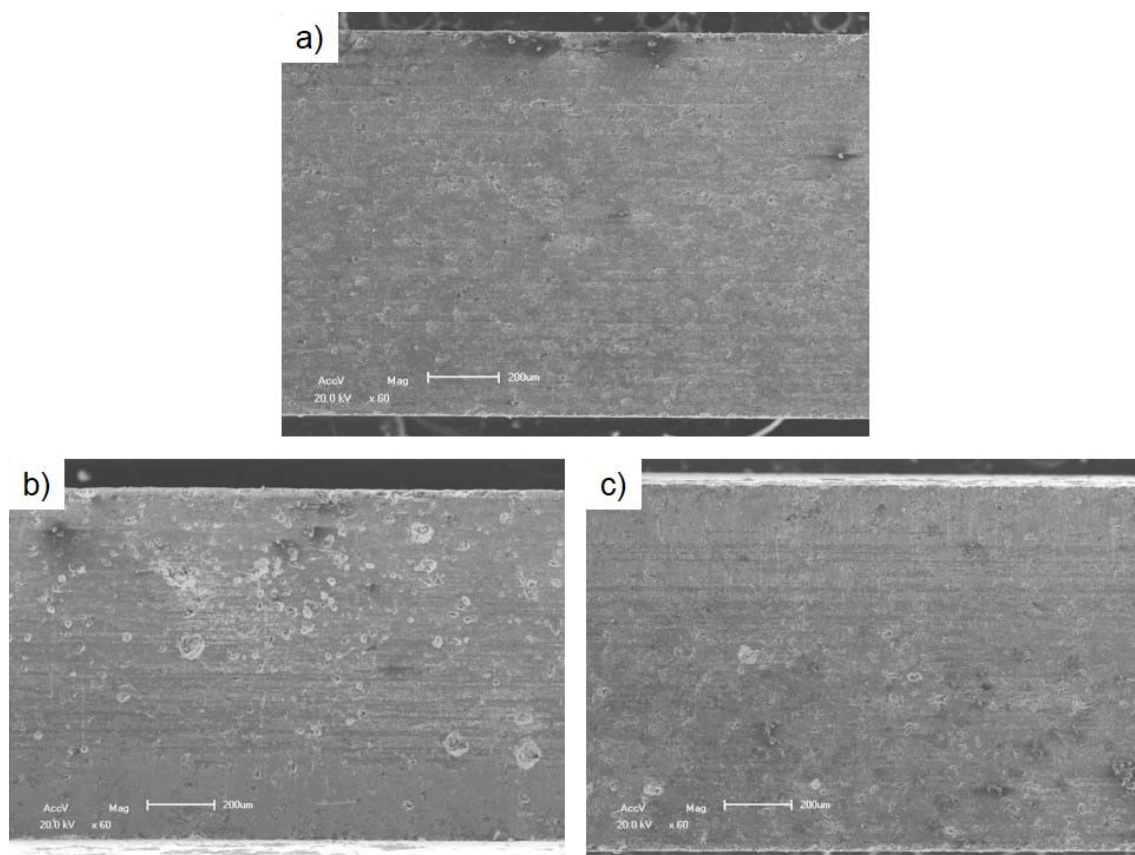


Figura 3. Aspecto superficial da face de trabalho do segundo anel de segmento de compressão após 4 horas de ensaio: (a) anel novo; (b) anel testado no cilindro de ferro fundido; (c) anel testado no cilindro revestido de Ni-SiC.

3.3 Análise da Rugosidade dos Anéis de Pistão e Camisas de Cilindro

A rugosidade média (R_a) dos anéis de segmento e das camisas de cilindros antes e após os ensaios dinamométricos são apresentadas nas Figuras 4, 5 e 6. Na Fig. 4 é possível perceber que após quatro horas de testes, existe uma redução no valor de R_a em todos os pontos medidos. O anel que trabalhou na camisa de Ni-SiC apresentou a redução mais acentuada, esse indício juntamente com a micrografia já apresentada na Fig. 2 (c) confirmam o maior desgaste desse anel com as condições de carga impostas neste trabalho. A disparidade nos valores de R_a apresentados na circunferência dos anéis pode ser explicado pelo pressão diferencial exercida por estes em uma algumas regiões da parede da camisa. A Fig.5 apresenta a

rugosidade média do segundo anel de compressão de ferro fundido cinzento, ensaiados nas camisas de FFC e Ni-SiC. Os valores de Ra mostram que ocorreu uma redução discreta em relação aos dois anéis analisados. O anel ensaiado na camisa de Ni-SiC apresentou valores ligeiramente maiores de Ra ao final dos ensaios. Contudo devido a dispersão dos resultados, nenhuma conclusão efetiva pode ser colocada. Novamente, as condições de trabalho menos severas no segundo anel, um tempo mais longo de ensaio dinamométrico é necessário para que ocorra mudanças perceptíveis na face de trabalho dos mesmos.

