

ESTUDO DO DESGASTE POR EROSIÃO DE LIGAS METÁLICAS UTILIZADAS EM SISTEMAS MECÂNICOS DE PLANTAS SIDERÚRGICAS¹

Heiter Ewald²
Luiz Rafael Resende da Silva³
Cherlio Scandian⁴

Resumo

Este trabalho analisou o comportamento em erosão por partículas sólidas de três materiais candidatos a serem utilizados em coifas de convertedores na aciaria LD. O estudo baseou-se, inicialmente, nas condições apresentadas pela norma ASTM G 76 – velocidades de 30 m/s e 70 m/s e ângulo de impacto de 90°. Adicionalmente, realizaram-se ensaios com ângulo de impacto de 30°. Os materiais utilizados foram o aço A36, o aço 15Mo3 e o inonel 625. Os resultados para o inonel 625 apresentaram as menores taxas de erosão em todas as condições. Porém, os aços A36 e 15Mo3 apresentaram variações em seus comportamentos em erosão com a variação da velocidade. Em baixa velocidade, 30 m/s, as duas ligas apresentaram resultados estatisticamente iguais, mas com o aumento da velocidade para 70 m/s seus comportamentos se tornam bastantes distintos. Neste caso, o aço 15Mo3 passou a apresentar taxas de erosão, independente do ângulo, menores que o aço A36. Este comportamento provavelmente foi devido ao maior módulo de tenacidade do aço 15Mo3 em relação ao aço A36.

Palavras-chave: Erosão; Aços; Inonel; Coifa convertedor LD.

STUDY OF WEAR FOR EROSION OF ALLOY STEEL USED IN MECHANICAL SYSTEMS PLANT SIDERÚRGICAS

Abstract

This study examined the behavior of solid particle erosion of three candidate materials for use in hoods converters in steel mill LD. The study was based initially on the conditions presented by ASTM G 76 – speeds of 30 m/s and 70 m/s and impact angle of 90°. Additionally, assays were performed with an impact angle of 30°. The materials used were the steel A36, 15Mo3 steel and inonel 625. The results for inonel 625 had the lowest erosion rates in all conditions. However, the A36 steel and 15Mo3 showed variations in their behavior with the variation in erosion speed. At low speed 30 m/s, the two alloys showed statistically identical results, but with increasing speed 70 m/s its become quite different behaviors. In this case, the steel 15Mo3 have erosion rates, regardless of the angle, smaller than the steel A36. This behavior is probably due to the higher modulus of toughness of the steel 15Mo3 against steel A36.

Key words: Tribology; Solid particle erosion.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, Professor Mestre, Coordenadoria de Mecânica, Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), Aracruz, ES, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, ES.

⁴ Engenheiro Metalúrgico, Professor Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, ES.

1 INTRODUÇÃO

O desgaste erosivo, que ocorre quando partículas sólidas são arrastadas pelo escoamento de um fluido e acabam por impactar uma superfície, tem sido um sério e contínuo problema em muitas aplicações industriais.⁽¹⁾ Em diversas situações o desgaste erosivo está presente. Em indústrias de beneficiamento de minério, em indústrias siderúrgicas, na indústria aeronáutica e aeroespacial, na indústria petroquímica, entre outras. Os danos gerados em algumas circunstâncias como em válvulas do tipo *choke* causam perdas grandiosas em termos financeiros e, também, podem afetar a segurança de seus colaboradores ou do meio ambiente.⁽²⁾ Diversos parâmetros influenciam a degradação de materiais por erosão. Estes às vezes são classificados em propriedades das partículas (dureza, forma, tamanho, velocidade de impacto e ângulo de impacto), do material desgastado (resistência mecânica, ductilidade, tenacidade e coeficiente de encruamento) e do ambiente (temperatura, pressão parcial de gases).⁽³⁾

A dureza, a forma e o tamanho das partículas podem causar importantes variações na maneira como irá ocorrer o desgaste. Um exemplo, identificado por Sundararajan e Roy⁽⁴⁾ a partir de pesquisas realizadas por Kleis, é a variação que ocorre no ângulo de máximo desgaste devido a diferenças na forma das partículas erodentes. Com a mudança de partículas de vidro esféricas para vidro moído o ângulo de máximo desgaste modificou-se de 90° para 30°, respectivamente.

A velocidade da partícula no momento do impacto com a superfície desgastada tem a maior influência na taxa de erosão.⁽⁵⁾

As características dos materiais exercem um forte efeito sobre o desgaste erosivo e tem sido extensivamente estudadas. Porém, de forma semelhante ao que ocorre com outras formas de desgaste, nem sempre melhorias nas propriedades mecânicas coincidem com resistência superior ao desgaste erosivo⁽⁶⁾ e, nem sempre o efeito das propriedades mecânicas do material erodido no comportamento em erosão é completamente esclarecido.⁽⁷⁾

A resistência de um material pode ser caracterizada pela sua dureza, limite de escoamento e limite de resistência à tração ou pelo coeficiente de resistência.⁽⁷⁾ Diversos estudos tentaram correlacionar à resistência mecânica do material erodido com a resistência a erosão, porém essa relação mostrou-se muito difícil e aplicável em apenas situações particulares.⁽⁶⁾

O encruamento resulta em um pequeno benefício ou nenhuma melhora na resistência à erosão. Tratamentos térmicos em aços podem causar efeitos positivos, porém isso é diminuído com o aumento do ângulo de impacto.⁽⁸⁾ Por isso, Sundararajan⁽⁷⁾ concluiu que a resistência à erosão de um material não pode ser prevista apenas baseada em sua resistência mecânica.

