

PROJETO, CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE DESGASTE MICRO-ABRASIVO POR ESFERA ROTATIVA LIVRE PARA A MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO

Ronaldo Câmara Cozza¹
Rodrigo de Souza Suzuki²
Cláudio Geraldo Schön³

Resumo

O propósito deste trabalho é apresentar uma configuração de equipamento “ball-cratering” para a medição do coeficiente de atrito. Duas células de carga foram utilizadas, de forma a medir, em tempo real, as forças “normal” e “tangencial” durante os ensaios e, a partir destas, calcular o coeficiente de atrito desenvolvido. Para a validação do equipamento projetado e construído, ensaios foram conduzidos sob um corpo-de-prova de aço-ferramenta AISI H10 (temperado e revenido) junto à uma esfera de aço AISI 52100 (temperado e revenido) e solução abrasiva, composta por SiC e água destilada; diferentes valores de força normal e distância de deslizamento foram definidos. Os resultados mostraram que, devido às próprias condições de ensaio, agiu o desgaste abrasivo por rolamento e, em relação ao equipamento desenvolvido, o mesmo apresentou excelente funcionalidade e reprodutibilidade, tanto em relação à formação das calotas de desgaste quanto à medição do coeficiente de atrito.

Palavras-chave: Desgaste; Abrasão; Ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa.

DESIGN, BUILDING AND VALIDATION OF A BALL-CRATERING WEAR TEST EQUIPMENT BY FREE-BALL TO MEASURE THE COEFFICIENT OF FRICTION

Abstract

The purpose of this work is to present a ball-cratering equipment configuration to measure the coefficient of friction. Two load cells were used to measure, in real time, the “normal” and “tangential” forces during the experiments to calculate the coefficient of friction. Micro-abrasive wear tests were conducted on an AISI H10 tool steel specimen, with a ball of AISI 52100 steel and an abrasive slurry, prepared with SiC and distilled water; different values of normal force and sliding distance were defined for the wear experiments to investigate and validate the constructed machine. The results showed that due to test conditions, it was observed the occurrence of rolling abrasion. The equipment showed excellent functionality and reproducibility, in terms of formation of the wear craters and measurement of the coefficient of friction.

Keywords: Wear; Abrasion; Ball-cratering wear test.

¹Pós-Doutorando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Professor Adjunto II, Centro Universitário da FEI, Professor Associado I, CEETEPS, FATEC-Mauá, São Bernardo do Campo, SP, Brasil. E-mail: rcamara@fei.edu.br; ronaldo.cozza@fatec.sp.gov.br

²Estudante de Engenharia Mecânica, aluno de Iniciação científica, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, SP, Brasil. E-mail: rodrisuzuki@gmail.com

³Físico, Professor Associado 3, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: schoen@usp.br

I EQUIPAMENTOS “BALL-CRATERING”: REVISÃO LITERÁRIA

Desde a sua apresentação à comunidade científica voltada à Tribologia, em meados de 1997 [1], pelo Prof. Ian M. Hutchings – Universidade de Cambridge, os equipamentos de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa vêm demonstrando aceitação e desenvoltura no estudo do comportamento ao desgaste micro-abrasivo de materiais.

Desde então, diferentes construções mecânicas de equipamentos para este tipo de ensaio vêm sendo propostas por diversos pesquisadores, dividindo-se em duas configurações: i) equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa e ii) equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre.

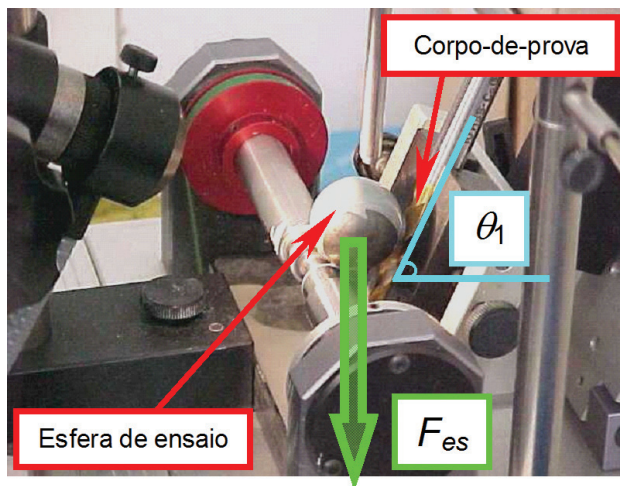


Figura 1. Equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre [2]. Força normal em função do peso da esfera (F_{es}) e do ângulo θ_1 .

