

# ESTUDO TRIBOLÓGICO DE REVESTIMENTOS DE DLC COM GASES REFRIGERANTES HFC134A E HC600A

Marcio Silverio <sup>1</sup>

Roberto Binder <sup>2</sup>

José Daniel Biasoli de Mello <sup>3</sup>

## Resumo

O presente trabalho pretende estudar o efeito dos gases refrigerantes HFC134a e HC600a na tribologia de componentes revestidos com DLC, Diamond-like Carbon, bem como estabelecer uma metodologia de avaliação tribológica para os mesmos. Os ensaios tribológicos foram realizados em uma plataforma do tipo esfera-plano, de movimento recíproco com o registro do coeficiente de atrito e resistência de contato. Como contra-corpo foram utilizados esferas de aço SAE52100 e WC-Co. A aplicação da força normal se deu de forma incremental em intervalos preestabelecidos de tempo estabelecendo uma relatividade entre diferentes corpos de prova. Os corpos de prova foram confeccionados em aço SAE 1020 revestidos com DLC obtidos por fornecedor comercial. A caracterização das amostras foi realizada via interferometria óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV com a utilização de análise química via espectrometro de energia dispersiva – EDS. Durante a execução dos ensaios verificou-se forte influência das atmosferas utilizadas formando uma tribocamada na interface de contato entre corpo e contra-corpo. Tal influência induziu perturbações no coeficiente de atrito e resistência de contato. A análise química desta tribocamada indicou elementos oriundos da degradação dos gases refrigerantes associados à presença de oxigênio.

**Palavras-chave:** Desgaste; Revestimentos; Coeficiente de atrito; Gases.

## TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF DLC COATINGS, WITH REFRIGERANT GASES HFC134A AND HC600A

## Abstract

This work aims to study the effect of refrigerant gases HFC134a and HC600a in components coated with DLC, Diamond-like Carbon, as well as is to establish a methodology for tribology evaluating of them. The tribological tests were conducted on a reciprocal motion. Balls of SAE 52100 steel and WC-Co were used as counter-body. The load was applied in a incremental way. The samples were prepared in SAE 1020 steel coated with DLC obtained from commercial suppliers. The characterization of samples was performed by optical interferometry and Scanning Electron Microscopy - SEM. It was verified a strong influence of the atmosphere through the in formation of a tribolayer at the interface between body and counter body. This influence showed disturbances in the coefficient of friction and contact resistance. Chemical analysis indicated that the tribolayer was formed by elements originated from the degradation of the refrigerants gases associated with of oxygen.

**Key words:** Wear; Coatings; DLC; Refrigerant gases.

<sup>1</sup> Aluno de pós graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Especialista de Materiais da Whirlpool S.A. Unidade Compressores: Embraco, Rua Rui Barbosa, 1020, Cep 89219-901, Joinville, SC, Brasil. E-mail: marcio\_silverio@embraco.com.br

<sup>2</sup> M.Sc em Engenharia e Ciência dos Materiais, Pesquisador Senior da Whirlpool S.A. Unidade Compressores: Embraco, Rua Rui Barbosa, 1020, Cep 89219-901, Joinville, SC, Brasil. E-mail: roberto\_binder@embraco.com.br

<sup>3</sup> Professor titular, Universidade Federal de Uberlândia. Av. João Naves de Ávila, 2121, CP, 593, Cep 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil. E-mail: ltm-demello@ufu.br

## I INTRODUÇÃO

Os recentes alertas do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas – IPCC,<sup>(1)</sup> divulgado em 2007 em Valencia, na Espanha, apontam para o aumento médio da temperatura do ar e dos oceanos, derretimento generalizado da neve dos pólos e aumento do nível dos mares, causando mudanças drásticas do modo de vida dos habitantes da terra.

O protocolo de Montreal, por sua vez, estabeleceu o controle e limitação de utilização de algumas substâncias nocivas ao meio ambiente, sejam depreciadoras da camada de ozônio ou causadoras do efeito estufa.<sup>(2)</sup>

Dentre estas substâncias encontram-se os gases refrigerantes a base de CFCs (Cloro Flúor Carbono) e HFCs (Hidro Flúor Carbonos). Tais substâncias, amplamente utilizadas pela indústria de refrigeração, impõem barreiras comerciais e técnicas que demandam de soluções inovadoras e altamente tecnológicas.

Diversas soluções estão em curso para a substituição destes gases ou redução dos efeitos destes, assim como a busca incessante por tecnologias menos agressivas ao meio ambiente. Seja por não afetarem a atmosfera, seja por reduzirem o consumo de energia.

O presente trabalho pretende estabelecer uma metodologia de avaliação do coeficiente de atrito e durabilidade de revestimentos DLC – *Diamond-like Carbon* na presença de gases refrigerantes de modo a identificar aplicações potenciais na indústria de refrigeração.

Os revestimentos a base de carbono, também denominados DLC, são hoje oferecidos em escala industrial e vem sendo utilizados para reduzir o atrito e desgaste mesmo sob condições de aplicação a seco.<sup>(3)</sup>

Entretanto, tais revestimentos apresentam variações em suas propriedades tribológicas em função da presença de elemento dopantes e/ou contaminantes no revestimento e ambiente a que são utilizados.

Hayward e Field,<sup>(4)</sup> Miyoshi et al.,<sup>(5)</sup> Dugger, Peebles e Pope<sup>(6)</sup> e Chandrasekar e Bhushan<sup>(7)</sup> confirmaram que a presença ou ausência de contaminantes na atmosfera de ensaio faz uma grande diferença no atrito e desempenho do desgaste de diamantes e/ou filmes finos a base de diamante. Quando testados em ambientes ultra-limpos e ultra-secos, ou seja, em alto vácuo ou ainda em altas temperaturas ambientes as superfícies do diamante em deslizamento exibem altos atrito e desgaste, principalmente porque os contaminantes da superfície são dissociados ou removidos mecanicamente e conseqüentemente não estão disponíveis para passivar as ligações sigma incompletas das superfícies.