A densidade de energia mecânica ou módulo de tenacidade é definida como o produto $(\sigma_y + \sigma_{UTS})\epsilon_f/2$, onde σ_y é o limite de escoamento, σ_{UTS} é o limite de resistência a tração e ϵ_f é a deformação total obtida no ensaio de tração. É esperado que a resistência a erosão esteja diretamente correlacionada com o módulo de tenacidade. Porém, apenas nos casos de ferros fundidos e compósitos de fibras reforçadas com alumínio, a expectativa foi alcançada. Em todos os outros casos considerados por Sundararajan⁽⁷⁾ essa relação falhou.

Este trabalho busca estudar o comportamento em erosão de três ligas metálicas (aço A36, aço 15Mo3 e inonel 625) candidatas a serem usadas em coifas de convertedores em plantas siderúrgicas. Nestes equipamentos ocorre a presença de partículas duras misturadas a gases que estão em temperaturas elevadas oriundas

do processo de oxidação do carbono na fabricação do aço. O estudo inicial do comportamento destes materiais orientou-se pelas condições da norma ASTM G 76.⁽⁹⁾ Os ensaios foram então realizados em temperatura ambiente e nas velocidades de 30 m/s e 70 m/s. Uma variação em relação à norma foi realizada no ângulo de impacto. Além do ângulo presente em norma – 90°, também realizou-se ensaios em 30°, ângulo em torno do qual caracteristicamente os metais e ligas apresentam máximo desgaste erosivo e ainda devido as condições reais em coifas de convertedores.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 condições dos Ensaio

As condições dos ensaios foram escolhidas, inicialmente, seguindo a norma ASTM G76,⁽⁹⁾ que define características de erosímetros a jato de ar bem como as condições e materiais para calibração destes.

Desta forma as condições definidas pela norma estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições para realização dos ensaios segundo norma ASTM G 76⁽⁹⁾

Parâmetro	Condição 1	Condição 2
Velocidade das partículas [m/s]	30	70
Material das partículas	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
Diâmetro médio das partículas [µm]	50	50
Duração do ensaio [min]	10	10
Ângulo de impacto [°]	90	90
Temperatura [°C]	18 a 28	18 a 28
Quantidade de amostras	10	10
Taxa de partículas que impactam a amostra [mg.mm ⁻² .s ⁻¹]	2	2

Porém, desejava-se conhecer, também, o comportamento dos materiais ensaiados sob erosão quando impactados em ângulos distintos de 90° (devido às diferentes regiões de interesse na coifa). Por isso, foi escolhido o ângulo de 30°, ângulo em torno do qual materiais que apresentam mecanismo de arrancamento por deformação plástica apresentam maiores taxas de desgaste. Desta forma os materiais foram ensaiados em quatro condições diferentes, variando ângulo e velocidade de impacto.

Outra variação foi quanto ao número de amostras ensaiadas. Apesar da norma indicar o número de 10 amostras por condição, devido a experiência adquirida em trabalhos anteriores com o mesmo equipamento foram usadas cinco amostras por condição neste estudo^(10,11) sendo calculado, então, a taxa de erosão e o desvio-padrão.

2.2 Erosímetro

A realização dos ensaios de erosão ocorreu no erosímetro a jato de ar construído na Universidade Federal do Espírito Santo. Este erosímetro, já validado⁽¹¹⁾ segundo a norma ASTM G-76, foi desenvolvido para realizar ensaios em temperatura ambiente e elevada.

Seguem alguns dados de referência do projeto do equipamento:

- velocidade máxima das partículas: 90 m/s.
- faixa de temperatura de ensaio: da ambiente até 450°C.
- diâmetro característico das partículas: 5 µm a 500 µm.

O erosímetro utilizado pode ser dividido em sete setores, descritos na Figura 1.

