



CONSTRUÇÃO DE UM DISPOSITIVO EXPERIMENTAL COM ESFERA FIXA ROTATIVA PARA ENSAIO DE DESGASTE ABRASIVO CONFORME ISO 26424

José Gedael Fagundes Júnior¹ – gedael.fagundes@unesp.br
Wyser José Yamakami¹ – wyser.yamakami@unesp.br
Vicente Afonso Ventrella¹ – vicente.ventrella@unesp.br
Juno Gallego¹ – juno.gallego@unesp.br

¹Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Departamento de Engenharia Mecânica. Grupo de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais e Processos Tecnológicos (MaProTec)

O desgaste abrasivo é um dos principais causadores de danos e falhas em componentes mecânicos. A utilização de técnicas experimentais para avaliar a resistência ao desgaste dos materiais é de grande interesse de pesquisadores e da indústria. Nos últimos anos, dispositivos compostos de esferas (fixas ou livres), simulando condições tribológicas de dois e três corpos tem sido bastante utilizada. Isto se dá graças as dimensões reduzidas das amostras e curtos intervalos de tempo para a realização dos ensaios. Inicialmente aplicadas para condições de desgaste considerados como microabrasivo em revestimentos com espessura micrométrica, estas técnicas estão sendo amplamente utilizadas para condições macro abrasivos, aplicadas por exemplo, em revestimentos depositados por soldagem, entre outros. Desta forma, tornou-se um grande atrativo para realização de ensaios para uma melhor compreensão e análise dos resultados. Um dispositivo experimental com esfera rotativa fixa foi construído seguindo as recomendações da norma ISO 26424 para realização de ensaios com a finalidade de avaliar a resistência ao desgaste em superfícies metálicas. A validação do dispositivo foi realizada em amostras de AISI 304. Testes realizados sob diversas condições de ensaio, tais como concentração do abrasivo, carga e distância percorrida, indicaram resultados com baixos desvio e semelhantes a outros encontrados na literatura. A circularidade das crateras geradas no ensaio apresentou faixas de variações dentro dos limites recomendados pela norma. Análises estatísticas aplicadas ao estudo corroboraram com a confiabilidade do abrasômetro construído.

Palavras-chave: Abrasômetro. Esfera fixa. Ensaio de desgaste. ISO 26424.

INTRODUÇÃO

O desgaste abrasivo é um dos modos mais severos de danos e falhas nos equipamentos industriais, representando grande parte dos custos relacionados a um determinado setor produtivo [1]. Dessa forma, a literatura reporta o uso de diversas técnicas experimentais em laboratórios a fim de classificar os materiais quanto ao seu comportamento ao desgaste. Entre as mais utilizadas destacam-se o abrasômetro com roda de borracha, conforme ASTM G65 00 [2,3] e os teste pino sobre disco (*pin-on-disk*) [4].

Recentemente o desgaste microabrasivo com esfera fixa rotativa tem atraído grande interesse nos estudos relacionados a tribologia graças a sua versatilidade quando comparado as demais técnicas. O ensaio se caracteriza pela ação de uma esfera fixa com movimento relativo (rotação) que é pressionada sob a ação de uma carga (F) contra a superfície da amostra. Uma polpa abrasiva composta de carboneto de silício (SiC) ou alumina (Al_2O_3) e continuamente gotejada na interface de contato entre a esfera e a amostra [5–9]. A técnica pode ainda ser utilizada a seco, sem a adição da polpa abrasiva. Uma das vantagens do ensaio está no tamanho da cratera gerada na amostra que assume um formato esférico com boa precisão geométrica e dimensional, possibilitando a medição do volume removido que em função da distância percorrida (S) e a carga aplicada (F), faz-se o cálculo do coeficiente de desgaste abrasivo (k). Para uma amostra que seria utilizada para um único teste no abrasômetro com roda de borracha, pode ser realizar diversos ensaios no teste com esfera fixa rotativa, tornando-o bem versátil.

