

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE MICROABRASIVO DO FILME DIAMOND-LIKE CARBON EM SUBSTRATOS DE AÇO AISI M2

Soraia Sandra Pires, soraiasandrapires@gmail.com¹

Ernane Rodrigues da Silva, ernanerodrigues@gmail.com¹

Paulo Sérgio Martins, paulo.martins@prof.una.br²

Poliana Santos Souza, polianassouza@ig.com.br³

Victor Souza Esteves Lima, victorselima@gmail.com¹

Rogério Antônio Xavier Nunes, rogerioxavier@cefetmg.br¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 5253 - Bairro Nova Suiça, CEP 30421-169, Belo Horizonte/MG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – POSMAT.

²Centro Universitário UNA, Rua Aimorés, 1.451, Lourdes, CEP 30860-382, Belo Horizonte/MG.

³Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, CEP 31270-901 – Belo Horizonte/MG. Prédio da Engenharia - Bloco 1 - 3º Andar - Campus da Pampulha.

Resumo: Os revestimentos Diamond-like Carbon (DLC) são filmes finos formados por carbono nas hibridizações sp^2 e sp^3 e são conhecidos devido à sua alta dureza e baixo coeficiente de atrito. Exibem uma gama de aplicações que visam promover a proteção ao desgaste a uma diversidade de materiais, em especial, ferramentas de corte, promovendo ainda uma lubrificação entre a peça e a ferramenta e consequentemente a diminuição ou eliminação do uso de lubrificantes. A descoberta de novas aplicações do filme DLC e o avanço tecnológico contínuo dos processos de deposição demandam mais estudos do comportamento tribológico do mesmo em diferentes condições e substratos para a geração de dados tecnológicos que possuem grande pesquisa e mérito industrial. O presente trabalho avalia a eficiência do filme DLC, com a determinação do coeficiente de desgaste do aço rápido M2 sem revestimento e com revestimento e estuda a influência da rugosidade do substrato na resistência à micro abrasão do aço rápido revestido. Para isto, utilizou-se o ensaio caloteste para formação do desgaste abrasivo dos materiais em três diferentes rugosidades e o coeficiente de desgaste específico foi calculado por meio de equações que envolvem os diâmetros das calotas geradas, o número de rotações, a carga aplicada e o raio da esfera.

Palavras-Chave: Diamond-like Carbon, Caloteste, Rugosidade, Desgaste micro-abrasivo, Coeficiente de desgaste.

1. INTRODUÇÃO

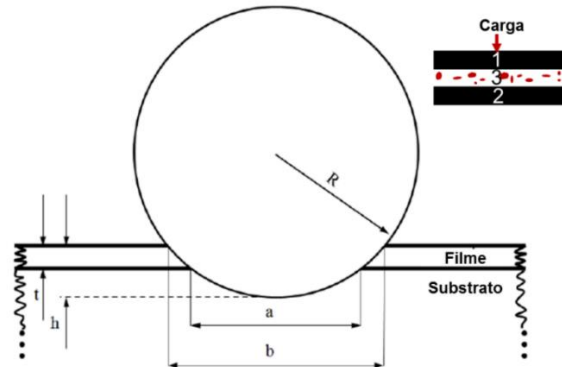
Revestimentos de carbono amorfo são filmes finos, formados por carbono de ligações sp^2 e sp^3 em diferentes proporções. O revestimento de carbono tipo diamante, do inglês, Diamond-Like Carbon (DLC), tem por características especiais sua alta dureza, inércia química e baixo coeficiente de atrito comprovado em diferentes tipos de substratos. Ele é aplicável na usinagem de materiais não ferrosos, por exemplo, em brocas de aço rápido e de metal duro para processos de furação de blocos de ligas de alumínio e silício (Al-Si) na indústria automotiva (Martins; 2016). A aplicação do revestimento DLC, permite não apenas a melhoria da produtividade das ferramentas, como também a utilização em processos de usinagem a seco ou com mínima quantidade de lubrificante, segundo Balinit (2017) trazendo benefícios ambientais com a redução do consumo de líquidos refrigerantes.