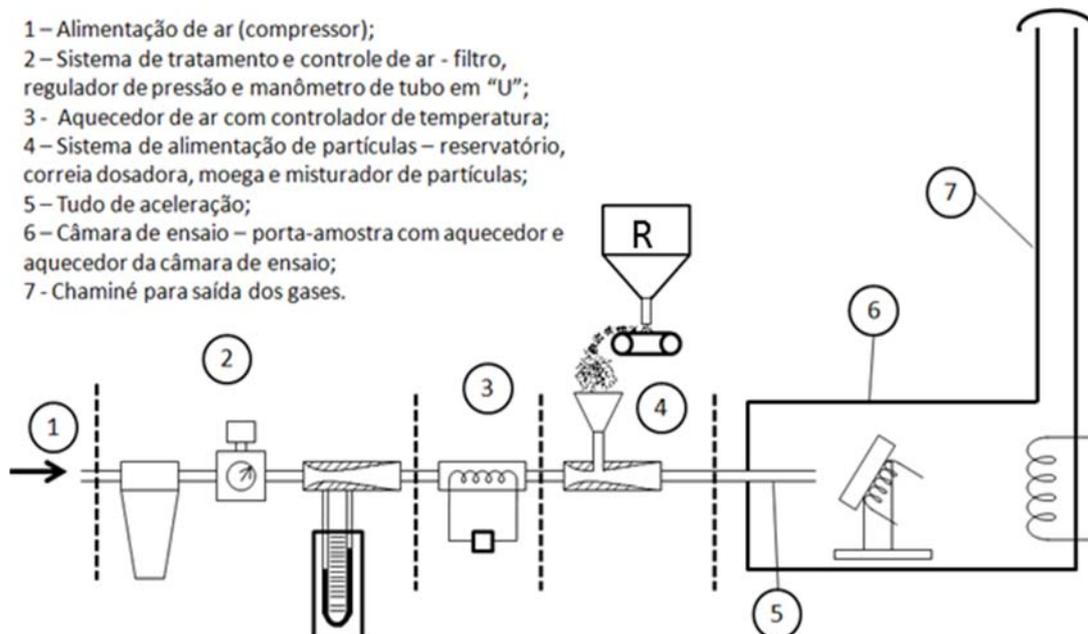


Figura 1. Desenho esquemático do erosímetro Tricormat/UFES.

2.3 Partículas Erodentes

De acordo com a norma ASTM G 76,⁽⁹⁾ as partículas erosivas utilizadas nos ensaios devem possuir características uniformes em relação a tamanho, umidade e composição química.

A alumina utilizada teve sua morfologia e granulometria cuidadosamente analisada por microscopia eletrônica de varredura no LCSM (Laboratório de Caracterização e Superfícies de Materiais) da Universidade Federal do Espírito Santo no Microscópio Eletrônico de Varredura modelo EVO 40 da Zeiss.

2.4 Materiais Empregados

Os materiais utilizados nos ensaios foram escolhidos devido a serem materiais candidatos à aplicação em coifas de convertedores. Estes foram recebidos já cortados em amostras de aproximadamente 50 x 40 x 7 mm (Figura 2). Seguindo, posteriormente, a preparação de acordo com os requisitos da norma ASTM G 76.⁽⁹⁾

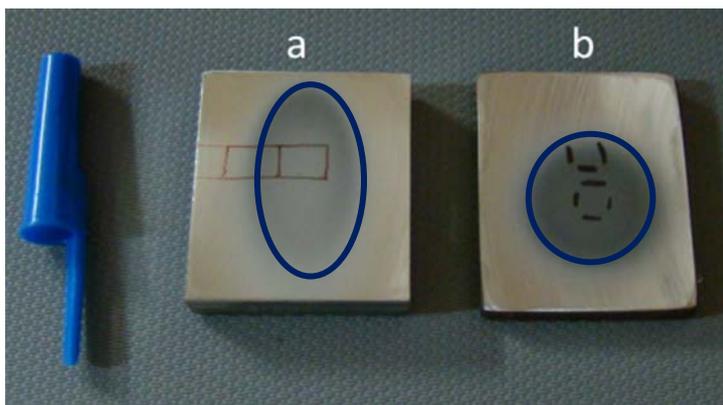


Figura 2. Foto de duas amostras impactadas em ângulos de (a) 30°; e (b) 90°, respectivamente.

As amostras foram lixadas na seguinte sequência granulométrica das lixas: 100 mesh, 220 mesh, 320 mesh e 500 mesh. A norma contempla que seja feita a preparação com lixa de no mínimo 400 mesh. Depois de lixadas, as amostras foram lavadas com álcool e guardadas em dessecadores até sua utilização.

Os materiais utilizados foram aço ASTM A36 para chapas, aço microligado ao molibdênio 15Mo3 e o terceiro material é uma superliga de níquel inonel 625 depositada por solda.

Seguem (Tabela 2) algumas propriedades destes materiais.

Tabela 2. Propriedades mecânicas dos materiais ensaiados

Material	Limite de escoamento [MPa]	Limite de resistência à tração [MPa]	Alongamento em 100 mm [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Dureza [HV 10]	Dureza (desvio padrão)
Aço A 36	250 ¹²	400 – 550 ¹²	20 ¹²	200 ¹²	147 ¹⁴	4,3 ¹⁴
15Mo3	260 – 270 ¹³	450 – 600 ¹³	20 – 22 ¹³	200 ¹³	144 ¹⁴	5,7 ¹⁴
Inconel 625	290 – 460 ¹²	760 – 880 ¹²	50 – 55 ¹²	207 ¹²	227 ¹⁴	17,2 ¹⁴

Posterior aos ensaios, algumas amostras foram cortadas e realizadas medições de microdureza na seção transversal, utilizando microdurômetro Pantec HXD-1000TM aferido. Foram feitas três linhas de microdurezas com carga de 10 gf na região central da cratera na seção transversal para cada condição ensaiada. As medições iniciaram a partir da superfície até a distância de 490 µm, distanciando aproximadamente 40 µm entre cada medição, buscando correlacionar se houve encruamento superficial em cada uma das condições.

