

DESGASTE DE POLIURETANO POR EROSÃO ÚMIDA: DESENVOLVIMENTO DE UM ENSAIO TECNOLÓGICO

Vinícius Augusto da Silva ¹
Adilson Rodrigues da Costa ¹

Resumo

A crescente utilização de minério de ferro e a diminuição de jazidas com minérios de teor elevado em ferro para a produção de aço têm forçado cada vez mais as mineradoras a explorarem suas reservas minerais de baixo teor de ferro. Durante o processo de tratamento e transporte destes minerais utiliza-se de tubulações que possibilitam a movimentação do minério moído e diluído em água. No entanto, o baixo teor de ferro somado aos altos teores de silicatos, altamente abrasivos, contidos nestes minerais resulta no aumento significativo do desgaste das superfícies em contato com esta polpa de minério. Diante da atual demanda de produção do minério de ferro e devido ao acentuado desgaste provocado nas tubulações e equipamentos nas etapas de tratamento e transporte de concentrado o presente trabalho objetivou avaliar o comportamento ao desgaste por erosão úmida de amostras de poliuretano utilizado para revestir as tubulações de polpa de concentrado de minério de ferro desenvolvendo para tal fim um ensaio tecnológico capaz de simular as condições de desgaste por erosão úmida.

Palavras-chave: Minério de ferro; Poliuretano; Desgaste; Erosão; Abrasão.

POLYURETHANE WEAR BY WET EROSION: DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGICAL TEST

Abstract

The increasing use of iron ore and the reduction of ore deposits with high ore containing high in iron for steel production have forced more and more of the mining companies to exploit its mineral reserves of low iron content. During the process of treatment and transportation of these minerals, uses pipes that allow the movement of ore milled and diluted in water. However, the low iron content in addition to the high levels of silicates, highly abrasive, contained in these minerals results in a significant increase of wear on the surfaces in contact with the ore pulp. In the face of the current demand for production of iron ore, and due to the pronounced wear as a result of the piping and equipment in stages of treatment and transport of concentrate this study aimed to evaluate the behavior to wear by erosion of wet samples of polyurethane used to coat the pipes of pulp of concentrated iron ore developing for this purpose a test of technology capable of simulating the conditions of wear by wet erosion.

Keywords: Iron ore; Polyurethane; Wear; Erosion; Abrasion.

I INTRODUÇÃO

Nos processos de extração, beneficiamento e transporte de minério de ferro é notório o desgaste dos equipamentos por erosão, abrasão e fadiga dentre outros mecanismos, devido à condição severa de operação. A degradação das superfícies dos componentes dos sistemas de bombeamento e transporte (desgaste) resulta em altos custos e indisponibilidade de equipamentos tornando essenciais os estudos de materiais que suportem melhor esta condição de trabalho.

Dentre os vários materiais atualmente aplicados na mineração o uso de elastômeros é crescente para as condições de desgaste, visando ao aperfeiçoamento do tribosistema [1].

Dentre os vários elastômeros, destaca-se o poliuretano desenvolvido por Otto Bayer no século XX, visando obter um material com propriedades superiores e de baixo custo em substituição às fibras de poliamida [2,3]. Como materiais de revestimento, podem ser utilizados em aço,

¹Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – DEMET, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.
E-mail: viniciusitauna@hotmail.com



concreto, plástico, madeira, metal, papel, couro, dentre outros [2,4]. A aplicação do poliuretano como material de revestimento tem crescido de maneira significativa, principalmente na indústria da mineração, devido ao custo moderado, excelentes propriedades mecânicas, elevada resistência ao desgaste por abrasão, corrosão e oxidação, principalmente quando aplicados em materiais metálicos, não sendo indicados como revestimento de materiais de fácil decomposição [5].

