






Projeto, construção e validação de um tribômetro “ball-cratering” de configuração mecânica “esfera-fixa”

Marcelo de Matos Macedo¹ 
João Henrique de Andrade Lima² 
Cláudio Moreira de Alcântara² 
Wílian da Silva Labiapari² 
Ronaldo Câmara Cozza^{1,3*} 

Resumo

O objetivo deste trabalho foi projetar, construir e validar um tribômetro para ensaios de desgaste micro-abrasivo, de configuração mecânica “ball-cratering” – “esfera-fixa”. Após o projeto e construção do equipamento, ensaios foram conduzidos com corpos-de-prova de aço-inoxidável ferrítico P410D com diferentes durezas; como contra-corpo, foi utilizada uma esfera de aço AISI 52100 e a lama abrasiva foi preparada com carbetto de silício preto – SiC e água destilada. Após a finalização dos ensaios, todas as crateras de desgaste foram analisadas por microscopia óptica, com o objetivo de medir o diâmetro das mesmas e calcular os respectivos volumes de desgaste. A validação do equipamento foi realizada com base no comportamento do volume de desgaste em função da dureza do corpo-de-prova e pela fundamentação teórica junto à *Equação de Archard*. O tribômetro apresentou excelente “reprodutibilidade”, caracterizada pelos baixos valores de desvios-padrão dos volumes de desgaste. A “funcionalidade” do mesmo foi condizente com a conceitualização científica provinda da *Equação de Archard*, em referência a capacidade do equipamento em gerar menores volumes de desgaste para maiores durezas superficiais.

Palavras-chave: Aço-inoxidável ferrítico; Desgaste micro-abrasivo; Ensaio “ball-cratering”.

Design, building and validation of a “ball-cratering” wear test equipment with “fixed-ball” mechanical configuration

Abstract

The purpose of this work was design, build and validate a ball-cratering wear tests tribometer of fixed-ball mechanical configuration. After the design and construction, micro-abrasive wear tests were conducted with specimen of P410D ferritic stainless steel of different hardness levels; as counter-body, was used a AISI 52100 steel and the abrasive slurry was prepared with black silicon carbide and distilled water. Finalizing the experiments, all wear craters were analyzed by optical microscope, with the aim of measure their diameters and calculate the respective wear volumes. The validation of the equipment was conducted based on the behavior of the wear volume as a function of the hardness and by *Archard Equation* theoretical foundation. The tribometer presented an excellent reproducibility, characterized by low values of wear volumes standard-deviation. Its functionality was consistent with the scientific conceptualization from *Archard Equation*, in reference of equipment capacity to generate low wear volumes related to high superficial hardnesses.

Keywords: Ferritic stainless steel; Micro-abrasive wear; Ball-cratering wear test.

¹Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza”, CEETEPS, Mauá, SP, Brasil.

²Aperam South America, Timóteo, MG, Brasil.

³Centro Universitário FEI, Fundação Educacional Inaciana “Padre Sabóia de Medeiros”, São Bernardo do Campo, SP, Brasil.

*Autor correspondente: rcamara@fei.edu.br



1 Configurações de tribômetros “ball-cratering” para ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa

Atualmente, os grandes centros de pesquisas e as indústrias metal-mecânica vêm demonstrando um grande e crescente interesse por pesquisas técnico-científicas acerca de desgaste micro-abrasivo gerado sob ensaios de configuração “ball-cratering”.

Este tipo de estudo é uma técnica que consiste na verificação do comportamento quanto ao atrito e desgaste de materiais metálicos [1-16] e não-metálicos [17-28], quando submetidos a condições tribológicas micro-abrasivas diversas.

Esquematizado, neste trabalho, pela Figura 1, o procedimento tribológico “ball-cratering” baseia-se na geração de uma cratera na superfície do corpo-de-prova, conforme descritivo publicado, inicialmente, por K.L. Rutherford e I.M. Hutchings [29]. Durante os ensaios, é inserido, entre o corpo-de-prova e a esfera de ensaio, um composto abrasivo, formado, por exemplo, por partículas abrasivas de carbeto de silício – SiC e água destilada.

