

## CARACTERIZAÇÃO E DESEMPENHO DE UM FILME À BASE DE CARBONO TIPO DLC PARA USO EM CAMISAS DE CILINDRO PARA REDUÇÃO DE ATRITO

E. D. Rejowski<sup>1</sup>, M. F. Pillis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MAHLE Metal Leve SA, Jundiaí, SP email: [edney.rejowski@br.mahle.com](mailto:edney.rejowski@br.mahle.com)

<sup>2</sup>IPEN – Av.Prof. Lineu Prestes, 2242 – 05509-000 - São Paulo, SP  
email: [mfpilllis@ipen.br](mailto:mfpilllis@ipen.br)

### RESUMO

*Nas últimas décadas, o controle sobre as emissões de NOx, particulados sólidos e o consumo de combustível vêm sendo debatidos globalmente com desdobramentos em leis mais restritas e consumidores mais exigentes, que prezam pela qualidade de vida e meio ambiente. Com base neste cenário, os projetos de novos motores visam baixo custo e conceitos de baixo atrito. Um dos contribuintes mais relevantes para o atrito num motor é o sistema pistão-anel de pistão-camisa de cilindro, que vem sendo foco de muitas pesquisas, na busca de soluções para introduzir novas tecnologias para redução do atrito. Este trabalho discute a viabilidade de filmes à base de carbono tipo diamante (DLC), com espessuras de 2,5 e 12,5 µm, aplicados na superfície interna de camisas de cilindro pelo processo de deposição química na fase vapor assistida por plasma (PECVD), com base na integridade do componente, na caracterização do filme e em teste de bancada para avaliar redução de atrito.*

Palavras-chave: Filmes à base de carbono, DLC, camisa de cilindro, perda por atrito.

### INTRODUÇÃO

As questões energéticas e ambientais que circundam o desenvolvimento de motores à combustão interna são as mais discutidas atualmente em todos os países, evidenciando a necessidade da redução do consumo de combustível e da taxa de emissões como a de CO<sub>2</sub>.

Os novos projetos de motores deparam-se com alguns importantes requisitos de mercado como, por exemplo, o aumento da potência específica que implica, em muitas vezes, na introdução de componentes como o turbo compressor. Conseqüentemente, ocorre um aumento da pressão e da temperatura interna na câmara de combustão, gerando assim uma maior solicitação dos elementos mecânicos do motor, principalmente daqueles que trabalham em contato com outras

superfícies mecânicas, e dependem de lubrificação para minimizar o efeito do desgaste.

De acordo com Ernst (1), os fabricantes de caminhões estão sob uma crescente pressão para reduzir as emissões. Os níveis permitidos de óxidos de nitrogênio (NOx) e da emissão de particulados foram reduzidos em mais de 90% durante a última década. Melhorias na combustão e nos sistemas de injeção de combustível, nos filtros de particulados, no catalizador de redução seletiva (SCR), no “lean NOx trap” e na recirculação dos gases de exaustão (EGR) são algumas soluções aplicadas, e em constante desenvolvimento, para atender os limites de emissões. Contudo, a técnica do EGR aumenta a quantidade de particulados sólidos na câmara de combustão por conta da presença dos gases queimados. Uma combustão ineficiente pode levar ao acúmulo de particulados sólidos à base de carbono que impregnam a superfície dos anéis de pistão, o que pode causar o desgaste nas camisas de cilindro de forma prematura.

Desta forma, o interesse no desenvolvimento de componentes de baixo atrito apresentou um recente crescimento e, conseqüentemente, novas tecnologias para revestimento de superfícies estão em estudo para atender a esta demanda.

O filme de carbono amorfo hidrogenado tipo diamante (a-C:H), também conhecido como “Diamond-like Carbon (DLC)” apresenta uma combinação superior de comportamento ao desgaste e ao atrito, o que faz do DLC uma solução interessante para diversas áreas da tribologia (2).