Conhecendo o papel crítico que as ligações incompletas desempenham no atrito, alguns pesquisadores como Miyake et al.,<sup>(8)</sup> Smentkowski e Yates Junior<sup>(9)</sup> e Molian, Janvrin e Molian<sup>(10)</sup> desenvolveram meios mais efetivos para passivar os filmes de Carbono, e então atingir coeficiente de atrito e desgaste extremamente baixos.

Dugger, Peebles e Pope<sup>(6)</sup> mostraram que quando os gases adsorvidos na superfície do diamante são removidos das interfaces em contato o coeficiente de atrito aumenta rapidamente, as ligações incompletas da superfície são reativadas e permitem formar ligações de forte adesão com os átomos da superfície do material de contra corpo. Inversamente, se a superfície de diamante é exposta a contaminantes gasosos ou contra ar aberto, o coeficiente de atrito cai, possivelmente porque ocorre repassivação das ligações incompletas da superfície.

O presente estudo dos fenômenos tribológicos envolvendo revestimentos de DLC foi realizado em diferentes configurações de ensaios de forma a melhor se adequarem as aplicações propostas.

Para o presente trabalho foi utilizada a metodologia proposta por Mello e Binder<sup>(11)</sup> que consiste na aplicação incremental de cargas em intervalos constantes de tempo. Com esta metodologia é possível estabelecer a durabilidade de revestimentos duros e lubrificantes sólidos de modo a estabelecer uma relatividade entre diferentes revestimentos e materiais.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios tribológicos realizados neste experimento foram desempenhados em um micro-tribometro UMT I – CETR, onde os ensaios de desgaste obedecem a um deslizamento linear recíproco sobre as amostras para caracterizar o comportamento do atrito com uma geometria de contato do tipo esfera-plano.

Durante os ensaios é monitorada a resistência de contato, que permite avaliar a evolução de resíduos entre corpo e contra corpo, bem como o exato momento do colapso do revestimento de DLC pela inflexão da curva da resistência ôhmica.

Os ensaios são interrompidos com a combinação do aumento do coeficiente de atrito a valores acima de 0,6 e redução da resistência de contato a valores inferiores a 50 Kohms. A remoção total do revestimento de DLC aumenta o coeficiente de atrito e altera a resistência de contato de acordo com a condutividade do substrato.

A cada intervalo de 15 minutos um incremento de carga normal de 0,2 kgf é aplicado. A carga normal inicial é de 0,68 kgf e incrementada até 3,48 kgf devido a limitações da célula de carga do tribometro. Os incrementos de carga são realizados automaticamente por um sistema de fuso mecânico motorizado e controlado pelo software do tribometro, que também controla toda a movimentação, leitura e armazenamento de dados dos ensaios a uma freqüência de 1Hz.

As amostras confeccionadas em aço SAE 1020 foram revestidas com DLC de um fornecedor comercial do tipo a-C:H obtido por PACVD e camada intermediária de  $Cr_xN_y$  com o intuito de dar suporte mecânico ao revestimento de DLC minimizando a diferença de propriedades mecânicas entre revestimento e substrato.

A espessura do DLC varia entre 1,0 micrometros e 1,5 micrometros com camada intermediaria de aproximadamente 1,5 micrometros.

Como contra corpo foram utilizadas esferas de aço SAE 52100 de diâmetros de 1,6 mm e 3,0 mm e de WC-Co de 4 mm de diâmetro, com o objetivo de alterar a severidade do ensaio em função de alterações da pressão de contato máxima.

A frequência de deslizamento foi ajustada para 2 Hz e o deslocamento em 10 mm realizados em temperatura ambiente de  $22 \pm 2^\circ\text{C}$ , sendo que as atmosferas de ensaio são descritas no item 2.2.

Uma câmara de gases flexível foi desenvolvido de forma a permitir a realização dos ensaios com atmosferas controladas de gases refrigerantes sem interferir nas cargas aplicadas, como mostrado na Figura 1.

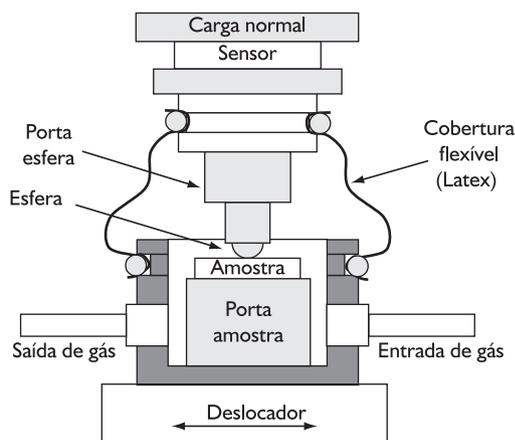


Figura 1. Câmara de controle de gases.

## 2.1 Caracterização Química e Topográfica

A caracterização do revestimento de DLC das amostras bem como das pistas de desgaste geradas pelos ensaios tribológicos e eventuais resíduos foram realizadas via microscopia eletrônica de varredura – MEV / EDS - Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X.

A topografia da superfície das amostras foi analisada via interferometria óptica para caracterização dos parâmetros de superfície.