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização da Alumina

Na Figura 3, encontram-se microscopias eletrônicas de varredura de amostras de alumina virgem.

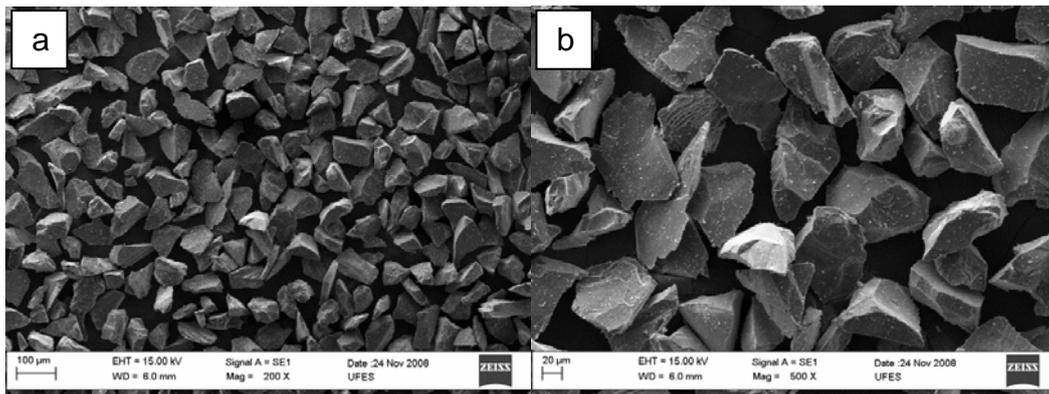


Figura 3. Micrografias eletrônicas de varredura de alumina virgem. Em (a) com ampliação de 200x; e (b) com ampliação de 500x.

Também, foi feita a análise da alumina pós-ensaio (Figura 4).

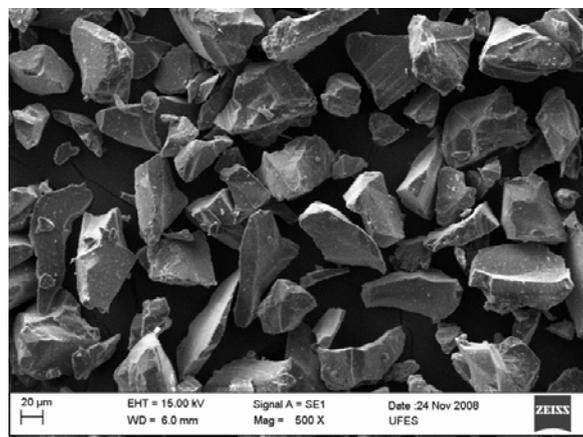


Figura 4. Micrografia eletrônica de varredura da alumina usada em ensaio a 70 m/s e ângulo de impacto de 90°. Ampliação de 500x.

3.2 Resultados dos Ensaios

A Figura 5 apresenta os resultados dos ensaios de erosão nos três materiais agrupados por condição. Os resultados para cada uma das condições observadas na Figura 5 são a média de 5 amostras, totalizando 60 ensaios.

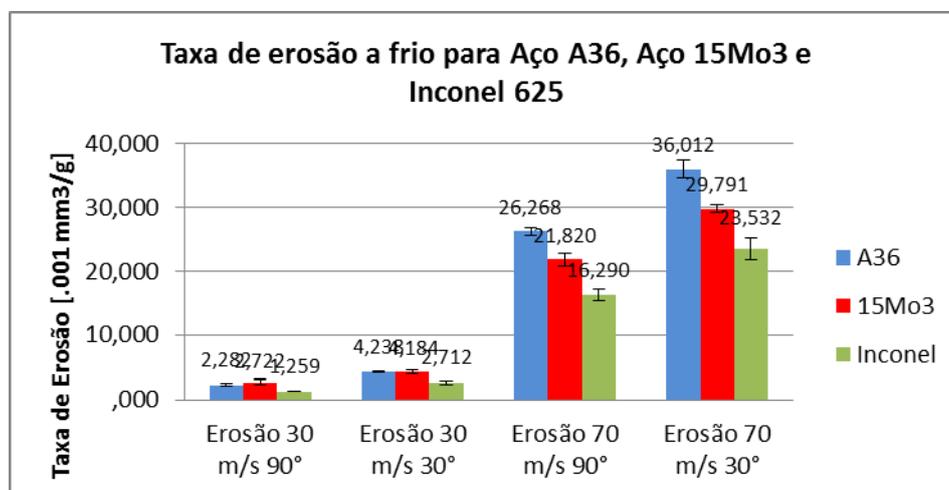


Figura 5. Gráfico que apresenta todas as condições de ensaio e materiais utilizados agrupados por condição.

Na Figura 6 apresenta-se a relação entre as taxas de desgaste e a dureza na condição com velocidade das partículas de 30 m/s e ângulo de impacto de 90°.