Os revestimentos DLC já existem a mais de 60 anos, mas somente nos últimos anos foi produzido em escalas industriais, devido ao avanço tecnológico das técnicas de deposição. A utilização dos revestimentos DLC vem se expandindo, atuando como lubrificante sólido em substituição aos líquidos refrigerantes, em componentes submetidos à impacto como moldes para estampagem e trefilação, em processos que envolvem atrito contínuo, como engrenagens e pistões e em componentes submetidos à aquecimento e resfriamento rápido como moldes para injeção de plásticos (Balinit; 2017).

Para que a gama de aplicações do DLC continue a avançar, é necessário obter o entendimento detalhado do comportamento tribológico do mesmo em diferentes condições (Silva; 2014). Além disso, as expectativas de tipo de falha do sistema substrato e revestimento são dados tecnológicos, que possuem grande pesquisa e mérito industrial (Vidakis, et al 2013) e conhecer a resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos finos auxilia na correta aplicabilidade do mesmo (European Committee for Standardization; 2001). Desta forma, busca-se, neste trabalho, avaliar o filme DLC com a

determinação do coeficiente desgaste do aço rápido sem revestimento e com revestimento e avaliar a influência da rugosidade do substrato na resistência à micro abrasão do conjunto substrato-revestimento.

O caloteste consiste em um ensaio que visa analisar a resistência à abrasão de filmes finos. A Figura 1 apresenta a geometria do desgaste causado pelo teste de micro abrasão com uma esfera de raio R e um substrato revestido por um filme de espessura t . A penetração total h do desgaste provocado pela esfera é a somatória da espessura do filme com uma parte do substrato. A depressão esférica formada é comumente chamada de calota com diâmetro interno a e diâmetro externo b (Fig. 1).



Fonte: Adaptado de Silva, Souza e Carneiro (2016)

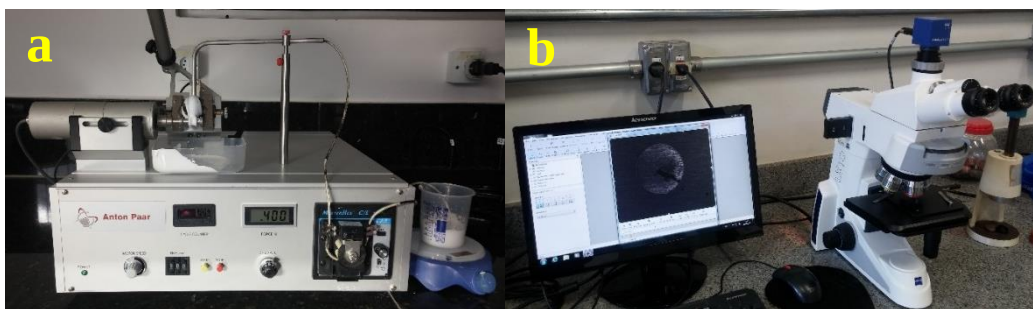
Figura 1- Diagrama esquemático do caloteste e do sistema tribológico formado em superfície plana

Os modos de desgaste abrasivo são classificados em três principais tipos: desgaste abrasivo por rolamento, onde as partículas abrasivas rolam sobre o substrato, desgaste abrasivo por riscamento, em que as partículas abrasivas deslizam sobre o substrato e desgaste abrasivo misto onde os dois mecanismos ocorrem simultaneamente (Cozza; 2013a).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Placas de aço AISI M2 foram cortadas em tamanho 30x30x5mm e preparadas em processo de retífica gerando um total de quatro amostras. Obteve-se rugosidade das superfícies por meio de um Rugosímetro Portátil Hexagon- Rugosurf 20, apresentando medidas de rugosidade R_a de 0,20 μ m, 0,23 μ m, 0,30 μ m e 0,30 μ m. Posteriormente os materiais foram depositados com filme DLC por deposição física à vapor (PVD) por pulverização a arco pulsado.