## 2.2 Ensaios

Os ensaios foram realizados conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1. Discrição dos ensaios

Ensaio	Atmosfera	Contra Corpo (material e diâmetro da esfera)
Ensaio 1	Ar 50% umidade	Aço 52100 / 3,0 mm
Ensaio 2	Ar 50% umidade	Aço 52100 / 1,6 mm
Ensaio 3	Ar 50% umidade	WC-Co / 4,0 mm
Ensaio 4	HC600a	WC-Co / 4,0 mm
Ensaio 5	HFC134a	WC-Co / 4,0 mm

## 3 RESULTADOS

O ensaio 1 apresentou coeficiente de atrito com pequenas flutuações e valor médio de 0,13, como pode ser visto na Figura 2a. O coeficiente de atrito apresentou-se conforme esperado teoricamente para o revestimento, porém o desgaste promovido não removeu completamente o DLC, inviabilizando a verificação da durabilidade do revestimento.

A análise da pista de desgaste do corpo e contra corpo foi realizada via MEV indicando a existência de DLC na pista. Figuras 2b e 2c.

O aumento da severidade no ensaio 2, além de não evidenciar a remoção total do DLC introduziu daniificação severa do revestimento. O coeficiente de atrito deste ensaio apresentou pequenas flutuações ao longo do ensaio, como verificado na Figura 3a. Posteriormente o resultado foi justificado pelo desgaste abrasivo do DLC com formação de trincas laterais e micro sulcamento do revestimento devido a deformação plástica gradual do substrato a cada aplicação incremental de carga normal (Figura 3b).

A cada incremento de carga uma nova interface de contato é gerada garantindo a sustentação do coeficiente de atrito em um patamar bem definido evitando o desgaste homogêneo e contínuo do revestimento de DLC.

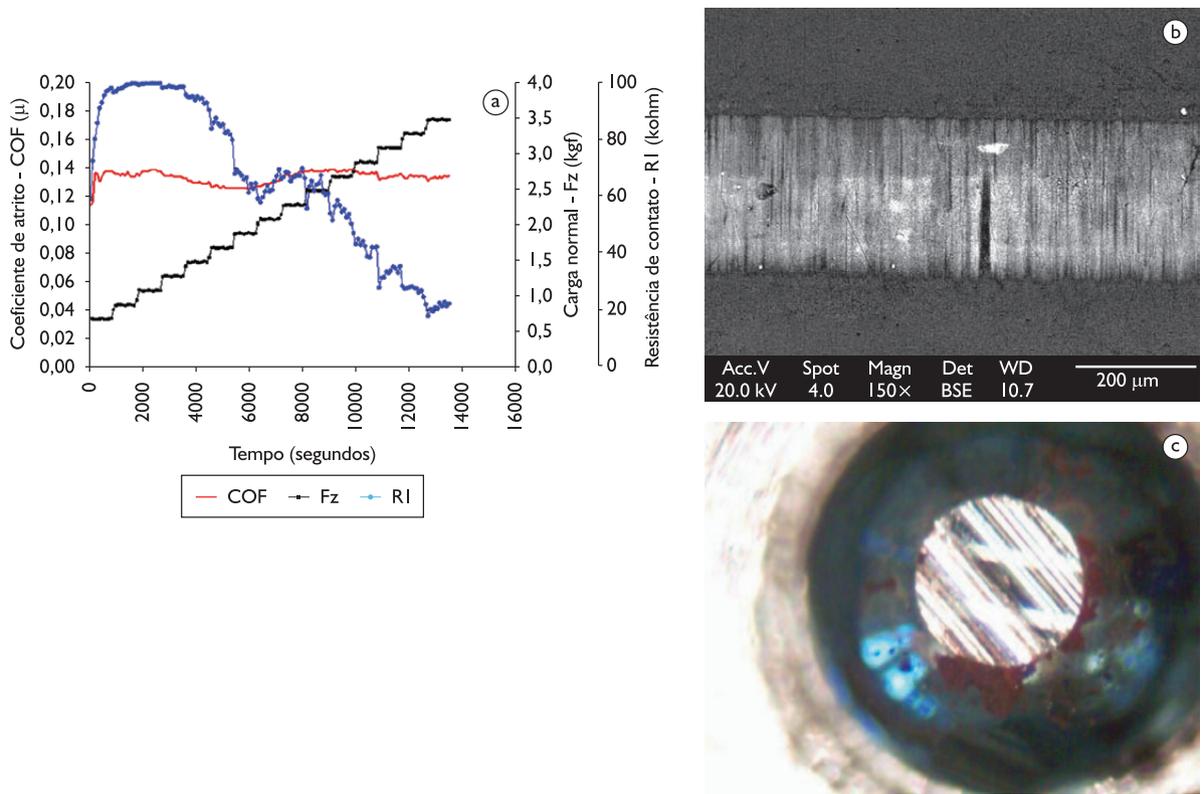
A deformação plástica do substrato das amostras do ensaio 2 foi caracterizada via interferometria óptica, visualizado na Figura 3c, onde os perfis das superfícies antes e após o ensaio estão sobrepostos de maneira a evidenciar a deformação do substrato.

A análise via MEV da superfície do contra-corpo (Figura 3d), apresenta um desgaste abrasivo severo da esfera. Ao centro, o desgaste abrasivo apresenta-se mais brando indicando um processo de estabilização do fenômeno de desgaste onde as partículas geradas no desgaste não permanecem na interface de contato. Todavia, nas bordas verifica-se desgaste abrasivo severo que coincide com as fissuras laterais da pista do corpo geradas pela maior concentração de partículas duras geradas no desgaste.