Em relação aos tribômetros utilizados para este tipo de ensaio de desgaste por micro-abrasão, há duas configurações mecânicas clássicas de equipamentos: *i*) equipamento para ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera “rotativa-livre” (Figura 2) e *ii*) equipamento para ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera “rotativa-fixa” (Figura 3).

Na configuração mecânica “esfera-livre”, a força normal atuante no corpo-de-prova é gerada em função do peso da esfera de ensaio e do ângulo de inclinação do corpo-de-prova, como esquematizado na Figura 2.

Em relação ao tribômetro “ball-cratering” de configuração mecânica “esfera-fixa”, a força normal que age sobre o corpo-de-prova durante os ensaios pode ser aplicada por meio do sistema mecânico sugerido por R.C. Cozza [8,30,31], no qual o carregamento normal é gerado pelo movimento de translação do corpo-de-prova contra a esfera de ensaio [8,30,31] ou, classicamente, pelo sistema “peso-morto”, comumente observado na literatura científica [32-35].

Embora a configuração mecânica “esfera-livre” (Figura 2) ofereça simplicidade de projeto, construção e operação, os autores deste trabalho optaram pelo direcionamento a um tribômetro “ball-cratering” de configuração mecânica “esfera-fixa”, porque o mesmo apresenta maior rigidez mecânica em relação à configuração mecânica “esfera-livre”, conforme publicado por Cozza et al. [17] – a configuração mecânica “esfera-fixa” elimina o movimento relativo entre o eixo de ensaio e a esfera de ensaio, impondo restrições mecânicas ao movimento da esfera de ensaio na direção paralela à força normal aplicada [17].

Com isso, em parceria com a “ArcelorMittal – Aperam South America”, o objetivo deste trabalho foi projetar, construir e validar um equipamento “ball-cratering” de configuração “esfera-fixa”, para ensaios de desgaste micro-abrasivo.

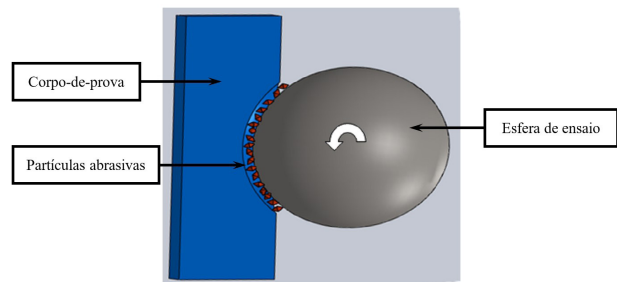


Figura 1. Representação esquemática do ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, quando da formação de uma cratera de desgaste no material sob teste.

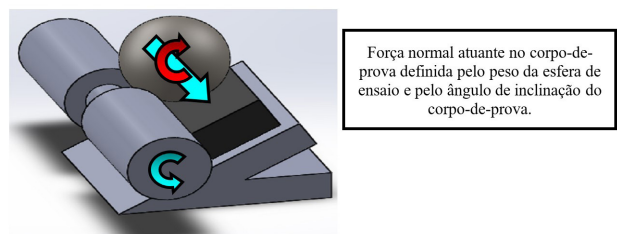


Figura 2. Princípio mecânico de um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera “rotativa-livre”, em que a carga de ensaio é determinada em função do peso da esfera e do ângulo de inclinação do corpo-de-prova.

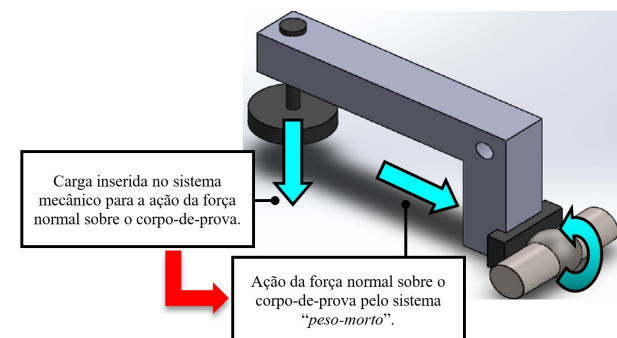


Figura 3. Princípio mecânico de um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera “rotativa-fixa”, no qual é utilizado um sistema “peso-morto” para aplicar a força normal sobre o corpo-de-prova.