O ensaio foi conduzido no equipamento Calotest da marca Anton Paar, com capacidade de rotação de até 720rpm e temporização máxima de 999 segundos (**Erro! Fonte de referência não encontrada.a**). Utilização de esfera de aço AISI 52100, diâmetro de 30 mm, solução abrasiva de óxido de alumínio (Al_2O_3) – base água, partículas de tamanho 1 μ m). A rotação da esfera ocorreu a uma velocidade tangencial de 1,13m/s e carga de 0,4N. Para cada superfície foram geradas 5 calotas nas mesmas condições, afim de se obter repetibilidade e desvio. As imagens foram obtidas através de um Microscópio Óptico Zeiss Axio Lab.A1 e software AxioVision 4.9.1. (**Erro! Fonte de referência não encontrada.2b**).



a) Equipamento Calotest b) Microscópio óptico

Figura 2- Equipamentos do procedimento experimental

3. ANÁLISE DOS DADOS

O perfil da cratera formada no ensaio pode ser analisado por diversas técnicas, sendo mais comum a microscopia óptica que permite o monitoramento das mudanças relevantes e das falhas ocorridas nas regiões de transição.

O coeficiente de desgaste específico dos materiais, com e sem revestimento, pode ser calculado por meio da manipulação da equação de Archard (Camerini et al 2011), resultando em:

$$k = \frac{V}{Dd \cdot N}$$

(1)

Onde V é o volume de material desgastado em milímetros cúbicos (mm^3), Dd é a distância deslizada em metros (m), N é a carga normal em Newton (N) e k é o coeficiente de desgaste específico em milímetros cúbicos por Newton x metro ($\text{mm}^3/(\text{N.m})$). Na Equação 2, o volume desgastado pode ser obtido através da relação matemática com o diâmetro externo da calota e raio da esfera (Cozza; 2013a):

$$V = \frac{\pi b^4}{64R} \quad (2)$$

Onde b é o diâmetro externo da calota formada em milímetros (mm) e R é o raio da esfera em milímetros (mm). A distância deslizada é obtida pelo perímetro da esfera e número de rotações durante o ensaio, conforme a equação abaixo:

$$Dd = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot n \quad (3)$$

Onde R é o raio da esfera em metros (m) e n é o número de rotações.

O método ainda, permite o cálculo da espessura do revestimento (Jakubéczyová et al, 2014) utilizando-se a equação abaixo, onde t é a espessura do revestimento em micrometros (μm), a é o diâmetro interno da calota em micrometros (μm), b é o diâmetro externo da calota em micrometros (μm) e R corresponde ao raio da esfera em micrometros (μm). (European Committee for Standardization; 2001).

$$t = \sqrt{R^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \quad (4)$$

A Figura 3 representa esquematicamente tal relação.

