

INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO CONTRA CORPO NO ENSAIO DE MICROABRASÃO

Pâmella Jureves Esteves, pjesteves_pje@hotmail.com¹

Marcelo Camargo Severo de Macêdo, mcamargo0207@gmail.com¹

Roberto Martins Souza, robertosouza@usp.br²

Cherlio Scandian, cherlio@hotmail.com¹

¹Universidade Federal do Espírito Santo – Centro Tecnológico – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Fernando Ferrari, 514 – Vitória - ES, 29075-910

²Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Luciano Gualberto, 380 - Butantã, São Paulo - SP, 05508-010

Resumo: Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da velocidade angular do contra corpo esférico no ensaio de microabrasão, no que tange ao coeficiente e micromecanismo de desgaste. Para isso, foram realizados ensaios de microabrasão na configuração esfera fixa, em uma amostra de aço AISI 1020 e contra corpo de aço temperado AISI 52100, utilizando velocidades de rotação de 40, 80 e 150 rpm, com carga normal aplicada de 0,2 e 0,4 N. Os resultados mostraram que o aumento da velocidade de rotação da esfera gera uma diminuição do coeficiente de desgaste, para as duas cargas empregadas. A análise dos micromecanismos de desgaste foi feita utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Palavras-chave: microabrasão, velocidade angular, coeficiente de desgaste, micromecanismo de desgaste

1. INTRODUÇÃO

O ensaio de microabrasão por esfera rotativa consiste em um contra corpo esférico pressionado contra um corpo de prova, na presença de uma solução abrasiva, gotejada na região de contato. O teste possui um princípio de operação fácil e, em geral, os resultados apresentam alta repetibilidade. O ensaio é largamente empregado no estudo do comportamento de finas camadas de revestimento e materiais com diversas finalidades, quando expostos a abrasão em escala micrométrica. O ensaio dispõe de duas configurações principais, sendo o contra corpo esférico fixado a um eixo de rotação (ensaio de microabrasão por esfera fixa) ou livre sobre um eixo de rotação (ensaio de microabrasão por esfera livre). Ambas configurações possuem vantagens e limitações (Gant e Gee, 2011).

Os abrasivos são arrastados para o contato pela esfera e a movimentação dessas partículas duras ocasionará o desgaste do material. A dinâmica do abrasivo na região de desgaste foi classificada por Trezona *et al.* 1999 como riscamento, partículas abrasivas engastam na superfície do contra corpo e riscam a amostra, ou como múltiplas indentações, onde os abrasivos são livres para rotacionar no contato e indentar a amostra. No segundo caso, já se observou que a taxa de desgaste pode ser até 10 vezes menor do que a taxa para o micromecanismo de riscamento, isso porque também ocorre gasto de energia entre as partículas (Rabinowicz *et al.*, 1961).

Portanto, para que ocorra o desgaste é necessário garantir que os abrasivos sejam arrastados para o contato, ou seja, um atrito inicial entre a esfera e as partículas. Allsopp *et al.* (1998) estudaram a influência da condição superficial da esfera e concluíram que é necessário que haja uma rugosidade na superfície da esfera, para que os abrasivos consigam se movimentar na zona de contato. As partículas angulares podem indentar no contra corpo e no corpo de prova. Para contra corpos lisos, estes autores (Allsopp *et al.*, 1998) observaram que os abrasivos tendem a indentar na entrada da zona de contato e permanecem estacionários. Já para os contra corpos condicionados (superfície rugosa), os abrasivos podem engastar na superfície da esfera e serem arrastados para dentro da região de desgaste.

Um outro fator que pode influenciar no atrito esfera/partículas abrasivas é a formação de um filme hidrodinâmico. Rutherford e Hutchings (1996) observaram que o aumento da velocidade influencia na espessura do filme hidrodinâmico e, combinado com o efeito do tamanho da partícula abrasiva, leva a uma diminuição do volume desgastado.

Gee *et al.* (2003) também afirmaram, em seu trabalho para padronizar o ensaio microabrasivo, haver influência da velocidade sobre o efeito hidrodinâmico. Porém, não encontraram evidências claras de como a suspensão lubrifica os contatos entre a esfera, a partícula abrasiva e a amostra

Bethke e Schiffmann apud Gee *et al.* (2003) realizaram ensaio de microabrasão na configuração esfera fixa para corpo de prova de aço-ferramenta e encontraram que o volume desgastado é independente da velocidade.

