

ATRITO E DESGASTE DE COMPONENTES SINTERIZADOS FERROXIDADOS REVESTIDOS COM FOSFATO DE MANGANÊS¹

José Daniel Biasoli de Mello²

Henara Lillian Costa³

Roberto Binder⁴

Resumo

Oxidação a vapor é um importante procedimento industrial utilizado para modificar propriedades tribológicas, selar porosidade e melhorar o aspecto estético de componentes ferrosos sinterizados. Acredita-se que revestimentos de fosfato de manganês tenham propriedades lubrificantes intrínsecas e coeficientes de atrito muito baixos. Neste trabalho, componentes ferrosos sinterizados oxidados a vapor foram revestidos com fosfato de manganês e seu comportamento tribológico foi investigado. Comparou-se componentes com duas espessuras nominais de filme de óxido, tanto revestidos quanto não-revestidos com fosfato de manganês. Sua resistência à abrasão foi avaliada por ensaios de microabrasão e sua resistência ao desgaste por deslizamento por ensaios de deslizamento alternado. Observou-se que a fosfatização das amostras ferroxidadas resultou em aumento da taxa de desgaste para ambos os tipos de ensaios. A fosfatização promoveu uma redução na espessura do filme de óxido, provavelmente devido à reação de conversão com o substrato. A redução da resistência ao desgaste devido à fosfatização foi associada com a redução da espessura do filme de óxido.

Palavras-chave: Oxidação a vapor; Fosfato de manganês; Componentes sinterizados; Desgaste.

WEAR BEHAVIOUR OF STEAM-OXIDISED SINTERED IRON COMPONENTS COATED WITH MANGANESE PHOSPHATE

Abstract

Steam oxidation is an important industrial procedure for changing tribological properties, sealing porosity and improving aesthetics in sintered iron components. Manganese phosphate coatings are believed to have intrinsic lubricant properties and very low friction coefficients. In this work, after steam oxidation, sintered iron components were coated with manganese phosphate and their tribological behaviour was investigated. Components with two nominal film thicknesses were compared, either coated or uncoated with manganese phosphate. Their abrasion resistance was evaluated using micro abrasion wear tests. Reciprocating wear tests were used to study their sliding wear resistance. It was observed that phosphating of the oxidized samples resulted in an increase of the wear rate in both tests. Phosphating promoted a reduction of the oxide film thickness, probably due to the chemical conversion reaction with the oxide substrate. The reduction of wear resistance due to phosphating was associated with a reduction of oxide film thickness.

Key words: Steam oxidation; Manganese phosphate; Sintered components; Wear.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Doutor, Laboratório de Tribologia e Materiais, Universidade Federal de Uberlândia, Campus Sta. Mônica, Sala 1M218, 38400-901, Brasil, Tel: +55 34 32394186, Fax 32394273, e-mail: Itm-demello@ufu.*

³ *Doutor, Laboratório de Tribologia e Materiais, Universidade Federal de Uberlândia, Campus Sta. Mônica, Sala 1M220, 38400-901, Brasil, Tel: +55 34 32394186, Fax 32394273, e-mail: Itm-henara@ufu.*

⁴ *Empresa Brasileira de Compressores, 89219-100, Joinville, SC, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A metalurgia do pó tem sido largamente utilizada na indústria, em especial devido ao seu baixo custo e grande versatilidade. A elevada porosidade de componentes sinterizados resulta em baixa resistência mecânica e capacidade de carga quando comparados com materiais densos. Porém, os poros desempenham um importante papel na remoção de resíduos de desgaste da interface⁽¹⁾ e têm o potencial de armazenar lubrificante que possa ser liberado durante a utilização do componente.^(2,3)

A oxidação a vapor é comumente aplicada a componentes ferrosos sinterizados com o objetivo de selar porosidade, aumentar densidade e melhorar propriedades mecânicas e tribológicas. Adicionalmente, a formação de uma camada azul ou negra melhora suas características estéticas. Muitos pesquisadores têm confirmado experimentalmente os efeitos benéficos da oxidação a vapor no comportamento tribológico de componentes sinterizados, em virtude da alta dureza do revestimento óxido quando comparado com o substrato de ferro macio.⁽³⁻⁶⁾ De Mello e Hutchings⁽³⁾ concluíram que delaminação e/ou delaminação/oxidação são os principais mecanismos durante o desgaste por deslizamento de tais materiais.

Fosfato de manganês é um revestimento industrial comumente utilizado para reduzir atrito e melhorar lubrificação em componentes deslizantes. Revestimentos de fosfato de manganês são formados por conversão química, e o principal componente do filme é a hurealita, $(\text{Mn, Fe})_5\text{H}_2(\text{PO}_4)_2$. Acredita-se que eles possuam excelente lubricidade e propriedades *anti-scuffing*, uma vez que eles absorvem uma grande quantidade de lubrificante em virtude de sua porosidade.⁽⁷⁻⁹⁾

Este trabalho explora a idéia inovadora de um revestimento multifuncional, que combina oxidação a vapor e fosfato de manganês em componentes ferrosos sinterizados, de forma a combinar as propriedades de alta dureza e capacidade de selamento obtidas com a oxidação a vapor e a melhora na lubrificação conferida pela camada subsequente de fosfato. O comportamento tribológico de amostras de ferro sinterizadas e oxidadas com duas diferentes espessuras de óxido foi comparado com o de amostras com revestimento duplo composto por óxido e fosfato de manganês. Apesar de esperar-se que as verdadeiras propriedades lubrificantes do fosfato de manganês revelem-se sob condições lubrificadas, devido à sua capacidade de absorver lubrificante, este trabalho optou por investigar o seu comportamento como um lubrificante sólido em condições de deslizamento a seco, que ocorrem em muitas aplicações industriais potenciais para tais revestimentos. Em particular, investigou-se o seu comportamento em ensaios de deslizamento a seco alternados, que simulam bem o movimento alternado encontrado em muitos componentes deslizantes de pequenos motores comumente fabricados em ferro sinterizado, como é o caso de pistões e cilindros de compressores herméticos. Adicionalmente, seu comportamento sob condições de desgaste abrasivo foi avaliado utilizando-se ensaios de desgaste de microabrasão.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As amostras foram produzidas utilizando-se pó de ferro atomizado marca Ancor Steel 1000B Höganäs. Depois de misturados com estereato de zinco (0,8 wt.%), os pós foram compactados sob uma pressão 550 MPa. A sinterização foi conduzida em uma atmosfera levemente redutora ($\text{N}_2 + 10\% \text{H}_2$) a uma temperatura constante de 1.120°C por 25 minutos – 30 minutos. Após resfriamento à temperatura ambiente, o