2 Montagem do tribômetro “ball-cratering”

A Figura 4 apresenta o tribômetro “ball-cratering” projetado e construído. Possuindo configuração mecânica “esfera-fixa”, o eixo de ensaio foi dividido em duas peças distintas, denominadas de “eixo de ensaio motor” e “eixo de ensaio movido” (Figura 4a). Por sua vez, cada uma destas partes possui uma face com raio côncavo de $R_c = 12,7$ mm ($R_c = 1/2$ ”), possibilitando, assim, a acomodação de uma esfera de ensaio de diâmetro $D = 25,4$ mm ($D = 1$ ”). Para a aplicação da força normal, foi adotado o sistema “peso-morto” (Figura 4b).

Por meio de um relógio-comparador (Figura 5), reportou-se uma excentricidade da esfera de ensaio de $e = 0,04$ mm, valor este, menor do que o valor registrado por Cozza [1], na magnitude de $e = 0,05$ mm.

O “eixo de ensaio motor” é acionado por um motor elétrico de corrente-contínua de potência $P = 30$ W (Figura 4b), rotacionando sob $n = 56$ rpm.

Finalmente, a fixação do corpo-de-prova é realizada pelo dispositivo exibido na Figura 6.

3 Análise do funcionamento do tribômetro “ball-cratering”

3.1 Materiais

Foram utilizados seis corpos-de-prova de aço-inoxidável ferrítico P410D, condicionado sob diferentes parâmetros de tratamento térmico, resultando, conseqüentemente, em valores distintos de durezas (H_{CP}), conforme exibido na Tabela 1.

Cada corpo-de-prova possuía dimensões de $27 \times 10 \times 5$ [mm]. Precedendo os ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, a superfície de cada corpo-de-prova foi lixada, obedecendo-se a seguinte seqüência de lixas: grão #400 e grão #600. A Figura 7 mostra um dos corpos-de-prova antes dos ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa.

Como contra-corpo, foi utilizada uma esfera de aço AISI 52100 (temperado e revenido), de diâmetro $D = 25,4$ mm ($D = 1$ ”) e dureza $H_{ES} = 856$ HV [8].

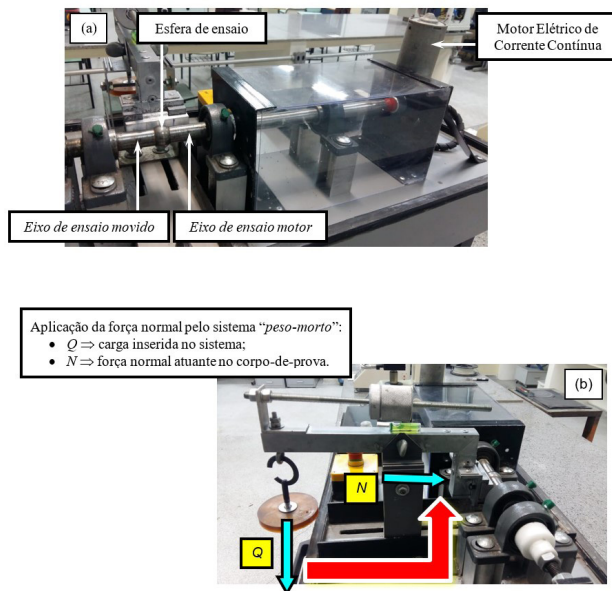


Figura 4. Tribômetro “ball-cratering” de configuração mecânica “esfera-fixa”, projetado e construído: (a) “Eixo de ensaio motor”, “esfera de ensaio” e “eixo de ensaio movido” montados no tribômetro; (b) aplicação da força normal pelo sistema “peso-morto”.

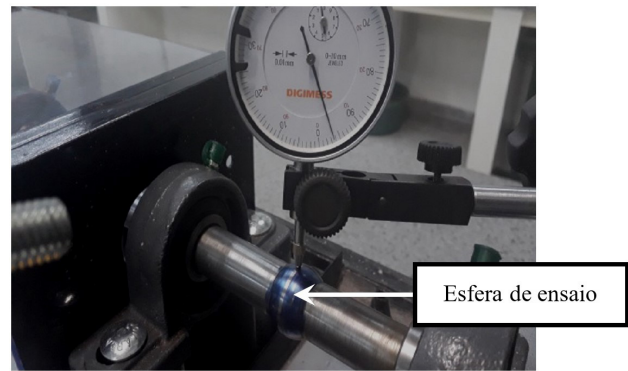


Figura 5. Verificação da excentricidade da esfera de ensaio com o auxílio de um relógio comparador. Excentricidade de $e = 0,04$ mm.