Para os ensaios de microabrasão feitos na configuração esfera livre, Allsopp apud Gee *et al.* (2003) mostrou que o volume desgastado decresceu com o aumento da velocidade e justificou que tal resultado ocorreu devido ao aumento da tendência da esfera escorregar no eixo quando aumenta-se a velocidade.

Bello e Wood (2003) realizaram um estudo sobre o comportamento tribológico de revestimentos de poliamida 11 e dentre os parâmetros variados encontra-se a velocidade. Para as condições estudadas pelos pesquisadores, o aumento a velocidade gerou um comportamento complexo do coeficiente de desgaste, que ora aumentou com o aumento da velocidade e ora diminuiu. A justificativa usada é que o aumento da velocidade pode gerar um filme hidrodinâmico entre a esfera e o revestimento e resultar no comportamento observado, como já havia sido observado.

Considerando-se as tendências descritas na literatura, o objetivo deste trabalho é avaliar a variação do coeficiente de desgaste quando aumenta-se a velocidade do contra corpo e observar se ocorrem mudanças nos micromecanismos de desgaste para as velocidades angulares de 40, 80 e 150 rpm com a carga de 0,2 e 0,4 N, mantendo fixas a distância deslizada (239,4 m) e a concentração abrasiva (0,1 gSiC/cm³H₂O).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram executados no micro-abrasômetro TE-66 de fabricação Plint, utilizando como contra corpo uma esfera de aço temperado AISI 52100, diâmetro de 25,4 mm e corpo de prova de aço AISI 1020. O abrasivo foi composto por partículas de carbeto de silício (SiC) com tamanho médio de 6,57 µm, diluídas em água destilada, para formar uma solução abrasiva com concentração de 0,1 gSiC/cm³H₂O e taxa padrão de gotejamento de 25 gotas/min.

Para avaliação da influência da velocidade de rotação da esfera, foram realizados ensaios com rotação de 40, 80 e 150 rpm em duas cargas diferentes, de 0,2 e 0,4 N. A distância total deslizada para cada ensaio foi fixada em 239,4 m.

Tabela 1. Tempo total de ensaio resultante da escolha da velocidade e distância deslizada.

Velocidade (rpm)	Tempo total de ensaio (min)
40	75
80	37,5
150	20

Os ensaios foram interrompidos a cada 300 revoluções para medição do diâmetro da calota, afim de verificar se o regime permanente de desgaste foi atingido e realizar o cálculo do coeficiente de desgaste através da equação de Rabinowich (Trezona *et al.*, 1999):

$$k = VSN \quad (1)$$

Onde V é o volume da cratera de desgaste, S é a distância deslizada e N é a carga normal aplicada.

O cálculo da espessura do filme hidrodinâmico foi feito pela equação de Reynolds em duas dimensões, para uma esfera de raio R deslizando contra um plano na presença de um fluido de viscosidade η , com uma carga normal aplicada N (Rutherford e Hutchings, 1996):

$$h_0 = 2R^3 (6\pi U \eta / 5N)^2 \quad (2)$$

Onde U é a velocidade tangencial e h_0 a espessura do filme.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para caracterização das partículas duras obteve-se imagens por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) e foi realizada, pelo princípio da difração a laser, a distribuição granulométrica do abrasivo através de um analisador a laser (faixa útil: 0,02 a 2000 µm), modelo Hydro 2000MU, da Malvern Instruments Ltda. A curva obtida (Fig. 1) apresentou uma tendência bimodal, que também foi observada nas imagens das partículas.

