

CONSTRUÇÃO DE EROSÍMETRO A JATO DE AR E SUA VALIDAÇÃO INICIAL SEGUNDO A NORMA ASTM G 76¹

Heiter Ewald²
Diego Calvi²
Flávio José da Silva³
Cherlio Scandian³

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar a construção e validação de erosímetro a jato de ar concebido para estudo do desgaste que ocorre, por exemplo, em tubulações, válvulas, ventiladores e acessórios das indústrias de minério. A construção do equipamento é detalhada pela apresentação das características das diversas partes que compõem o mesmo. Os materiais empregados na realização dos ensaios, também, são apresentados, bem como sua caracterização conforme solicitado pela norma ASTM G 76. Os ensaios foram realizados em três situações diferentes: aço SAE 1020 sendo impactado por partículas de alumina a 30 m/s e 70 m/s e o aço AISI 304, igualmente por partículas de alumina, porém, apenas na velocidade de 70 m/s, conforme requerido pela norma citada. O ângulo de impacto empregado foi de 90°. Os resultados foram avaliados pela perda de massa das amostras sendo, também analisadas em um analisador topográfico as crateras formadas pelo impacto das partículas sólidas. Para complementação do estudo, a região impactada foi avaliada através de microscopia eletrônica de varredura. Os resultados das taxas de desgaste foram compatíveis com os apresentados em norma.

Palavras-chave: Erosímetro a gás; Validação.

THE CONSTRUCTION OF A GAS-BLAST EROSION TESTER AND VALIDATION ACCORDING TO THE ASTM G 76 STANDARD

Abstract

The scope this paper is to introduce the construction and validation of gas-blast erosion tester built to study the erosive wear by solid particles that occurs, for example, in pipes, valves, fans and accessories used in ore processing industry. The construction of the equipment is the detailed by presenting the characteristics and the various parts that compose it. The materials used in conducting the tests are presented, and its characterization as requested by the ASTM G 76 standard. The tests were conducted in three different situations: SAE 1020 steel impacted by alumina particles at 30 m/s and 70 m/s, and steel AISI 304, also impacted by alumina particles, but at a speed of 70 m/s, as required by the standard cited. The impact angle was 90°. The results were evaluated by mass loss and the surface topography of the craters formed by the impact of solid particles were also evaluated. To complement the study, the impacted region was evaluated by scanning electron microscopy. The results were showed to agree with those presented by the standard.

Key words: Gas-blast erosion tester, Validation.

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

² *Engenheiro Mecânico - UFES.*

³ *Professor Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica – UFES, Vitória, ES.*

1 INTRODUÇÃO

O desgaste erosivo por partículas sólidas que acabam por impactar uma superfície, tem sido um sério e contínuo problema em muitas aplicações industriais.⁽¹⁾ Frente a isso, iniciou-se o desenvolvimento de erosímetro a quente a fim de auxiliar a seleção de materiais para situações práticas, onde ocorrem, por exemplo, a presença de partículas duras nos sistemas de ventilação em indústrias de beneficiamento de minério. Em alguns casos, o ar circula em altas temperaturas e velocidades gerando desgaste erosivo nos ventiladores, dutos e acessórios (válvulas, conexões etc.).⁽²⁾

O presente artigo, diferentemente da publicação de Diego et al. que apresentou o projeto de construção de erosímetro, trata do detalhamento construtivo das partes que compõem o equipamento e de sua validação inicial. A validação do mesmo foi realizada conforme requerido pela norma ASTM G 76. Os materiais utilizados nos ensaios, como aço SAE 1020, aço AISI 304 e alumina, foram caracterizados antes e após os ensaios. Os resultados das taxas de erosão, na temperatura ambiente, para o aço SAE 1020 e AISI 304 utilizando as velocidades de 30 m/s e 70 m/s, estão em conformidade com a norma citada.