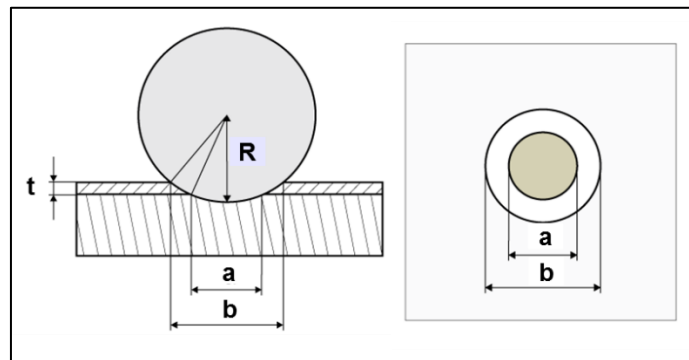


Figura 3 - Medição do diâmetro da calota por microscopia óptica

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

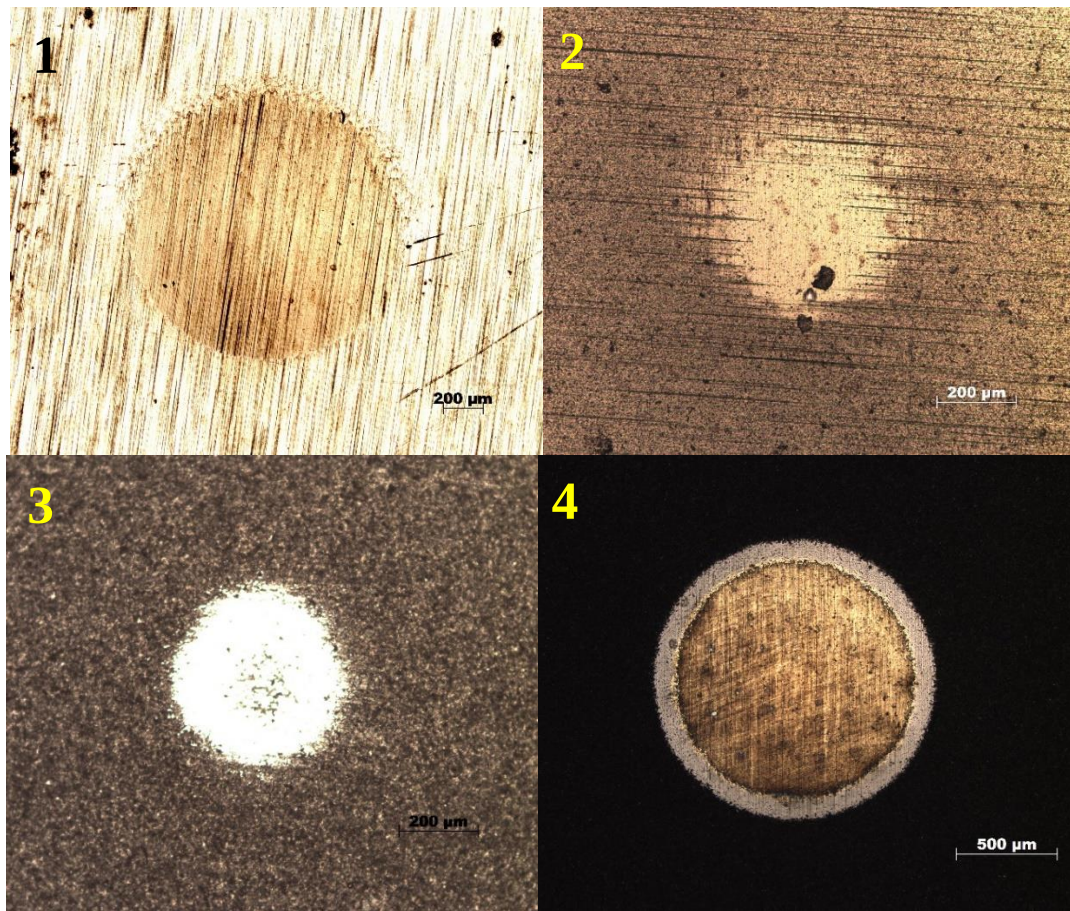
A tabela abaixo apresenta as condições de rugosidade das amostras antes da deposição do filme DLC.

Tabela 1 – Condições iniciais das amostras

Amostra	Condição	Rugosidade Ra [μm]	Desvio Padrão [μm]
1	Sem filme	0,303	0,032
2	Com filme	0,196	0,048
3	Com filme	0,229	0,019
4	Com filme	0,303	0,032

As amostras e suas respectivas calotas geradas após o ensaio de caloteste são mostradas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Observa-se que as calotas geradas nas amostras de 1 a 3 possuem bordas irregulares. Estas imperfeições na formação da cratera são denominadas *ridgings*, e ocorrem devido à não penetração das partículas abrasivas na região central (Cozza; 2013b). A presença de *ridgings* traz uma desvantagem na precisão do método, visto que há dificuldades

na medição do diâmetro das calotas geradas (Silva et al., 2016) e consequente erro de cálculo do volume desgastado (Cozza; 2013b).



1) Amostra 1 2) Amostra 2 3) Amostra 3 4) Amostra 4

Figura 4 - Microscopia óptica das calotas geradas

O cálculo da espessura do filme por meio da Eq. (4) só é possível para a amostra 4, que possui bordas regulares e nítidas. Aplicando-se a média dos resultados obtidos na amostra obtém-se:

$$t = \sqrt{15000^2 + \frac{1059^2}{2}} - \sqrt{15000^2 + \frac{1291,7^2}{2}} = 4,6 \pm 0,3 \mu\text{m}$$

Para tal a espessura encontrada foi de $4,6 \pm 0,3 \mu\text{m}$. A confirmação deste dado é possível por análise em microscópio eletrônico de varredura que será executada em trabalhos posteriores.

A tabela abaixo apresenta os resultados encontrados para o diâmetro médio das calotas e o coeficiente de desgaste específico obtido por meio das equações 1, 2 e 3.