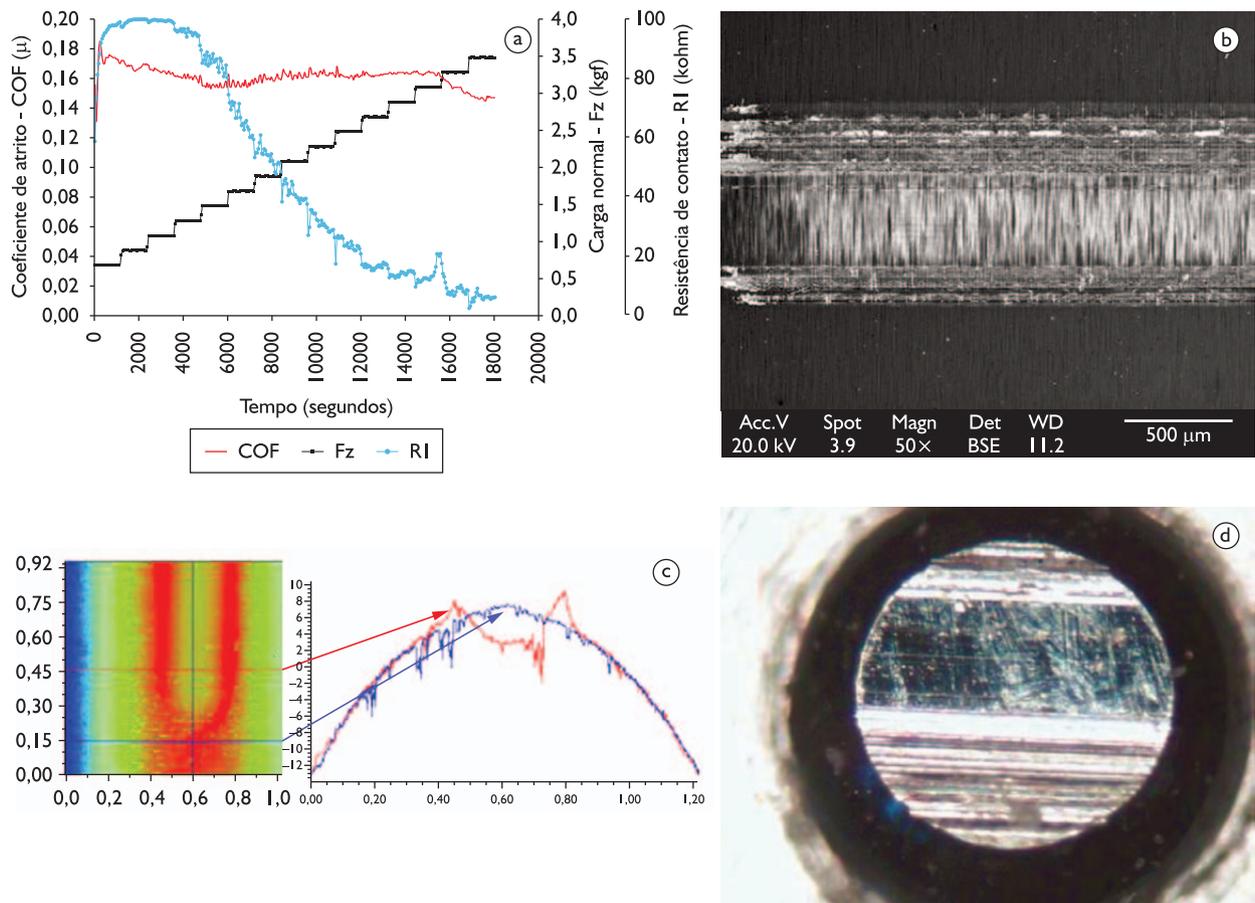
O aumento do diâmetro da esfera do ensaio 3 visa eliminar o fenômeno de sulcamento verificado no ensaio 2 e proporcionar um desgaste gradual em função do aumento da dureza do material do contra-corpo (esfera de WC-Co) pela redução da pressão de contato.

Como apresentado na Figura 4a, o coeficiente de atrito apresentou aumento significativo durante a aplicação de 0,88 kgf de carga normal. Neste mesmo momento ocorre a redução da resistência de contato.

Mello e Binder<sup>(11)</sup> demonstraram em seus estudos que a queda da resistência de contato associada ao aumento do coeficiente de atrito são juntos parâmetros seguros para identificar o fim do revestimento de DLC.



**Figura 2.** Teste 1. a) Evolução dos parâmetros tribológicos; b) Pista de desgasta; e c) Contra corpo.



**Figura 3.** Ensaio 2. a) Ensaio tribológico; b) marca de desgaste; c) Análise interferométrica; e d) Contra corpo.

Comparativamente, verificou-se que nos ensaios aqui descritos os revestimentos de DLC e  $Cr_xN_y$  apresentam comportamento similar possibilitando identificar a transição do contato entre contra corpo e DLC, contra corpo e  $Cr_xN_y$  e contra corpo e substrato.

O ensaio foi interrompido automaticamente com o aumento do coeficiente de atrito acima de  $0,6 \mu$  e resistência de contato abaixo de 50 Kohms (atingido anteriormente com aplicação da carga de 0,88 Kgf). Neste ensaio foi permitido identificar tanto a durabilidade dos revestimentos de DLC como de  $Cr_xN_y$ .

Na pista de desgaste gerada no corpo do ensaio 3, Figuras 4b e 4b, apresenta uma forte formação de uma tribocamada rica em Oxigênio, conforme a análise química via EDS.