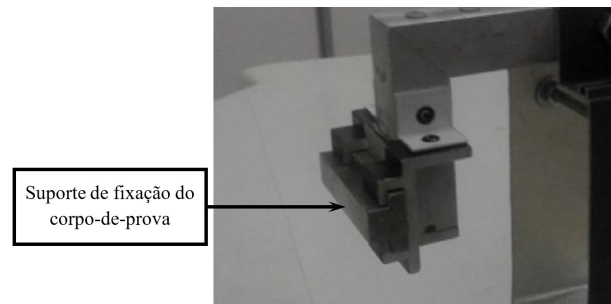


Figura 6. Dispositivo para fixação do corpo-de-prova.



Figura 7. Imagem do “Corpo-de-prova 5”, antes dos ensaios “ball-cratering”.

Tabela 1. Durezas dos materiais utilizados neste trabalho

	Material	Dureza – [HV]
Corpo-de-prova 1	Aço-inoxidável ferrítico P410D	177
Corpo-de-prova 2	Aço-inoxidável ferrítico P410D	200
Corpo-de-prova 3	Aço-inoxidável ferrítico P410D	222
Corpo-de-prova 4	Aço-inoxidável ferrítico P410D	238
Corpo-de-prova 5	Aço-inoxidável ferrítico P410D	297
Corpo-de-prova 6	Aço-inoxidável ferrítico P410D	304
Esfera de ensaio	Aço AISI 52100	856 [8]
Material abrasivo	Carbeto de silício – SiC (preto)	1886-1937 [8]

A lama abrasiva foi preparada com carbetto de silício (SiC) preto – tamanho médio de partícula abrasiva de $a_p = 3 \mu\text{m}$ – e água destilada. A dureza do material abrasivo está compreendida entre $H_{PA} = 1886 \text{ HV}$ e $H_{PA} = 1937 \text{ HV}$ [8].

A Tabela 1 reúne os valores das durezas dos materiais utilizados neste trabalho (corpos-de-prova, esfera de ensaio e carbetto de silício). As numerações dos corpos-de-prova foram estabelecidas em ordem crescente junto aos respectivos valores de durezas.

3.2 Procedimento experimental

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

Foi definido um valor de força normal para os ensaios tribológicos, $N = 2 \text{ N}$, junto a uma concentração de lama abrasiva: $C = 25\% \text{ SiC} + 75\% \text{ água destilada}$, em volume.

O tempo de ensaio, para todos os experimentos, foi estabelecido no valor de $t = 20 \text{ min}$. Com a esfera de ensaio de diâmetro $D = 25,4 \text{ mm}$ rotacionando sob $n = 56 \text{ rpm}$, calculou-se uma distância de deslizamento de $S = 90 \text{ m}$.

Para cada corpo-de-prova foram conduzidos três ensaios de desgaste micro-abrasivo “ball-cratering”.

3.3 Aquisição de dados e análise de resultados

Após as finalizações de todos os ensaios “ball-cratering” de desgaste micro-abrasivo, os diâmetros das crateras de desgaste (b) foram medidos por microscopia-óptica. Com isso, os valores dos volumes de desgaste (V) das respectivas crateras de desgaste puderam ser calculados por meio da Equação 1:

$$V \cong \frac{\pi \cdot b^4}{64 \cdot R} \text{ para } b \ll R \quad (1)$$

Em que “ R ” é o raio da esfera de ensaio.

A reprodutibilidade e a funcionalidade do tribômetro “ball-cratering” projetado e construído foram validadas com base na análise estatística dos volumes das crateras de desgaste e no comportamento do volume de desgaste em função da dureza de cada corpo-de-prova – $V = f(H_{CP})$, respectivamente.