Tabela 2 – Resultados

Amostra	Condição	Rugosidade Ra [µm]	Diâmetro médio da Calota [µm]	Desvio Padrão - Diâmetro médio da Calota [µm]	Coeficiente de desgaste específico(k) [mm ³ /(m*N)]	Desvio Padrão (k) [mm ³ /(m*N)]
1	Sem filme	0,303	1387,4	109,4	5,1E-05	1,6E-05
2	Com filme	0,196	516,5	24,7	8,0E-07	3,7E-07
3	Com filme	0,229	447,3	5,4	4,7E-07	1,1E-08
4	Com filme	0,303	1291,7	8,7	2,9E-05	5,2E-06

Observa-se uma diminuição de 58% no coeficiente de desgaste específico da amostra revestida (Fig. 5).

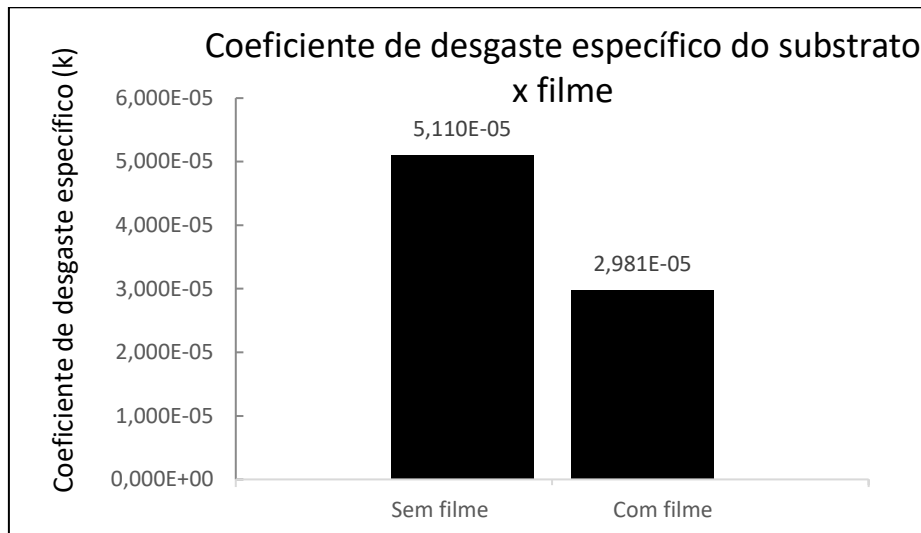


Figura 5 – Comparação do coeficiente de desgaste específico do substrato sem revestimento e com revestimento.

Nota-se que o coeficiente de desgaste específico varia exponencialmente em relação ao diâmetro da calota (Fig. 6) e tal variação depende das condições de rotação, tempo e carga aplicada.

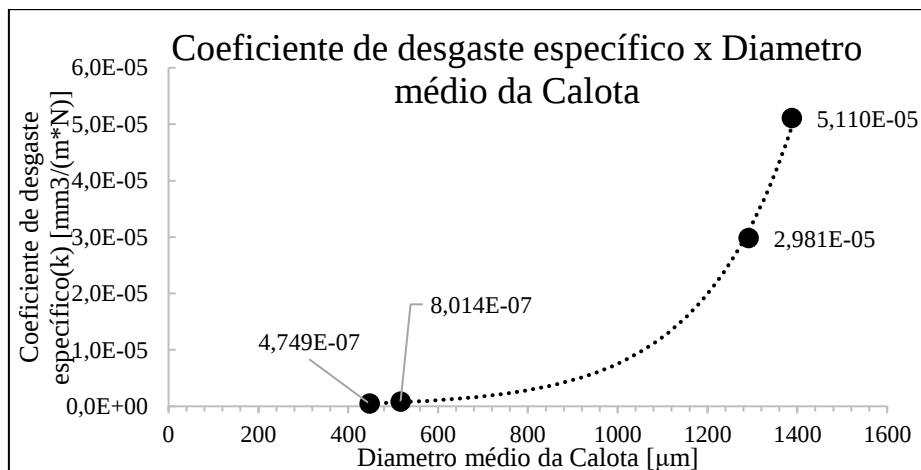


Figura 6 - Variação do coeficiente de desgaste específico em relação ao diâmetro da calota

Para todas as amostras revestidas houve uma correlação linear entre a distância deslizada e o diâmetro externo da calota (Fig. 7). Em contrapartida, a amostra não revestida apresentou variação do volume desgastado de forma não linear. Tal variação pode ser justificada devido ao erro de medição da calota, que apresentou bordas irregulares como mostrado na Fig. 4a. Pode-se inferir que quanto maior o tempo de rotação do ensaio, maiores serão os diâmetros encontrados para as amostras revestidas.