Apesar da crescente utilização do poliuretano para revestimento de dutos e outras aplicações na mineração o conhecimento do comportamento tribológico dos PU's ainda é escasso. Diante disso, neste trabalho foi estudado o comportamento tribológico de três amostras de PU aplicado no revestimento interno de tubulações de polpa de minério de ferro. Para este estudo desenvolveu-se um ensaio tecnológico de erosão úmida reproduzindo, em escala laboratorial a condição operacional existente em plantas de beneficiamento de minério de ferro. O equipamento foi projetado e montado no “LESTA – Laboratório de Engenharia de Superfícies e Técnicas Afins” da Escola de Minas/UFOP e para os ensaios foram utilizadas amostras de minério de ferro oriundas da etapa de moagem primária do processo produtivo de beneficiamento onde se verifica a condição de maior severidade em desgaste por erosão. Após os ensaios de desgaste, foram calculadas as perdas de massa e a taxa de desgaste específica de cada amostra e realizadas análises microscópicas para visualização e interpretação da morfologia das regiões desgastadas nos testes. Isto possibilitou a correlação com as propriedades mecânicas dos PU's e a realização de análises comparativas com o observado no cotidiano da indústria. Finalmente, após a interpretação dos resultados das três amostras de PU, foi possível classificar os polímeros quanto à resistência ao desgaste erosivo, validar o equipamento e a metodologia proposta possibilitando ensaios com outros materiais e abrasivos em diferentes condições operacionais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Equipamento de Erosão Úmida

A concepção da máquina para ensaios de erosão úmida resultou da pesquisa bibliográfica e da observação de testes laboratoriais de erosão seca. A partir destas observações foi construído o um protótipo mostrado na Figura 1.

O princípio de funcionamento do equipamento baseia-se na injeção de água pressurizada com velocidade constante e adição contínua de abrasivo (amostra de minério de ferro proveniente da moagem primária) através de parafuso sem fim, com regulagem manual. A polpa assim formada é projetada a alta velocidade contra a amostra de PU posicionada no porta corpo de prova distante 50 mm à frente da saída da mistura água pressurizada/abrasivo sólido de minério de ferro. Após projeção da polpa de minério

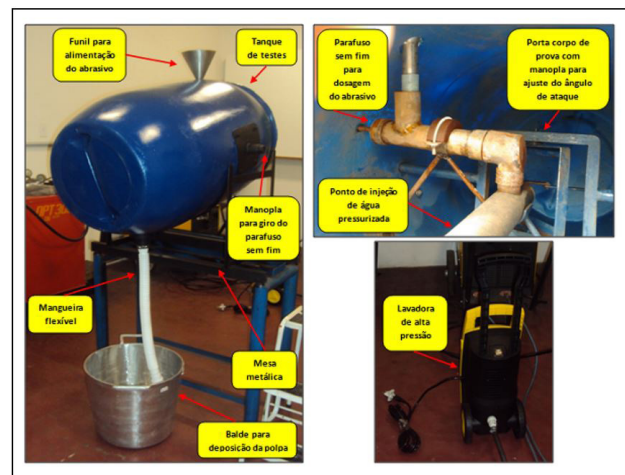


Figura 1. Detalhes do equipamento de erosão úmida.

de ferro contra a amostra de PU, esta é descartada pela parte inferior do tanque de testes sendo depositada em balde metálico. A polpa é utilizada somente uma única vez em cada um dos ensaios para que se tenha preservada a granulometria inicial do abrasivo selecionado para os testes de erosão. Na Figura 2 são apresentados o fluxo esquemático das etapas do ensaio de erosão úmida (a) e o princípio de funcionamento do ensaio de erosão úmida (b).

Optou-se por realizar 10 ensaios com cada um dos 3 tipos de poliuretano, com tempos e concentrações distintas reproduzindo a variabilidade encontrada em processo industrial. No início e fim de cada um dos ensaios, as amostras de PU foram pesadas numa balança digital com precisão de 10^{-4} gramas. Diante da variação de tempos de testes e concentração entre ensaios e entre tipos de PU's, utilizou-se a taxa de desgaste como fator de comparação para análise do desempenho de cada tipo de poliuretano. O ângulo de incidência do jato de polpa foi de 90° , ajustado através de um transferidor acoplado à manopla de controle angular da porta amostra. A velocidade de impacto do jato de polpa foi de 25 m/s, calculada com base na potência e no diâmetro do bico de saída da água pressurizada. O fluido utilizado foi água de torneira sem nenhum aditivo químico.