Segundo a ASTM, erosão é a progressiva perda do material original de uma superfície sólida devido a um mecanismo de interação entre a superfície e um fluido, um fluido multicomponente, a colisão sucessiva de um líquido ou partículas sólidas.⁽³⁾ Esta pode ser medida experimentalmente pela perda de massa ou de espessura da superfície de uma amostra ou pelo volume de material removido, o qual permite uma comparação da resistência de diferentes materiais.⁽⁴⁾

Métodos comumente utilizados em testes de laboratório podem ser divididos entre os que as partículas são aceleradas por meio do escoamento de um fluido e os que o movimento circular é utilizado para se obter a velocidade de impacto. Segundo Deng et al.,⁽⁵⁾ dois dos mais comuns métodos são o *gas-blast* – partículas aceleradas por um fluido gasoso, e o acelerador centrífugo, sendo, ainda, o primeiro mais utilizado na realização de ensaios a quente.⁽⁶⁾ Este método foi desenvolvido no início da década de sessenta, sendo popular em alguns países da Europa Ocidental e nos Estados Unidos.⁽⁷⁾ A maior vantagem deste método está na simplicidade da avaliação do resultado e ainda na menor duração do ensaio.⁽⁷⁾

A extensão do desgaste erosivo depende do número e da massa das partículas que atingem a superfície, bem como da velocidade, forma e orientação das mesmas, além, do ângulo de impacto.⁽⁸⁾ A velocidade é a variável que mais influencia a taxa de desgaste.⁽⁸⁾ No caso do erosímetro, a medição é feita anteriormente ao ensaio, e, depois sendo reproduzido o mesmo fluxo de fluido e de partículas, a velocidade se repete. A velocidade das partículas é conhecida através do método dos dois discos, proposto por Ruff e Ives.⁽⁹⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, tem-se um detalhamento do equipamento, que teve como dados de referência de projeto:⁽¹⁾

- velocidade máxima das partículas: 90 m/s;
- faixa de temperatura de ensaio: temperatura ambiente até 450°C; e
- diâmetro característico das partículas: $50 < \varnothing < 500 \mu\text{m}$.

2.1 Detalhamento do Equipamento

O erosímetro pode ser dividido em sete setores, a saber (Figura 1):

1. Alimentação de ar;
2. Tratamento e controle do ar;
3. Aquecimento e controle da temperatura;
4. Alimentação de partículas;
5. Aceleração das partículas;
6. Câmara de ensaio; e
7. Saída dos gases.

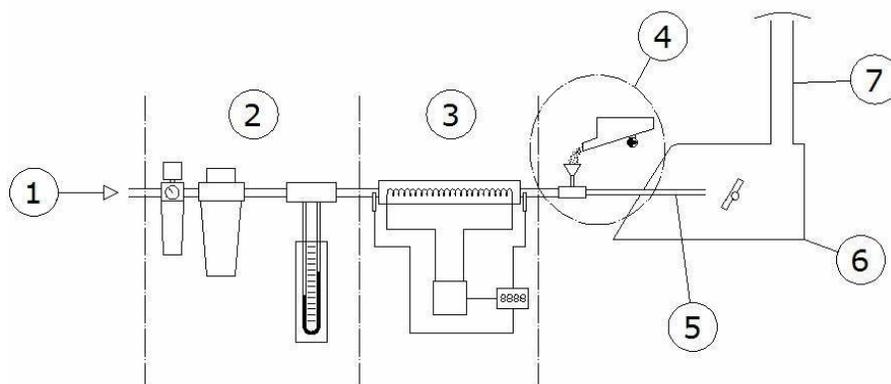


Figura 1 - Desenho esquemático do erosímetro evidenciando os sete setores descritos anteriormente.⁽²⁾

Inicialmente, um compressor (1) alimenta o equipamento com um fluxo de ar de vazão e pressão necessárias ao ensaio.

Posteriormente ao compressor, existe uma central para filtragem do ar comprimido, controle e medida do fluxo (2). Um filtro que se localiza logo após a saída do ar do compressor tem a função de retirar impurezas indesejáveis ao fluxo. O regulador de pressão, que está após o filtro, é utilizado para controlar a vazão de ar do sistema pelo controle da pressão.