Tabela 2. Condições de ensaio definidas para os ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa

Condições de ensaio	
Força normal – N [N]	2
Concentração da lama abrasiva – C [% vol.]	25% SiC + 75% água destilada (em volume)
Tempo de ensaio – t [min]	20
Rotação da esfera de ensaio – n [rpm]	56
Distância de deslizamento – S [m]	90
Número de repetições	3

4 Resultados e discussão – análise de reprodutibilidade e funcionalidade do tribômetro “ball-cratering”

A Figura 8 mostra os corpos-de-prova utilizados para a análise de reprodutibilidade e funcionalidade do tribômetro “ball-cratering” projetado e construído, já com todos os ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa conduzidos.

4.1 Análise de “reprodutibilidade”

Todas as crateras de desgaste foram geradas sem a necessidade da retirada dos corpos-de-prova do dispositivo de fixação disponível no equipamento (Figura 6), visto que o mesmo possui o recurso de deslocamentos “horizontal” e “vertical” de posicionamento.

A Figura 9 apresenta imagens de crateras de desgaste produzidas nos ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa.

A Tabela 3 mostra a média aritmética dos volumes de desgaste (V), assim como os respectivos valores dos desvios-padrão (SD), para cada um dos corpos-de-prova.

Nota-se que, para todos os corpos-de-prova, o desvio-padrão (SD), em referência à média aritmética dos valores dos volumes de desgaste (V), estabeleceu-se abaixo de 10%.

Baseando-se nos desvios-padrão experimentais gerados pelo equipamento “ball-cratering” projetado e construído, pode-se dizer que o mesmo apresentou padrões comportamentais de “reprodutibilidade” perfeitamente compatíveis com as necessidades técnico-científicas requisitadas para este tipo de equipamento e ensaio.

4.2 Análise de “funcionalidade”

A Figura 10 exhibe o gráfico do volume de desgaste (V) em função da dureza (H_{CP}) do corpo-de-prova – $V = f(H_{CP})$.

Observa-se que, com o aumento da dureza do material, o volume de material desgastado – volume da cratera de desgaste – diminuiu, seguindo, em concordância qualitativa, a Equação de Archard (Equação 2):



Figura 8. Crateras de desgaste geradas nos corpos-de-prova de aço-inoxidável ferrítico P410D, para a verificação da reprodutibilidade e da funcionalidade do equipamento “ball-cratering” projetado e construído.

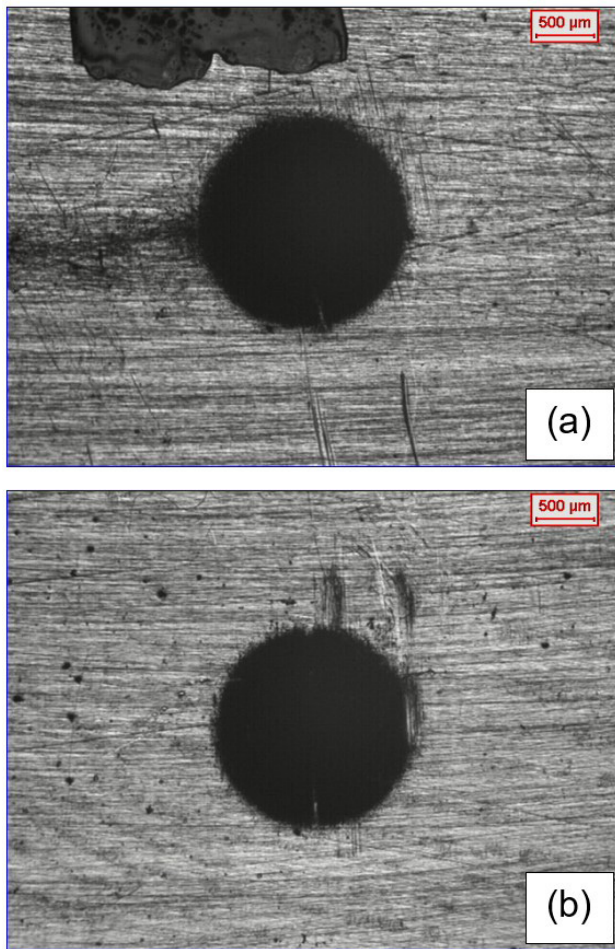


Figura 9. Crateras de desgaste obtidas a partir dos ensaios “ball-cratering” conduzidos neste trabalho: (a) “Corpo-de-prova 2” e (b) “Corpo-de-prova 4”.

