

# COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE REVESTIMENTOS DE DLC COM GASES REFRIGERANTES HFC134a E HC600a<sup>1</sup>

Marcio Silverio<sup>2</sup>

Roberto Binder<sup>3</sup>

José Daniel Biasoli de Mello<sup>4</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. O DLC vem despontando industrialmente como uma alternativa para redução do atrito e desgaste em pares tribológicos. Em compressores herméticos as perdas mecânicas por atrito resultam no aumento do consumo de energia reduzindo a eficiência dos mesmos. O objetivo do trabalho é estabelecer uma metodologia de avaliação tribológica de componentes revestidos com DLC com os gases refrigerantes HFC134a e HC600a. 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 Varrredura – 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; DLC; HFC134a; HC600a.

## 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. The DLC is appearing industrially as an alternative to reduce the friction and wear in tribological pairs. In hermetic compressors the mechanical losses by friction result in consumption of energy increasing reducing the efficiency of those devices. The objective is to establish a methodology for tribology evaluating of components coated with the DLC used with HFC134a and HC600a refrigerant gases. 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; DLC; HFC134a; HC600a.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Tecnólogo em Materiais – Whirlpool S.A. Unidade Compressores: Embraco*

<sup>3</sup> *M.Sc em Engenharia e Ciência dos Materiais – Whirlpool S.A. Unidade Compressores: Embraco*

<sup>4</sup> *Professor titular – Universidade Federal de Uberlândia*

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das grandes preocupações globais da atualidade está relacionada diretamente com o futuro de nossa existência na terra. 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 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 Fluor Carbono) e HFCs ( Hidro Fluor Carbonos). Sendo que, o primeiro, é um dos vilões da redução da camada de ozônio e teve que ser substituído a fim de minimizar os efeitos dos raios ultravioletas sobre a terra. Já os gases HFCs, utilizados em substituição dos CFCs, tem seus dias contados devido ao potencial de isolamento térmico da atmosfera terrestre também conhecido como efeito-estufa.

A indústria de refrigeração se encontra neste meio como um dos grandes vilões do passado e presente, mas que vem desenvolvendo grandes esforços na busca de soluções menos agressivas ao meio ambiente no futuro.

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.

Países como Estados Unidos e Canadá optaram por utilizar o HFC134a, um gás não agressor da camada de ozônio, mas causador do efeito estufa.

Um dos gases considerados menos agressivo ao meio ambiente é o HC600a, comercialmente chamado R600a. Um hidrocarboneto muito utilizado na comunidade européia, porém evitado pelos Estados Unidos e Canadá devido a seu caráter inflamável.

Comparativamente, o gás refrigerante HC600a apresenta um potencial de depredação da camada de ozônio igual a zero, igualmente ao gás HFC134a. Entretanto, seu potencial de aquecimento global é 3 contra 1300 do HFC134a.<sup>(2)</sup> O presente trabalho pretende estabelecer uma metodologia de avaliação do coeficiente de atrito e durabilidade de revestimentos DLC – *Diamond-like Carbon*, aplicados em componentes de compressores herméticos de refrigeração na presença de gases refrigerantes.

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>

Por se tratarem de revestimentos com baixo coeficiente de atrito e taxa de desgaste, sua utilização leva a uma importante gama de aplicações industriais onde o desgaste de componentes deve ser evitado.

A busca por soluções que reduzam o atrito e desgaste impacta diretamente na redução do consumo de energia elétrica, melhorando a eficiência dos produtos onde tais mecanismos atuam.

Entretanto, tais revestimentos apresentam variações em suas propriedades tribológicas em função da presença de 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 câmara 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 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 et al.<sup>(9)</sup> e Molian, Janvrin e Molian<sup>(10)</sup> desenvolveram meios mais efetivos para passivar os filmes de Carbono, como por exemplo, átomos de Flúor, 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, por aquecimento, 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 estudo dos fenômenos tribológicos envolvendo revestimentos de DLC são realizados em diferentes configurações de ensaios de forma a melhor se adequarem as aplicações propostas.

Para o presente trabalho foi utilizada a metodologia proposta por De 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 1 – 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.

O incremento de carga normal aplicada bem como o tempo de cada etapa é descrito na Tabela 1.