tratamento de oxidação a vapor foi conduzido a 540°C por 2 horas em um forno industrial contínuo. Antes da fosfatização, as amostras passaram por limpeza em uma solução ácida sulfúrica ou fosfórica (10% vol.) a 45°C por 5 minutos, e em seguida em uma solução alcalina fraca (2% vol.) a 50°C por 5 minutos para remover óleos e graxas. As amostras foram então enxaguadas em água a 50°C por 2 minutos. A etapa de ativação foi realizada imergindo-se as amostras em colóides de fosfato de manganês à temperatura ambiente por 5 minutos sob agitação. As amostras ativadas foram então imersas em uma solução fosfatante composta de ácido fosfórico, fosfato de manganês e aceleradores a 95°C por 15 minutos. Depois de enxaguadas em água, as amostras fosfatadas foram imersas em uma solução passivadora a 50°C por 10 minutos e secadas com jato de ar quente a 50°C por 10 minutos. As características das amostras são apresentadas na Tabela 1. A preparação das amostras para os testes tribológicos envolveu corte com disco de precisão e limpeza ultra-sonora em acetona por 5 minutos. Seis diferentes corpos-de-prova foram preparados e testados para cada grupo de amostras, totalizando 24 corpos-de-prova ensaiados.

Ensaio de deslizamento a seco foram conduzidos em um tribômetro com movimento linear alternado. Nestes ensaios, uma esfera de rolamento de aço duro com diâmetro de 10 mm é posicionada sobre a superfície da amostra sob uma carga normal aplicada por peso morto de 120 N. A amostra é movimentada por um mecanismo excêntrico que gera uma trajetória alternada a uma frequência de 2 Hz. A amplitude do movimento é de 6 mm.

Durante os testes, a resistência do contato e o coeficiente de atrito foram adquiridos simultaneamente. A esfera e a amostra foram isoladas eletricamente. Um circuito condicionador de sinais fornecia uma saída de tensão proporcional à resistência elétrica durante os testes. A força de atrito era medida utilizando-se uma célula de carga. O coeficiente de atrito era calculado dividindo-se esta força pela força normal aplicada.

As superfícies das amostras desgastadas foram examinadas por microscopia ótica e eletrônica de varredura. Interferometria a laser foi utilizada para medir o volume das crateras de desgaste produzidas. Uma rotina computacional foi implementada em Matlab[®] para calcular o volume de desgaste a partir de mapas interferométricos 3D. Para algumas amostras selecionadas, seções longitudinais das superfícies desgastadas foram preparadas e observadas utilizando-se microscopia ótica e MEV. Uma rotina especial de preparação metalográfica foi desenvolvida para estas amostras.⁽²⁾

Os ensaios abrasométricos foram conduzidos em um microabrasômetro. Nestes ensaios, uma marca circular é produzida por uma lama abrasiva entre uma esfera girante de raio $R = 15$ mm e a amostra, reproduzindo a geometria da esfera na amostra. A esfera é movimentada pelo atrito com um eixo rotativo sobre o qual ela posiciona-se, sendo que a carga aplicada sobre a amostra ($0,22 \pm 0,01$ N) é essencialmente decorrente do peso da esfera.⁽¹⁰⁾ O coeficiente de desgaste (k) é calculado em função do diâmetro da marca de desgaste circular produzida na amostra (b), da distância de deslizamento (S) e da carga normal (N) utilizando-se a relação $k = \pi b^4 / 64 R S N$, para $b \ll R$. As esferas passavam por limpeza ultra-sonora antes de cada teste. A rotação do eixo foi mantida constante em 150 rpm, que representa uma velocidade relativa entre a esfera e a amostra de aproximadamente $0,11 \text{ ms}^{-1}$. Testes seqüenciais dentro de uma faixa de tempo de duração de teste (10 s, 20 s, 30 s, 40 s, 50 s, 60 s, 80 s, 100 s, 120 s, 180 s, 240 s, 300 s e 360 s) foram conduzidos no mesmo local da amostra com o objetivo de determinar-se o regime permanente de desgaste. Um lama abrasiva composta de 75 g de sílica

(SiO₂) suspensa em 100 g de água destilada era alimentada continuamente sobre a esfera a uma taxa de aproximadamente 1 gota/s, a qual estava sob constante agitação para evitar precipitação dos abrasivos.

3 RESULTADOS

Exemplos de seções longitudinais por microscopia ótica das amostras revestidas são apresentados na Figura 1. Camadas de óxido escuro razoavelmente homogêneas podem ser vistas em (a) e (b). Além disso, a oxidação foi eficiente para produzir óxido tanto na superfície quanto nos poros internos. Nas amostras fosfatadas, as camadas de fosfato não puderam ser visualizadas (c) e (d), apesar de sua presença ter sido confirmada por EDX. Acredita-se que as camadas fosfatadas eram demasiadamente macias e, portanto, facilmente removíveis durante a etapa de polimento da preparação metalográfica. As amostras fosfatadas apresentaram uma camada de óxido muito porosa. Além disso, a fosfatização reduziu a espessura da camada de óxido sobre a qual o fosfato foi formado. No caso das amostras de espessura de óxido mais fina (4 μm, Figura 1c), foi inclusive possível visualizar descontinuidades na camada de óxido.