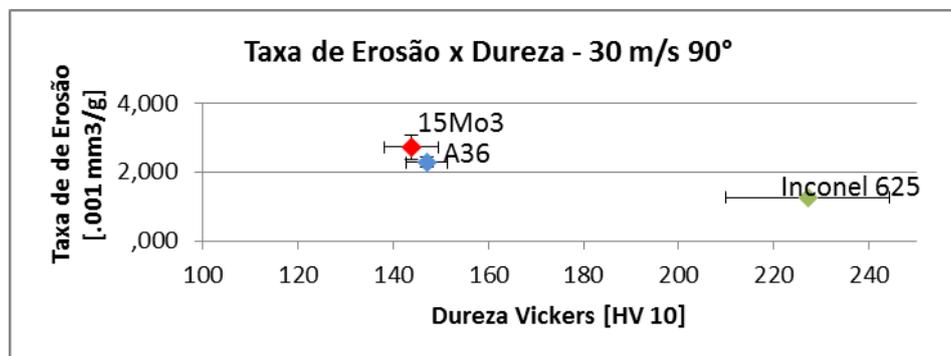


Figura 6. Gráfico que relaciona a taxa de desgaste do aço A36, aço 15Mo3 e inconel 625 com suas respectivas durezas para a condição de velocidade de 30 m/s e 90° de ângulo de impacto. Como o desvio-padrão da taxa de erosão do Inconel 625 é muito pequeno, não é possível sua observação na figura.

A Figura 7 apresenta micrografias do aço A36 e inconel 625 quando impactados com velocidade de 70 m/s e ângulo de 90°.

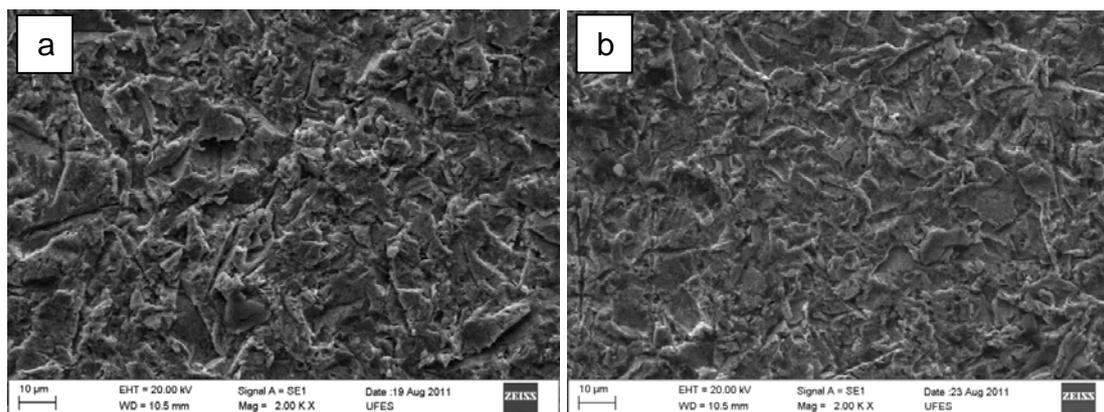


Figura 7. Micrografias eletrônicas de varredura do aço (a) A36 e (b) inconel 625 impactados em velocidade de 70 m/s e ângulo de impacto de 90°. Ampliação de 2.000x.

A Figura 8 apresenta a relação entre as taxas de desgaste e a dureza dos materiais para a condição de ensaio de velocidade e ângulo de impacto, respectivamente, de 70 m/s e 90°.

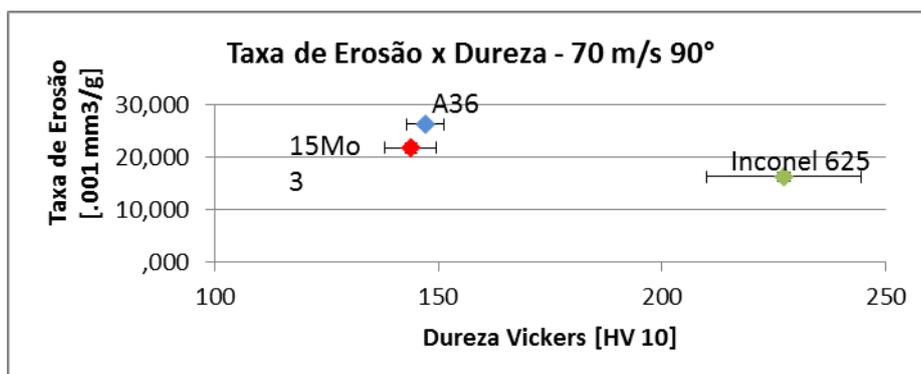


Figura 8. Gráfico relacionando a taxa de desgaste do Aço A36, Aço 15Mo3 e inconel 625 com

respectivas durezas para ensaios realizados com velocidade e ângulo de impacto de 70 m/s e 90°, respectivamente. O desvio-padrão é muito pequeno, não sendo possível sua observação na figura. A Figura 9 apresenta micrografias eletrônicas de varredura para o aço A36 e para o inonel 625 com velocidade de impacto de 70 m/s e ângulo de 30°. Destacam-se, na Figura 9, marcas de microcorte, principalmente, devido ao baixo ângulo de impacto.