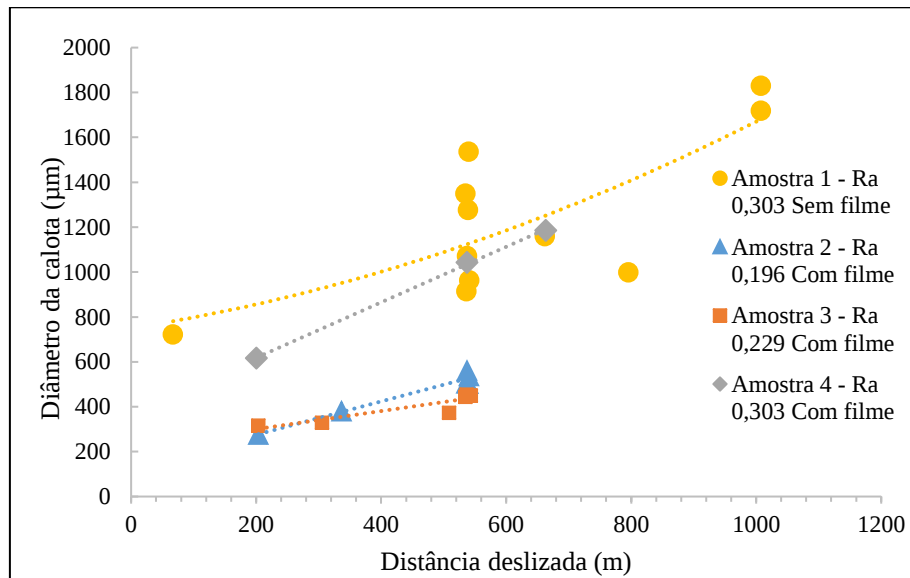


Figura 7 - Diâmetro da Calota x Distância deslizada

Verifica-se que para o substrato com superfície mais rugosa, o coeficiente de desgaste específico é cerca de 60 vezes maior do que a superfície de rugosidade $0,229\mu\text{m}$ e cerca de 35 vezes maior quando comparado à superfície menos rugosa de $0,196\mu\text{m}$ (Fig. 8).

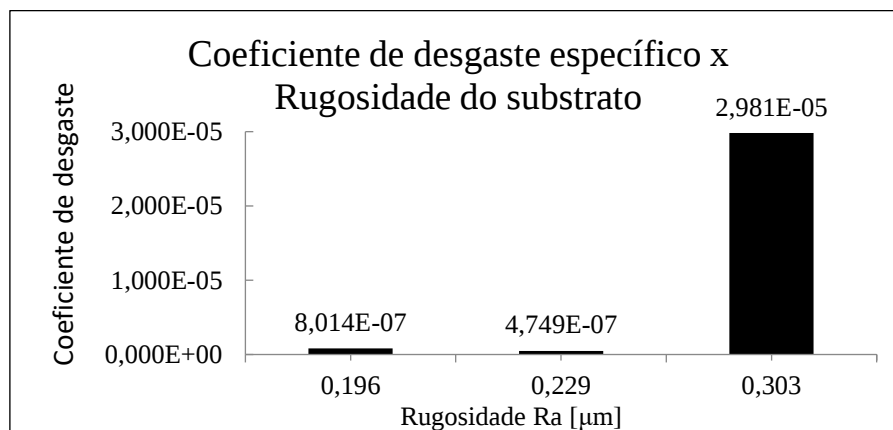


Figura 8 - Comparação do coeficiente de desgaste específico obtido nas amostras revestidas

Compreende-se que, quanto maior a rugosidade do substrato, maior é o desgaste sofrido pelo conjunto filme/substrato. Tal fenômeno também é observado pelo tamanho do diâmetro da calota da amostra mais rugosa, que obteve diâmetro médio de $1291,7\mu\text{m}$, enquanto as demais amostras, nas mesmas condições, resultaram em diâmetros próximos de $500\mu\text{m}$ (Fig. 9).