Pelas referências bibliográficas mencionadas neste artigo, a configuração “esfera livre” foi a primeira que surgiu, oferecendo fácil construção e simplicidade de operação. A Figura 1 [2] mostra este tipo de equipamento, em que a força normal que age sobre o corpo-de-prova depende do peso da esfera (F_{es}) e da inclinação θ_1 da amostra.

Em relação à configuração mecânica “esfera fixa”, o princípio de aplicação da força normal sobre o corpo-de-prova se baseia no sistema “peso-morto”, como esquematizado na Figura 2.

Uma importante contribuição para o aprimoramento do aparato mecânico “esfera-fixa” foi dada pelos Professores Ronaldo Câmara Cozza e Roberto Martins de Souza, quando a excentricidade da esfera de ensaio, até então sendo considerada impossível de ser retirada por Gee e Wicks [3], foi completamente anulada junto ao sistema projetado e construído [4].

Diferente do sistema definido para o tribômetro Plint TE 66 (Micro-scale abrasion tester – Figura 3a), em que a esfera de ensaio é fixada por (entre) dois eixos, no equipamento desenvolvido, a esfera é “colada” no eixo de ensaio (Figura 3b [4]). Uma superfície côncava de raio $R = 12,7 \text{ mm}$ ($1/2''$) é, inicialmente, recoberta com adesivo à base de cianoacrilato de etila (Ciano CMI – Anaeróbicos S.A.) e, em seguida, a esfera de ensaio é pressionada contra esta, fixando-se na mesma. Para zerar a excentricidade da esfera, o eixo de ensaio foi projetado de forma que fosse possível descolar, em um mesmo plano, a esfera de ensaio em duas direções perpendiculares (Figura 3c [4]).

Ambas as configurações apresentam excelente desempenho na análise do volume de desgaste (V) [5], taxa de desgaste (Q) [6], coeficiente de desgaste (k) [7], regime permanente de desgaste [8] e ação dos modos de desgaste micro-abrasivos [9,10], mas a medição do coeficiente de atrito (μ) ainda é um assunto pouco explorado neste tipo de ensaio.

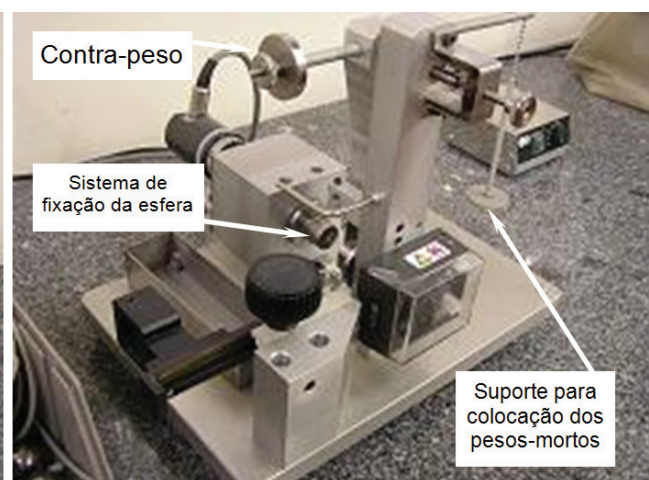
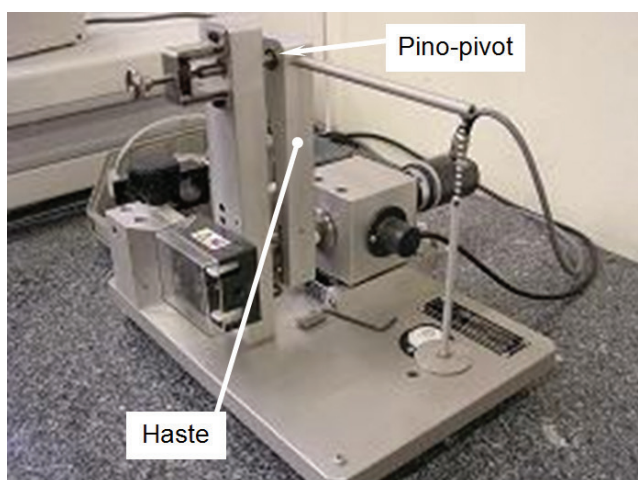


Figura 2. Equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa – modelo Plint TE 66 (Micro-scale abrasion tester), fabricado pela Phoenix Tribology Ltd – Inglaterra. Fonte: Foto - cortesia do Prof. Amílcar Lopes Ramalho, Universidade de Coimbra, Portugal.