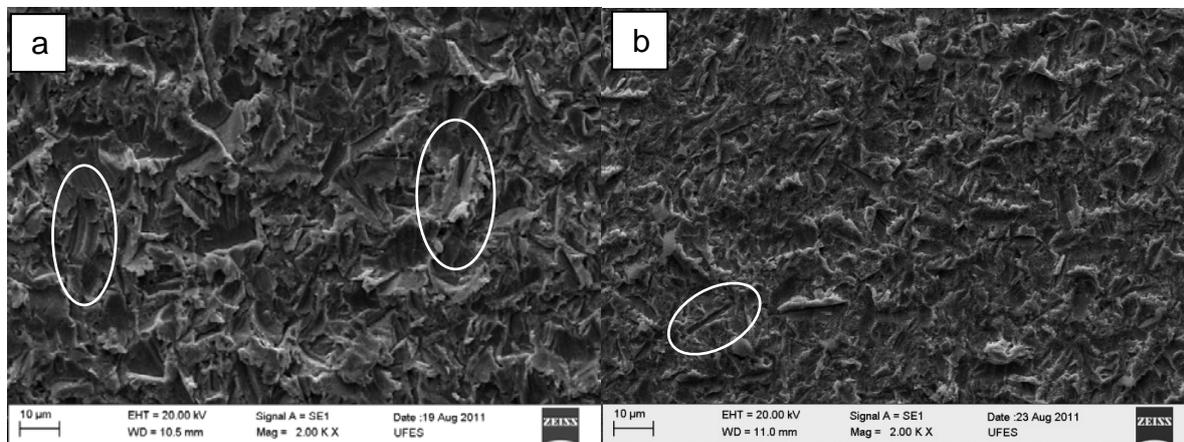


Figura 9. Micrografias eletrônicas de varredura dos aços (a) A36 e (b) inonel 625 impactados em velocidade de 70 m/s, ângulo de impacto de 30°. Destacam-se, ainda, marcas de microcorte nos dois materiais, principalmente devido ao baixo ângulo de impacto. Ampliação de 2.000x.

A Figura 10, apresenta micrografias do aço 15Mo3 quando impactado em 30 m/s e 70 m/s com ângulo de impacto de 90°.

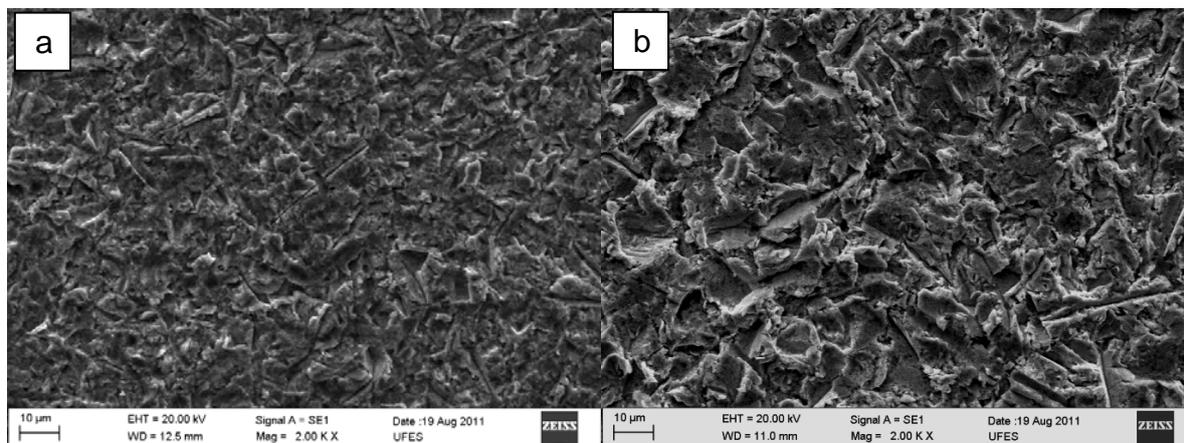


Figura 10. Micrografias do aço 15Mo3 impactado a (a) 30 m/s e (b) 70 m/s em ângulo de impacto de 90°. Ampliação de 2.000x.

Na Figura 11 observa-se a micrografia do aço A36 ensaiado com velocidade de 70 m/s e ângulo de 30°. A seta indica o sentido de impacto das partículas e está destacado o arrancamento de material promovido pelo contato com uma partícula.

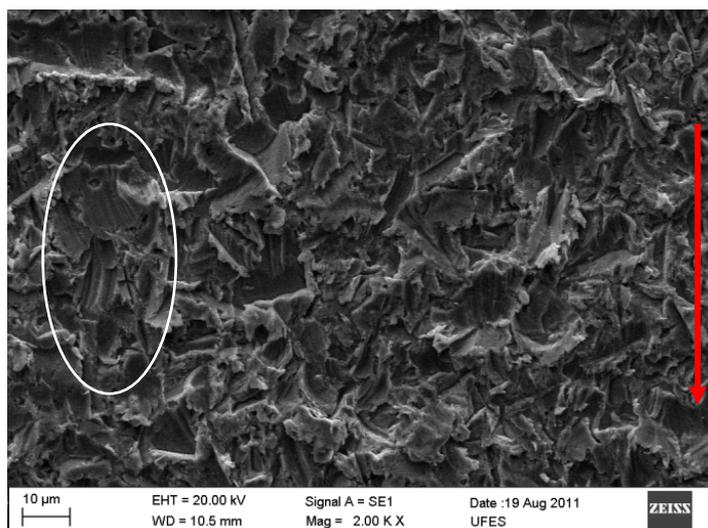


Figura 11. Micrografia do aço A36 impactado a 70 m/s e 30°. A seta indica o sentido de impacto das partículas. Ampliação de 2.000x.