No início a técnica era utilizada para aplicações relacionadas ao desgaste em filmes micrométricos aplicadas por técnicas de deposição. Atualmente a técnica é vastamente utilizada para avaliar as propriedades de resistência ao desgaste abrasivo em diversos materiais de espessuras maiores tais como chapas e revestimentos duros depositados por soldagem [10][11]. Contudo, a técnica carece de estudos para compreender melhor os fundamentos e comportamento das variáveis envolvidas no ensaio. Por esta razão, a literatura tem um grande interesse em estudos para melhor compreensão dos resultados, o que implica na aquisição e/ou construção de dispositivos que possam reproduzir o ensaio de esfera fixa rotativa [12–14].

O objetivo do presente trabalho foi investigar os efeitos das condições de ensaio em função da carga de ensaio, aspectos do abrasivo e distância percorrida e seus efeitos sobre o coeficiente de desgaste abrasivo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Amostras de aço inoxidável AISI 304 com dimensões de 40 mm x 25 mm x 12 mm foram utilizadas como corpos de prova para validação do dispositivo. Na sequência foram preparadas por etapas de retífica, lixamento e polimento em alumina com granulometria de 0,5 mm.

Um tribômetro com esfera fixa foi construído para a realização de ensaios de desgaste conforme as recomendações da norma ISO 26424. O equipamento é controlado por um sistema de arduino que possibilita o ajuste da velocidade de rotação e o número de voltas, que por sua vez, será utilizado para determinar a distância percorrida no ensaio (S). A vazão da polpa abrasiva é controlada por uma bomba peristáltica que possibilita o controle da quantidade de gotas despejada na interface de contato da esfera com a amostra. Um homogeneizador magnético é utilizado para manter a agitação da polpa, mantendo o abrasivo em suspensão, Figura 1. A utilização de sistema acoplado a uma célula de carga permite o ajuste e calibração da força (F) de ensaio aplicada.

Após o ensaio, as amostras foram submetidas a banhos ultrassônicos e secagem. As imagens das calotas esféricas foram realizadas em um estereomicroscópio ZEISS. A partir de um software de imagens foi realizada a medição do diâmetro horizontal e vertical, d_h e d_v , respectivamente, de onde se calcula o diâmetro médio da calota, d_m . Para situações em que a diferença entre estas medidas for superior a 10%, o teste deverá ser descartado e realizado novamente. O volume removido foi calculado a partir da Equação (1), levando em consideração o raio da esfera (R) e o diâmetro médio da calota (d_m), [14]. Logo, o coeficiente de desgaste (k) foi determinado em função do volume removido (V), da distância percorrida (S) e da carga aplicada (N), Equação (2) [13]. As condições de ensaio estão apresentadas na Tabela 1.

As análises estatísticas foram utilizadas a partir do teste ANOVA, de onde verificou-se a significância dos dados analisados.

Figura 1. Ensaio de desgaste abrasivo. (a) Representação esquemática [15]. (b) Tribômetro com esfera fixa construído para testes conforme ISO 26424.