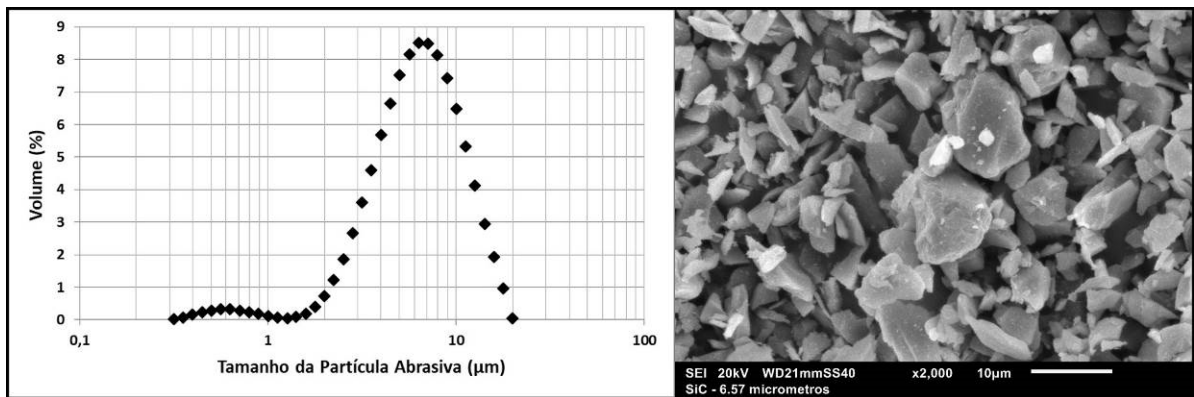


Figura 1. Curva de distribuição granulométrica e imagem de MEV, detector de elétrons secundários, aumento de 2000x, das partículas abrasivas.

O diâmetro da zona desgastada foi medido entre as interrupções dos ensaios, gerando um gráfico de coeficiente de desgaste em função do número de revoluções para os ensaios realizados, como mostrado na Fig. 2.

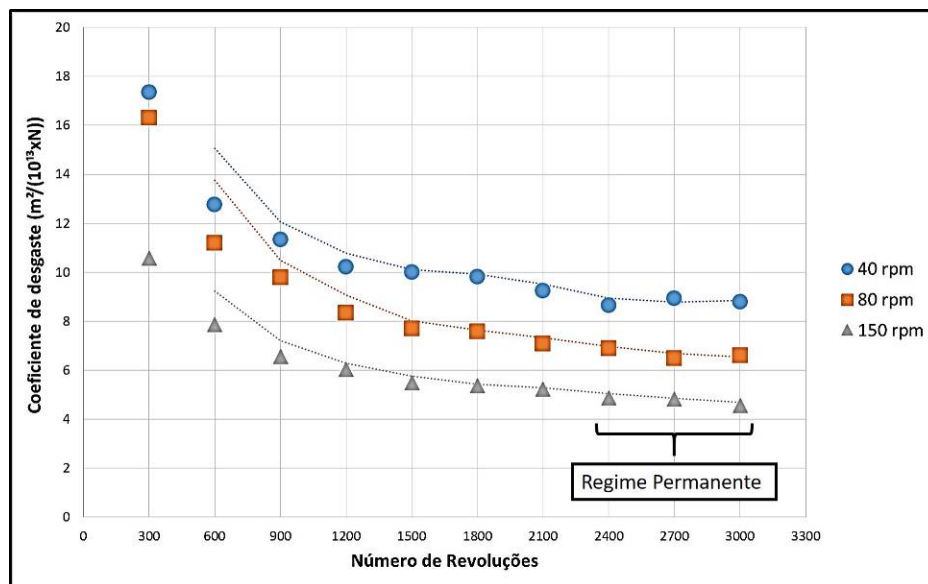


Figura 2: Coeficiente de desgaste pelo número de revoluções para carga aplicada de 0,2 N.

O coeficiente de desgaste para cada condição foi dado pela média dos três últimos pontos em regime permanente, que foi definido a partir do instante em que a variação no coeficiente de desgaste calculado é menor ou igual a 7 %. A Figura 3 mostra uma comparação entre os coeficientes de desgaste para as diferentes velocidades e cargas, o desvio padrão foi obtido dos coeficientes médios dos três ensaios.