A Figura 12 apresenta o perfil de microdurezas gerado a partir de diversas medições feitas na seção-transversal da cratera de desgaste.

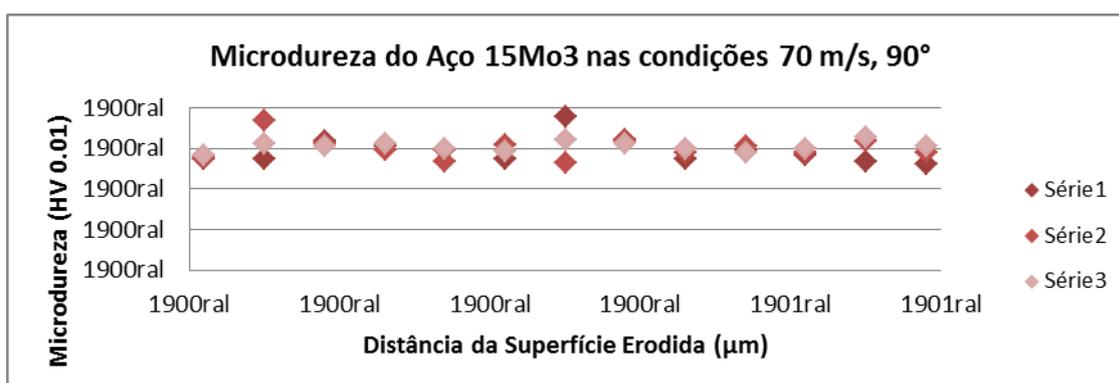


Figura 12. Perfil de microdureza gerado a partir da superfície desgastada em velocidade de 70 m/s e ângulo de impacto de 90° para o Aço 15Mo3.

4 DISCUSSÃO

4.1 Caracterização da Alumina

Conforme apresentado na seção 1 deste trabalho, as características das partículas erodentes influenciam no desgaste.⁽⁴⁾ Por isso, fez-se necessário uma cuidadosa caracterização deste material.

A partir da Figura 3, observa-se boa uniformidade no tamanho das partículas (de aproximadamente 50 µm), bem como a grande angulosidade na forma das mesmas, que é ainda melhor observada na Figura 3b. Sendo estes requisitos estabelecidos pela norma ASTM G 76.

Pode-se observar ainda, a partir da Figura 4 que mesmo após sua utilização as partículas de alumina mantiveram sua forma facetada. Vê-se ainda a existência de pequenas partículas oriundas da cominuição da alumina, provavelmente, pelo impacto com a amostra e com outras partículas.

4.2 Resultado dos Ensaios

A Figura 5, que apresenta o resultado geral dos ensaios agrupados por condição para os três materiais estudados, corrobora diversos comportamentos sobre erosão conhecidos, mas também, um desempenho díspar foi encontrado para os aços A36 e 15Mo3.

Um comportamento clássico nos estudos de erosão é o aumento da taxa de desgaste que ocorre com a diminuição do ângulo de impacto para materiais dúcteis. Para estes materiais o desgaste tende a ser máximo para ângulos rasos (por exemplo, entre 15° e 30°). Este comportamento é associado com condições de impacto mais favoráveis a remoção de material por micro-mecanismos dúcteis de sulcamento e corte.⁽¹⁵⁾

Ao se comparar as taxas de erosão em 90° e 30°, independente da velocidade, ocorre um aumento destas em ângulos rasos. A partir da Figura 11 também pode-se observar um aumento nos mecanismos citados por Hutchings.⁽¹⁵⁾

O efeito da velocidade de impacto é atribuído como o mais influente no desgaste erosivo por diversos autores.⁽⁵⁾ Geralmente, a relação entre a taxa de erosão e a velocidade é exponencial. A partir da Figura 5 pode-se observar o grande aumento da taxa de desgaste quando a velocidade é aumentada de 30 m/s para 70 m/s. O aço A36, por exemplo, tem sua taxa de erosão majorada de 2,28 para 28,26 [0,001 mm³/g]. A Figura 10 também oferece condições para mensurar esse comportamento através de micrografias do aço 15Mo3 impactado a 30 m/s e 70 m/s. Observa-se que as marcas visualizadas na Figura 10b são maiores porém em menor número, uma vez que as partículas possuem maior energia cinética a 70 m/s e os eventos são maiores em uma mesma área da amostra.