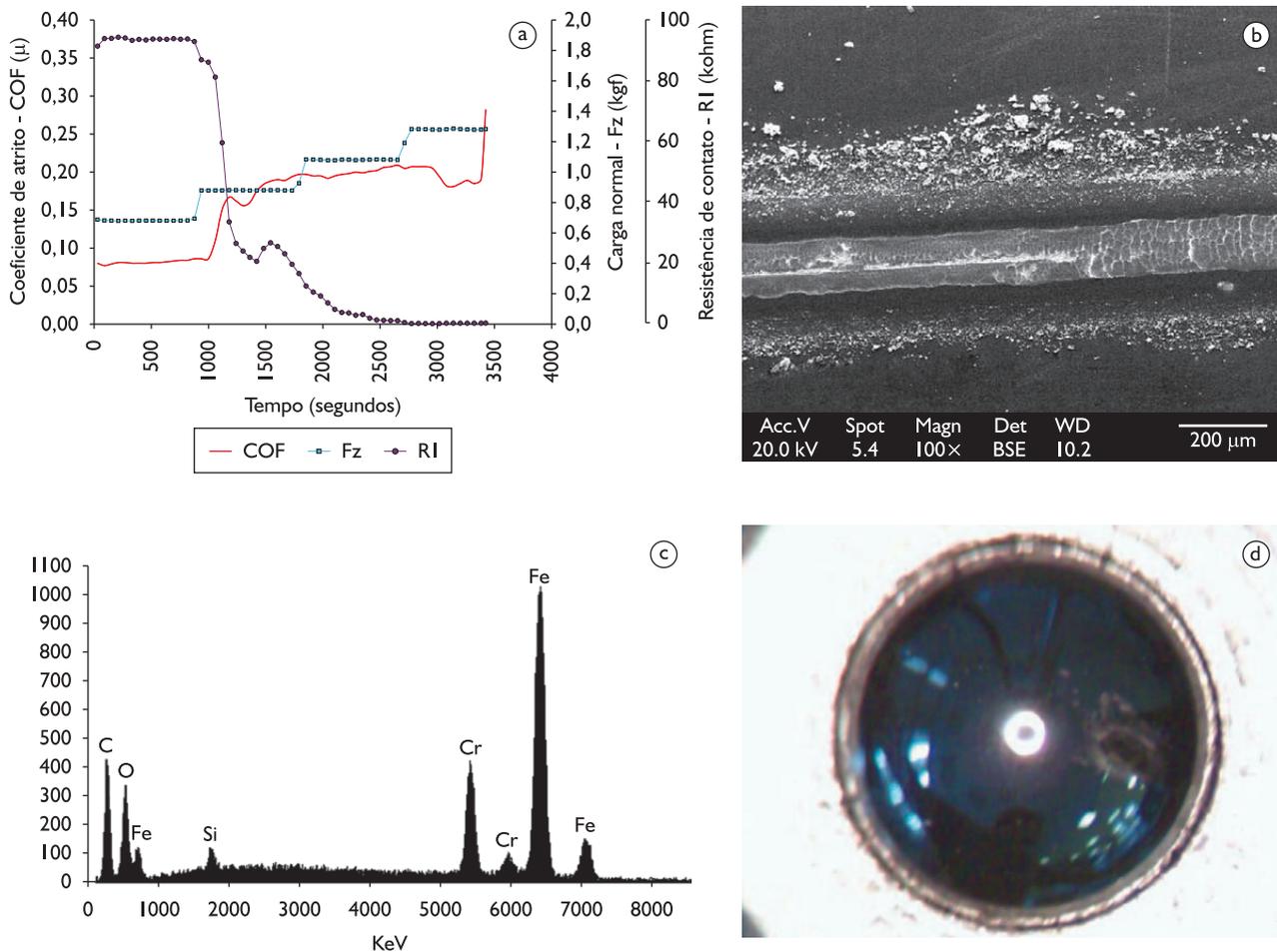
Ao centro da pista verifica-se um risco que corresponde à remoção parcial desta camada e a exposição do substrato de aço do corpo. Mais a direita da foto é possível identificar a camada remanescente de óxido onde diversas trincas ficaram aparentes, sugerindo que esta camada seria removida caso o ensaio não fosse interrompido.

A análise do desgaste do contra corpo apresentou desgaste muito inferior aos outros ensaios (Figura 4d). Embora o desgaste da esfera seja inferior, a severidade do ensaio foi garantida pelo aumento da dureza da esfera e melhores propriedades mecânicas do carbeto de tungstênio.

Ensaio complementares foram realizados com interrupções programadas nos intervalos de tempo correspondentes as alterações no coeficiente de atrito observadas. Com o auxílio de análises via MEV e EDS identificou-se variações nos teores de Carbono e Cromo indicando o momento do fim de cada revestimento.

No ensaio 4 foi utilizado uma câmara de gases desenvolvida especialmente para permitir a realização de ensaios com atmosfera saturada de gás refrigerante.

A câmara é levemente evacuada e mantida com pressão atmosférica acima de 1 atm, de modo a evitar contaminações com oxigênio da atmosfera. Entretanto, a câmara não é totalmente hermética e permite eventual contaminação com umidade durante a execução dos ensaios.



**Figura 4.** Ensaio 3. a) Evolução dos parâmetros tribológicos; b) Pista de desgaste; c) Análise química via EDS da tribocamada; e d) Contra corpo do ensaio 3.