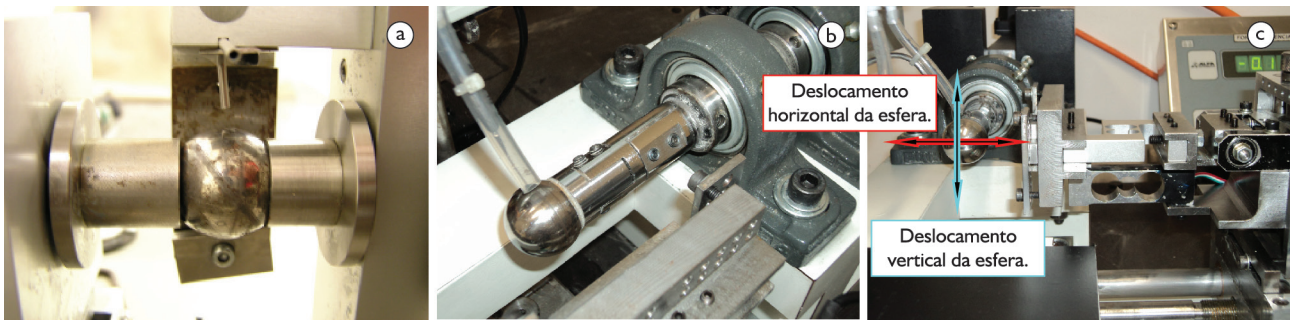


Figura 3. (a) Método de fixação da esfera de ensaio no tribômetro Plint TE 66 (Micro-scale abrasion tester). Foto: Cortesia do Prof. Amílcar Lopes Ramalho, Universidade de Coimbra – POR; (b) método alternativo de fixação da esfera de ensaio, proposto na Tese de Doutorado de Ronaldo Câmara Cozza [4] e (c) deslocamento em duas direções perpendiculares da esfera de ensaio [4].

As primeiras pesquisas publicadas que abordaram, de forma teórica, a determinação do coeficiente de atrito em ensaios “ball-cratering” foram conduzidas por Kusano, Rutherford e Hutchings [11,12] e, nestes trabalhos, o coeficiente de atrito foi calculado pela Equação 1, em função da força normal (N), do peso da esfera (F_{es}) e dos parâmetros geométricos θ_1 e θ_2 do equipamento, esquematizados na Figura 4 [11]. Como resultado, foi plotado o gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio, como mostra a Figura 5 [11].

$$\mu = \frac{F_{es} \sin(\theta_2) - \sin(\theta_1 + \theta_2)}{1 - \cos(\theta_1 + \theta_2)} \quad (1)$$

De fato, as primeiras pesquisas publicadas que realmente mediram, na prática, o coeficiente de atrito no sistema tribológico “esfera – partículas abrasivas – corpo-de-prova” foram realizadas pelos Professores Ronaldo Câmara Cozza, Deniol Katsuki Tanaka e Roberto Martins de Souza [4,13,14]. Com isso, continuando os trabalhos iniciados no então LFS – Laboratório de Fenômenos de Superfície/USP, o objetivo deste trabalho é apresentar uma configuração de equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre, hábil a medir o coeficiente de atrito no sistema tribológico “esfera – partículas abrasivas – corpo-de-prova”.

2 DESCRIÇÃO GERAL DO EQUIPAMENTO PROJETADO E CONSTRUÍDO

A Figura 6 [15] apresenta o equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre projetado e construído.

Foram utilizadas duas células de carga com a finalidade de controlar a força normal (N) e medir a força tangencial (T). A Figura 7 [15] mostra as posições que foram definidas para estas células de carga; o modelo das mesmas é S-5, fabricada pela empresa Alfa – Instrumentos Eletrônicos Ltda.

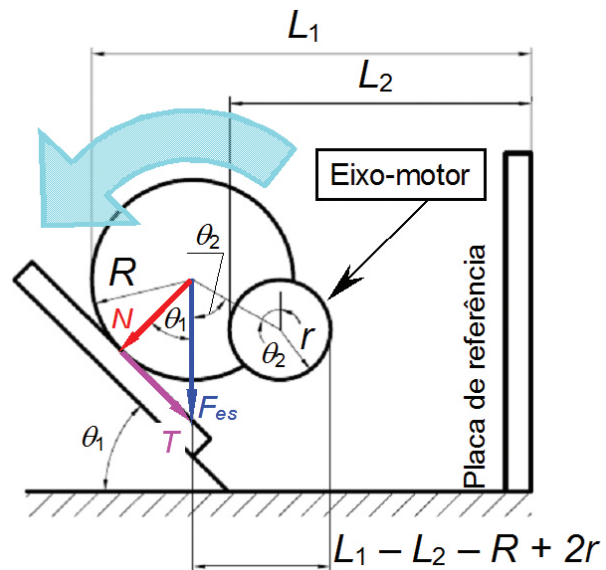


Figura 4. Parâmetros geométricos de um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre.