As Figuras 6 e 8 também confirmam o exposto na seção 1 de que a resistência a erosão de um material não pode ser prevista apenas baseada em sua resistência mecânica.⁽⁷⁾ A relação entre a dureza e a resistência a erosão apresentou boa concordância a 30 m/s. Os aços A36 e 15Mo3 que possuem durezas estatisticamente iguais também obtiveram taxas de desgaste muito próximas. Porém, com o aumento da velocidade para 70 m/s, essa concordância não mais ocorreu. O aço 15Mo3 passou a apresentar taxa de desgaste intermediária entre o aço A36 e o incoel 625. Ao observarmos a Tabela 2 notamos que as propriedades mecânicas do incoel 625 são muito superiores, justificando sua excelente resistência a erosão. Já o aço A36 e 15Mo3 possuem dureza muito próximas.

Em baixa velocidade essa propriedade parece ser bastante influente. Porém, em maiores velocidades torna-se razoável prever um aumento da influência da tenacidade na taxa de erosão. Apesar de não se possuir dados do ensaio de tração do material recebido, a Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas para os três materiais utilizados. Neste caso, devido aos maiores valores de limite de escoamento e limite de resistência à tração do aço 15Mo3 seu módulo de tenacidade será maior que o do aço A36.

A ideia de uma maior influência da tenacidade em detrimento da dureza parece razoável. Esta ideia é a base inclusive para explicar a diferença de comportamento entre materiais frágeis e dúcteis com o ângulo de impacto. Devido a maior energia cinética das partículas, a tenacidade apresenta maior influência que a dureza, a qual é mais significativa quando as partículas possuem menor energia cinética.

Poder-se-ia imaginar ainda a influência dos efeitos do encruamento superficial de algum dos materiais. Porém, não se observou qualquer variação de dureza nos materiais na seção transversal da cratera gerada durante os impactos.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nos ensaios puderam-se obter as seguintes conclusões:

Conforme era esperado o inonel 625 obteve o melhor resultado nos ensaios de erosão em todas as condições.

Não se observou encruamento na seção transversal em nenhum dos materiais estudados em todas as condições de ensaio.

A variação da taxa de desgaste com a variação da velocidade e do ângulo de impacto seguiu o que se apresenta em literatura.

O aço 15Mo3 apresentou grande diferença em seu comportamento de acordo com a condição de ensaio. Em baixa velocidade de impacto se comportou como o aço A36, já em velocidade de 70 m/s teve um melhor comportamento que o Aço A36. Este comportamento provavelmente foi devido ao maior módulo de tenacidade do aço 15Mo3 em relação ao A36.

Agradecimentos

Ao mestrando Luiz Rafael Resende da Silva pelo apoio no desenvolvimento do erosímetro do Tricorrmat – Ufes e na realização dos ensaios.

Ao grande amigo professor Felipe de Oliveira Palácio e ao professor Dr^o Flávio José da Silva pela execução das micrografias via MEV.

REFERÊNCIAS

- 1 FINNIE, I. Some reflections on the past and future of erosion. *Wear*, Berkeley, USA, n. 186-187, p. 1-10. 1995.
- 2 HAUGEN, K.; KVERNOLD, O.; RONOLD, A.; SANDBERG, E. R. Sand erosion of wear-resistant materials: Erosion in choke valves. *Wear*, v. 186-187, p. 179-188. 1995.
- 3 STACK, M.M.; LEKATOS, S., STOTT, F.H. Erosion-corrosion regimes: number, nomenclature and justification. *Tribology International*, v. 28; p. 445-451. 1995.
- 4 SUNDARARAJAN, G.; ROY, M. Solid particle erosion behavior of metallic materials at room and elevated temperatures. *Tribology International*, v. 30, p. 339-359. 1997.
- 5 KLEIS, I.; KULU, P. Solid particle erosion. Estônia: Springer, 2008. cap. 1, p. 14.
- 6 STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. *Engineering Tribology*, Elsevier, 2001. cap. 11, p. 597.
- 7 SUNDARARAJAN, G. The solid particle erosion of metallic materials: The rationalizations of the influence of material variables. *Wear*, v. 186-187, p. 129-144. 1995.
- 8 ZUM GAHR, K. H. *Microstructure and wear of materials*. Netherlands: Elsevier, 1987.
- 9 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM G76: Conducting erosive tests by solid particle impingement using gas jets*. West Conshohocken: ASTM, 2002.
- 10 CALVI, D. P.; COSTA JUNIOR, W. G.; QUEIROZ, R. S.; MACÊDO, M. C. S.; SCANDIAN, C. Projeto e construção de erosímetro de erosímetro para testes em alta temperatura. Contribuição técnica ao 62^a Congresso Anual da ABM.

- 11 EWALD, H.; CALVI, D. P.; SILVA, F. J.; SCANDIAN, C. Construção de erosímetro a jato de ar e sua validação inicial segundo a norma ASTM G 76. Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 2009: Belo Horizonte, Brasil.
- 12 <http://www.matweb.com> (acesso em 01/12/2011)
- 13 Norma DIN 17155
- 14 Medição efetuada no Triccormat/UFES.
- 15 HUTCHINGS, I. M. Solid Particle Erosive Wear Testing. ASM HANDBOOK, v. 8: p. 730-732. 2000.