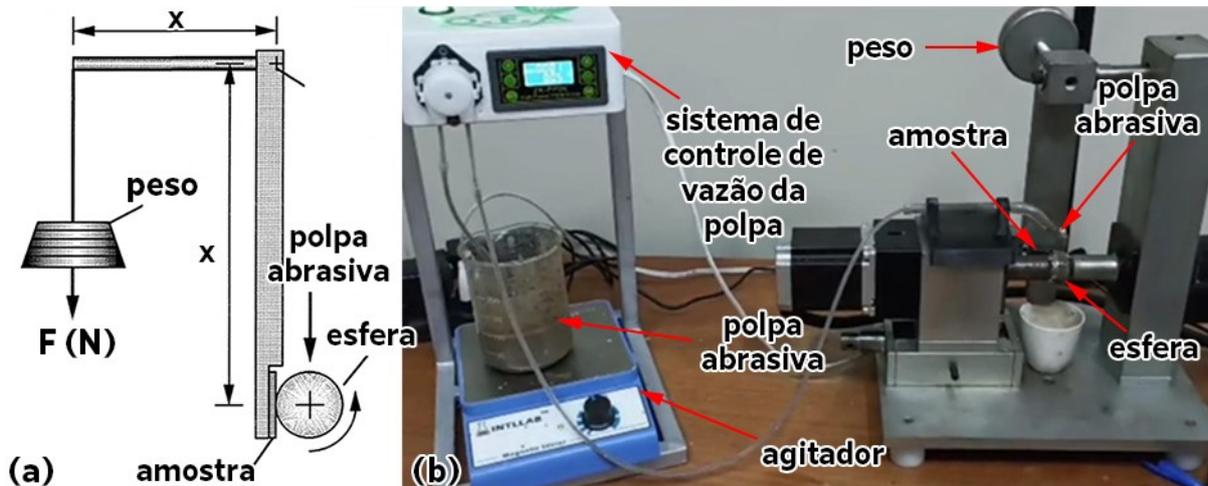
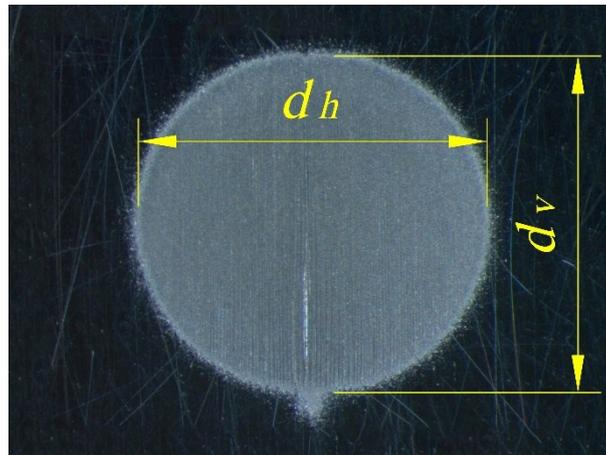


Figura 2. Indicação das diagonais horizontais e verticais no cálculo da diagonal média.



$$V = \pi \frac{b^4}{64R} \quad (1)$$

$$k = \frac{V}{FS} \quad (2)$$

Tabela 1. Condições do ensaio abrasivo.

Carga, F (N)	1 – 0,5
Distância, S (m)	60, 90, 120
Rotação, n (RPM)	185
Raio da esfera, R (mm)	12,7
Material da esfera	AISI 52100
Abrasivo	SiC
Diluição da polpa, (g/ml)	0,7 e 0,5
Malha abrasivo, m (Mesh)	2000 e 3000
Vazão da polpa, a (gotas/min)	14 - 18

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta as calotas esféricas geradas nas amostras após o ensaio. As calotas apresentaram boa circularidade, onde as medidas encontradas para d_v e d_h apresentaram valores com desvios inferiores a 10%, atendendo as exigências de recomendação do ensaio, Figura 4(a). É possível notar que a concentração do abrasivo na solução afeta consideravelmente o desgaste da amostra, caracterizado por crateras com diâmetros maiores, Figura 3. Conseqüentemente, o aumento na concentração do abrasivo de 0,5 g/ml para 0,7 g/ml promoveu elevação nos valores de k , conforme apresentado no gráfico da Figura 4(b). O modo atuante foi caracterizado pelo riscamento (*grooving*), resultante do mecanismo de desgaste por dois corpos, típico das condições de baixa concentração de abrasivo evidenciada pelos riscos apresentados na superfície das crateras [5]. As partículas do abrasivo se mantêm anexadas na superfície da esfera, atuando como uma lixa durante no contato com a superfície da amostra. Microindentações que são caracterizadas pelo modo de rolamento (três corpos) não foram identificadas em nenhuma condição dos testes realizados [15]. Uma pequena mancha foi observada em algumas condições de ensaio, promovidas pelo acumula do abrasivo na região inferior da calota.

Figura 3. Calotas esféricas geradas nos testes realizados.