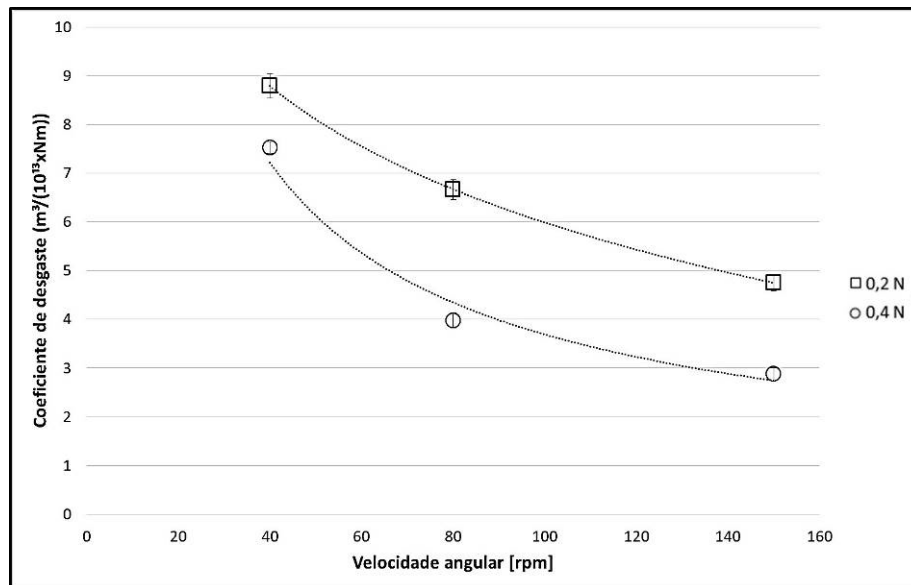


Figura 3: Coeficiente de desgaste em função da velocidade angular.

Entre a maior (150 rpm) e a menor (40 rpm) rotação foi possível observar uma redução na média de 45,9% do coeficiente de desgaste para a carga de 0,2 N e de 61,9 % para a carga de 0,4 N. Estes resultados indicam que o aumento da rotação levou a uma diminuição sistemática do coeficiente de desgaste.

Uma das hipóteses para explicar a diferença entre os coeficientes de desgaste é o efeito da formação e/ou aumento da espessura de uma camada hidrodinâmica formada pela solução abrasiva. Pela equação de Reynolds, foi obtido que um aumento da velocidade resultou em um aumento da espessura do filme lubrificante (h_0) (Figura 4) (Rutherford e Hutchings, 1996).

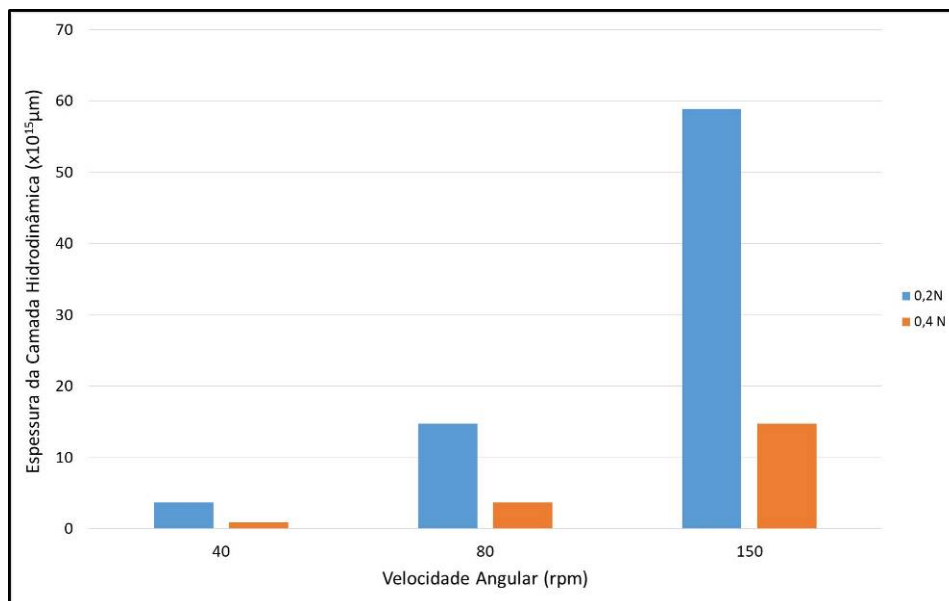


Figura 4: Espessura da camada hidrodinâmica em função da velocidade.