Tabela 3. Média aritmética dos valores dos volumes de desgaste (V) com os respectivos desvios-padrão (SD)

Corpo-de-prova	Dureza – H	Volume de Desgaste – V	Volume de Desgaste – V
	[HV]	Média Aritmética [mm ³]	Desvio-Padrão [mm ³]
1	177	0,0139	0,0009
2	200	0,0119	0,0010
3	222	0,0118	0,0002
4	238	0,0115	0,0010
5	297	0,0111	0,0006
6	304	0,0102	0,0005

$$\xi = K_W \cdot K_F \int \frac{P \cdot v}{H_{CP}(T)} dT \quad (2)$$

Direcionando as grandezas pertinentes à Equação de Archard para o ensaio “ball-cratering”, as mesmas podem ser definidas como:

- ξ é uma grandeza quantitativa que, quanto maior for o seu valor, maior será a severidade do processo de

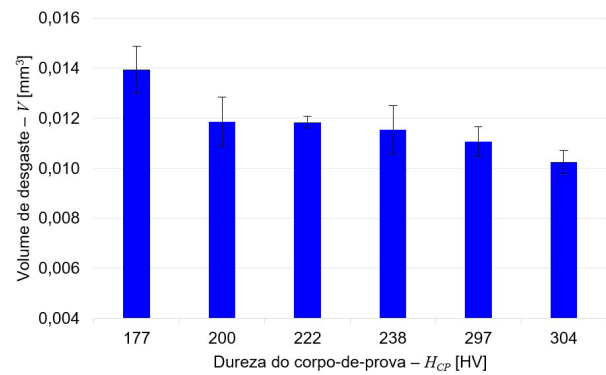


Figura 10. Gráfico do volume de desgaste (V) em função da dureza (H_{CP}) do corpo-de-prova – $V = f(H_{CP})$.

desgaste micro-abrasivo – ou, maior será o volume de material desgastado;

- K_W e K_F são grandezas constantes relacionadas aos materiais pertencentes ao sistema tribológico – corpo-de-prova, partículas abrasivas e esfera de ensaio – durante o processo de desgaste micro-abrasivo;
- P é a pressão de contato reportada no sistema tribológico “corpo-de-prova – partículas abrasivas – esfera de ensaio”, definida pela Equação 3 [7,8,36]:

$$P = \frac{N}{A} \quad (3)$$

Sendo N a força normal estabelecida para os ensaios tribológicos “ball-cratering” e A a área projetada da cratera de desgaste [7,8,36];

- v é a velocidade tangencial da esfera de ensaio, definida pela Equação 4:

$$v = \pi \cdot D \cdot n \quad (4)$$

- H_{CP} é a dureza do corpo-de-prova, em função da temperatura (T) – $H_{CP} = f(T)$.

Analisando-se o comportamento das grandezas da Equação de Archard durante o processo de desgaste micro-abrasivo, nota-se que o valor da rotação da esfera de ensaio foi o mesmo para todas as condições de ensaio – $n = 56$ rpm; com isso, a velocidade tangencial da esfera de ensaio permaneceu constante para todos os corpos-de-prova.

Adicionalmente, a temperatura de cada corpo-de-prova permaneceu constante sob temperatura ambiente, fazendo com que, consequentemente, as durezas (H_{CP}) dos materiais analisados se mantivessem inalteradas durante todos os ensaios “ball-cratering”. Entretanto, seguindo-se a Equação de Archard, ξ e H_{CP} são inversamente proporcionais; logo, o aumento de H_{CP} ocasiona, consequentemente, uma diminuição de ξ , caracterizando uma menor severidade de desgaste relacionado a um menor volume de desgaste (V) gerado.

Finalmente, a única grandeza física que variou, de forma decrescente, durante os ensaios “*ball-cratering*” foi a pressão de contato (P), visto que a força normal (N) permaneceu constante, mas a área projetada (A) de cada cratera de desgaste aumentou com o aumento progressivo da distância de deslizamento.