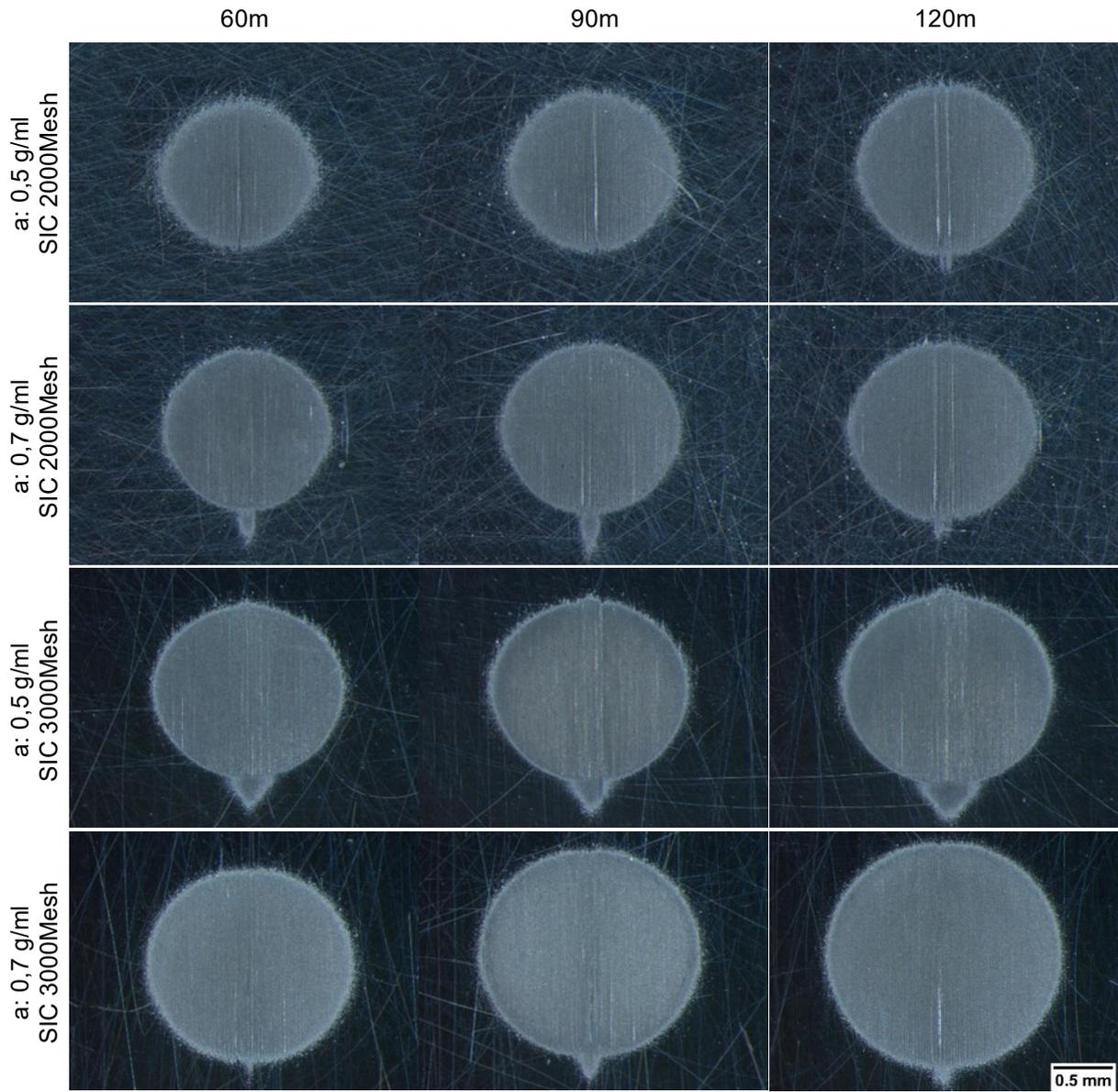
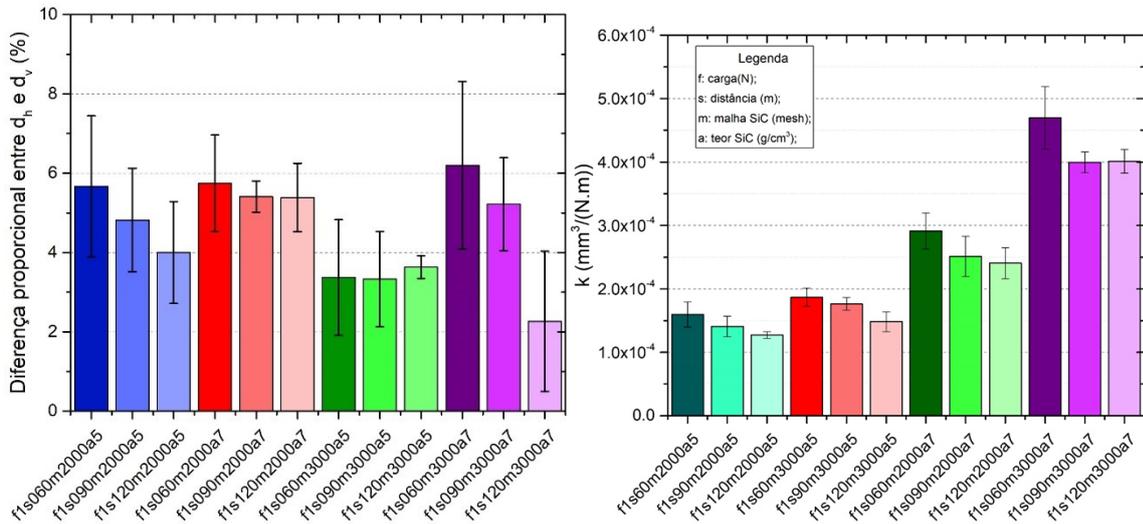