Nas últimas décadas, pesquisas envolvendo filmes DLC têm sido desenvolvidas para atender diversas aplicações. Devido às suas características de alta resistência à corrosão, alta estabilidade térmica, alta resistência ao desgaste e baixo atrito (3, 4), revestimentos DLC têm sido usados em componentes de motor na indústria automotiva, em aplicações médicas e na indústria metalúrgica. Os filmes DLC consistem de uma mistura de carbono amorfo e fases cristalinas e contêm átomos de carbono em diferentes estados de hibridização (5). Existem átomos de carbono de hibridizações  $sp^3$  como as encontradas no diamante, com hibridizações  $sp^2$  como as encontradas no grafite e possivelmente alguns átomos com hibridizações  $sp^1$  (6). As propriedades dos filmes de DLC dependem muito do teor de hidrogênio presente e da razão  $sp^3/sp^2$ , que depende do processo de deposição e de seus parâmetros (7).

Os filmes tipo DLC podem ser obtidos por meio de diversas técnicas como “sputtering”, “ion beam assisted deposition”, “arc ion plating”, e “plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD)” (8). Por meio da técnica PECVD, filmes de carbono amorfo hidrogenado (a-C:H) são depositados nas paredes internas de tubos. Os precursores utilizados são hidrocarbonetos como metano, acetileno, benzeno e tolueno.

Com base no cenário apresentado, observa-se a necessidade de gerar soluções competitivas para componentes que resultem em baixo atrito para atender às futuras demandas de mercado. São propostos neste trabalho alguns testes para investigar o potencial do filme à base de carbono amorfo hidrogenado tipo diamante (a-C:H), dopado com silício, na redução do atrito e do desgaste, quando depositado sobre a superfície interna de camisas de cilindro em ferro fundido cinzento lamelar, pelo processo PECVD. Os resultados de testes usando bancada de teste recíproca, comparando camisas de cilindro com e sem revestimentos serão apresentados.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### *Material-base*

O material utilizado como substrato para aplicação de filmes DLC são camisas de cilindro em ferro fundido cinzento SAE G3000, fabricadas pelo processo de fundição centrífuga. Devido à sua elevada capacidade de transferência de calor, de auto-lubrificação e de atenuação de ruído, o ferro fundido cinzento é amplamente utilizado na fabricação de componentes de motor, inclusive de camisas de cilindros. Foram selecionadas camisas de cilindro tipo molhada para aplicação em motores diesel pesado com dimensão de 131 x 262 mm (diâmetro interno x comprimento total), pesando aproximadamente 6,5 kg, denominadas de “camisa HD1” e “camisa HD2”, em função das espessuras do filme DLC, conforme descrito a seguir.

### *Revestimento de carbono amorfo hidrogenado (a-C:H) tipo diamante DLC*

O revestimento utilizado neste trabalho é uma camada de carbono amorfo hidrogenado tipo diamante com uma camada de ligação de Si, ou seja, entre o substrato e a camada de carbono existe uma camada intermediária de Si para

melhorar a aderência e, à medida que ocorre o crescimento do filme, cria-se um gradiente decrescente de Si e um crescente de C em direção à interface com o ambiente. Duas espessuras de DLC foram selecionadas para este estudo: 2,5  $\mu\text{m}$  (camisa HD1) e 12,5  $\mu\text{m}$  (camisa HD2).

### Processo de deposição do filme DLC

O processo de imersão iônica por plasma em catodo oco (HCPIIP) foi selecionado devido à sua capacidade de gerar revestimentos DLC espessos e duros em superfícies internas de tubos metálicos. A Figura 1 mostra esquematicamente o sistema de deposição, que utiliza um sistema de descarga em catodo oco (HCD) para gerar um plasma de alta densidade permitindo assim um rápido crescimento do revestimento DLC, com boa adesão e baixa tensão residual. Neste caso a própria camisa de cilindro funciona como câmara de reação (9-11).