O incremento de carga é realizado automaticamente por um sistema de fuso mecânico motorizado e controlado pelo software do tribometro. Este software também controla toda a movimentação do tribometro e faz leituras da carga normal,

força tangencial, resistência de contato e tempo de execução do ensaio. Os dados são lidos e armazenados a uma frequência de 1Hz.

**Tabela 1.** Cargas normais e tempos de ensaios

Etapa	Carga Normal (Kgf)	Tempo (s)
1	0,68	15
2	0,88	15
3	1,08	15
4	1,28	15
5	1,48	15
6	1,68	15
7	1,88	15
8	2,08	15
9	2,28	15
10	2,48	15
11	2,68	15
12	2,88	15
13	3,08	15
14	3,28	15
15	3,48	15

As amostras confeccionadas em aço SAE 1020 foram revestidas com DLC de um fornecedor comercial do tipo a-C:H obtido por PACVD.

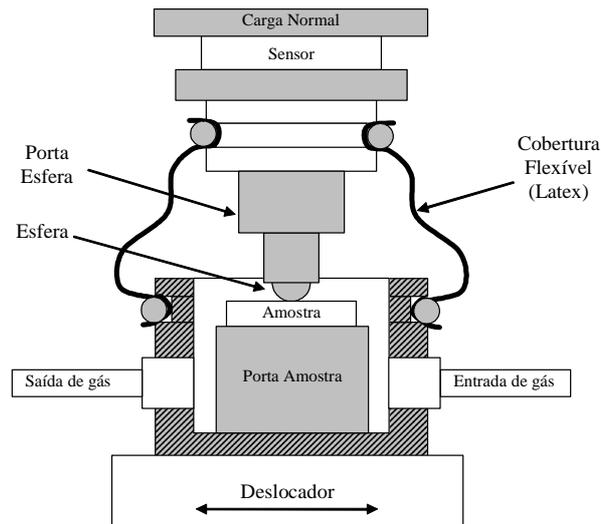
O DLC foi aplicado sobre uma camada intermediária de CrN com o intuito de dar suporte mecânico ao revestimento de DLC e minimizar a diferença de propriedades mecânicas entre o DLC e o substrato de aço.

A espessura do DLC atinge entre 1,0 micrometros e 1,5 micrometros com camada intermediária de aproximadamente 1,5 micrometros medidos por preparação metalográfica da seção transversal.

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.

A frequência de deslizamento foi ajustada para 2 hz e o deslocamento em 10 mm realizados ao ar com umidade relativa controlada (50%) e temperatura ambiente  $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Comparativamente foram realizados ensaios em atmosfera saturada com dois diferentes tipos de gases refrigerantes: HFC 134a e HC 600a.

Para permitir a utilização de gases refrigerantes, um sistema de enclausuramento da atmosfera foi desenvolvido de forma a minimizar a contaminação da atmosfera interna da câmara com oxigênio. Esta câmara, confeccionada em material flexível, permite o ajuste adequado aos suportes sem interferir nas cargas aplicadas como mostrado na Figura 1.



**Figura 1.** Câmara de controle de gases.

Antes de cada ensaio, a câmara é levemente evacuada de forma a expurgar o oxigênio contido em seu interior e evitar a influência da umidade sobre as superfícies de contato.

## 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 2.

**Tabela 2.** Descrição dos ensaios

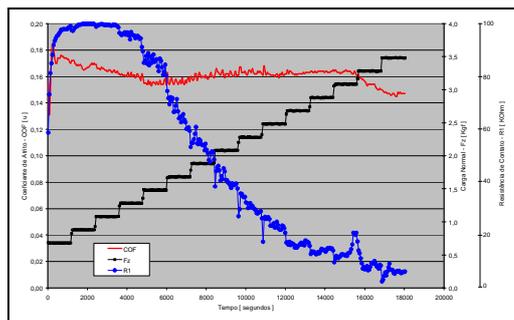
Ensaio	Atmosfera	Contra Corpo (material e diâmetro da esfera )
Ensaio 1	Ar 50% umidade	Aço 52100 / 3,0 mm
Ensaio 2	Ar 50% umidade	Aço 52100 / 1,6 mm
Ensaio 3	Ar 50% umidade	WC-Co / 4,0 mm
Ensaio 4	HC600a	WC-Co / 4,0 mm
Ensaio 5	HFC134a	WC-Co / 4,0 mm