O aumento da lubrificação em desgaste por partículas duras, segundo Hutchings (1992), resulta em uma diminuição do atrito, fazendo com que as partículas mais angulosas tenham facilidade de indentar no contato. Com isso, o filme de lubrificação pode agir de duas maneiras: a primeira seria expulsando ou dificultando a entrada de abrasivos na região de contato e a segunda seria influenciando a dinâmica dos abrasivos no contato entre a esfera e a amostra.

O efeito da velocidade sobre o filme hidrodinâmico foi observado por Gee *et al.* 2003, porém não se sabe como a suspensão lubrifica os contatos entre a esfera, a partícula abrasiva e a amostra.

Uma comparação entre as imagens de MEV, com sensor de elétrons retroespalhados, mostrou um número crescente de abrasivos entre riscos e engastados na região de contato em função da velocidade. O acréscimo da velocidade resultou na tendência das partículas duras engastarem na amostra, aumentando a quantidade de abrasivos na superfície desgastada (Figura 5).

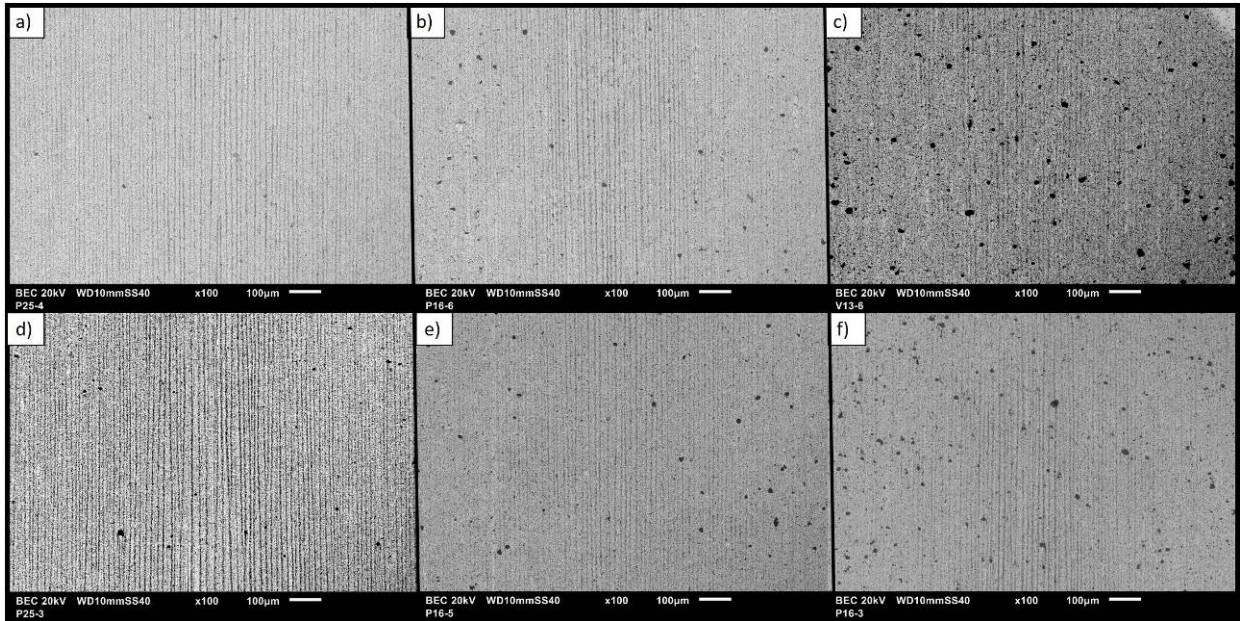


Figura 5: Análise MEV, elétrons retroespalhados, aumentos de 100x. Calotas geradas com carga de 0,2 N: (a) 40 rpm; (b) 80 rpm; (c) 150 rpm; e calotas geradas com carga de 0,4 N: (d) 40 rpm; (e) 80 rpm; (f) 150 rpm. Os pontos escuros são abrasivos aderidos nas superfícies.

Ainda pode-se observar que o incremento da velocidade possibilitou que abrasivos maiores ($10\ \mu\text{m}$) fossem engastados nas amostras, como observado na Fig. 6.