Para fornecer uma leitura da vazão do ar que escoar pelo equipamento, se utiliza um manômetro de tubo em “U”. A leitura observada neste manômetro é utilizada para que se possa conseguir a reprodutibilidade da velocidade das partículas. Isto foi necessário uma vez que o fluxo de ar é interrompido para troca do sistema de medição de velocidade pelo porta-amostras.

A medida da velocidade das partículas é feita através do mecanismo a dois discos proposto por Ruff e Ives.⁽⁹⁾ A leitura exibida pelo manômetro de tubo em “U” é conseguida devido ao diferencial de pressão fornecido pelo tubo Venturi, através de duas tomadas de pressão perpendiculares ao fluxo (uma na entrada e outra na garganta).

A vazão normalmente não é um dado importante nos testes a frio, uma vez que a leitura no manômetro de tubo em “U” só indica a reprodutibilidade na velocidade das partículas. Porém, no caso de ensaios a quente, essa medida é utilizada para se garantir a vazão mínima necessária para que não ocorram danos no aquecedor.

Após a passagem pelo tubo Venturi, o ar passa pelo aquecedor (3). Dois termopares medem a temperatura do escoamento e enviam os dados para um controlador PID, que então fornece a potência necessária para que a temperatura ajustada para o ensaio seja alcançada.

À jusante do aquecedor encontra-se o alimentador de partículas (4), que tem a função de inserir no fluxo de ar as partículas que irão impactar a amostra. Para isso é necessário que ocorra uma pressão negativa na região de entrada destas, isto é, na moega. Então, é utilizado um bico expensor que cria esta pressão negativa na região, a fim de ajudar a gravidade na introdução das partículas. Este dispositivo é construído em aço inoxidável AISI 304. Externamente, o inserto do alimentador foi fabricado, também, em aço inoxidável AISI 304, já, internamente, empregou-se o metal duro para resistir aos sucessivos impactos erosivos (Figura 2).

A posição do bico expensor é alinhado com o inserto do alimentador, formando um ângulo de 45°.

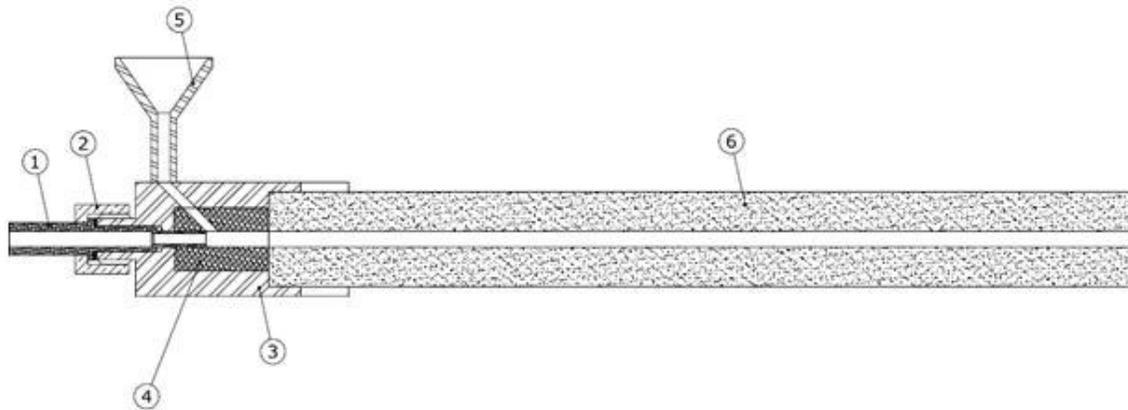


Figura 2 - Desenho esquemático do sistema de alimentação inerente ao sistema de escoamento de ar: "1" - bico expensor, fabricado em aço inoxidável AISI 304, "2" - porca de fixação do bico alimentador, "3" - capa do alimentador em aço inoxidável AISI 304, "4" - inserto do alimentador em metal duro, "5" - moega de alimentação em aço inoxidável AISI 304, "6" - tubo de alimentação em alumina.⁽²⁾

As partículas são armazenadas em um reservatório que se localiza na parte superior do erosímetro, onde na saída deste existe uma válvula tipo guilhotina direcionando as partículas até a correia.