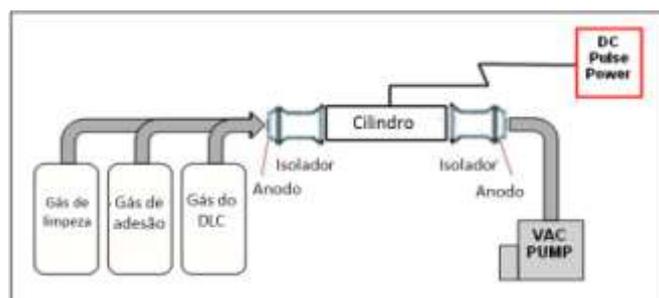


Figura 1 – Esquema de deposição via HCPIIP (10,11).

### Análise da rugosidade das camisas antes e após receber o filme DLC

As camisas HD foram avaliadas antes e após a deposição do filme DLC para verificar se o revestimento é capaz de reproduzir a rugosidade original do substrato. De forma a padronizar a sequência de atividades, as medições foram feitas em duas alturas axiais das camisas HD: 30 e 90 mm, a partir da face de topo, e em quatro posições angulares: 0, 90, 180 e 270°, conforme descrito abaixo:

- Rugosidade do diâmetro interno via perfilômetro de contato 2D Stylus, a partir das normas ISO 4287 (1997) e ISO13565-2 / DIN 4776 (1996/1990). Os parâmetros de rugosidade da família Rk (curva de Abbott-Firestone) foram comparados (12);

- Geração da réplica da superfície brunida com auxílio de um pedaço de folha de acetato, para qualificar a superfície brunida, inclusive o ângulo de brunimento.

### Caracterização do filme DLC

Técnicas de microscopia eletrônica de varredura foram utilizadas para caracterizar o filme. Corpos-de-prova foram retirados das camisas HD e preparados para observação em secção transversal. Foram feitas análises químicas em linha via EDS na secção transversal das camisas. A Figura 2 mostra metade de cada uma das camisas HD1 e HD2 após receber o filme DLC, e a respectiva localização de retirada dos corpos-de-prova.

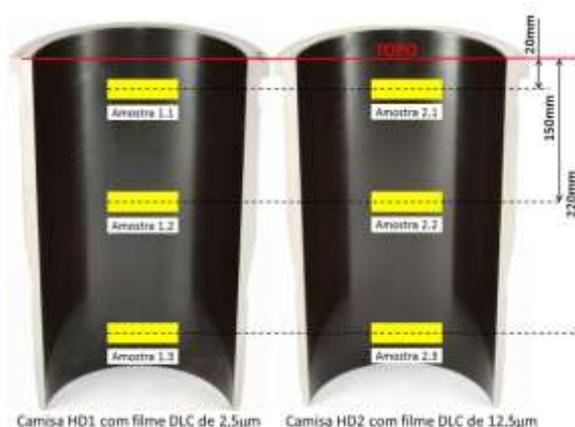


Figura 2 – Corte das camisas HD e localização dos corpos-de-prova para caracterização do filme DLC.

### Propriedades tribológicas

Com o objetivo de comparar o coeficiente de atrito das camisas revestidas por DLC e a camisa não revestida, utilizou-se um tribômetro modelo CETR UMT-2 de deslizamento recíproco, mostrado na Figura 3, que aplica um carregamento normal e constante durante um curso linear, gerenciado por um mecanismo servo-hidráulico, sendo o carregamento normal e a força de atrito controlados por sensores do tipo “strain gages”. O corpo-de-prova da camisa de cilindro é fixado no suporte inferior enquanto que o contra-corpo, um segmento de anel de pistão, é fixado no suporte superior e desenvolve um curso linear vai-e-vem, sob influência do

carregamento normal. Tanto a camisa quanto o segmento do anel ficam imersos em 20 ml de óleo tipo SAE 30 à temperatura de 120°C.

Como contra-corpo foram utilizados segmentos de anéis de pistão em aço-carbono com revestimento tipo PVD de nitreto de cromo, e perfil de contato abaulado assimétrico, um design típico aplicado em motores pesados a diesel. O corpo-de-prova da camisa de cilindro apresenta dimensões de 25,4 x 10,0 mm e o segmento do anel de pistão possui 30 mm de comprimento.