2.2 Amostras de Poliuretano

Para os ensaios de erosão úmida foram utilizadas 3 amostras de PU's, mais aplicados em revestimentos de tubulação utilizados em transporte de polpa em mineração. As amostras foram fornecidas nas dimensões de (15 cm × 15 cm × 2 cm), conforme ilustrado na Figura 3.

As amostras foram numeradas de 01 a 03 (PU01, PU02 e PU03) de modo a diferenciá-las resguardando sua origem. No Laboratório de Engenharia de Superfícies e Técnicas Afins - LESTA foram pesados os corpos de provas utilizados nos ensaios e foram analisadas propriedades químicas e físicas importantes para o objetivo do estudo.

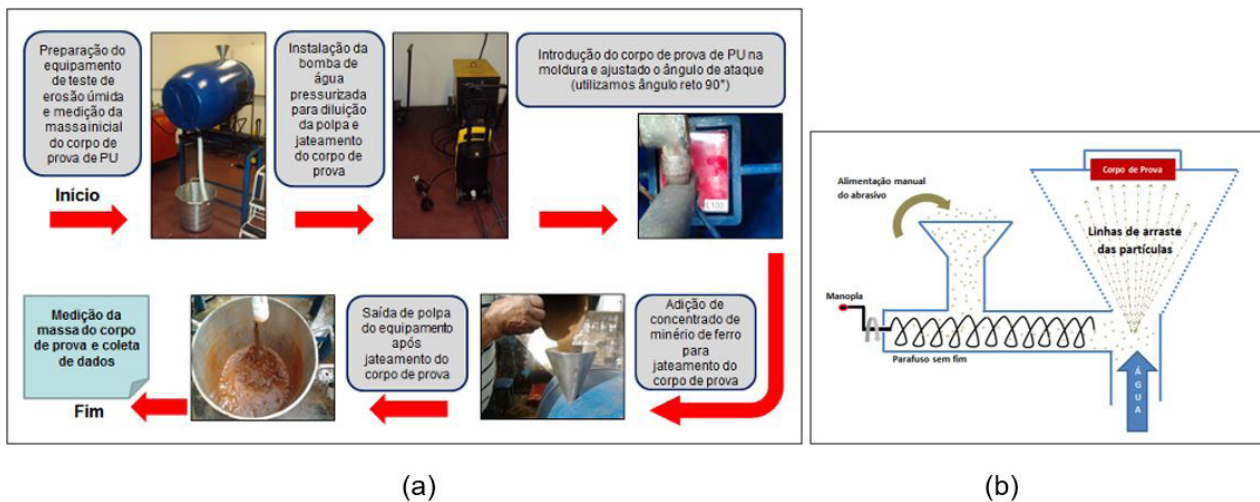


Figura 2. (a) Fluxo esquemático com as etapas do ensaio de erosão úmida definidas para o trabalho. (b) Princípio de funcionamento do ensaio de erosão úmida.

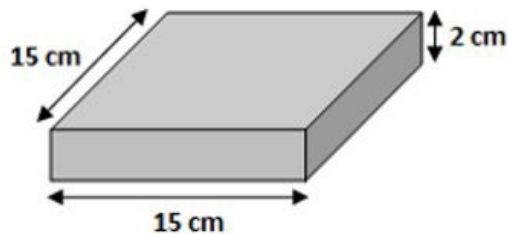


Figura 3. Geometria e dimensões dos corpos de prova.

Para obter a dureza das amostras de PU utilizou-se um durômetro modelo Teclock Hardness Testes GS-706.

A densidade dos poliuretanos foi medida pelo aparelho *multipycnometer* à gás hélio da marca *Quantachrome Instruments*.

Outras propriedades importantes das amostras de poliuretano analisadas neste trabalho como resistência à tração, alongamento e resiliência foram fornecidas pelo fabricante das amostras.