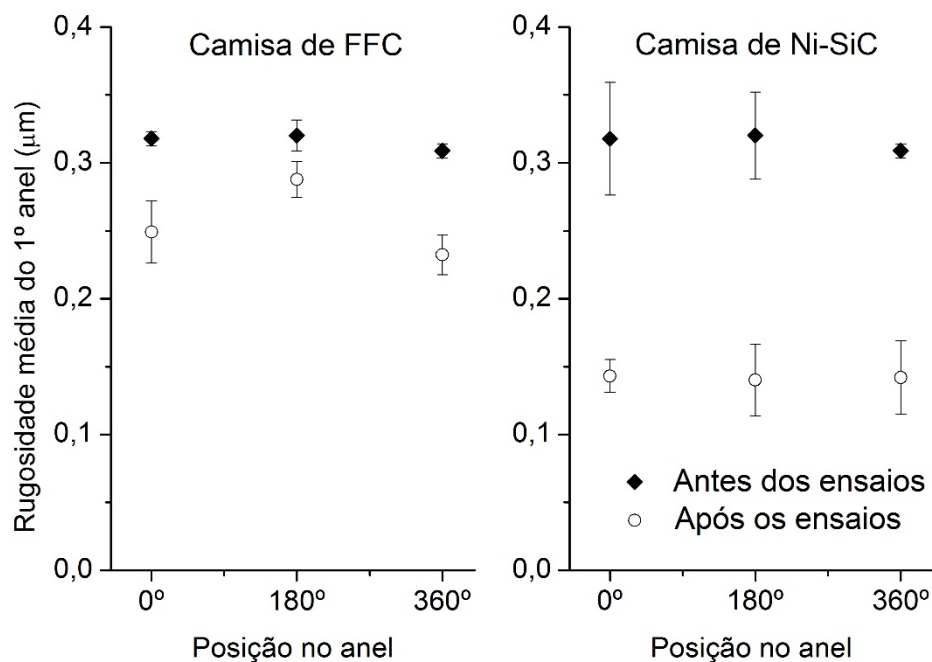


Figura 4. Rugosidade média da face de trabalho do primeiro anel de compressão antes e após 4 horas de ensaio nas camisas de Ferro fundido cinzento e Níquel carbeto de silício.

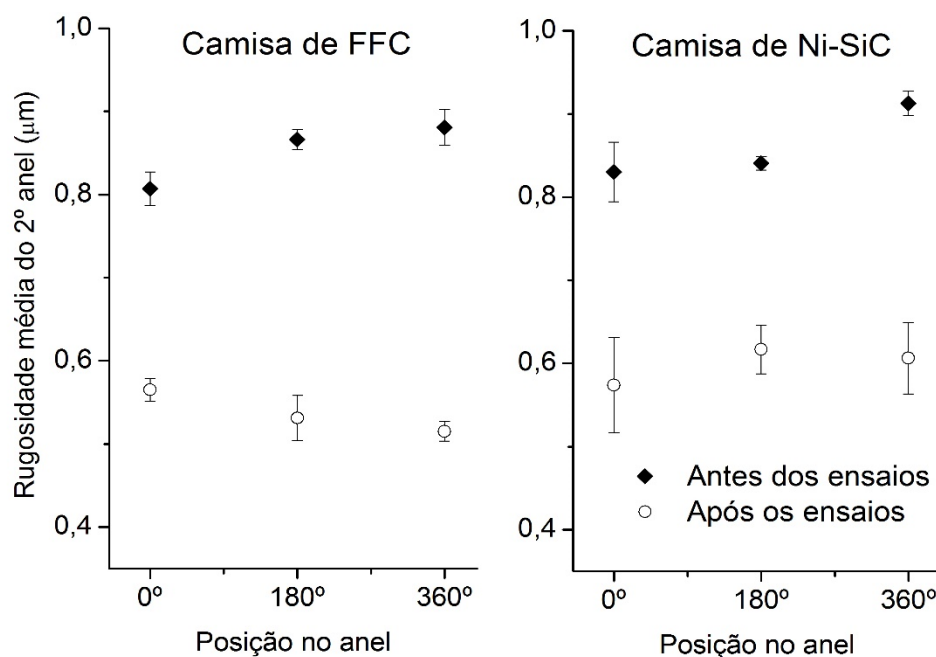


Figura 5. Rugosidade média da face de trabalho do segundo anel de compressão antes e após 4 horas de ensaio nas camisas de Ferro fundido cinzento e Níquel carbeto de silício.