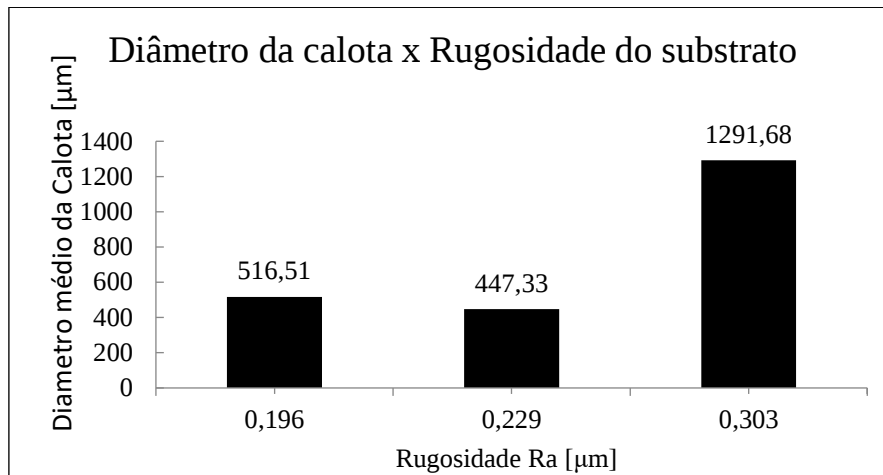


Figura 9 - Comparação do diâmetro das calotas obtidas nas amostras revestidas

Simulações numéricas com base na teoria do contato elástico de Hertzian assumem que, quanto maior a rugosidade do substrato, maior é a pressão de contato efetiva que pode provocar mudanças no mecanismo de desgaste adesivo para fragmentação, caso a pressão atinja valores críticos, que envolvem dureza, tensões de cisalhamento e módulo de elasticidade do material (Jiang; Arnell, 2000).

Devido à quantidade maior de asperezas, superfícies mais rugosas revestidas são propensas à formação de trincas na interface. Isso acontece, pois, a irregularidade do acabamento superficial gera pontos onde a espessura do filme é significativamente mais fina do que o restante da superfície. Nestes pontos, onde o filme é extremamente fino, ocorre fragilização durante o atrito, promovendo desgaste do filme por mecanismos mais agressivos (Jiang; Arnell, 2000).

5. CONSIDERAÇÕES

Verifica-se que os substratos revestidos com filme DLC apresentam maior resistência ao desgaste microabrasivo em relação à superfície não revestida. A precisão do método depende fortemente da regularidade das bordas das calotas obtidas mas os resultados são coerentes com o esperado. A amostra 3, de maior rugosidade Ra (0,303 μm) apresentou o maior coeficiente de desgaste específico em relação às amostras de menor rugosidade, resultando na amostra de menor resistência ao desgaste microabrasivo.

A amostra 2, de rugosidade Ra igual 0,229 μm apresentou o menor coeficiente de desgaste específico dentre os demais casos. Esperava-se que a amostra 1, de Ra igual 0,196 μm apresentasse o menor coeficiente. No entanto, o desvio padrão dos coeficientes de ambas amostras, possuem a mesma ordem de grandeza. Tal fato significa que, considerando os desvios, pode-se concluir que o coeficiente de desgaste específico de ambas amostras é o mesmo.

Conclui-se que, para rugosidades acima de 0,303 μm , o impacto das asperezas da superfície significou em um desgaste significativamente maior. Abaixo de tal rugosidade, o tipo de desgaste microabrasivo não se altera e o coeficiente de desgaste específico sofre menores variações. Tal efeito pode ser melhor interpretado com o aumento do número de amostras e faixas de rugosidade do substrato.