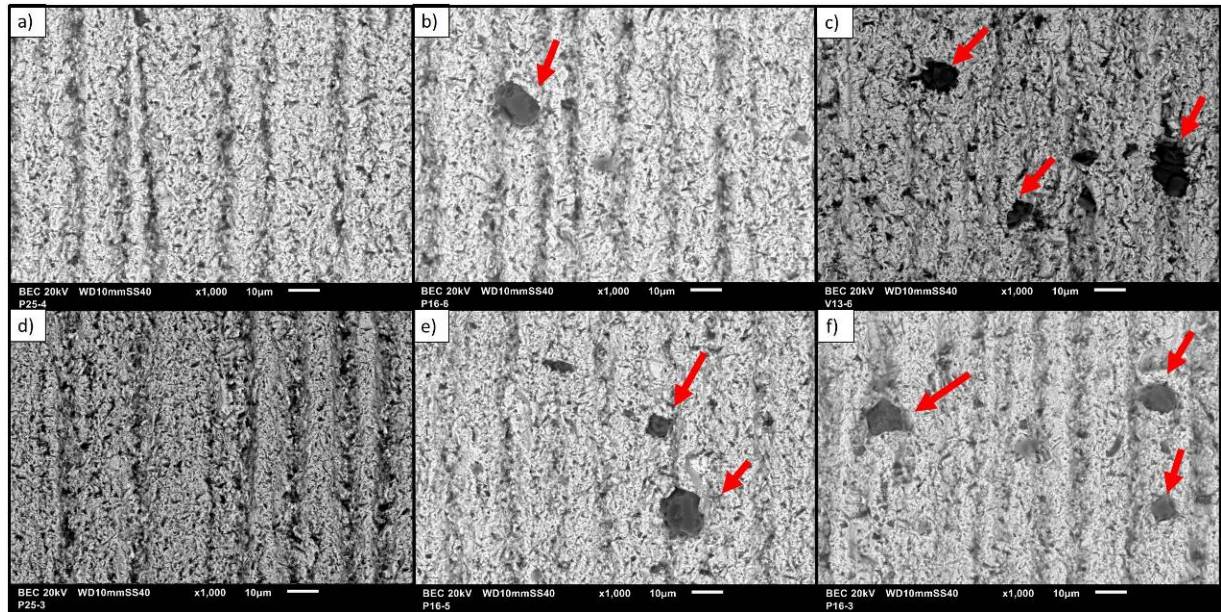


Figura 6: Análise MEV, elétrons retroespalhados, aumentos de 1000x. Calotas geradas com carga de 0,2 N: (a) 40 rpm; (b) 80 rpm; (c) 150 rpm; e calotas geradas com carga de 0,4 N: (d) 40 rpm; (e) 80 rpm; (f) 150 rpm. As setas indicam os abrasivos de SiC incrustados nas calotas de desgaste.

Nas análises do micromecanismos de desgaste, por meio do MEV, foi possível observar riscamento nas superfícies das calotas e rolamento de partículas entre os sulcos (Cozza, 2014), para todas as velocidades e cargas utilizadas (Figuras 7 e 8).