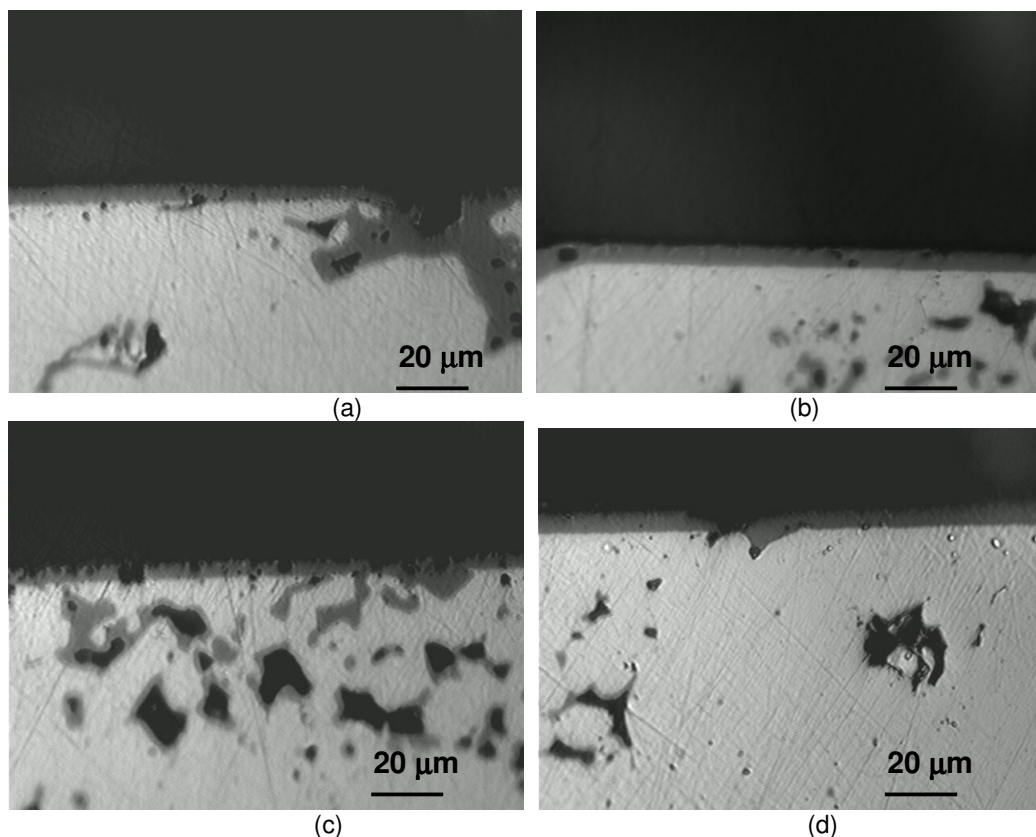


Figura 1. Exemplos de microscopia ótica das diferentes amostras (a) Amostra 1_5, 4 μm, não-fosfatada; (b) Amostra 2_4, 6 μm, não-fosfatada; (c) Amostra 1P_2, 4 μm, fosfatada; (d) Amostra 2P_4, 6 μm, fosfatada.

A Figura 2 mostra exemplos da evolução da resistência do contato e do coeficiente de atrito com o tempo para corpos-de-prova com uma espessura nominal de filme óxido de 4 μm na condição não-fosfatada (Amostra 1). Não foi possível

encontrar um padrão de comportamento fundamentado seja nas medições de coeficiente de atrito ou de potencial de contato. Por exemplo, o corpo-de-prova 1_1 manteve um elevado potencial de contato (acima de 40 mV) ao longo de todo o teste, com apenas pequenas regiões de baixo potencial de contato. O coeficiente de atrito, após uma tendência inicial de aumento, diminuiu e permaneceu razoavelmente constante em torno de 0,45. Já o corpo-de-prova 1_2, que teoricamente é igual ao corpo-de-prova 1_1, o potencial de contato esteve abaixo de 10 mV durante a maioria do teste, com poucos picos com valores mais altos. O coeficiente de atrito inicialmente permaneceu baixo (em torno de 0,35), aumentou para em torno de 0,5, em seguida diminuiu novamente (0,4) e finalmente estabilizou-se em torno de 0,45. Todas as outras amostras apresentaram comportamentos muito variáveis no que diz respeito a coeficiente de atrito e potencial de contato.