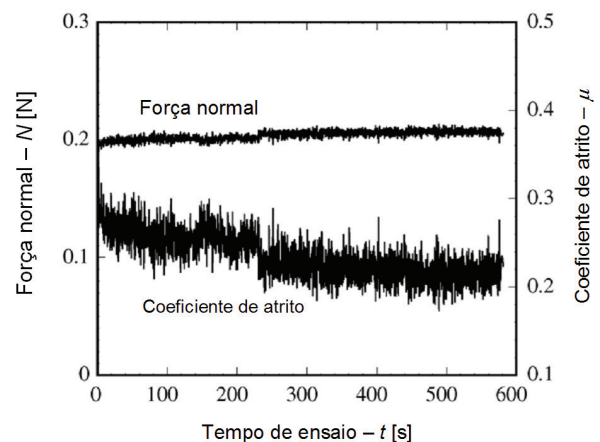


Figura 5. Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Resultados obtidos em um equipamento de configuração “esfera-livre” [11].

O eixo de ensaio apóia-se sobre dois mancais de rolamento (modelo do mancal: P 204; modelo do rolamento: Y204 V22 – série Y). Todo o sistema “eixo de

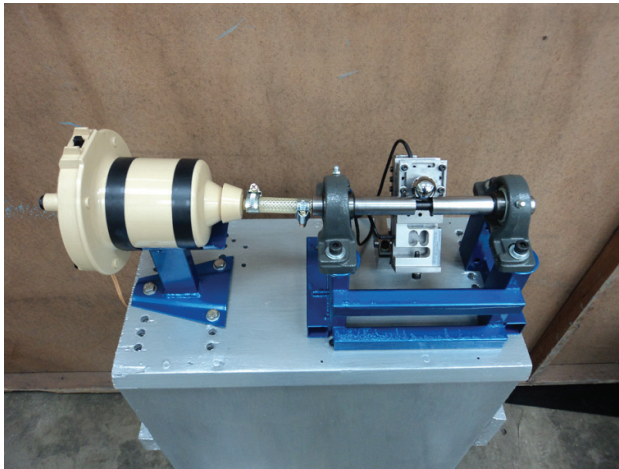


Figura 6. Equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre projetado e construído [15].

ensaio + mancais de rolamento” está fixo em um suporte de perfis de aço, projetado e construído com base nas dimensões do referido sistema.

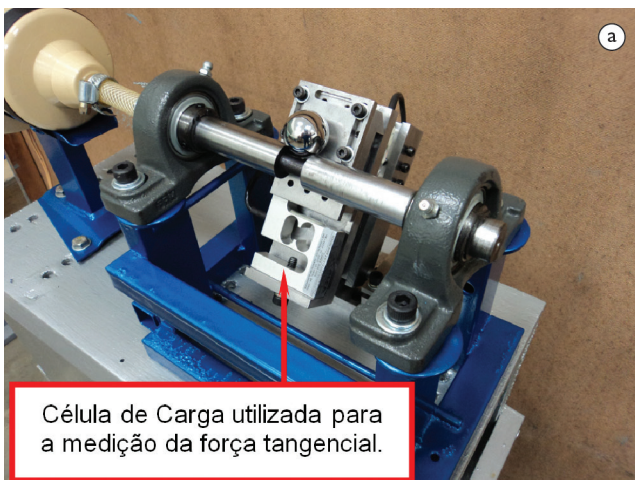
O acionamento do eixo é realizado por um motor elétrico monofásico de potência 130 W.

Durante os ensaios, a pasta abrasiva é inserida no sistema tribológico com o auxílio de um conta gotas.