## 3 RESULTADOS

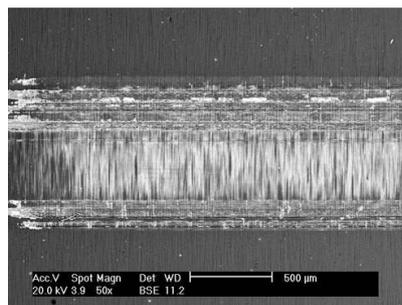
O ensaio 1 apresentou coeficiente de atrito com pequenas flutuações e valor médio de 0,13, como pode ser visto na Figura 2a. O coeficiente de atrito apresentou-se conforme esperado teoricamente para o revestimento, porém o desgaste promovido não removeu completamente o DLC, inviabilizando a verificação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

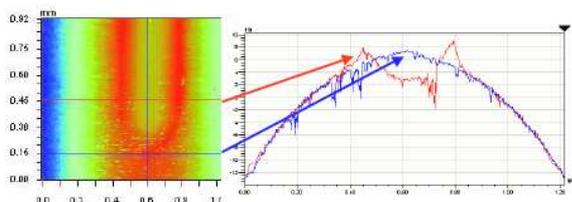




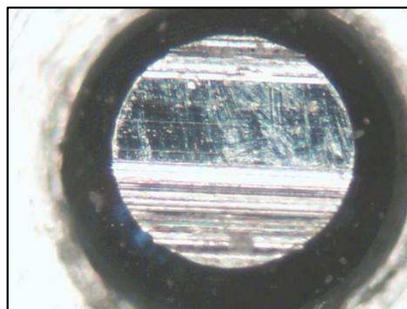
- a -



- b -



- c -



- d -

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

No ensaio 3, o aumento do diâmetro da esfera 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).

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.

De 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.

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

O ensaio foi interrompido automaticamente com o aumento do coeficiente de atrito acima de 0,6 μ 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 CrN.

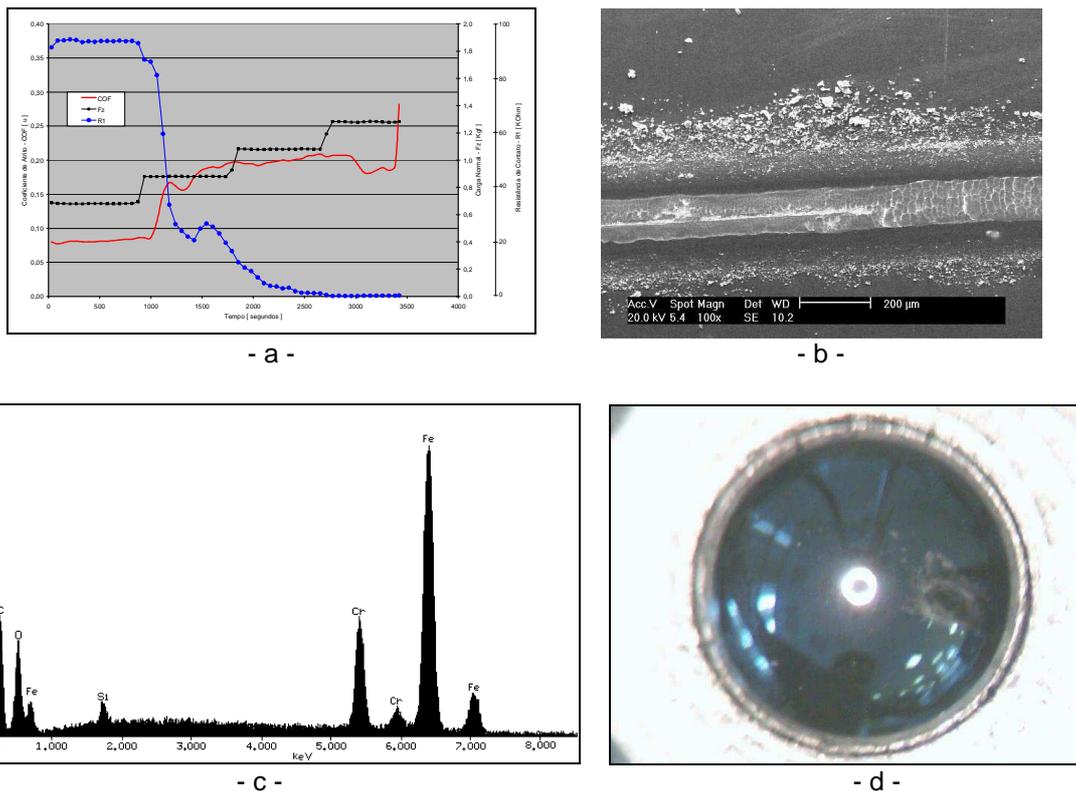
A Figura 4b mostra a pista de desgaste gerada no corpo do ensaio 3 onde é possível identificar uma forte formação de uma tribocamada. A análise química via espectroscopia de raio-X indicou a presença de Oxigênio caracterizando forte oxidação devido a reatividade dos materiais do corpo, contra corpo e a atmosfera de ensaio como mostra a Figura 4c.