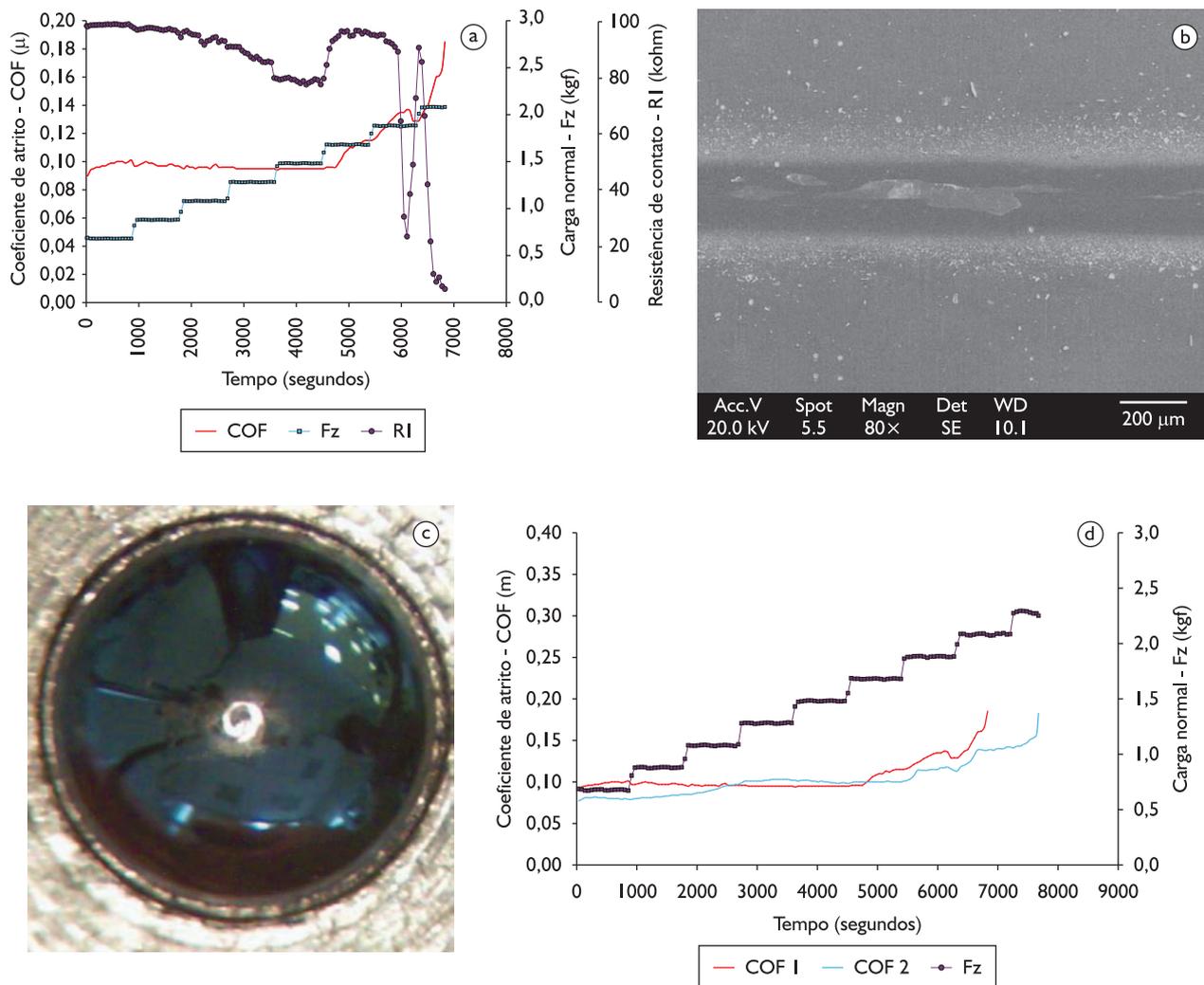
Como pode ser visto na Figura 5a, o coeficiente de atrito apresenta um patamar bem definido em torno de 0,1 até o estágio 6 onde carga normal é de 1,68 kgf. A partir deste estágio o coeficiente de atrito experimenta uma rampa de crescimento indicando uma transição entre o revestimento de DLC e o  $Cr_xN_y$ . Este fenômeno ocorre até o estágio 8 onde a carga normal é de 2,08 kgf, quando passa a vigorar o coeficiente de atrito do substrato de aço e o ensaio é interrompido automaticamente pelo tribômetro.

A curva de resistência de contato também sofre algumas alterações ao longo do ensaio. Na transição entre DLC e  $Cr_xN_y$  é verificado uma perturbação indicando as diferentes resistências do contato dos dois revestimentos. Similarmente aos ensaios 1, 2 e 3 a resistência de contato cai drasticamente quando se atinge o substrato.

A análise da pista de desgaste via MEV comprova a remoção total do DLC e da camada de base de  $Cr_xN_y$ . Também verificou-se a ausência de desgaste severo dos revestimentos, indicando que o por desgaste do DLC ocorreu de forma gradual e contínua devido a adequação da tensão de contato deste ensaio.

A utilização de gás refrigerante HC 600a proporcionou um aumento da durabilidade do revestimento pela inexistência da camada de óxido. Tal fenômeno indica forte influência da tribocamada sobre o coeficiente de atrito e sua durabilidade.

A análise via MEV da pista (Figura 5b), apresenta o substrato que aparece com o desgaste completo dos revestimentos bem ao centro da pista. A região mais escura representa o revestimento de  $Cr_xN_y$  utilizado como camada de base, e a região de tom cinza intermediário representa o revestimento de DLC.



**Figura 5.** Efeito do refrigerante R600a. a) Parâmetros tribológicos; b) Marca de desgaste; c) contra-corpo; e d) Replica do ensaio (somente coeficiente de atrito).