Figura 4. (a) Variações entre as medidas obtidas para as diagonais horizontais e verticais. (b) Coeficiente de desgaste para as condições com aplicação da carga de 1N.



Os valores de coeficiente de desgaste encontrados se mostraram ser bastante afetados pelos valores da carga aplicada, Figura 5. Quanto menor a carga, o coeficiente de desgaste apresentou aumento significativo, Figura 6. Este comportamento pode ser atribuído ao efeito do líquido na interface de contato da esfera com a amostra. Cargas maiores, promovem uma possível expulsão do abrasivo da região de contato, deixando a condição de ensaio menos abrasiva, o que pode explicar os pequenos volumes removidos na amostra [5]. Uma vez que as curvas granulométricas são determinadas por curvas de partição, onde há uma distribuição entre uma fração de partículas finas abaixo e outra fração de partículas grosseiras acima da granulometria nominal, determinadas pela malha classificatória da peneira [16]. Para os abrasivos com malha de 2000 Mesh, a população de partículas grosseiras acima da medida nominal é bem maior do que nos abrasivos com malha de 3000 Mesh. Sendo assim, as partículas mais grosseiras impedem que as partículas menores promovam uma ação mais eficiente de abrasão, reduzindo o volume de material removido na amostra. Já no SiC de granulometria 3000 Mesh, a probabilidade de o material apresentar partículas muito grosseiras é menor, Figura 7.

Figura 5. Calotas esféricas geradas sob diferentes condições de cargas aplicadas. (a) 1N. (b) 0,5N.