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 no 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.



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

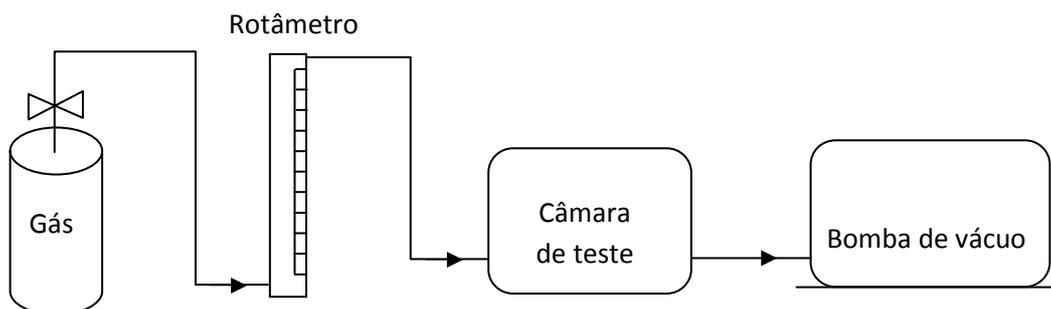
No ensaio 4 foi utilizado uma câmara de gases desenvolvida especialmente para permitir a realização de ensaios com atmosfera saturada de gás refrigerante.

Um esquema do sistema de evacuação e controle de gases da câmara é apresentado na Figura 5. Neste ensaio o gás refrigerante HC600a é controlado por um rotômetro acoplado em serie a linha de alimentação de gases do sistema.

Antes de cada ensaio a câmara é levemente evacuada para eliminação do ar contido na parte interna da mesma. Após a evacuação a câmara recebe sucessivos fluxos de gás refrigerante de forma a promover um arraste do oxigênio remanescente.

Por fim, a bomba de vácuo é desligada e o sistema fica levemente pressurizado acima de 1 atm durante todo o ensaio para impedir a entrada de ar e conseqüente contaminação com oxigênio.

A câmara, entretanto, não é totalmente hermética e permite eventual contaminação com umidade da atmosfera externa durante a execução dos ensaios.



**Figura 5.** Esquema do sistema de gases instalado no tribometro.

Como pode ser visto na Figura 6a, 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 CrN. 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 CrN 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 CrN. Também verificou-se a ausência de fratura do revestimento na borda da pista de desgaste, indicando que o DLC foi removido por desgaste gradual e contínuo.

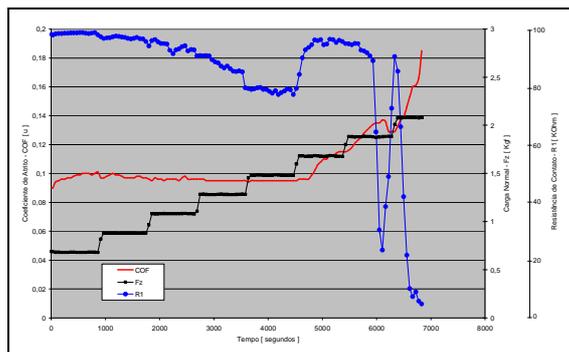
A utilização de gás refrigerante HC 600a proporcionou um aumento da durabilidade do revestimento pela inexistência da camada de óxido, verificada no ensaio anterior. Tal fenômeno indica forte influência da tribocamada sobre o coeficiente de atrito e sua durabilidade.