Após realizados os ensaios de erosão, os corpos de prova de PU foram levados para observação ao microscópio óptico quantitativo com aquisição e análise de imagens, modelo DMR.

2.3 Preparação do Material Abrasivo

Para material abrasivo foi utilizado minério de ferro fornecido pela empresa Samarco Mineração S.A. oriundo da etapa de moagem primária do processo de beneficiamento onde se verifica a condição de maior severidade em desgaste por erosão. Foram utilizados 90 kg de minério de ferro seco para os 10 ensaios com cada um dos 3 corpos de prova de PU. A análise da distribuição granulométrica das partículas

abrasivas fornecidas pelo laboratório da empresa é mostrada na Figura 4. Além da análise granulométrica foi fornecida a análise química mostrada na Tabela 1 a fim de identificar os componentes presentes na amostra de minério de ferro.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são mostrados os resultados das propriedades dos poliuretanos utilizados no trabalho. Analisando os resultados das propriedades das amostras de poliuretano nota-se que a dureza dos 3 PU's são relativamente próximas sendo que o PU03 apresenta a menor dureza e o PU01 a maior. A densidade também foi muito próxima para as 3 amostras assim como o alongamento. A grande diferença é percebida na resistência à tração e na resiliência onde se percebe que o PU02 apresenta valores bem menores destas duas propriedades quando comparado com os PU01 e PU3. A diferença nestas duas propriedades será de fundamental importância para a análise dos resultados dos ensaios de erosão úmida.

Após conclusão da montagem do equipamento de testes de erosão úmida e preparação das amostras de PU foram realizados 10 ensaios com cada uma das 3 amostras. Os parâmetros utilizados e os resultados de perda de massa e taxa de desgaste estão apresentados na Tabela 3. Para a leitura dos resultados dos ensaios foi admitido em erro experimental de 5%, sem prejudicar a análise dos mesmos.

A vazão específica foi calculada de acordo com a Equação 1:

$$\text{Vazão específica da polpa} = \frac{\text{Massa total do abrasivo}}{\text{Volume total de água}} \times \frac{1}{\text{Tempo total dos ensaios}} \quad (1)$$

A perda de massa das 3 amostras foi medida após os 10 ensaios e foi calculada a taxa de desgaste de acordo com a Equação 2:

$$\text{Taxa de desgaste} = \frac{\text{Perda de massa de PU}}{\text{Vazão específica}} \quad (2)$$

Com base nos resultados de perda de massa e do cálculo da taxa de desgaste das amostras de diferentes PU's é possível fazer algumas correlações significativas relativas ao comportamento de cada tipo de poliuretano submetido às condições de erosão similar ao que se percebe em tubulações revestidas utilizadas para o transporte de polpa de minério de ferro.

Na Figura 5 é apresentado um gráfico correlacionando a dureza das amostras de PU com a taxa de desgaste.

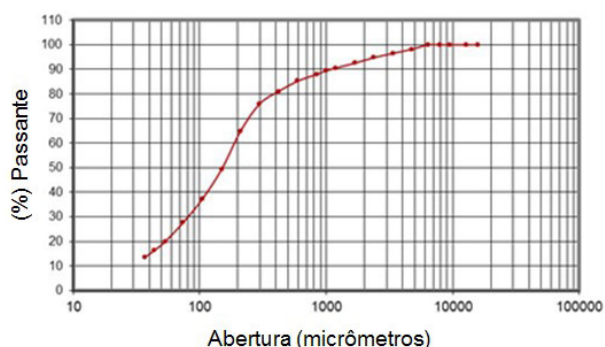


Figura 4. Curva de distribuição do tamanho de partículas do material abrasivo utilizado no trabalho.

Percebe-se que não é possível afirmar que há relação direta entre a taxa de desgaste e a dureza dos PU's. O PU03 que possui a menor dureza entre os 3 tipos de PU apresentou a maior taxa de desgaste, enquanto o PU01 que obtém a maior dureza apresentou taxa de desgaste superior ao PU02 que tem dureza intermediária considerando as 3 amostras.