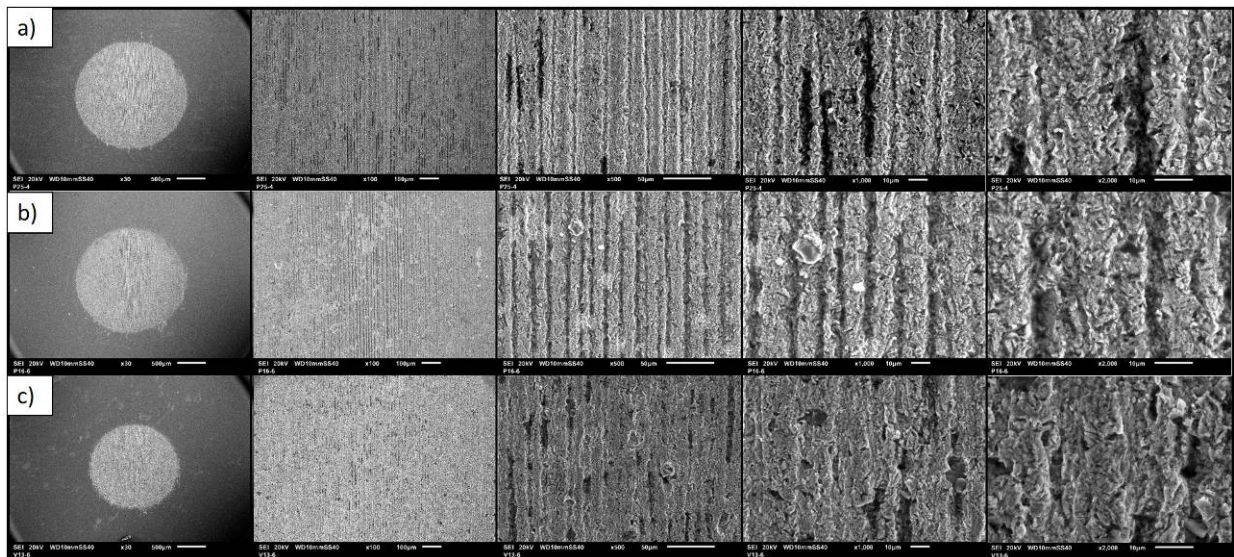


Figura 7: Análise MEV, elétrons secundários, calota de desgaste obtidas com carga 0,2 N - aumentos 30x, 100x, 500x, 1000x e 2000x. (a) 40 rpm; (b) 80 rpm; (c) 150 rpm.

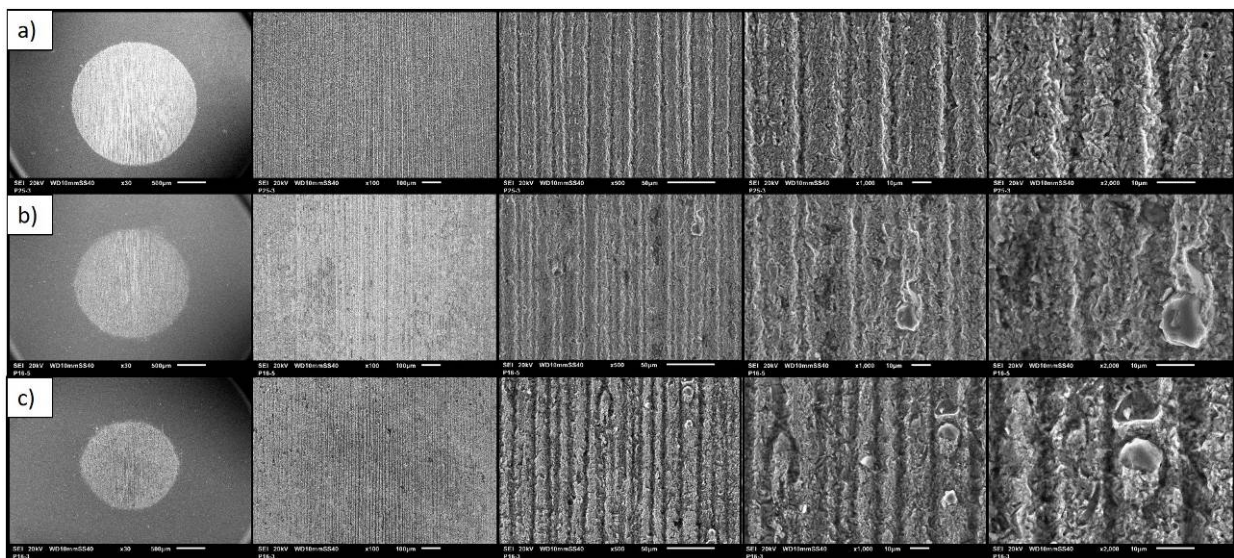


Figura 8: Análise MEV, elétrons secundários, calota de desgaste obtidas com carga 0,4 N - aumentos 30x, 100x, 500x, 1000x e 2000x. (a) 40 rpm; (b) 80 rpm; (c) 150 rpm.

De acordo com o aumento da velocidade, o espaçamento entre os riscos diminuiu e foi encontrado uma quantidade de indentações mais significativa, com maior profundidade e aumento de deformação plástica, que já havia sido observado por Hamdi *et al.* (2003). Estes autores realizaram ensaios para um único grão em alta velocidade e verificaram diversos riscos onde a deformação foi principalmente plástica.