A Figura 6b mostra a análise via MEV da pista, onde a área mais clara no centro da pista é o substrato que aparece depois do desgaste completo dos revestimentos. A região mais escura representa o revestimento de CrN utilizado como camada de base, e a região de tom cinza intermediário representa o revestimento de DLC.

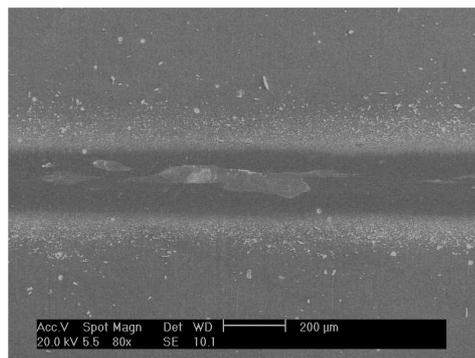
A Figura 6c apresenta a esfera do ensaio 4 indicando desgaste reduzido e baixa deposição de resíduo de desgaste, corroborando com a análise da pista.

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

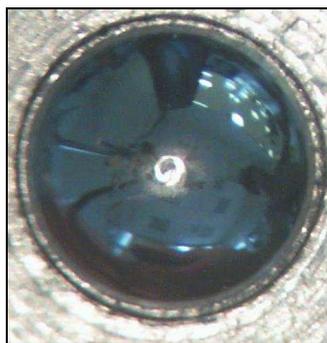
A Figura 6d apresenta o resultado das réplicas do ensaio 4. Verificou-se certa dispersão na durabilidade dos resultados, porém uma variação desprezível do coeficiente de atrito. Neste gráfico não são plotados a resistência de contato para evitar a poluição dos dados. Entretanto, os resultados foram similares ao resultado do ensaio preliminar.



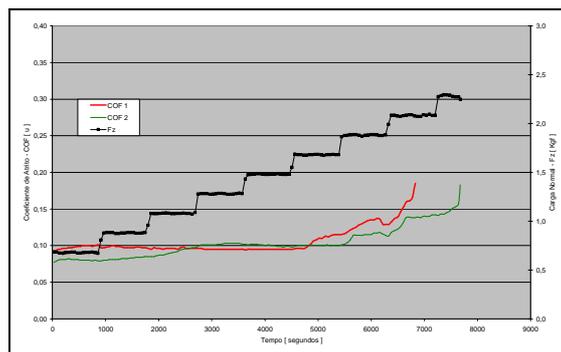
- a -



- b -



- c -



- d -

**Figura 6.** Efeito do refrigerante R600a. a- Parâmetros tribológicos. b. Marca de desgaste. c. contra-corpo. d. Replicação do ensaio (somente coeficiente de atrito).

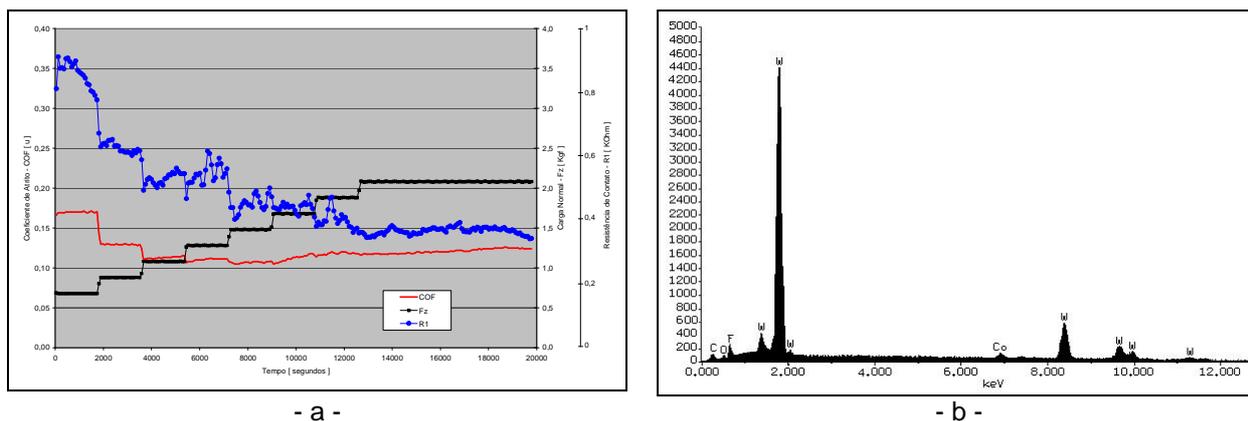
No ensaio 5, realizado com gás refrigerante R134a, algumas perturbações no coeficiente de atrito foram verificadas ao longo do ensaio. Com o aumento da carga normal evidenciou-se uma sensível redução do coeficiente de atrito (Figura 7a).