6. REFERÊNCIAS

- BALINIT Hard Carbon: Usinagem altamente produtiva em metais não ferrosos Oerlikon Balzers, 2017. Disponível em: <<https://www.oerlikon.com/balzers/br/pt-br/portfolio/solucoes-de-superficie-balzers/revestimentos-a-base-de-pvd-e-pacvd/balinit/a-base-de-carbono/balinit-hard-carbon-1/>>. Acesso em: 05 maio 2017.
- CAMERINI, R. V.; SOUZA, R. B. de; CARLI, F.; PEREIRA, A. S.; BALZARETTI, N.M. Ball cratering test on ductile materials. *Wear*, v. 271, p. 770-774, 2011.
- COZZA, R. C. A study on friction coefficient and wear coefficient of coated systems submitted to micro-scale abrasion tests. *Surface & Coatings Technology*, v. 215, p. 224-233, 2013.
- COZZA, R. C. Análise sobre a reprodutibilidade de resultados e fragmentação de partículas abrasivas em ensaios “ball-cratering”. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 103-111, 2013.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. DD ENV 1071-6: Determination of the abrasion resistance of coatings by a micro-abrasion wear test. Brussels: DIN, 2001.
- JAKUBÉČZYOVÁ, Dagmar; KOČÍK, Marek; HVIŽDOŠ, Pavol. Multicomponent Thin Films Deposited by PVD ARC and LARC Technology. *Materials Science (Medžiagotyra)*, v. 20, n. 1, p. 36-41, 2014.
- JIANG, Jiaren; ARNELL R.D. The effect of substrate surface roughness on the wear of DLC coatings. *Wear*, v. 239, p. 1-9, 2000.

- MARTINS, Paulo Sérgio. Estudo da furação em altas velocidades de corte em ligas de Al-Si utilizando brocas de aço rápido e metal duro sem e com revestimento de DLC (Diamond like carbon). 2016. 209f. Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2016.
- SILVA, P. C. S. da. Estudo da formação de interface para obtenção de filmes de DLC altamente aderentes sobre aço. 2014. 100f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos. 2014.
- SILVA, W. M.; SOUZA, P. S.; CARNEIRO, J. R. Methods of data analysis for the ball cratering test on TiN and DLC coated steel. *Materials Research*, v. 19, n. 1, p. 9-17, 2016.
- VIDAKIS, N.; ANTONIADIS, A.; BILALIS, N. The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds. *Journal of Materials Processing Technology*, v.143–144, p. 481-485, 2003.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

ANALYSIS OF THE ABRASION RESISTANCE OF DIAMOND-LIKE CARBON IN STEEL AISI M2 SUBSTRATES. BY A MICRO-ABRASION WEAR TEST

Soraia Sandra Pires, soraiasandrapires@gmail.com¹
Ernane Rodrigues da Silva, ernanerodrigues@gmail.com¹
Paulo Sérgio Martins, paulo.martins@prof.una.br²
Poliana Santos Souza, polianassouza@ig.com.br³
Victor Souza Esteves Lima, victorselima@gmail.com¹
Rogério Antônio Xavier Nunes, rogerioxavier@cefetmg.br¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 5253 - Bairro Nova Suiça, CEP 30421-169, Belo Horizonte/MG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – POSMAT.

²Centro Universitário UNA, Rua Aimorés, 1.451, Lourdes, CEP 30860-382, Belo Horizonte/MG.

³Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, CEP 31270-901 – Belo Horizonte/MG. Prédio da Engenharia - Bloco 1 - 3º Andar - Campus da Pampulha.

Abstract. *The Diamond-like Carbon (DLC) coatings are thin films formed by sp² e sp³ carbon and are known due its high hardness and low friction coefficient. It presents a large application promoting the wear protection to several materials, in special, cutting tools, promoting lubrication between the part and the cutting tool and consequently the decrease or elimination of using lubricants. The discover of new applications of DLC and the continuous technological advance of the deposition processes demands more studies of the DLC the tribological behavior in different conditions and subtrates, to generate technological data that porsue big relevance in research and indutrial production. This work evaluates the DLC efficiency, determinating the wear specific rate of steel AISI M2 with and without DLC coating and studies the influency of the surface roughness on the micro abrasion resistance of the coated steel. For these analysis, used the ball cratering test to the formation of abrasive wear in three different roughness and the was calculated the specific wear rate through equations involving the crater's diameters, rotations, applied load and the sphere's radius.*

Keywords: *Diamond-like Carbon, Ball Cratering Test, Roughness, Micro Abrasive Wear, Specific Wear Rate.*