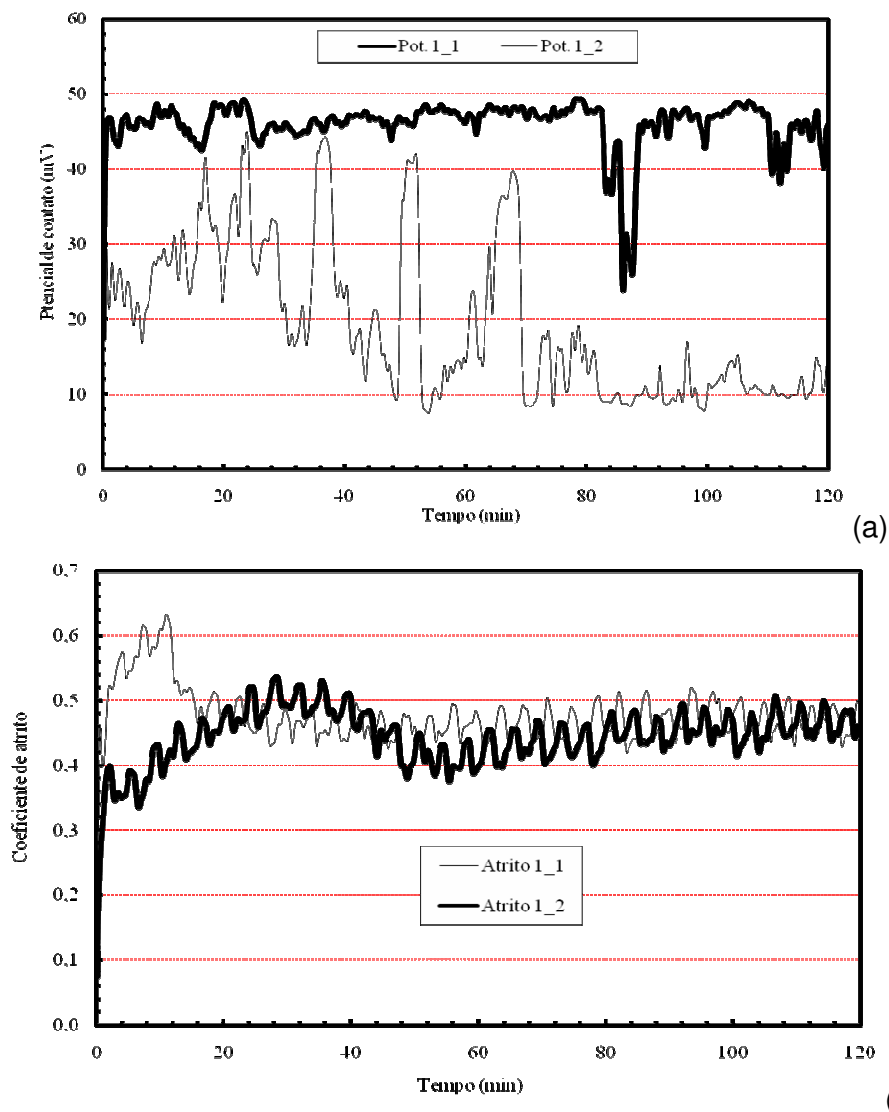


Figura 2. Exemplos da evolução das variáveis medidas com o tempo durante os ensaios de deslizamento alternado para uma espessura nominal de filme óxido de 4 μm (Amostra 1); (a) potencial de contato; (b) coeficiente de atrito.

A Figura 3 mostra exemplos de microscopias óticas das superfícies desgastadas após os ensaios de deslizamento. Em (a), apresenta-se um corpo de

prova do grupo Amostra 1 que teve o maior volume de desgaste dentro do grupo. O perfil longitudinal ao longo da amplitude do movimento (b) mostra claramente remoção de material durante o teste. Por outro lado, o corpo de prova com o menor volume de desgaste dentro do grupo Amostra 2P é mostrada em (c) e (d), onde se observa que o volume de desgaste é quase imperceptível.

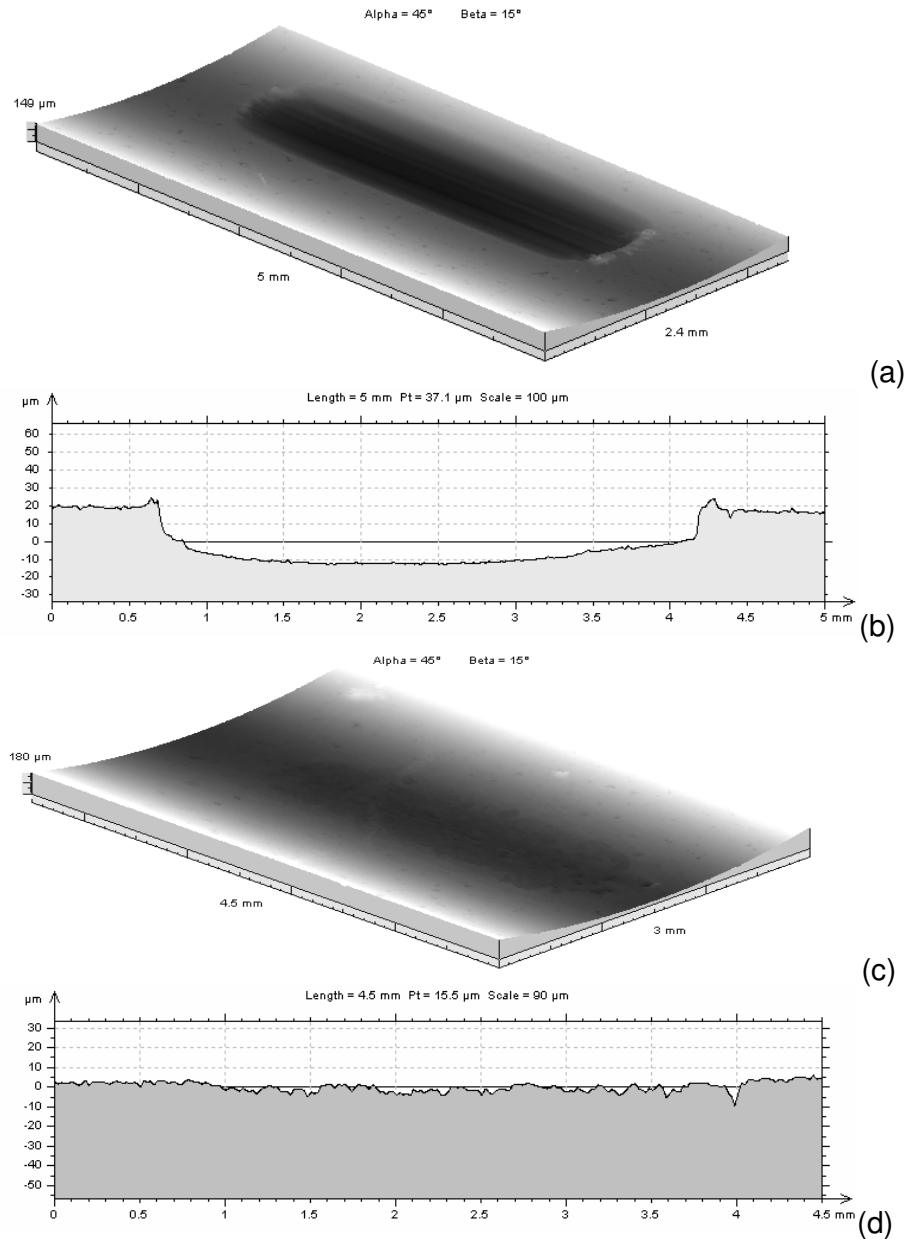


Figura 3. Exemplos de mapas topográficos interferométricos 3D e perfis longitudinais das superfícies desgastadas após os ensaios de deslizamento alternado; (a, b) corpo-de-prova 1_4; (c, d) corpo-de-prova 2P_5.

Os volumes desgaste para todas as amostras calculados a partir dos mapas interferométricos 3D são apresentados na Figura 4. Observa claramente que a amostra com uma espessura nominal de filme óxido sem posterior fosfatização (Amostra 1) apresentou as menores taxas de desgaste. Além disso, a variação entre os diferentes corpos-de-prova dentro da amostra foi a menor, o que refletiu em um

desvio padrão relativamente baixo. Já as amostras com a menor espessura de filme óxido (Amostras 1 e 1P) apresentaram as maiores taxas de desgaste. A fosfatização (Amostras 1P e 2P) aumentou tanto a taxa de desgaste volumétrica quanto o desvio padrão em relação às amostras não fosfatadas (Amostras 1 e 2).