Li e Hutchings [6] observaram em suas pesquisas uma tendência geral de aumento da taxa de erosão com o aumento da dureza, porém eles utilizaram amostras que variavam de 20 a 90 Shore A, constatando que em menores durezas (abaixo de 60 Shore A) a relação direta com a taxa de desgaste é mais nítida. Em amostras com durezas acima de 75 Shore A até 90 Shore A, a relação com a taxa de desgaste não fica clara.

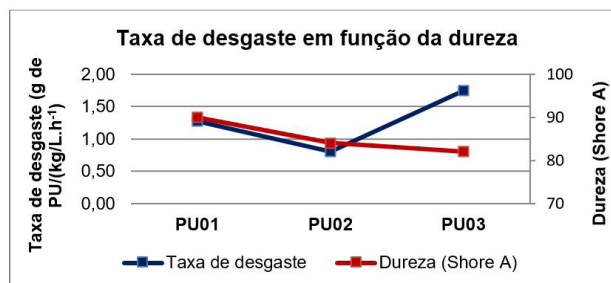


Figura 5. Gráfico da correlação da taxa de desgaste com a dureza das amostras de PU.

Tabela 1. Resultado da análise química do material abrasivo

Amostra	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PPC	MnO ₂
Minério de ferro - Descarga da Moagem Primária – Samarco Mineração (%)	55,03	18,72	0,36	0,033	2,09	0,080

Tabela 2. Resultados das propriedades dos 3 tipos de poliuretano utilizados no trabalho

Amostras	PU01	PU02	PU03
Massa inicial (g)	375,236	400,313	379,408
Dureza (Shore A)	90	84	82
Densidade (g/cm ³)	1,10 ± 0,01	1,15 ± 0,01	1,10 ± 0,01
Resistência à tração (MPa)	31,0	18,6	34,5
Alongamento (%)	450	450	490
Resiliência Bashore (%)	45	28	58

Tabela 3. Resultados dos ensaios de erosão úmida das 3 amostras de poliuretano

Resultados	PU01	PU02	PU03
Massa total de abrasivo - minério de ferro (kg)	30,0	27,5	28,9
Volume total de água para diluição (l)	113,15	89,3	115,85
Concentração da polpa em volume	6,23%	7,24%	5,86%
Duração total dos ensaios (s)	1286	975	1317
Vazão específica da polpa [(kg/l)/h]	0,742	1,137	0,682
Massa inicial (g)	375,236	400,313	379,408
Massa final após ensaios (g)	374,291	399,397	378,215
Perda de massa total (g)	-0,945	-0,916	-1,193
Taxa de desgaste (g de PU/(kg/l.h ⁻¹))	1,273	0,806	1,750

Na Figura 6 é apresentado o gráfico correlacionando a resistência à tração com a taxa de desgaste das amostras. Li e Hutchings [6] em suas pesquisas observaram que a alta resistência à erosão foi encontrada em materiais mais macios e que apresentam também as menores resistências à tração. Nota-se que no presente trabalho a correlação da taxa de desgaste com a resistência à tração também é unívoca. O PU02 que apresenta a menor resistência à tração comparada com os PU01 e PU03 foi justamente a que apresentou a menor taxa de desgaste - tal como observado por Li e Hutchings [6] - mesmo sendo submetido à concentração de abrasivo maior.

Na Figura 7 é apresentado o gráfico correlacionando a resiliência Bashore com a taxa de desgaste das amostras. Assim como visto para a resistência à tração, a taxa de desgaste é maior nas amostras que apresentam maiores valores de resiliência. Não é possível afirmar que esta relação seja sempre direta e nem linear para o desgaste erosivo, pois há alguns estudos como o trabalho realizado por Oliveira [7], no qual ele observou que a propriedade mecânica resiliência teve uma correlação polinomial de segunda ordem com a taxa de desgaste abrasivo dos poliuretanos testados. Em seus estudos de desgaste à abrasão Franco et al. [8] observaram que o aumento da resiliência e do alongamento máximo na ruptura colaboraram para um aumento na resistência ao desgaste abrasivo. Portanto, é importante não considerar esta propriedade isoladamente e sim correlacioná-la com outras propriedades como a dureza e a resistência à tração como fizemos neste trabalho.