3 ANÁLISE DA REPRODUTIBILIDADE DO EQUIPAMENTO PROJETADO E CONSTRUÍDO

3.1 Materiais

Foi utilizado um corpo-de-prova de aço-ferramenta AISI H10 (temperado e revenido), com dimensões de 16 mm x 16 mm x 50 mm. Para a análise de sua microestrutura, a superfície da mesma foi lixada, obedecendo a seguinte sequência de lixas: grão 220, 320, 400 e 600. Em seguida, a superfície foi polida com pastas diamantadas de diferentes granulometrias, na sequência de 6 μm , 3 μm e

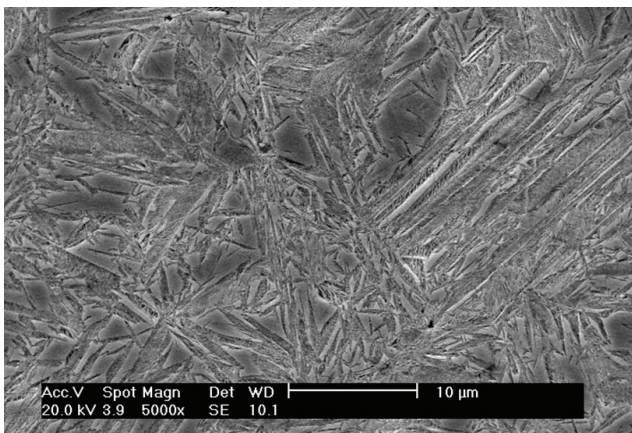


Célula de carga utilizada para a medição da força tangencial.



Célula de carga utilizada para o controle da força normal.

Figura 7. Células de carga destinadas ao controle da força normal e medição da força tangencial [15].



Elemento químico	% (em peso)
Si	0,81
Zr	0,42
S	0,26
V	0,19
Cr	0,65
Mn	1,68
Ni	0,46
Fe	Balanço

Figura 8. Composição química nominal e microestrutura do aço-ferramenta AISI H10, na condição “temperado e revenido”. Matriz martensítica contendo austenita retida. Ataqué com Nital 3% [4].

0,25 μm . A última etapa foi o ataque químico com Nital 3%. A Figura 8 [4] apresenta a microestrutura e a composição química nominal do aço, formada por uma matriz martensítica contendo austenita retida.

Foi utilizada uma esfera de aço AISI 52100 (temperado e revenido), de diâmetro 25,4 mm (1"). A preparação de sua superfície, para a caracterização metalográfica, foi realizada da mesma maneira e com os mesmos materiais utilizados para o aço-ferramenta AISI H10. Na Figura 9 [4] apresenta-se a microestrutura e a composição química nominal do aço AISI 52100, na condição "temperado e revenido". Nesta figura, observa-se a presença de carbonetos distribuídos homogeneamente na matriz do material.

A pasta abrasiva foi preparada com carbeto de silício (SiC) preto e água destilada. A Figura 10a [4] mostra uma micrografia eletrônica de varredura do pó abrasivo utilizado; a distribuição granulométrica deste material é exibida na Figura 10b [4], obtida por interferometria a laser, através do equipamento Granulometer 1064 – CILAS.

Com os mesmos valores de força e tempo (50 N e 15 s, respectivamente) adotados por Izhevskiy *et al.* [16], para a determinação da dureza do SiC, foram medidas as durezas Vickers do corpo-de-prova (aço-ferramenta AISI H10) e da esfera de ensaio (aço AISI 52100). De forma aleatória, foram realizadas treze indentações na superfície de cada material (uma esfera foi usinada de forma a obter-se uma superfície plana para a medição da dureza). Após os ensaios, descartou-se o valor de dureza obtido na primeira indentação. Em seguida, a dureza do material foi determinada pela média aritmética dos dez valores mais próximos entre si.

A Tabela 1 reúne os valores das durezas dos materiais utilizados (corpo-de-prova, esfera de ensaio e carbeto de silício) [4].

3.2 Procedimento Experimental

A Tabela 2 exhibe as condições de ensaio estabelecidas para os experimentos.



Figura 9. Composição química nominal e microestrutura do aço AISI 52100, na condição "temperado e revenido". Ataque com Nital 3% [4].