De fato, em todos os ensaios, a pressão de contato (P) seguiu, sob concordância qualitativa, a abordagem detalhada por Cozza et al. [7,8,36] em trabalhos anteriores, diminuindo com o aumento da dureza do material. Com a variação crescente da área projetada da cratera de desgaste para cada corpo-de-prova, obtêm-se diferentes valores de ξ , relacionados aos valores de volumes de desgaste (V) calculados.

Com isso, baseando-se na Figura 10 – que exibiu resultados práticos da variação do volume de desgaste (V) em função da dureza do corpo-de-prova (H_{cp}) – e pela complementação teórica provinda da *Equação de Archard* (Equação 2), pode-se dizer que o tribômetro “*ball-cratering*” projetado e construído apresentou “*funcionalidade*” condizente, dentro dos parâmetros técnico-científicos imprescindíveis a um tribômetro.

Referências

- 1 Cozza RC. Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo [dissertação]. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo; 2006.
- 2 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.
- 3 Adachi K, Hutchings IM. Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test. *Wear*. 2003;255:23-29.
- 4 Adachi K, Hutchings IM. Sensitivity of wear rates in the micro-scale abrasion test to test conditions and material hardness. *Wear*. 2005;258:318-321.
- 5 Silva WM, Binder R, Mello JDB. Abrasive wear of steam-treated sintered iron. *Wear*. 2005;258:166-177.
- 6 Sinnott-Jones PE, Wharton JA, Wood RJK. Micro-abrasion-corrosion of a CoCrMo alloy in simulated artificial hip joint environments. *Wear*. 2005;259:898-909.
- 7 Cozza RC, de Mello JDB, Tanaka DK, Souza RM. Relationship between test severity and wear mode transition in micro-abrasive wear tests. *Wear*. 2007;263:111-116.
- 8 Cozza RC. Estudo do desgaste e atrito em ensaios micro-abrasivos por esfera rotativa fixa em condições de “força normal constante” e “pressão constante” [tese]. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo; 2011.
- 9 Cozza RC, Rodrigues LC, Schön CG. Micro-abrasive wear behaviour of an iron aluminide alloy under conditions of room and elevated temperatures. In: Proceedings of the “TriboBR 2014 – 2nd International Brazilian Conference on Tribology”; 2014 Nov 3-5; Foz do Iguaçu, Brazil. São Paulo: ABM; 2014.
- 10 Cozza RC, Rodrigues LC, Schön CG. Analysis of the micro-abrasive wear behavior of an iron aluminide alloy under ambient and high-temperature conditions. *Wear*. 2015;330-331:250-260.
- 11 Cozza RC, Schön CG. Evidence of superposition between grooving abrasion and rolling abrasion. *Tribol Trans*. 2015;58:875-881.
- 12 Cozza RC. Estudo da obtenção do Regime Permanente de Desgaste em ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa conduzidos em corpos-de-prova de WC-Co P20 e aço-ferramenta M2. *Matéria*. 2018;23(1):e-11986.
- 13 Serrano ROP, de Castro ALP, Rico EAM, Pinto MA, Viana EMF, Martinez CB. Abrasive effects of sediments on impellers of pumps used for catching raw water. *Rev Bras Eng Agric Ambient*. 2018;22(9):591-596.
- 14 Serrano ROP, Santos LP, Viana EMF, Pinto MA, Martinez CB. Case study: Effects of sediment concentration on the wear of fluvial water pump impellers on Brazil’s Acre River. *Wear*. 2018;408-409:131-137.

5 Conclusões

Em relação à “reprodutibilidade” e à “funcionalidade” do tribômetro “*ball-cratering*” projetado e construído, pode-se concluir que:

- *Reprodutibilidade*: Analisando-se os desvios-padrão dos valores dos volumes de desgaste – V , observa-se que todos ficaram abaixo de 10% em relação à média aritmética, podendo, conseqüentemente, serem considerados como resultados confiáveis cientificamente;
- *Funcionalidade*: Em concordância qualitativa com a *Equação de Archard*, o volume de desgaste diminuiu com o aumento da dureza do material ensaiado. Portanto, pode-se dizer que a “*funcionalidade*” do tribômetro em questão atende as exigências técnicas pertinentes a ensaios tribológicos laboratoriais.

Finalmente, conclui-se que, apoiando-se nos resultados apresentados e na discussão conduzida, que o tribômetro “*ball-cratering*”, *projetado e construído*, está tecnicamente *validado*.