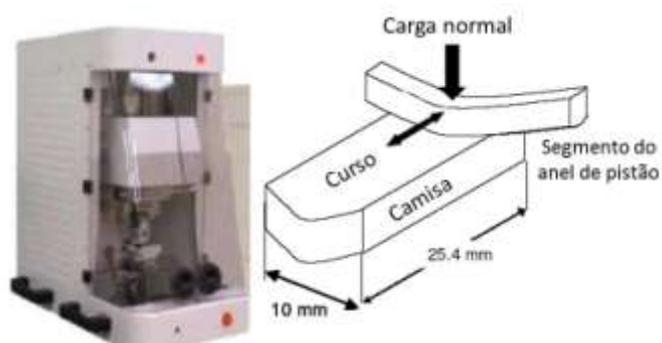


Figura 3 – Tribômetro modelo CETR UMT-2 de deslizamento recíproco.

O coeficiente de atrito (COF) foi medido nas situações de carga normal 50 e 100 N e em diversas velocidades recíprocas (25, 50, 75, 100, 150, 250 e 375 rpm). Adotou-se o valor médio de cinco testes válidos para cada caso, sendo aplicado a cada variante de camisa HD1 e HD2, e também para a camisa sem revestimento, denominada de referência. Para cada teste, um segmento de anel de pistão novo foi utilizado. O protocolo de teste considerou um ciclo inicial de amaciamento (2h @ 360 N) que antecedeu o ciclo de medição do COF após 2 h de teste.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A rugosidade da superfície interna das camisas antes e após a deposição do filme DLC não apresentou variações expressivas nos parâmetros Rk, que se mantiveram dentro de uma faixa aceitável. Desta forma, o filme DLC tende a manter as características da rugosidade do substrato. Resultados comparativos dos parâmetros Rk são apresentados na Figura 4.

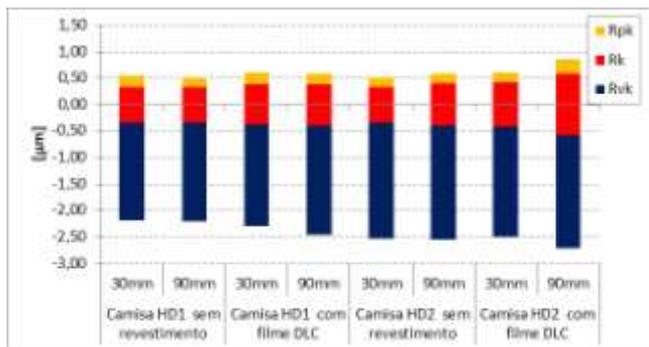


Figura 4 – Evolução dos parâmetros de rugosidade antes e após deposição do filme DLC.

Como complemento à qualificação do brunimento, análises da réplica da superfície brunida foram feitas para verificar se houve alguma alteração no padrão dos canais de brunimento, assim como a permanência do ângulo de cruzamento. A Figura 5 apresenta os resultados de réplica e compara a superfície das camisas HD1 e HD2 sem e com revestimento DLC. Observa-se que as características visuais do padrão de brunimento não sofreram modificações. Nas demais posições de controle os resultados foram similares.