A análise química da camada formada no contra corpo realizada por espectroscopia de raios-X (Figura 7b), apresentou os elementos 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.

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.



**Figura 7:** Efeito do refrigerante HFC134a. a- Parâmetros tribológicos. b. Análise química via EDS da camada formada no contra corpo.

## 4 DISCUSSÃO

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

Como visto nos ensaios 1 e 2 onde o diâmetro da esfera foi reduzido de 3,00 mm para 1,60 mm, 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 com diâmetro de 4,00 mm possibilitou um aumento da severidade do ensaio sem implicar em aumento considerável da deformação do substrato. O aumento da severidade do ensaio se deu pelo aumento da tensão de contato devido a melhores propriedades mecânicas do WC-Co em relação ao aço 52100 das esferas de 1,60 mm de diâmetro. 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 permitiu a visualização dos fenômenos de desgaste envolvidos nestes ensaios. As alterações do coeficiente de atrito observadas nestes ensaios são decorrentes de alterações ocorridas na interface do contato entre corpo e contra corpo e atmosfera dos ensaios.

Quando utilizado o gás refrigerante HFC134a o coeficiente de atrito apresentou diminuição bem definida a cada incremento de carga normal nos primeiros estágios do ensaio. Esta redução do atrito se deve a reações triboquímicas entre resíduos de DLC e do material do corpo e contra corpo de WC-Co e decomposição química do gás refrigerante HFC134a.

A análise química via EDS do contra corpo apresentou traços de Flúor, Oxigênio e Carbono indicando uma reação entre os materiais envolvidos no sistema e a decomposição do gás refrigerante HFC134a associado a infiltrações de ar na câmara de teste.

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.

A durabilidade dos revestimentos é verificada na figura 8 que representa graficamente a distância de deslizamento dos ensaios realizados. Nos ensaios 1 e 2 não foi possível estabelecer o desgaste total do revestimento de DLC. Nestes ensaios também não ocorreu dispersão dos resultados que terminaram ao final do limite de carga aplicado automaticamente pelo tribometro. Os ensaios 3, 4 e 5 realizados com maior severidade de contato apresentam diferenças significativas de durabilidade do DLC.

Entretanto, o ensaio 5 apresentou variações consideráveis de durabilidade dos revestimentos, onde nos ensaios que apresentaram variações de atrito em função do aumento de carga verificou-se que não se estabeleceu o final do DLC. A repetição destes ensaios apresentou resultados diferentes, sendo que o maior controle de contaminantes (presença de ar úmido dentro da câmara de testes) gerou grande dispersão dos resultados de durabilidade deste ensaio.