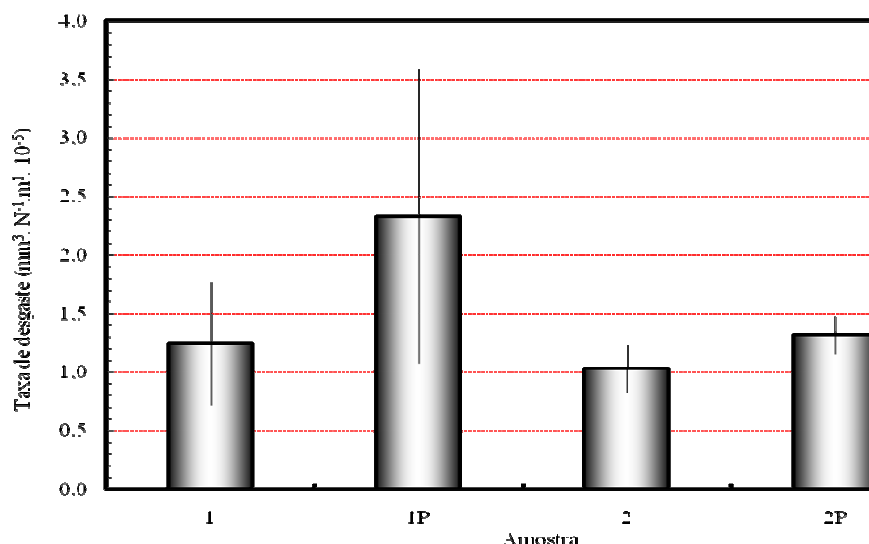


Figura 4. Desgastes volumétricos médios para os ensaios de deslizamento alternado.

Para os ensaios de microabrasão, os coeficientes de desgaste para cada amostra foram calculados para cada tempo de ensaio e estes valores são mostrados na Figura 5. Nos estágios iniciais dos ensaios, uma grande variação aparentemente aleatória foi observada para o coeficiente de desgaste. Após aproximadamente 10 minutos de ensaio, esta variação tornou-se bem menor, ocorrendo uma tendência de estabilização para um regime permanente de desgaste. Valores dos coeficientes de desgaste médios dentro do regime permanente de desgaste foram calculados com base em 8 ensaios para cada condição amostra/abrasivo.

Os coeficientes de desgaste médios dentro do regime permanente de desgaste são apresentados na Figura 6. Observa-se claramente que a fosfatização reduz a resistência ao desgaste e aumenta o desvio padrão dos resultados. As amostras com espessura nominal de óxido de 6 μm apresentaram maior resistência ao desgaste abrasivo que as amostras com espessura nominal de óxido de 4 μm . Este resultado foi semelhante ao encontrado para os ensaios de deslizamento alternado, apesar de o desvio padrão dos resultados ter sido menor.

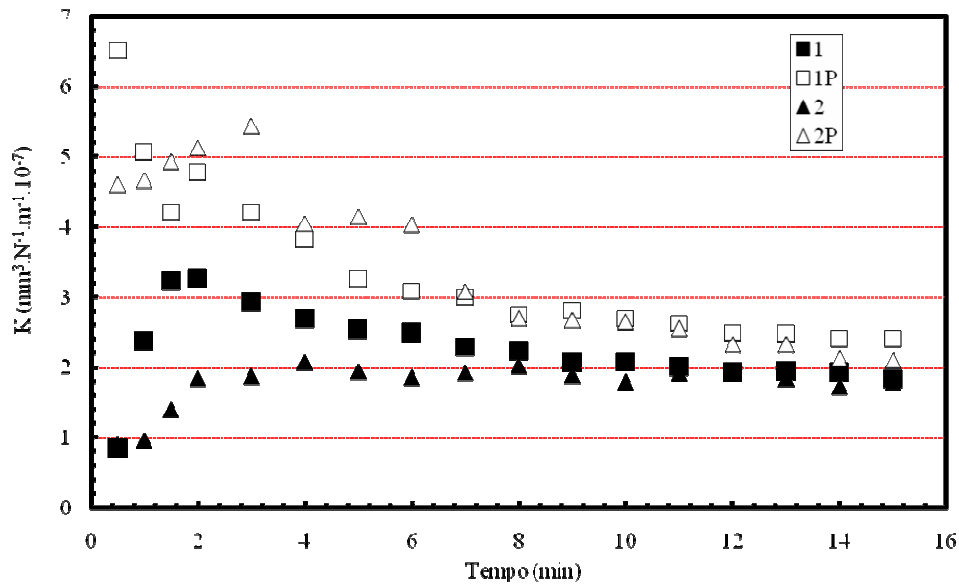


Figura 5. Evolução do coeficiente de desgaste com o tempo durante os ensaios de microabrasão.

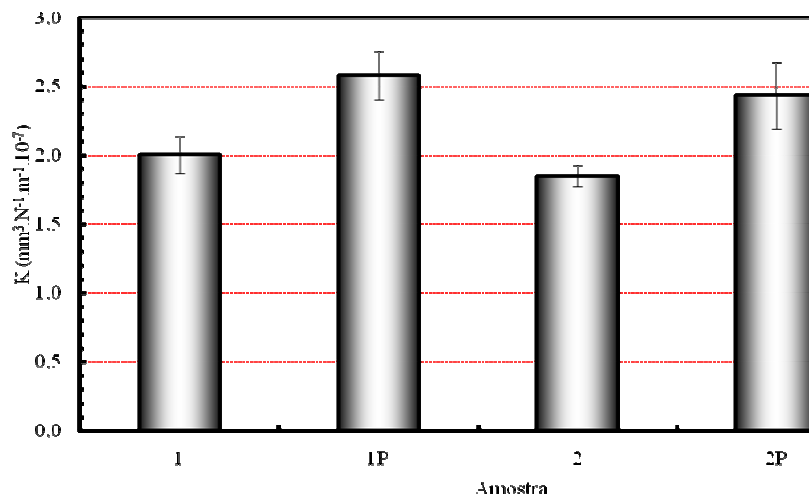


Figura 6. Coeficientes de desgaste médios para os ensaios de microabrasão.