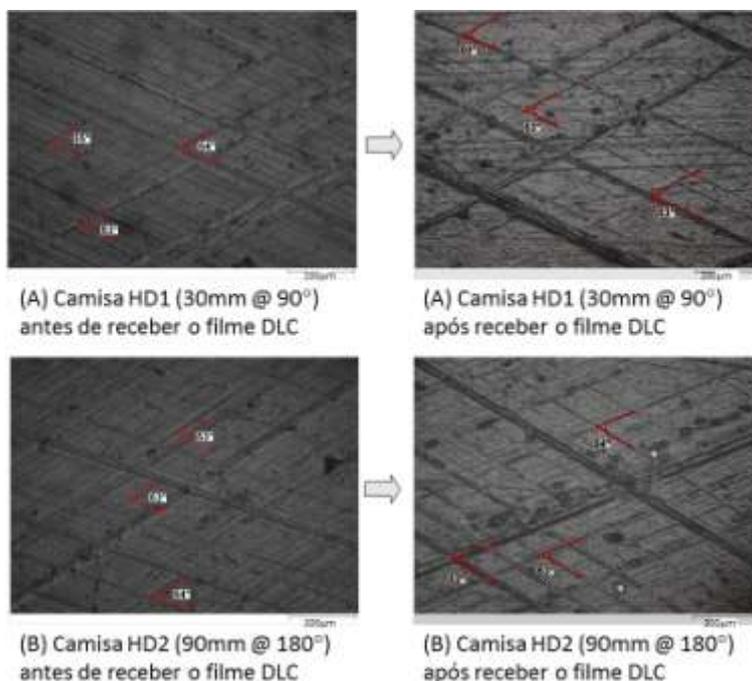


Figura 5 – Réplica da superfície brunida das camisas HD1 e HD2 sem e com DLC.

As imagens da secção transversal do filme, obtidas por microscopia eletrônica de varredura, estão apresentadas na Figura 6. Observa-se a homogeneidade da espessura dos filmes DLC.

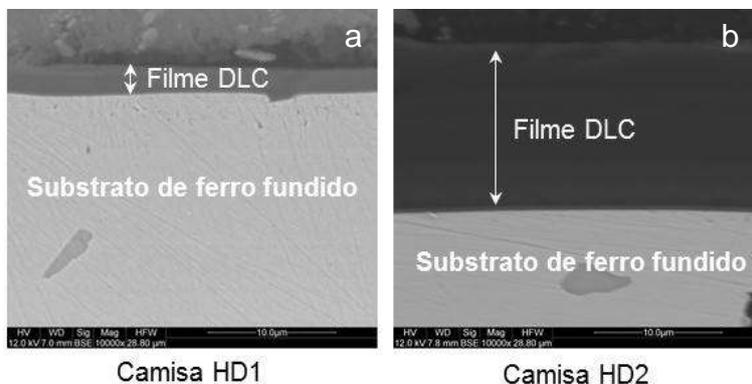


Figura 6 – Imagens por MEV em secção transversal das camisas recobertas: (a) HD1 (amostra 1.1); (b) HD2 (amostra 2.1).

Na Figura 7 está apresentada a análise química feita por EDS em linha na secção transversal da amostra retirada da camisa HD1. Observa-se o gradiente de composição química decrescente de Si e crescente de C, em direção à superfície de trabalho. O espectro obtido para a camisa HD2 é similar a este.

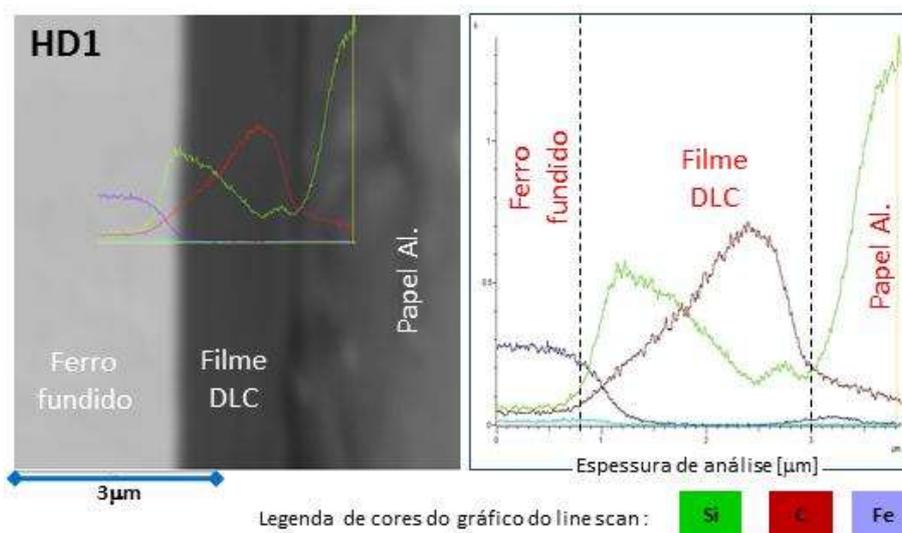


Figura 7: Resultados de análise química por EDS em linha na secção transversal da camisa HD1.