Na Fig.6 é apresentada as medições de Ra executadas nas camisas de cilindro antes e após os ensaios dinamométricos. Por meio desta figura, podemos perceber que Ra partindo de valores entre 1,2 e 1,3 μm cai para índices bastante dispersos na circunferência das camisas após os testes. Essas variações como já comentado para os anéis de pistão, são resultantes da distribuição das forças tangenciais promovidas pelos anéis de pistão durante o curso de expansão-compressão, forçando-os com maior intensidade em algumas regiões da parede da camisa. Claramente é possível perceber que a redução de Ra foi mais pronunciada camisa de ferro fundido cinzento (FFC). Conseqüentemente a redução desse parâmetro afeta diretamente a quantidade de lubrificante na parede da camisa. O volume de retenção de óleo no brunimento do cilindro tem substancial relevância para o desempenho tribológico do sistema [7]. A temperatura de operação na parede dos cilindros durante os ensaios com aceleração máxima e relação de mistura 0,90 é mostrada na figura 7. As temperaturas mensuradas no cilindro revestido com Ni-SiC são menores em relação a camisa de Ferro fundido, em todos os termopares dispostos. Embora a diferença máxima seja de apenas 7 °C, os gradientes de temperatura da parede interna da camisa com revestimento podem ser consideravelmente menores, devido a espessura efetiva ser de apenas 90 μm . Isso pode ter contribuído para uma melhor integridade da película de lubrificante, refletindo em uma menor a redução de Ra para a condição de carga estudada.

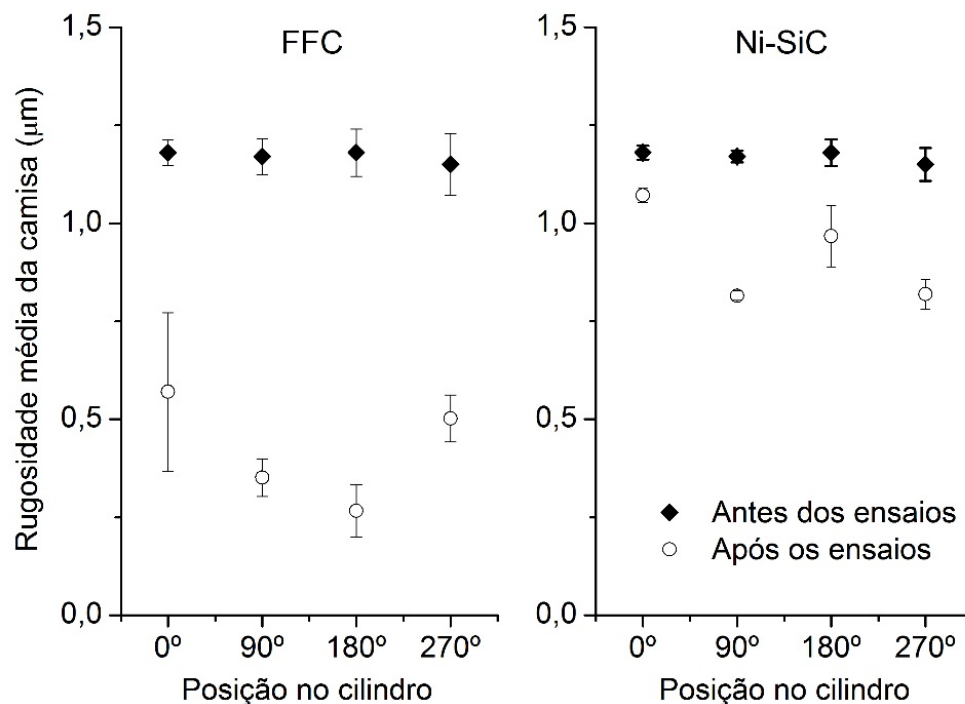


Figura 6. Rugosidade média nas camisas de Ferro fundido cinzento (FFC) e Níquel carbeto de silício (Ni-SiC) antes e após quatro 4 horas de ensaio dinamométrico.