- 15 Silva JPC, Scandian C, Franco AR Jr. Mapas de desgaste microabrasivo do aço inoxidável austenítico AISI 316L: Uma análise comparativa de superfícies não nitretadas e nitretadas a plasma. In: Anais do 1º Workshop de Tratamentos de Superfícies de Ligas Resistentes à Corrosão; 69º Congresso Anual da ABM; 2014 July 21-25; São Paulo, Brazil. São Paulo: ABM; 2014
- 16 Labiapari WS. Abrasão-corrosão em aços-inoxidáveis ferríticos [tese]. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia; 2015.
- 17 Cozza RC, Tanaka DK, Souza RM. Micro-abrasive wear of DC and pulsed DC titanium nitride thin films with different levels of film residual stresses. Surf Coat Technol. 2006;201:4242-4246.
- 18 Rutherford KL, Hutchings IM. A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems. Surf Coat Technol. 1996;79:231-239.
- 19 Rutherford KL, Hutchings IM. Micro-scale abrasive wear testing of PVD coatings on curved substrates. Tribol Lett. 1996;2:1-11.
- 20 Trezona RI, Hutchings IM. Three-body abrasive wear testing of soft materials. Wear. 1999;233-235:209-221.
- 21 Batista JCA, Matthews A, Godoy C. Micro-abrasive wear of PVD duplex and single-layered coatings. Surf Coat Technol. 2001;142-144:1137-1143.
- 22 Allsopp DN, Hutchings IM. Micro-scale abrasion and scratch response of PVD coatings at elevated temperatures. Wear. 2001;251:1308-1314.
- 23 Batista JCA, Godoy C, Matthews A. Micro-scale abrasive wear testing of duplex and non-duplex (single-layered) PVD (Ti,Al)N, TiN and Cr-N coatings. Tribol Int. 2002;35:363-372.
- 24 Batista JCA, Joseph MC, Godoy C, Matthews A. Micro-abrasion wear testing of PVD TiN coatings on untreated and plasma nitrided AISI H13 steel. Wear. 2002;249:971-979.
- 25 Ramalho A. Micro-scale abrasive wear of coated surfaces-prediction models. Surf Coat Technol. 2005;197:358-366.
- 26 Shipway PH, Howell L. Microscale abrasion-corrosion behaviour of WC-Co hardmetals and HVOF sprayed coatings. Wear. 2005;258:303-312.
- 27 Chen H, Xu C, Zhou Q, Hutchings IM, Shipway PH, Liu J. Micro-scale abrasive wear behaviour of HVOF sprayed and laser-remelted conventional and nanostructured WC-Co coatings. Wear. 2005;258:333-338.
- 28 Cozza RC. Effect of pressure on abrasive wear mode transitions in micro-abrasive wear tests of WC-Co P20. Tribol Int. 2013;57:266-271.
- 29 Rutherford KL, Hutchings IM. Theory and application of a micro-scale abrasive wear test. J Test Eval. 1997;25(2):250-260.
- 30 Cozza RC. A study on friction coefficient and wear coefficient of coated systems submitted to micro-scale abrasion tests. Surf Coat Technol. 2013;215:224-233.
- 31 Cozza RC. Influence of the normal force, abrasive slurry concentration and abrasive wear modes on the coefficient of friction in ball-cratering wear tests. Tribol Int. 2014;70:52-62.
- 32 Ceschini L, Palombarini G, Sambogna G, Firrao D, Scavino G, Ubertalli G. Friction and wear behaviour of sintered steels submitted to sliding and abrasion tests. Tribol Int. 2006;39:748-755.
- 33 Shipway PH, Hogg JJ. Dependence of microscale abrasion mechanisms of WC-Co hardmetals on abrasive type. Wear. 2005;259:44-51.
- 34 Stack MM, Mathew MT. Micro-abrasion transitions of metallic materials. Wear. 2003;255:14-22.
- 35 Stack MM, Mathew MT. Mapping the micro-abrasion resistance of WC/Co based coatings in aqueous conditions. Surf Coat Technol. 2004;183:337-346.
- 36 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.

Recebido em: 17 Nov. 2019

Aceito em: 16 Nov. 2021