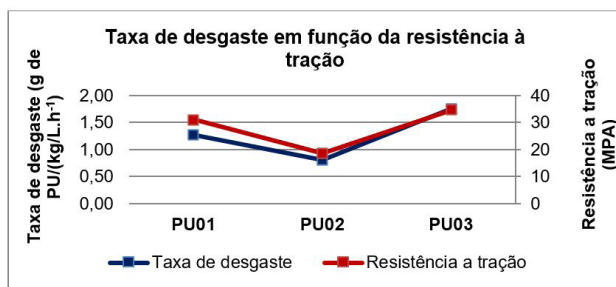


Figura 6. Gráfico da correlação da taxa de desgaste com a resistência à tração das amostras de PU.

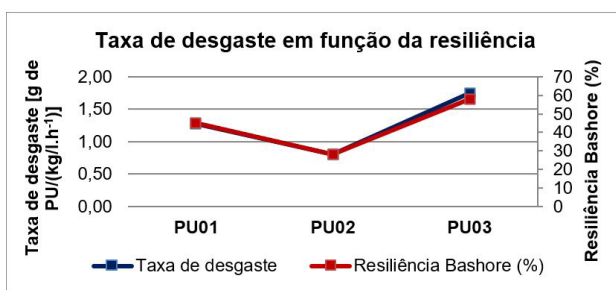


Figura 7. Gráfico da correlação da taxa de desgaste com a resiliência Bashore das amostras de PU.

Depois de realizados os ensaios os corpos de prova de PU foram levados para observação ao microscópico óptico para análise da superfície erodida na busca de informações adicionais sobre o comportamento de cada um dos tipos de PU's quando submetidos a este mecanismo de desgaste.

Na Figura 8 estão apresentadas as micrografias ópticas com luz polarizada da superfície dos corpos de prova após os ensaios, nas quais observamos detalhes morfológicos do desgaste erosivo.

Analisando as micrografias das 3 amostras de PU's, é possível perceber com mais nitidez detalhes morfológicos do desgaste provocado pela erosão da polpa abrasiva projetada contra as amostras. Fica evidente a maior deterioração da superfície do PU03 comparado com os demais e que além da erosão na superfície é possível detectar poros, que são defeitos de fabricação das peças de PU, devido à formação de bolhas de ar a alta temperatura na etapa de fusão do PU. Também podem ser vistos nas imagens partículas de minério de ferro incrustadas na superfície das amostras, provenientes da polpa projetada nos ensaios.

A presença de poros nas suas superfícies das amostras de PU's, poros estes que são provenientes do processo de fabricação, contribui significativamente, para a incorporação de partículas abrasivas durante o processo de jateamento de polpa nos ensaios de erosão. Isto se deve ao fato das partículas abrasivas chegarem com grande energia cinética na superfície, gerando um percurso de cortes e/ou furos, ficando ao fim destes incrustadas na superfície. Este fenômeno também foi reportado por Li e Hutchings [6], Oliveira [7] e Arnold [9]. Estes autores constataram que houve a incorporação de partículas abrasivas oriundas do ensaio de desgaste erosivo na superfície dos materiais que estudaram. A velocidade de incidência empregada no teste de erosão do trabalho de Li e Hutchings [6] foi de 50 m/s, o dobro da velocidade utilizada neste trabalho. Já Oliveira [7] optou por adotar uma velocidade de incidência de 15 m/s, o que demonstra que a incorporação de partículas abrasivas na superfície do PU é um fenômeno recorrente em condições de bombeamento e jateamento de polpas abrasivas contra PU's.