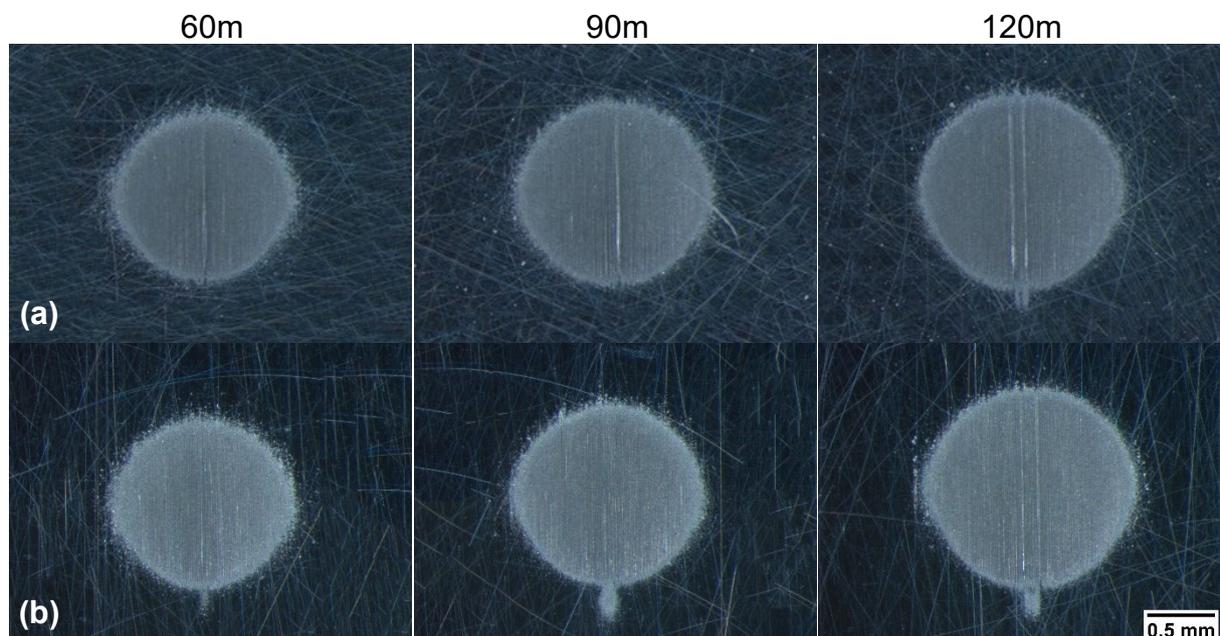


Figura 6. Comparação do coeficiente de desgaste para diferentes cargas aplicadas e demais variáveis constantes.

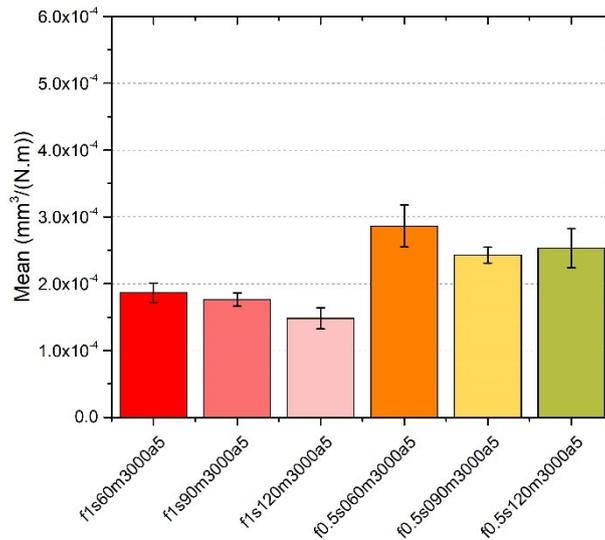
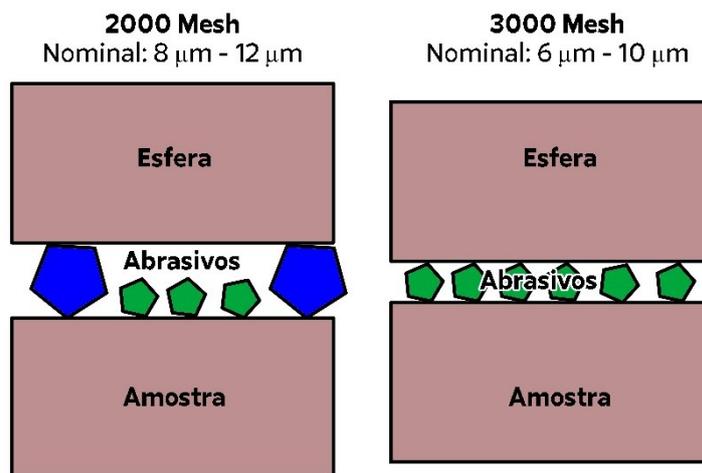


Figura 7. Representação esquemática da diferente ação abrasiva do SiC em função da granulometria nominal das partículas.