Resultados de COF provenientes dos testes de bancada de movimento recíproco se mostraram confiáveis uma vez que a dispersão não ultrapassou 2%. As camisas revestidas HD1 e HD2 apresentaram redução do coeficiente de atrito de 19% em média para todas as velocidades recíprocadas, quando comparadas com os valores obtidos para as camisas sem revestimento (valores de referência), demonstrando que o filme DLC é uma solução potencial que pode ser aplicada em motor à combustão interna para redução do atrito do motor e, conseqüentemente, para um menor consumo de combustível e menor emissão de gases. A Figura 8 apresenta resultados de COF obtidos em 2h de teste para a camisa HD1 com carga normal de 50 N, comparando com valores obtidos dos testes da camisa referência.

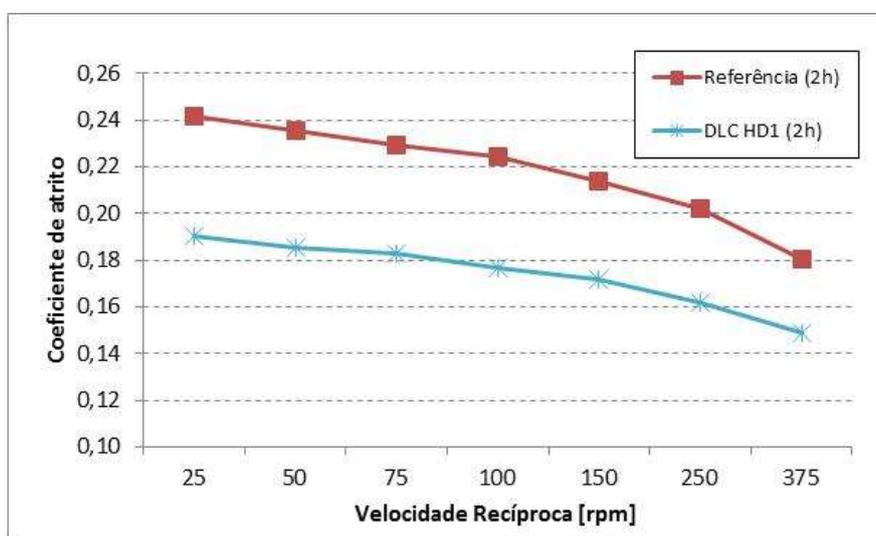


Figura 8 – Resultados de COF da camisa HD1 e referência (carga normal de 50 N).

## CONCLUSÕES

O processo de deposição por HCPIIP mostrou-se um método eficiente para aplicar revestimentos DLC na superfície interna de camisas de cilindro, apresentando como vantagem a possibilidade de revestir uma superfície acabada (superfície afiada) sem a necessidade de etapas de pós-acabamento no processo, porque a superfície revestida mantém as características originais da topografia do substrato.

Os filmes DLC apresentaram boa aderência ao substrato de ferro fundido cinzento, inicialmente verificada pela análise metalográfica, e posteriormente pelo

desempenho durante os testes de bancada, já que não foram observados sinais de delaminação nas superfícies de contato.

A propriedade de baixo atrito dos filmes de DLC foi demonstrada no teste de bancada recíproco com uma redução média de 19% do coeficiente de atrito, em comparação à camisa de referência.

O filme DLC apresentou um bom desempenho tribológico com anéis de pistão revestidos com CrN.