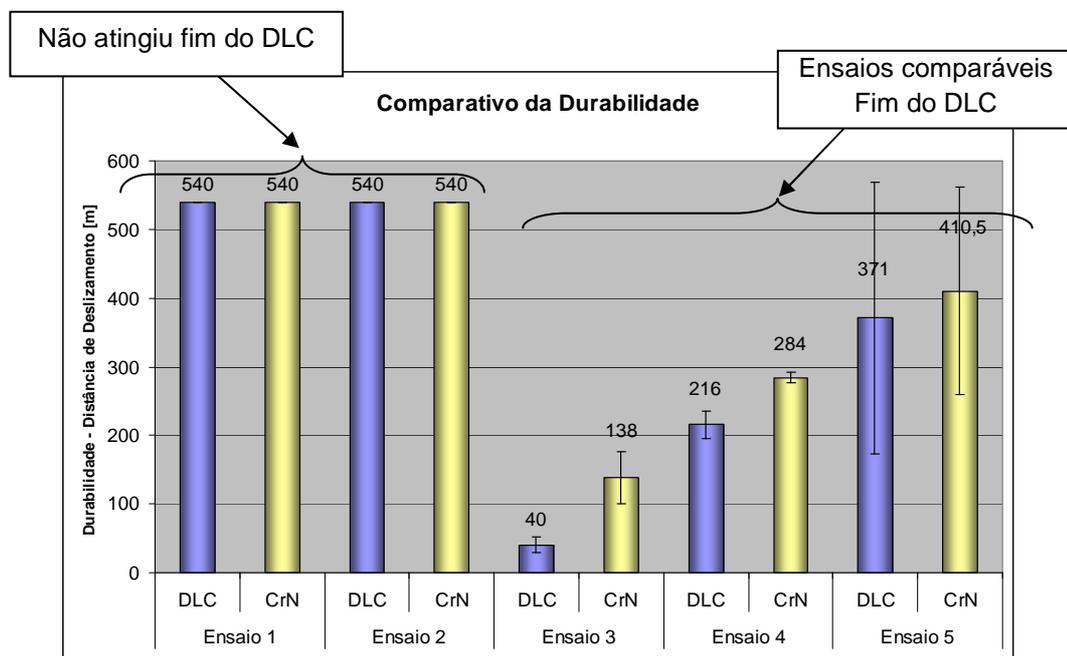


Figura 8. Comparativo da durabilidade do DLC e de CrN nas diferentes configurações de ensaio.

## 5 CONCLUSÃO

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

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 HFC134a 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 presença 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.

## **Referencias**

- 1 IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report. Valencia – Spain, 12-17 November 2007. Plenary XXVII.
- 2 UNEP - United Nations Environment Programme. Montreal protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. New York: United Nations; 1987.
- 3 Erdemir, A. Design criteria for super lubricity in carbon films and related microstructures. *Tribology International*, v. 37, p. 577-583, 2004.
- 4 Hayward, I.P. and Field, J.E. (1987), Friction and wear of diamond, *Int. Conf. On Tribol., 50 Years on*, IMechE, C159/87, 205-209.
- 5 Miyoshi, K., Wu, R.L.C., Garscadden, A., Barnes, P.N., and Jackson, H.E. (1993), Friction and wear of plasma-deposited diamond films, *J. Appl. Phys.*, 74, 4446-4450.
- 6 Dugger, D., Peebles, E., and Pope, L.E. (1992), Counterface material and ambient atmosphere: role in the tribological performance of diamond films, in *Surface Science Investigations in Tribology, Experimental Approaches*, Chung, Y.-W., Homolo, A.M., and Street, G.B. (Eds.), ACS Symposium Series 485, American Chemical Society, Washington, D.C., 72-102.
- 7 Chandraseka, S. and Bhushan, B. (1992), The role of environment in the friction of diamond for magnetic recording head applications, *Wear*, 153, 79-89.
- 8 Miyake, S., Miyamoto, T., Kaneko, R., and Miyazaki, T. (1995), Macro- and micro-tribological properties of polished CVD diamond films and trial processing diamond, *IEICE Trans. Electron.*, E78, 180-185.
- 9 Smentkowski, V.S. and Yates, J.T., Jr. (1996), Fluoroalkyl iodide photodecomposition on diamond (100) — An efficient route to the fluorination of diamond surfaces, *MRS Symp.* 416, 293-298.
- 10 Molian, P.A., Janvrin, B., and Molian, A.M. (1993), Laser chemical vapor deposition of fluorinated diamond thin films for solid lubrication, *Wear*, 165, 133-140.
- 11 De Mello, J. D. B.; Binder, R. A Methodology to Determine Surface Durability in Multifunctional Coatings Applied to Soft Substrates. *Tribology international*, v. 39, p. 769-773. 2006.