A literatura reporta que após uma distância mínima percorrida, o ensaio atinge um regime permanente, onde o valor de k deve se manter constante, independente da distância percorrida no ensaio. Geralmente este regime é atingido após algumas unidades de metros percorridos [6]. Dessa forma, pode se dizer que todas as condições realizadas no presente estudo se encontram dentro do regime permanente. Contudo, os testes ANOVA apontaram que para as condições utilizando o SiC com malha de 2000 Mesh, as médias encontradas para as distâncias percorrida de 60 m, 90 m e 120 m, apresentaram diferenças significantes entre si. Este comportamento reforça o que foi discutido anteriormente em função da ação das partículas grosseiras de SiC presentes nestas condições de ensaio causando estas imprecisões no coeficiente de desgaste.

CONCLUSÃO

No presente estudo de validar o dispositivo contruído para a realização de ensaios abrasivos a partir da aplicação de condições com diferentes quantidades e granulometria do abrasivo (SiC), assim como diversas cargas aplicadas, possibilitou as seguintes conclusões:

- O dispositivo apresentou resultados confiáveis, promovendo a formação de crateras com precisão geométrica, atendendo as especificações da norma aplicada ao ensaio;
- Abrasivos com granulometrias mais finas (3000 Mesh) apresentaram resultados mais confiáveis quando comparados às condições onde foi utilizado abrasivos com granulometria de 2000 Mesh;
- As cargas de 0,5 N aplicadas no ensaio estabeleceram condições mais severas de abrasão, resultando em maiores volumes removidos e conseqüentemente taxas de desgaste mais elevadas comparadas aquelas em que se utilizou cargas de 1N;

REFERÊNCIAS

- [1] Zum Gahr K-Heinz. Microstructure and wear of materials 1987:560.
- [2] Heidari R. Design and Development of the ASTM G65 Apparatus 2024.
- [3] Grasser D, Corujeira Gallo S, Pereira MP, Barnett M. Wear simulation and validation of composites (insert-reinforced matrix) in the dry sand rubber wheel test. Miner Eng 2024;207:108583. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2024.108583>.
- [4] Solasa KC, Venkataraman N V., Choudhury PR, Schueller JK, Bhattacharyya A. On the Use of Alternative Measurement Methods in the Estimation of Wear Rates in Rotary-Pin-on-Disk Tribometry. Tribol Lett 2024;72:1–19. <https://doi.org/10.1007/S11249-024-01841-9/FIGURES/8>.
- [5] Resendiz-Calderon CD, Cázares-Ramírez I, Samperio-Galicia DL, Farfan-Cabrera LI. Method for conducting micro-abrasion wear testing of materials in oscillating sliding. MethodsX 2022;9:101703. <https://doi.org/10.1016/J.MEX.2022.101703>.