As Figuras 7-(a) e (b) mostram um exemplo de uma marca de desgaste produzida após um ensaio de deslizamento alternado para um corpo-de-prova fosfatizado com uma espessura nominal de óxido de 4 μm cuja taxa de desgaste foi próxima à média apresentada pelo grupo (Amostra 1P). Análise por EDX fora da marca de desgaste (1) indicou principalmente a presença de Fe, Mn, P e O. Dentro das marcas de desgaste (2), as quantidades de P, Mn e O foram significativamente reduzidas. Já para um corpo-de-prova com taxa de desgaste bem inferior à média do grupo (c, d), a análise por EDX indicou uma grande quantidade de Mn, P e O mesmo dentro das marcas de desgaste. Esta afirmação é confirmada pela imagem por elétrons retro espalhados (BSE) apresentada em (d). Por outro lado, para um corpo-de-prova com taxa de desgaste bem acima da média do grupo (e, f), praticamente não havia Mn e P dentro da marca de desgaste e a quantidade de O foi reduzida de forma muito significativa, indicando remoção tanto da camada de óxido quanto da camada de fosfato.

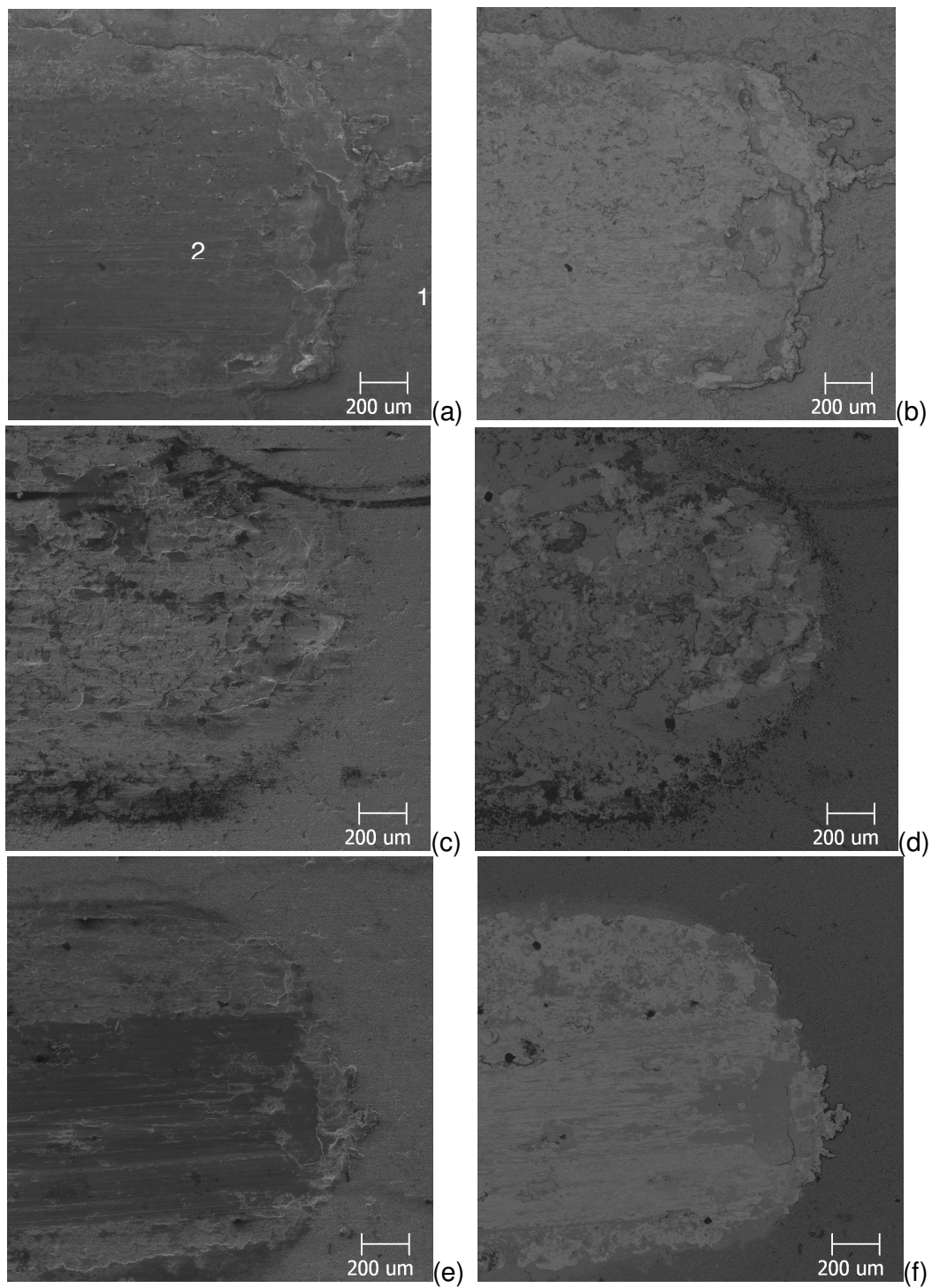


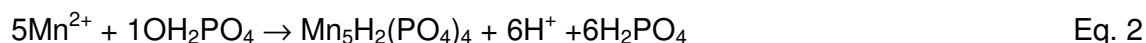
Figura 7. Exemplos de MEV das superfícies desgastadas das amostras fosfatadas; imagens BSE à direita; (a, b) corpo-de-prova 1P_3, desgaste médio; (c, d) 2P_4, desgaste muito baixo; (e, f) 1P_5, desgaste elevado.