Elemento químico	% (em peso)
C	1,04
Mn	0,35
Si	0,25
Cr	1,45
Fe	Balanço

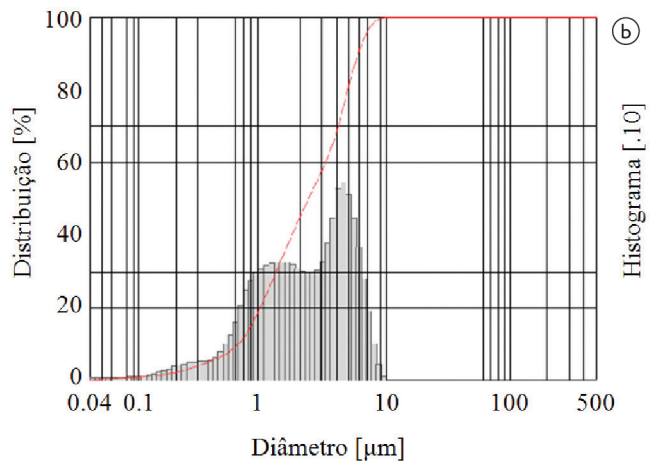
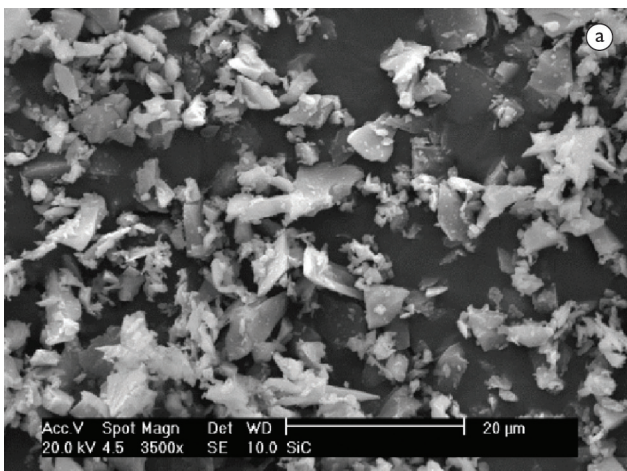


Figura 10. SiC: (a) micrografia eletrônica de varredura e sua (b) distribuição granulométrica [4].

Tabela 1. Durezas dos materiais utilizados neste trabalho [4,16]

	Material	Dureza – [HV]
Corpo-de-prova	Aço-ferramenta AISI H10	720 [4]
Esfera	Aço AISI 52100	856 [4]
Partículas abrasivas	SiC	(1.886-1.937) [16]

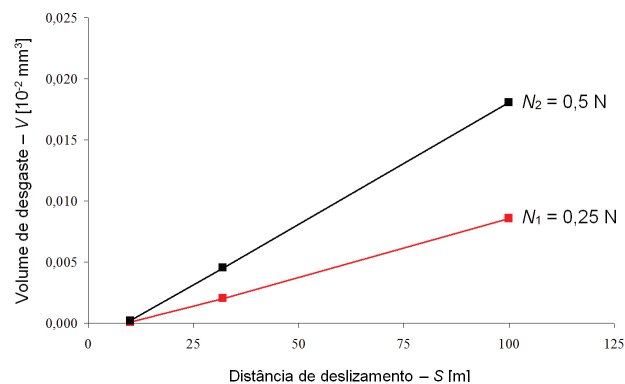
Tabela 2. Condições de ensaio definidas para os experimentos

Condição de ensaio ⇒	1	2	3
Força normal - N_1 [N]	0,25	0,25	0,25
Força normal - N_2 [N]	0,5	0,5	0,5
Fração volumétrica de SiC - C [%]	25 (com 75% água destilada)	25 (com 75% água destilada)	25 (com 75% água destilada)
Distância de deslizamento - S [m]	10	32	100
Rotação (esfera) - n [rpm]	≈ 75	≈ 75	≈ 75
Velocidade tangencial (esfera) - v [m/s]	≈ 0,1	≈ 0,1	≈ 0,1
Tempo de ensaio - t	100 s (1 min 40 s)	320 s (5 min 20 s)	1.000 s (16 min 40 s)
Quantidade de repetições	3	3	3

Dois valores de força normal foram selecionados para os ensaios: $N_1 = 0,25$ N e $N_2 = 0,5$ N.

Com base na Série de Renard R20/4 [17], foram fixadas três distâncias de deslizamento: $S_1 = 10$ m, $S_2 = 32$ m e $S_3 = 100$ m. Sendo o diâmetro da esfera fixo $D = 25,4$ mm e $n = 75$ rpm, os tempos de ensaio correspondentes são, respectivamente, $t_1 = 100$ s (1 min 40 s), $t_2 = 320$ s (5 min 20 s) e $t_3 = 1.000$ s (16 min 40 s). Três ensaios foram realizados para cada valor de S e a sequência foi, aleatoriamente, definida como: 10 m – 32 m – 32 m – 100 m – 10 m – 32 m – 100 m – 10 m e 100 metros [4]. No total, conduziram-se 18 ensaios.