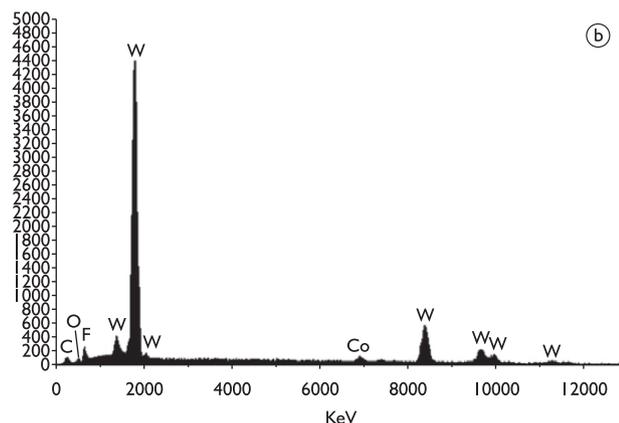
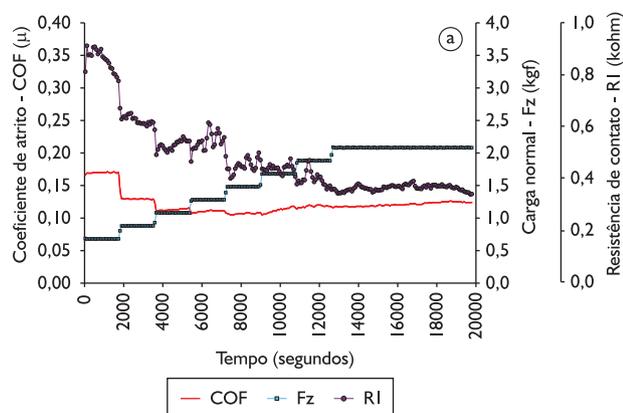
A análise da esfera do ensaio 4 (Figura 5c), indicando desgaste reduzido e baixa deposição de resíduo de desgaste, corroborando com o nível de desgaste da pista.

Para um maior entendimento dos resultados envolvidos neste ensaio, foram realizadas réplicas do mesmo a fim de identificar uma repetibilidade dos resultados.

A Figura 5d apresenta o resultado das réplicas onde verifica-se dispersão na durabilidade dos resultados, porém variação desprezível do coeficiente de atrito.

No ensaio 5, realizado com gás refrigerante R134a, verificou-se que com o aumento da carga normal ocorreram sensíveis variações do coeficiente de atrito (Figura 6a).

A análise química da tribocamada formada no contra corpo, realizada via EDS (Figura 6b), apresentou os elementos como: Carbono, Cobalto e Tungstênio, contidos nos materiais ensaiados e também traços de Oxigênio e Flúor. Estes últimos elementos indicam contaminação das interfaces de contato com umidade do ar (falta de hermeticidade da câmara de gases) e decomposição química do gás refrigerante utilizado.



**Figura 6.** Efeito do refrigerante HFC134a. a) Parâmetros tribológicos; e b) Análise química via EDS da camada formada no contra corpo.

Observando-se os aspectos construtivos da câmara de gases refrigerantes, a presença de oxigênio é admissível e condizente com o método de evacuação e permeabilidade do sistema. Entretanto, não era esperada a decomposição do gás refrigerante HFC 134a, um tetrafluoretano que tem em sua composição Flúor, Carbono e Hidrogênio.

A liberação do Flúor contido na estrutura química do gás refrigerante apresentou interação química com os resíduos de desgaste formando uma tribocamada de menor coeficiente de atrito, porém de fraca energia de ligação nas superfícies de contato. Tal tribocamada foi removida a cada incremento de carga e novamente formada ao longo da permanência da mesma.

## 4 DISCUSSÃO

Considerando as diversas configurações dos ensaios realizados, verificou-se que a utilização de esferas com diferentes diâmetros e materiais alteraram as propriedades de contato e conseqüentemente os resultados de atrito.

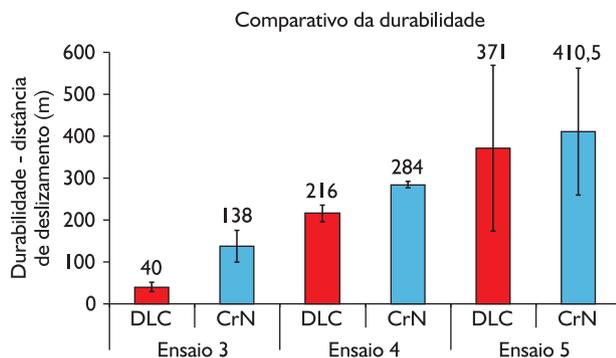
Como visto nos ensaios 1 e 2 a redução do diâmetro da esfera aumentou muito a tensão de contato e os resultados de atrito não apresentaram aumento de severidade esperado devido a deformação do substrato do corpo.

A mudança do material da esfera para WC-Co possibilitou um aumento da severidade do ensaio sem implicar em aumento considerável da deformação do substrato por atingir um valor intermediário de pressão de contato. Entretanto, a reação triboquímica entre resíduos de desgaste do corpo e contra corpo em atmosfera de alta umidade levaram a formação de uma tribocamada espessa e rica em Oxigênio que alterou a interface de contato e conseqüentemente do comportamento do atrito.

A utilização de atmosfera controlada de gases refrigerantes nos ensaios 4 e 5 permitiu a eliminação da influência da umidade na tribocamada e a visualização dos fenômenos de desgaste envolvidos nestes ensaios..

Quando utilizado o gás refrigerante HFC134a o coeficiente de atrito apresentou diminuição bem com o aumento da carga normal nos primeiros estágios do ensaio. Esta redução do atrito se deve a reações triboquímicas entre resíduos de DLC, do material do corpo e contra corpo, decomposição química do gás refrigerante HFC134a e infiltrações na câmara de testes, como evidenciado pela análise química via EDS.