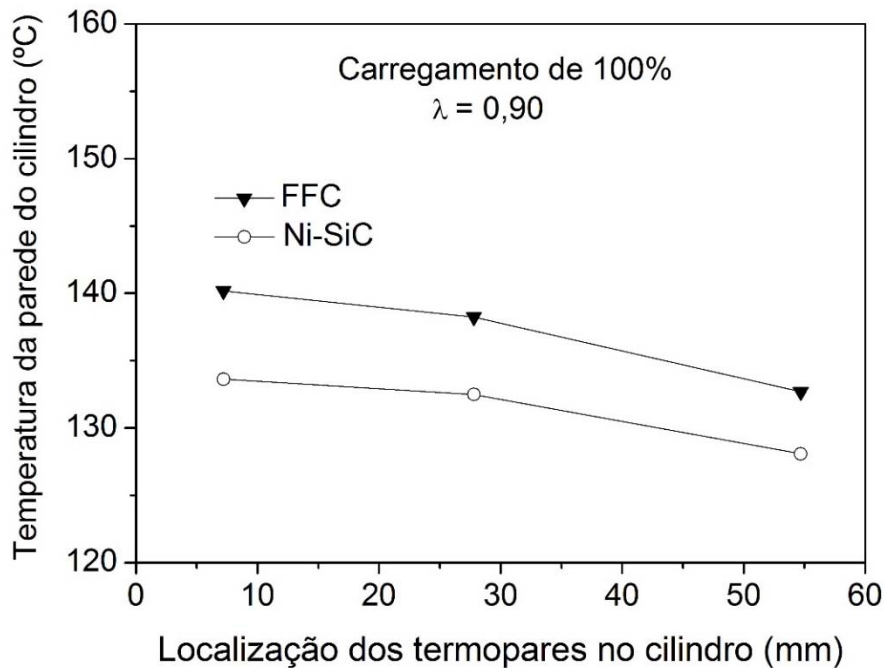


Figura 7. Temperatura da parede dos cilindros mensuradas durante os ensaios.

4 CONCLUSÃO

Após quatro horas de ensaios em bancada dinamométrica sob condição de alto carregamento em diferentes materiais de camisa de cilindro, as análises realizadas nos anéis de pistão levam as seguintes conclusões:

- O primeiro anel de segmento cromado que trabalhou na camisa de cilindro revestida com Ni-SiC apresentou o maior desgaste, confirmado pela maior redução do parâmetro Ra, e também pela análise superficial da face de trabalho. Possivelmente devido a condição de carga máxima aplicada, a espessura do filme lubrificante parece ser insuficiente para proteger o anel contra as partículas duras de SiC, caso a película de lubrificante seja efetivamente rompida. Como não existe um mecanismo eficiente de lubrificação sólida na camisa com revestimento, como ocorre no ferro fundido pela grafita, o rompimento do filme de lubrificante acarreta um desgaste efetivo.
- Os resultados obtidos para o segundo anel ensaiado nas camisas são pouco conclusivos tanto para o aspecto superficial como para o parâmetro Ra. Devido a menor condição de temperatura e pressão sofrido por este anel, um maior tempo de ensaio deve ser realizado para conclusões mais efetivas.
- Nas camisas de cilindro, os resultados de Ra apresentaram grande dispersão nos pontos medidos após os ensaios, devido as forças tangenciais desiguais aplicadas pelo anéis nas paredes das camisas. A camisa revestida de Ni-SiC apresentou a menor redução do parâmetro Ra, acredita-se que isso ocorreu devido a menor temperatura de operação em relação ao ferro fundido, mantendo possivelmente uma melhor integridade da película lubrificante.

REFERÊNCIAS

- 1 Tung SC, McMillan ML. Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future. Tribology International. 2004.

- 2 Charles Fayette Taylor. The Internal combustion Engine in Theory and Practice: Vol. 2 - 2nd Edition, Revised design: Combustion, fuels, materials. 2nd Edition. MIT Press; 1985.
- 3 Sugishita J, Fujiyoshi S. The effect of cast iron graphites on friction and wear performance II: Variables influencing graphite film formation. Wear. 1981;68 (1):7–20.
- 4 Sugishita J, Fujiyoshi S. The effect of cast iron graphites on friction and wear performance I: Graphite film formation on grey cast iron surfaces. Wear. 1981; 66(2): 209-221.
- 5 Taylor BJ, Eyre TS. A review of piston ring and cylinder liner materials. Tribology International. 1979;12 (2):79–89.
- 6 John B. Heywood. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York: McGraw-Hill Book Company; 1988.
- 7 Andersson P. Piston ring tribology A literature survey VTT Industrial Systems. Combustion. 2002.