## REFERÊNCIAS

1. ERNST, P.; BARBEZAT, G. Thermal spray applications in power train contribute to the saving of energy and material resources  
Surf. and Coat. Techn., n. 202, p.4428-4431, 2008.
2. MORGENSTERN, R.; KIESSLING, W.; REICHSTEIN, S. Reduced friction losses and wear by DLC coating of piston pins. In: Proceedings of the ASME ICES2008-1650, April, 2008, 27th-30th, Chicago, Illinois, USA.
3. ALIN, M.; VIZINTIN, J. Real contact temperature as the criteria for the reactivity of diamond-like-carbon coatings with oil additives.  
Thin Solid Films, n.518, p. 2029-2036, 2010.
4. HAQUE, T.; MORINA, A.; NEVILLE, A.; KAPADIA, R.; ARROWSMITH, S. Effect of oil additives on the durability of hydrogenated DLC coating under boundary lubrication conditions.  
Wear, n.266, p.147-157, 2009.
5. KLUBA, A.; BOCIAGA, D.; DUDEK, M. Hydrogenated amorphous carbon films deposited on 316L stainless steel.  
Diamond and Related Materials, n. 19, p. 533-536, 2010.
6. LETTINGTON, A.L. Applications of diamond-like carbon thin films.  
Carbon n.36, v.5/6, p. 555-560, 1998.
7. CHARITIDIS, C.A. Nanomechanical and nanotribological properties of carbon-based thin films: A review.  
International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, n. 28, p. 51-70, 2010.
8. PU, J.-Ch.; WANG, S.-F.; SUNG, J.C. High temperature oxidation behavior of CVD diamond films.  
Applied Surface Science, n. 256, p.668-673, 2009.

9. PODGORNIK, B. Interactions between hard DLC coatings and lubricants. Ecotrib paper 2007-12, 06-2007.
10. GRISCHKE, M.; HIEKE, A.; MORGENWECK, F.; DIMIGEN, H. Variation of the Wettability of DLC-coatings by Network Modification Using Silicon and Oxygen. Diamond and Related Materials, n.7, p. 454-458, 1998.
11. LUSK, D.; GORE, M.; BOARDMAN, W.; CASSERLY, T.; BOINAPALLY, K.; OPPUS, M.; UPADHYAYA, D.; TUDHOPE, A.; GUPA, M.; CAO, Y; LAPP, S. Thick DLC films deposited by PECVD on the internal surface of cylindrical substrates. Diamond and Related Materials, n. 8, p. 428-434, 1999.
12. UEHARA, S. Overview of the new surface finishing for SI bores". In: SAE Paper 2007-01-2823, 2007.

## CHARACTERIZATION AND PERFORMANCE OF A DLC COATING APPLIED IN CYLINDER LINERS FOR FRICTION REDUCTION

E. D. Rejowski<sup>1</sup>, M. F. Pillis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MAHLE Metal Leve SA, Jundiaí, SP email: [edney.rejowski@br.mahle.com](mailto:edney.rejowski@br.mahle.com)

<sup>2</sup>IPEN – Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – 05509-000 - São Paulo, SP  
email: [mfpillis@ipen.br](mailto:mfpillis@ipen.br)

### ABSTRACT

*In the last decades, subjects on the control of emissions of NO<sub>x</sub>, solid particulates and consumption of fuel have been globally discussed and resulting in more restricted laws and demanding costumer driver that value the life quality and the environment. In the light of this, the new engine developments are looking for optimized low friction components. One of the most relevant contributing factors for the friction in a engine is the system piston-piston ring-cylinder liner that is the focus of many works in search of solutions to introduce new technologies for attriction reduction. This work discusses the viability to deposit a carbon film diamond (DLC) with thickness of 2.5 and 12.5 μm, applied onto internal surface of cylinder liners by plasma enhanced chemical vapor deposition process (PECVD) in order to maintain the integrity of the component. The characterization of the DLC film and its behavior in a rig test to evaluate friction reduction are presented.*

Key words: Carbon based films, DLC, cylinder liner, friction losses.