Se a incorporação de partículas pode contribuir para reduzir o desgaste da superfície do PU, pode também resultar em aumento de massa em função da maior densidade da partícula abrasiva, por exemplo: a hematita (Fe_2O_3) $5,30 \text{ g/cm}^3$ e a sílica com densidade $2,65 \text{ g/cm}^3$, quando comparados com a densidade do PU que é pouco maior que 1 g/cm^3 . Tal aumento de massa foi identificado em diversos trabalhos como o de Artuzo [10] no qual foram feitos ensaios de abrasão com amostras de poliuretano e constatou-se que as amostras que mais se desgastaram, também foram as que apresentaram maior aumento de massa após os ensaios. O aumento de massa também foi verificado por Oliveira [7] em seus ensaios de erosão úmida no qual foi encontrado aumento de massa em quase todos os corpos de prova devido à incrustação de partículas de abrasivo nas superfícies dos PU's.

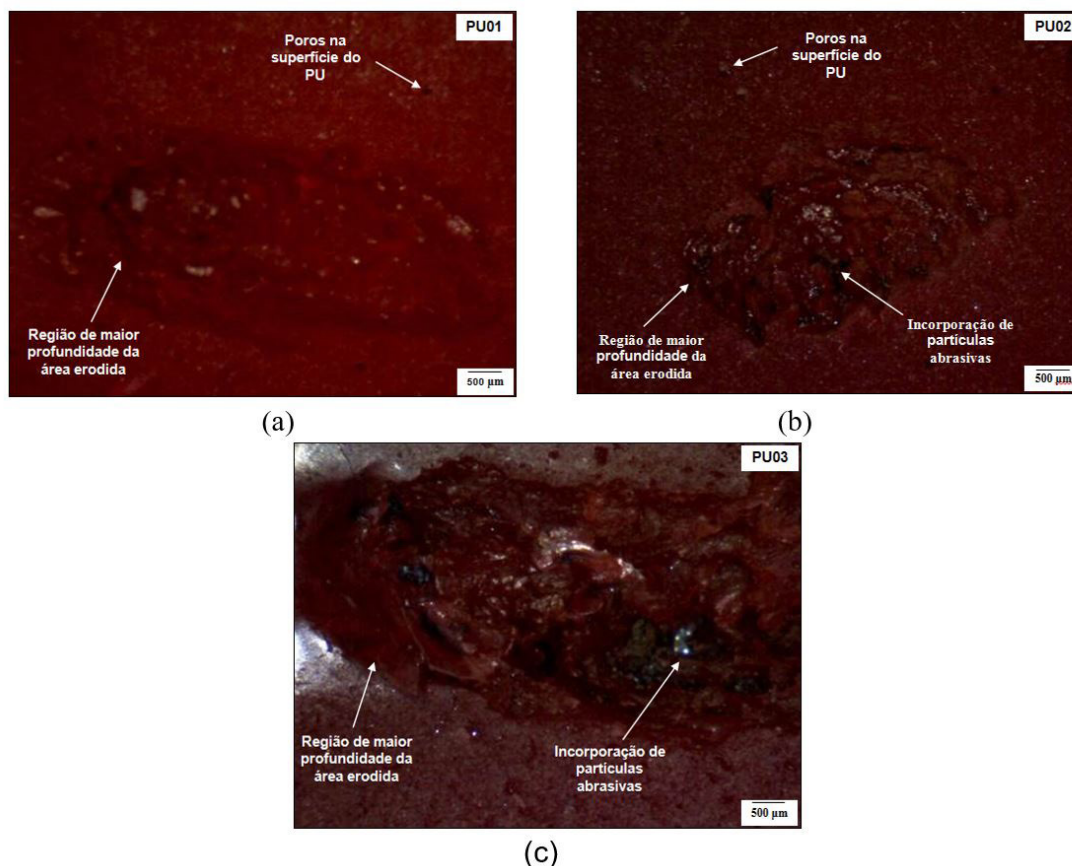


Figura 8. Análise microscópica com luz polarizada das superfícies erodidas das amostras de PU: (a) Detalhe da superfície erodida da amostra de PU01; (b) Detalhe da superfície erodida da amostra de PU02; (c) Detalhe da superfície erodida da amostra de PU03.