- [6] Parreiras Marques F, César Bozzi A, Scandian C, Paulo Tschiptschin A. Microabrasion of three experimental cobalt-chromium alloys: Wear rates and wear mechanisms. *Wear* 2017;390–391:176–83. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2017.07.023>.
- [7] Ardila MAN, Costa HL, de Mello JDB. Influence of the ball material on friction and wear in microabrasion tests. *Wear* 2020;450–451:203266. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2020.203266>.
- [8] de Paula AFM, Borges DFL, da Silva FC, Rossino LS, Manfrinato MD, Verma V, et al. Synergism between tribological parameters – “micro-abrasive concentration level”, “micro-abrasive particle type”, and “liquid type” of a micro-abrasive slurry composition on the micro-abrasive wear behaviour of Fe-30Al-6Cr (at.%) iron aluminide alloy. *Wear* 2023;524–525:204867. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2023.204867>.
- [9] Farfán-Cabrera LI, Gallardo-Hernández EA, de la Rosa CS, Vite-Torres M. Micro-scale abrasive wear of some sealing elastomers. *Wear* 2017;376–377:1347–55. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2017.02.004>.
- [10] Esteves PJ, Seriacopi V, de Macêdo MCS, Souza RM, Scandian C. Combined effect of abrasive particle size distribution and ball material on the wear coefficient in micro-scale abrasive wear tests. *Wear* 2021;476:203639. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2021.203639>.
- [11] Ligier K, Bramowicz M, Kulesza S, Lemecha M, Pszczółkowski B. Use of the Ball-Cratering Method to Assess the Wear Resistance of a Welded Joint of XAR400 Steel. *Materials* 2023, Vol 16, Page 4523 2023;16:4523. <https://doi.org/10.3390/MA16134523>.
- [12] Gant AJ, Gee MG. A review of micro-scale abrasion testing. *J Phys D Appl Phys* 2011;44:073001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/7/073001>.
- [13] Kusano Y, Van Acker K, Hutchings IM. Methods of data analysis for the micro-scale abrasion test on coated substrates. *Surf Coat Technol* 2004;183:312–27. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2003.10.010>.
- [14] ISO 26424:2008(E). Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Determination of the abrasion resistance of coatings by a micro-scale abrasion test. 2008.
- [15] 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;225–229:205–14. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00358-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00358-5).

[16] Wills BA, Finch JA. Particle Size Analysis. *Wills' Mineral Processing Technology* 2016:91–107. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097053-0.00004-2>.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Engenheiro Lucas Alfredo Queiroz Silva pelo desenvolvimento do sistema de controle por arduíno aplicados na construção do abrasômetro que possibilitou o desenvolvimento dessa e de outras futuras pesquisas envolvidas com o desgaste. Ao apoio financeiro da CAPES, CNPQ, FAPEMIG e FAPESP que foram prestados em diversos equipamentos de análises utilizados durante a realização deste trabalho.

CONSTRUCTION OF AN EXPERIMENTAL DEVICE WITH A FIXED ROTATING SPHERE FOR ABRASIVE WEAR TESTING ACCORDING TO ISO 26424

José Gedael Fagundes Júnior¹ – gedael.fagundes@unesp.br
Wyser José Yamakami¹ – wyser.yamakami@unesp.br
Vicente Afonso Ventrella¹ – vicente.ventrella@unesp.br
Juno Gallego¹ – juno.gallego@unesp.br

¹São Paulo State University (UNESP), School of Engineering, Ilha Solteira
Group for Characterization and Development of Materials and Technological
Processes (MaProTec)

Abstract

Abrasive wear is one of the main causes of damage and failure in mechanical components. The use of experimental techniques to evaluate the wear resistance of materials is of great interest to researchers and industry. In recent years, devices composed of spheres (fixed or free), simulating two- and three-body tribological conditions, have been widely used. This is due to the reduced dimensions of the samples and the short time intervals required for the tests. Initially applied to conditions considered as micro-abrasive wear in coatings with micrometric thicknesses, these techniques are now widely used for macro-abrasive conditions, applied, for example, in coatings deposited by welding, among others. As a result, it has become very attractive for conducting tests to better understand and analyze the results. An experimental device with a fixed rotating sphere was built following the recommendations of ISO 26424 to conduct tests to evaluate wear resistance on metallic surfaces. The validation of the device was carried out on AISI 304 samples. Tests conducted under various conditions, such as abrasive concentration, load, and distance traveled, indicated results with low deviation and similar to others found in the literature. The circularity of the craters generated in the test showed variation ranges within the limits recommended by the standard. Statistical analyses applied to the study corroborated the reliability of the constructed wear tester.

Key-words: *Abrasometer. Fixed Rotating Ball. Wear test. ISO 26424.*