Entretanto, as condições em que esta tribocamada é formada não foram reproduzidas em ensaios subseqüentes levando a acreditar que a formação da mesma seja de difícil estabelecimento, controle e pouco prováveis que aconteçam em aplicações práticas.



**Figura 7.** Comparativo da durabilidade do DLC e de  $Cr_xN_y$  nas diferentes configurações de ensaio.

A durabilidade dos revestimentos é verificada na Figura 7 que representa graficamente a distância de deslizamento dos ensaios realizados. Como nos ensaios 1 e 2 não ocorreu colapso do revestimento de DLC os ensaios foram finalizados no limite de aplicação de carga do tribômetro. Assim sendo, tais ensaios não foram comparados com os demais quanto a durabilidade. Os ensaios 3, 4 e 5 realizados com tensão de contato intermediária e controle de contaminantes gasosos apresentam diferenças significativas de durabilidade do DLC.

No ensaio 5 as flutuações do atrito em função da carga geraram grande dispersões na determinação da durabilidade dos revestimentos. A repetição destes ensaios apresentou resultados diferentes, sendo que o maior controle de contaminantes (presença de ar úmido dentro da câmara de testes) indicou ser um forte fator de influência na dispersão dos resultados de durabilidade.

## 5 CONCLUSÃO

No ensaio ao ar o desgaste apresentou-se estável, porém não desgastou os revestimentos de DLC e  $Cr_xN_y$  por completo, impossibilitando o estabelecimento da durabilidade do mesmo.

## REFERÊNCIAS

- 1 IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. In: ASSESSMENT REPORT, 4., 2007, Valencia, Spain. Geneva: IPCC, 2007. Plenary 27.
- 2 UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. *Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer*. New York, 1987.
- 3 ERDEMIR, A. Design criteria for super lubricity in carbon films and related microstructures. *Tribology International*, v. 37, n. 7, p. 577-583, July 2004.
- 4 HAYWARD, I. P.; FIELD, J.E. Friction and wear of diamond. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRIBOLOGY, 1987, London. *50 Years on*. [S.l.]: Institute of Mechanical Engineers, 1987. p. 205-9.
- 5 MIYOSHI, K. et al. Friction and wear of plasma-deposited diamond films. *Journal of Applied Physics*, v. 74, n. 7, p. 4446-50, Oct. 1993. <http://dx.doi.org/10.1063/1.354386>
- 6 DUGGER, D.; PEEBLES, E.; POPE, L. E. Counterface material and ambient atmosphere: role in the tribological performance of diamond films. In: CHUNG, Y.-W.; HOMOLO, A. M.; STREET, G. B. (Eds.). *Surface science investigations in tribology, experimental approaches*. Washington, D.C: American Chemical Society, 1992. p. 72-102. (ACS Symposium Series, 485).

A redução do tamanho da esfera alterou drasticamente o fenômeno de desgaste. Embora a redução do diâmetro da esfera aumente a tensão de contato, ocorreu deformação plástica excessiva do substrato que interferiu no estabelecimento da durabilidade do DLC.

A tribocamada formada na interface de contato, tanto dos ensaios realizados ao ar quanto dos ensaios com gases refrigerantes demonstraram interferência bem definida na durabilidade dos revestimentos.

Entretanto, o gás HFC 134a apresentou decomposição química durante o ensaio (possivelmente associado a presença de Oxigênio) e passou a apresentar resultados inconsistentes para a avaliação de durabilidade do DLC.

A ausência de Oxigênio reduziu consideravelmente a durabilidade do DLC quando comparados aos ensaios com gases refrigerantes. Verificando-se um aumento de mais de cinco vezes a durabilidade do revestimento.

Finalmente conclui-se que a formação de uma tribocamada é fortemente afetada pela atmosfera utilizada. O oxigênio interfere negativamente na durabilidade do revestimento de DLC levando a oxidação dos resíduos gerados na interface de contato. Os gases refrigerantes utilizados também apresentaram interferência direta nos resultados, sendo que a melhor opção testada foi o gás HC600a que apresentou menor reatividade com os materiais e possíveis contaminações no sistema de teste.

## Agradecimentos

A empresa Whirlpool S.A. – Unidade Compressores, que gentilmente concedeu a infra-estrutura física dos laboratórios e equipamentos para execução e caracterização dos ensaios. Aos colegas Antônio Tadeu Cristofolini e, Fernando W. Torres pelas discussões.

- 7 CHANDRASEKA, S.; BHUSHAN, B. The role of environment in the friction of diamond for magnetic recording head applications. *Wear*, v. 153, n. 1, p. 79-89, Mar. 1992. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(92\)90262-7](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(92)90262-7)
- 8 MIYAKE, S. et al. Macro- and micro-tribological properties of polished CVD diamond films and trial processing diamond. *IEICE TRANSACTIONS on Electronics*, v. E78-C, n. 2, p. 180-5, Fev. 1995.
- 9 SMENTKOWSKI, V. S.; YATES JR., J. T. Fluoroalkyl iodide photodecomposition on diamond (100): an efficient route to the fluorination of diamond surfaces. *Materials Research Society Symposia*, v. 416, p. 293-8, 1996.
- 10 MOLIAN, P. A.; JANVRIN, B.; MOLIAN, A. M. Laser chemical vapor deposition of fluorinated diamond thin films for solid lubrication. *Wear*, v. 165, n. 2, p. 133-40, June 1993. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(93\)90328-J](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(93)90328-J)
- 11 MELLO, J. D. B.; BINDER, R. A methodology to determine surface durability in multifunctional coatings applied to soft substrates. *Tribology International*, v. 39, n. 8, p. 769-773, Aug. 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2005.07.015>

Recebido: 1/03/2010

Aceito: 28/03/2011