4 CONCLUSÕES

O equipamento e o ensaio de erosão úmida desenvolvidos no trabalho reproduziram, adequadamente, a condição de desgaste erosivo de revestimentos de poliuretano em escala industrial nos processos de bombeamento de polpas de minério de ferro.

Os parâmetros de velocidade do jato de abrasivo, ângulo de impacto e concentração da polpa abrasiva utilizados no trabalho possibilitaram o desgaste erosivo acelerado das amostras de PU propiciando análises (quantitativa e qualitativa), necessárias para a comparação de desempenho dos PU's.

As amostras de poliuretano utilizados no trabalho apresentaram durezas com valores próximos não sendo possível afirmar que houve relação direta das taxas de desgastes em função da dureza das amostras.

A propriedade resistência à tração mostrou forte correlação com o desgaste erosivo das amostras. O PU que teve a maior resistência à erosão foi o que apresentava a menor resistência a tração. Analisando os resultados constatou-se que o PU02 com resistência à tração 40% menor que o PU01 apresentou uma taxa de desgaste 37% inferior, o que reforça as hipóteses da correlação entre esta propriedade e o desgaste erosivo.

Na análise da propriedade “resiliência” com o desgaste das amostras constatou-se que a amostra que apresentou maior resistência ao desgaste foi a de menor resiliência, enquanto a amostra que apresentou maior taxa de desgaste é a amostra de maior resiliência, comprovando correlação direta entre esta propriedade e o desgaste erosivo.

Com o cálculo da taxa de desgaste e com o auxílio da microscopia óptica, foi possível concluir que o PU03 apresenta uma estrutura menos resistente às condições do ensaio do que o PU01 e o PU02 que se mostraram mais resistentes ao desgaste erosivo.

A análise da microestrutura das amostras dos PU's revelou poros que podem servir como regiões de acúmulo de partículas abrasivas contribuindo para o aumento de massa e formação de barreira contra a erosão podendo contribuir para redução do desgaste da superfície em condição de operação contínua.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Samarco Mineração e à empresa Pollyrubber por cederem gentilmente as amostras utilizadas neste trabalho, e, à REDEMAT/UFOP - Rede Temática em Engenharia de Materiais.

REFERÊNCIAS

- 1 Sare IR, Mardel JI, Hill AJ. Wear-resistant metallic and elastomeric materials in the mining and mineral processing industries: an overview. *Wear*. 2001;250:1-10.
- 2 Coutinho FMB, Delpech MC. Poliuretanos como materiais de revestimento de superfície. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. 1999;9(1):41-48.
- 3 Rocha MCG. Estudo cinético da reação entre polibutadieno hidroxilado e diisocianatos em solução de clorobenzeno [dissertação]. Rio de Janeiro: Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro; 1988.
- 4 Delpech MC. Síntese e caracterização de poliuretanos obtidos como dispersões aquosas [tese]. Rio de Janeiro: Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro; 1996.
- 5 Hill DJT, Killeen MI, O'Donnell JH, Pomery PJ, St John D, Whittaker AK. Laboratory wear testing of polyurethane elastomers. *Wear*. 1997;208:155-160.
- 6 Li J, Hutchings IM. Resistance of cast polyurethane elastomers to solid particle erosion. *Wear*. 1990;135:203-293.
- 7 Oliveira SPH. Contribuição ao estudo do desgaste erosivo e abrasivo de poliuretanos utilizados na indústria mineradora e petrolífera [dissertação]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2011.
- 8 Franco SD, Moraes JO, Ramos FF No, Piza MTP. Efeito das propriedades mecânicas no desgaste abrasivo de poliuretanos MDI-BD. In: Anais do XV Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC); 2015; Uberlândia. Uberlândia: UFU; 2015.
- 9 Arnold JC. Impact of small particles into rubber surfaces at glancing angles. *Journal of Applied Polymer Science*. 1997;64:2199-2210.
- 10 Artuzo CG. Determinação do coeficiente de atrito nos ensaios de abrasão por esfera rotativa [dissertação]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2014.

Recebido em: 12 Dez. 2016

Aceito em: 20 Jul. 2017