4 DISCUSSÃO

Fosfatização é um processo de conversão química no qual o revestimento deriva-se parcialmente da solução e parcialmente do substrato. O ácido livre P_2O_5 presente na solução fosfatante entra em contato com a superfície de ferro, ocorrendo uma reação. Íons de Hidrogênio são consumidos e o Ferro é oxidado, de acordo com a equação 1:



A solução adjacente à superfície do metal é então neutralizada, levando à precipitação de espécies de fosfato menos solúveis, segundo a equação 2:



A substituição de Mn^{+2} por Fe^{+2} na solução leva à formação de um fosfato misto $(Fe,Mn)_5H_2PO_4$, que é então hidratado, dando hurealita.⁽⁷⁾ Por esta razão, a camada de óxido sobre a qual a camada de óxido forma-se pode ser reduzida e eventualmente até tornar-se descontínua em alguns pontos. Isto foi claramente observado nas observações microscópicas, em especial para a amostra com a camada de óxido nominal mais fina de 4 μm .

Uma grande variação foi observada para os valores de coeficiente de atrito e potencial de contato para corpos-de-prova dentro de um mesmo grupo de amostras, tanto na condição fosfatizada quanto não-fosfatizada. Os volumes de desgaste também variaram bastante, em especial para as amostras fosfatizadas. Finalmente, as amostras com filmes óxidos mais espessos apresentaram maior resistência ao desgaste tanto nos ensaios de deslizamento quanto nos ensaios de microabrasão. Para analisar estas tendências e a grande variação dos resultados, as superfícies desgastadas foram observadas por microscopia ótica e MEV.

A Figura 8 mostra imagens de MEV da seção longitudinal da marca de desgaste para um corpo-de-prova com taxa de desgaste próxima à média encontrada para a Amostra 1 (condição não-fosfatizada, espessura de óxido = 4 μm). Fora da marca de desgaste (a), o óxido aparece como uma camada escura. Dentro da marca de desgaste (b, c), observa-se a ocorrência do mecanismo de delaminação em algumas áreas, que eventualmente leva à remoção de debris grandes. Próximo às extremidades do comprimento do movimento alternado, onde a velocidade é virtualmente zero, o desgaste é mais intenso, com remoção de debris maiores. Os revestimentos óxidos são removidos dentro das marcas de desgaste.

A redução da capacidade de apoio para as amostras fosfatizadas poderia explicar seu comportamento inferior, uma vez que o substrato de ferro é muito macio.⁽³⁾ Oyamada e Inoue⁽⁹⁾ investigaram o desgaste lubrificado de ferro fundido revestido com fosfato de manganês em um aparato de teste oscilatório/rotatório, mas as amostras não possuíam a camada de óxido intermediária. Eles encontraram que nos períodos iniciais dos ensaios, enquanto o desgaste ocorria somente na camada de revestimento de manganês, a taxa de desgaste foi mais elevada que quando o desgaste ocorreu a uma profundidade intermediária, onde a camada de revestimento continha uma mistura de ferro fundido e fosfato de manganês. Como o fosfato de manganês por si só é macio, é somente a combinação de suas propriedades lubrificantes com a dureza do substrato que podem reduzir o desgaste. No caso dos resultados do presente trabalho, como o substrato de ferro puro é muito macio, as

propriedades lubrificantes benéficas obtidas com a fosfatização não podiam ser combinadas com a dureza do substrato, uma vez que a camada de óxido tinha sido diminuída pelo processo de fosfatização. Além disso, como os testes eram conduzidos em condições de deslizamento a seco, talvez os maiores benefícios possíveis de serem atingidos com a camada fosfatizada não puderam ser detectados. Apesar de os revestimentos fosfatados possuírem algumas propriedades lubrificantes devido à sua friabilidade, suas verdadeiras propriedades lubrificantes somente aparecem sob condições lubrificadas devido à absorção de lubrificante proporcionada pelos poros.⁽⁷⁻⁹⁾ Porém, deve-se salientar que, apesar de os revestimentos possuírem alta porosidade quando eles são inicialmente produzidos, é questionável se a porosidade sobrevive após a compressão gerada pelos ensaios de deslizamento. Esta possibilidade não foi investigada adequadamente neste trabalho, mas deve ser verificada em trabalhos posteriores por técnicas de caracterização adequadas.