Foi definida uma concentração de pasta abrasiva: 25% SiC e 75% água destilada, em volume [4].

**Figura 11.** Gráfico do volume de desgaste em função da distância de deslizamento. Erro máximo observado: $V = 3,6 \cdot 10^{-5}$ mm³.

3.3 Aquisição de Dados e Análise de Resultados

Os valores da força normal (N) e da força tangencial (T) foram registrados, simultaneamente, durante todos os ensaios, a cada $t = 20$ s, e o coeficiente de atrito (μ) foi calculado através da Equação 2:

$$\mu = \frac{T}{N} \quad (2)$$

A reprodutibilidade do equipamento foi analisada com base nos gráficos de $V = f(S)$, que deve apresentar um comportamento linear com a obtenção do Regime Permanente de Desgaste.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Obtenção do Regime Permanente de Desgaste – RPD

A Figura 11 exibe o gráfico do volume de desgaste (V) em função da distância de deslizamento (S) – $V = f(S)$.

Pela Figura 11, nota-se que o Regime Permanente de Desgaste – RPD, caracterizado pela relação linear entre volume de desgaste e distância de deslizamento, foi obtido, dado este, de relevante importância neste tipo de ensaio. Além disso, com o aumento da força normal, foi reportado um conseqüente aumento no volume de desgaste.

A Figura 12a apresenta uma cratera de desgaste gerada nos ensaios. Devido às baixas forças normais e elevada concentração de pasta abrasiva adotadas, todas as calotas apresentaram a ocorrência de desgaste abrasivo por rolamento (Figura 12b).

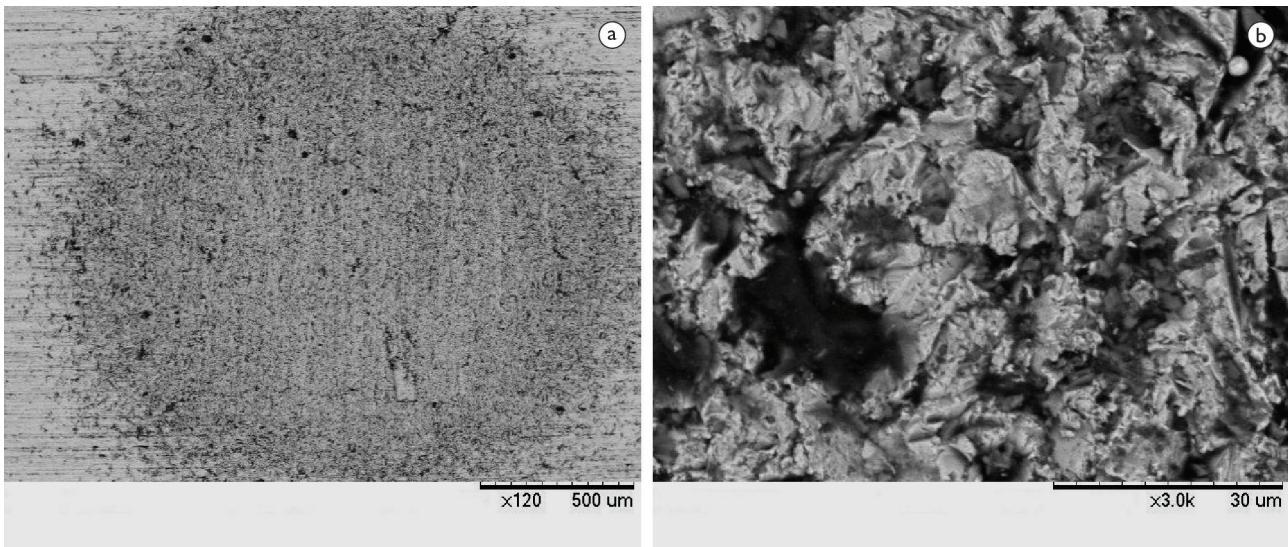


Figura 12. Exemplo de cratera de desgaste obtida nos experimentos.

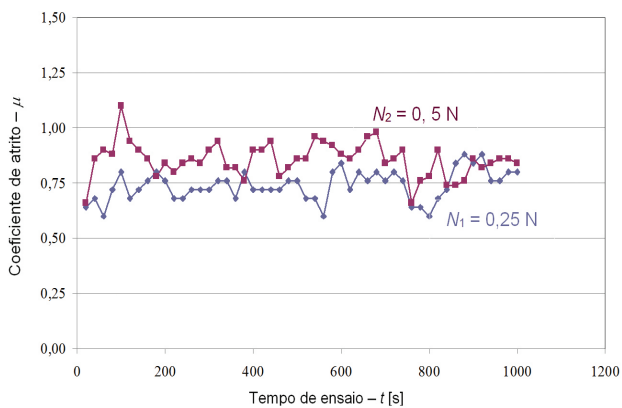


Figura 13. Gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Erro máximo observado: $\mu = 0,13$.