4. CONCLUSÃO

Para os ensaios de microabrasão realizados na configuração esfera fixa com rotações de 40, 80 e 150 rpm, foi concluído que:

- O aumento da velocidade de rotação da esfera reduziu em 45,9% o coeficiente médio de desgaste para a carga de 0,2 N e 61,9 % para a carga de 0,4 N
- O aumento da velocidade de rotação da esfera pode influenciar na formação e/ou espessura da camada hidrodinâmica.
- O micromecanismo encontrado foi riscamento com microrolamento entre os sulcos. A medida em que a velocidade aumentou, o espaçamento entre os riscos diminuiu e ocorreu um aumento no tamanho das indentações, gerando aumento da deformação plástica;

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

6. REFERÊNCIAS

- Allsopp, D. N., 1999, "Abrasive Wear of Bulk Materials and Hard Coatings", Ph. D Thesis, University Cambridge, Cambridge, United Kingdom.
- Allsopp, D.N., Trezona, R.I., Hutchings, I.M., 1998, "The Effects of Ball Surface Condition in the Micro-Scale Abrasive Wear Test", Tribology Letters, 259-264.
- Bello, J.O., Wood, R.J.K., 2003, "Grooving Micro-Abrasion of Polyamide 11 Coated Carbon Steel Tubulars for Downhole Application", Wear, 255, 1157-1167.
- Bethke, R., Schiffmann, K., 2001, "Ball Cratering Wear Test: Review of the State of the Art", Fraunhofer Institut für Schicht und Oberflächentechnik, Braunschweig.
- Cozza, R.Z., 2014, "Third Abrasive Wear Mode: Is It Possible?", Journal of Materials Research and Technology, p 191-193.
- Gant, A.J., Gee, M.G., 2011, "A Review of Micro-Scale Abrasion Testing", J. Phys. D: Appl. Phys. 44 073001 15 pp.
- Gee, M.G., Gant, A., Hutchings, I., Bethke, R., Schiffman, K., Van Acker, K., Poulat, S., Gachon, Y., von Stebut, J., 2003, "Progress towards Standardisation of Ball Cratering", Wear, 255, 1-13.
- Hamdi, H., Dursapt, M., Zahouani, H., 2003, "Characterization of Abrasive Grain's Behavior and Wear Mechanisms", Wear, 254, 1294-1298.
- Hutchings, I. M., 1992, "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials", London: Edward Arnold.
- Rabinowicz, E., Dunn, L.A., Russell, P.G., 1961, "A Study of Abrasive Wear under Three-Body Conditions", Wear, 4, 345-355.
- Rutherford, K.L., Hutchings, I.M., 1996, "A Micro-Abrasive Wear Test, with Particular Application to Coated Systems", Surface and Coatings Technology, Vol. 79, p. 231-239.
- Trezona, R.I., Allsopp, D.N., Hutchings, I.M., 1999, "Transitions between Two-Body and Three-Body Abrasive Wear: Influence of Test Conditions in the Microscale Abrasive Wear Test", Wear, 225-229, 205-214.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EFFECT OF BALL SPEED IN THE MICRO-SCALE ABRASION TEST

Pâmella Jureves Esteves, pjesteves_pje@hotmail.com¹

Marcelo Camargo Severo de Macêdo, mcamargo0207@gmail.com¹

Roberto Martins Souza, robertosouza@usp.br²

Cherlio Scandian, cherlio@hotmail.com¹

¹Federal University of Espírito Santo, Department of Mechanical Engineering, CTIII, Vitória - ES, 29075-910, Brazil

²Polytechnic School of the University of São Paulo, São Paulo - SP, 05508-010, Brazil

Abstract. The objective of this study is to analyze the effect of the ball speed in the micro-scale abrasive wear, regarding the wear coefficient and wear modes. Micro-scale abrasive wear tests were conducted in fixed ball configuration, in a sample of AISI 1020 steel and counted body of tempered AISI 52100 steel, using rotation speeds of 40, 80 and 150 rpm, with normal load of 0,2 and 0,4 N. The results showed that the increase of the ball rotation speed creates a decrease in the coefficient wear for the two loads employed. The analysis of the wear modes was conducted by scanning electron microscope (SEM).

Keywords: micro-scale abrasion, rotation speed, wear coefficient, modes wear