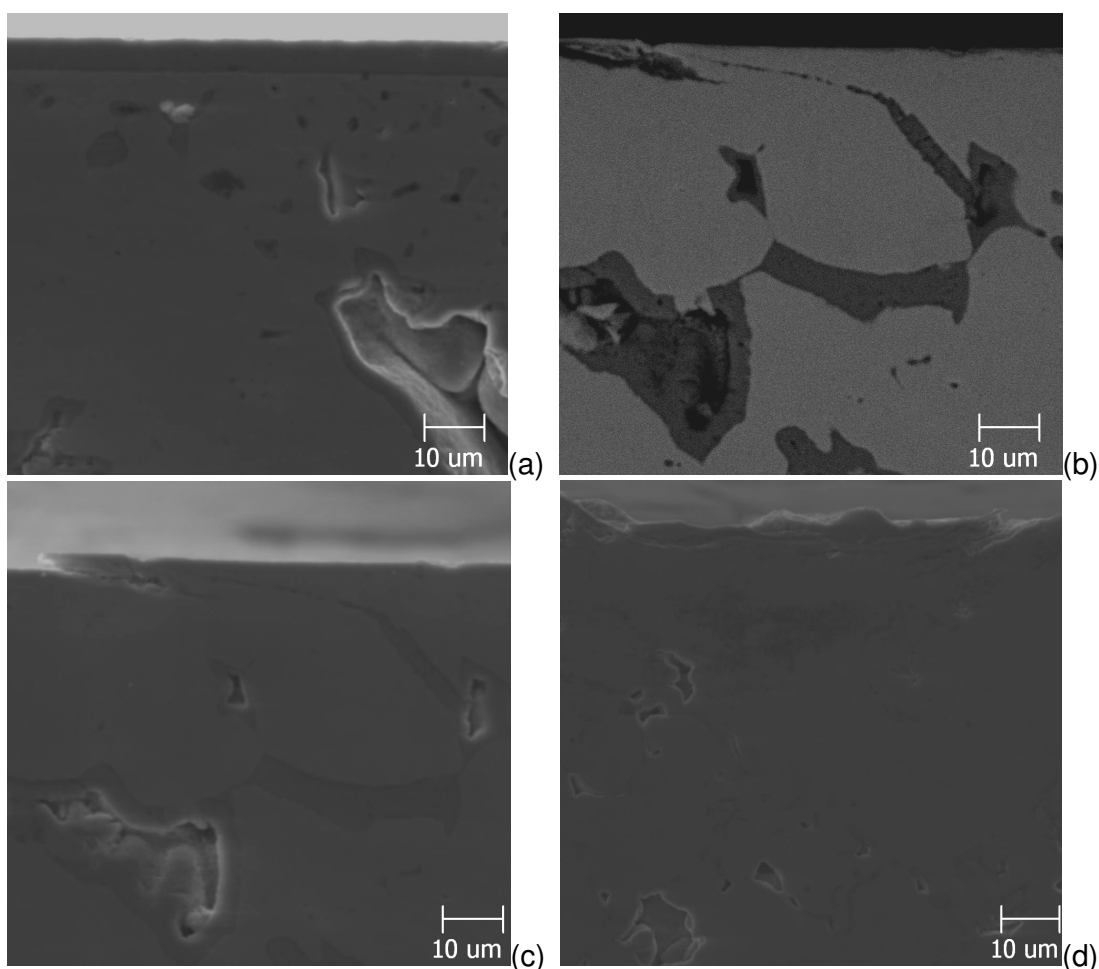


Figura 8. MEV da seção longitudinal da superfície desgastada, corpo-de-prova 1_5: (a) fora da marca de desgaste, BSE; (b) dentro da marca de desgaste; (c) dentro da marca de desgaste, BSE; (d) dentro da marca de desgaste, extremidade do deslizamento.

Em relação aos ensaios de microabrasão, as camadas de óxido superficiais já haviam sido penetradas quando o regime permanente de desgaste foi atingido, o que pode sugerir que o desgaste seja somente governado pelo comportamento do substrato, como já detectado em trabalhos anteriores.⁽⁶⁾ Neste sentido, diferenças

significativas no comportamento abrasométrico devido à presença de diferentes filmes superficiais não era esperada. Porém, a presença de poros nestas amostras, que também são revestidos durante o processo de oxidação, poderia explicar a diferença observada entre as amostras.

Tem sido largamente identificado na literatura^(11,12) que revestimentos lubrificantes macios, com baixo coeficiente de atrito, podem levar intensificar o desgaste abrasivo. O mecanismo de microcorte durante a abrasão é mais eficiente na presença de um lubrificante, porque este ajuda a manter arestas cortantes afiadas nas partículas abrasivas. Adicionalmente, um baixo coeficiente de atrito entre a ponta ativa do abrasivo e a amostra torna o ângulo crítico para o corte mais negativo, aumentando a remoção de material.

As amostras fosfatizadas também tiveram um desempenho inferior nos ensaios de deslizamento, o que foi atribuído à redução da capacidade de apoio. Um outro efeito que pode agir conjuntamente neste caso é a possibilidade de ocorrência de desgaste abrasivo nos ensaios por deslizamento, que deverá ser mais eficiente para as amostras fosfatizadas, caso os debris de desgaste na interface de contato sejam oxidados e levem a desgaste abrasivo. A presença de riscos nas trilhas de desgaste durante os ensaios de deslizamento reforça essa suposição.

5 CONCLUSÕES

O comportamento tribológico de revestimentos multifuncionais compostos de uma camada dura de óxido e de uma camada macia de fosfato de manganês foi comparado com o comportamento de revestimentos óxidos simples. Observou-se que:

- a oxidação a vapor produziu camadas de óxido homogêneas cobrindo a superfície do substrato, incluindo poros superficiais e internos;
- o tratamento subsequente de fosfatização reduziu a espessura da camada de óxido, que se tornou porosa e eventualmente descontínua em algumas regiões;
- as amostras fosfatizadas apresentaram resistências ao desgaste adesivo e abrasivo inferior ao das não-fosfatizadas. Este efeito foi mais significativo para amostras com camada prévia de óxido mais fina.

REFERÊNCIAS

- 1 Lim, S.C. e Brunton, J.H. The Unlubricated Wear of Sintered Iron. *Wear*, v.113, n.3, p.371-382. 1986.
- 2 De Mello, J.D.B., Binder, R., Klein, A.N. e Hutchings, I.M. Effect of compaction pressure and powder grade on microstructure and hardness of steam oxidised sintered iron. *Powder Metallurgy*, v.44, n.1, p.53-61. 2001.
- 3 De Mello, J.D.B. e Hutchings, I.M. Effect of processing parameters on the surface durability of steam-oxidized sintered iron. *Wear*, v.250, p.435-448. 2001.
- 4 Molinari, A. e Straffellini, G. Tribological Behaviour of Steam Treated Ferrous Parts. *International Journal of Powder Metallurgy*, v.32, p.55-62. 1997.
- 5 De Mello, J.D.B., Bozzi, A.C. e Binder, R. Effect of Industrial Processing Parameters on the Surface Durability of Steam Oxidised Sintered Iron. *Austrib2002*. Perth, Australia: Elsevier, 2002.
- 6 Da Silva, W.M., Binder, R. e De Mello, J.D.B. Abrasive wear of steam-treated sintered iron. *Wear*, v.258, n.1-4, Jan, p.166-177. 2005.

- 7 Hivart, P., Hauw, B., Bricout, J.P. e Oudin, J. Seizure behaviour of manganese phosphate coatings according to the process conditions. *Tribology International*, v.30, n.8,p.561-570. 1997.
- 8 Hivart, P., Hauw, B., Duber, L. e Bricout, J.P. Numerical identification of bulk behavior law of manganese phosphate coatings. Comparison with tribological properties. *Journal of Coatings Technology*, v.75, n.942, p.37-44. 2003.
- 9 Oyamada, T. e Inoue, Y. Evaluation of the wear process of cast iron coated with manganese phosphate. *Tribology Transactions*, v.46, n.1, p.95-100. 2003.
- 10 Trezona, R.I. e Hutchings, I.M. Three-body abrasive wear testing of soft materials. *Wear*, v.235, p.209-221. 1999.
- 11 Samuels, L.E. Abrasives - Their Use in the Machining of Metals. *Physics in Technology*, v.16, n.5, p.214-220. 1985.
- 12 Hutchings, I.M. *Tribology - friction and wear of engineering materials*. London: Arnold. 1992. 273 p.