4.2 Coeficiente de Atrito

A Figura 13 exibe o comportamento do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Percebe-se que, independente do tempo de ensaio, o coeficiente de atrito manteve-se, aproximadamente, constante, concordando, qualitativamente, com a literatura [13,14].

REFERÊNCIAS

- 1 Rutherford KL, Hutchings IM. Theory and application of a micro-scale abrasive wear test. J Test Eval. 1997;25(2):250-60. <http://dx.doi.org/10.1520/JTEI1487>
- 2 Silva WM. Efeito da pressão de compactação e tamanho do pó de ferro na micro-abrasão do ferro sinterizado a vapor [dissertação de mestrado]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2003. p. 98.
- 3 Gee MG, Wicks MJ. Ball crater testing for the measurement of the unlubricated sliding wear of wear-resistant coatings. Surf Coat Technol. 2000;133-134:376-82. [http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00966-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00966-X)
- 4 Cozza RC. Estudo do desgaste e atrito em ensaios microabrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante [tese de doutorado]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2011. p. 327.

5 CONCLUSÕES

Para os materiais e condições de ensaios estabelecidos para a análise do desempenho do equipamento, observou-se que o mesmo apresentou bom funcionamento e reprodutibilidade, visto os comportamentos do volume de desgaste em função da distância de deslizamento e do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio ($V = f(S)$ e $\mu = f(t)$, respectivamente).

Tanto o comportamento do volume de desgaste quanto o comportamento do coeficiente de atrito apresentaram concordância qualitativa com a literatura, em que $V = f(S)$ mostra-se linear, indicando a obtenção do Regime Permanente de Desgaste, e $\mu = f(t)$ tende a manter-se constante com o tempo de ensaio, como prediz a literatura [4,13,14].

- 5 Ramalho A. Micro-scale abrasive wear of coated surfaces-prediction models. *Surf Coat Technol.* 2005;197:358-366. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.12.024>
- 6 Bose K, Wood RJK. Optimum tests conditions for attaining uniform rolling abrasion in ball cratering tests on hard coatings. *Wear.* 2005;258:322-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.018>
- 7 Silva WM, Binder R, Mello JDB. Abrasive wear of steam-treated sintered iron. *Wear.* 2005;258:166-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.042>
- 8 Cozza RC. Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo [dissertação de mestrado]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2006. p. 217.
- 9 Trezona RI, Allsopp DN, Hutchings IM. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. *Wear.* 1999;225-229:205-214. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00358-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00358-5)
- 10 Cozza RC, Mello JDB, Tanaka DK, Souza RM. Relationship between test severity and wear mode transition in micro-abrasive wear tests. *Wear.* 2007;263:111-16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.099>
- 11 Kusano Y, Hutchings IM. Sources of variability in the free-ball micro-scale abrasion test. *Wear.* 2005;258:313-17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.02.020>
- 12 Rutherford KL, Hutchings IM. A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems. *Surf Coat Technol.* 1996;79:231-39. [http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02461-1](http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972(95)02461-1)
- 13 Cozza RC, Tanaka DK, Souza RM. Friction coefficient and abrasive wear modes in ball-cratering tests conducted at constant normal force and constant pressure – Preliminary results. *Wear.* 2009;267:61-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2009.01.055>
- 14 Cozza RC, Tanaka DK, Souza RM. Friction coefficient and wear mode transition in micro-scale abrasion tests. *Tribol Int.* 2011;44:1878-89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2011.08.006>
- 15 Suzuki RS, Cozza RC. Projeto e construção de um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre [relatório de Iniciação Científica]. São Bernardo do Campo: Centro Universitário da FEI; 2011. p. 57.
- 16 Izhevskiy VA, Genova LA, Bressiani JC, Bressiani AHA. Liquid phase sintered SiC ceramics from starting materials of different grade. *Cerâmica.* 2004;50:261-267. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132004000300014>
- 17 Deutsches Institut für Normung E.V. Standard DIN 804: Machine tools; on-load speeds for machine tools; nominal values, limiting values, transmission ratios. Berlin; 1977.

Recebido em: 20/01/2014

Aceito em: 11/03/2014