Um circuito PWM (modulação por largura de pulso) controla a velocidade do motor de corrente contínua que aciona a correia. Em seguida, as partículas são conduzidas pela correia a uma calha e então à moega (Figura 3).

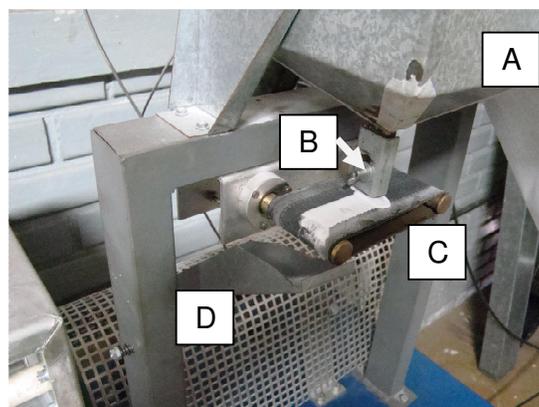


Figura 3 - Em "A" - reservatório de partículas sólidas. Em "B" - válvula guilhotina. Em "C" - correia, e em "D" - calha que conduz as partículas até a moega.

Após a inserção das partículas no fluxo, estas seguirão para o bocal cilíndrico

(Figura 1⁽⁵⁾ e Figura 4A), que as acelerará até a velocidade desejada. Este bocal tem o comprimento de 300 mm, devido a ser este o comprimento que propicia a maior velocidade final das partículas segundo Stevenson e Hutchings,⁽¹⁰⁾ para a faixa de diâmetros escolhidos das partículas que irão impactar a amostra.

O diâmetro interno do tubo escolhido foi de 5 mm e o material, alumina.

A amostra que sofrerá os impactos das partículas, depois de devidamente preparada, deverá ser fixada no porta-amostras, que está fixado no fundo da câmara de ensaio, conforme pode ser observado na Figura 4. O porta-amostras possui uma graduação de 20° a 90°, para que se possa aproximar o ângulo entre o bocal de saída das partículas e a amostra, mas para que seja garantido o posicionamento correto, o ângulo foi medido com um goniômetro.

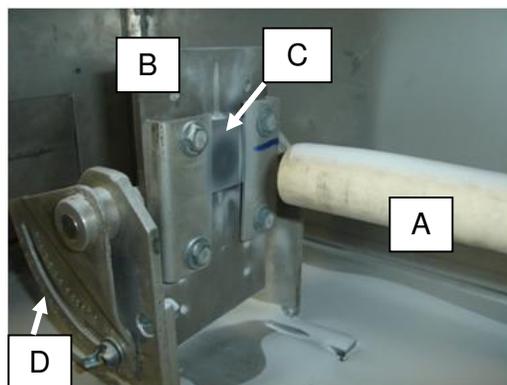


Figura 4 – Em “A” temos o bocal de aceleração de partículas, em “B” o porta-amostras, em “C” a amostra fixada no porta-amostras e em “D” a graduação do porta-amostras.

Outra parte do equipamento necessária na preparação do ensaio é o mecanismo dos dois discos solidários a um eixo, onde através da defasagem entre as marcações pode ser determinada a velocidade das partículas (Figura 5).

A rotação dos discos é de 10.000 RPM, a fim de fornecer uma defasagem entre as marcações de no mínimo 12 mm. Optou-se então por utilizar um motor de indução monofásico de ½ cv, rotação de 3.410 RPM. Para se chegar à rotação desejada, utilizou-se um par de polias com diâmetros de 61 mm acoplada no motor e de 16 mm acoplada no eixo dos discos.

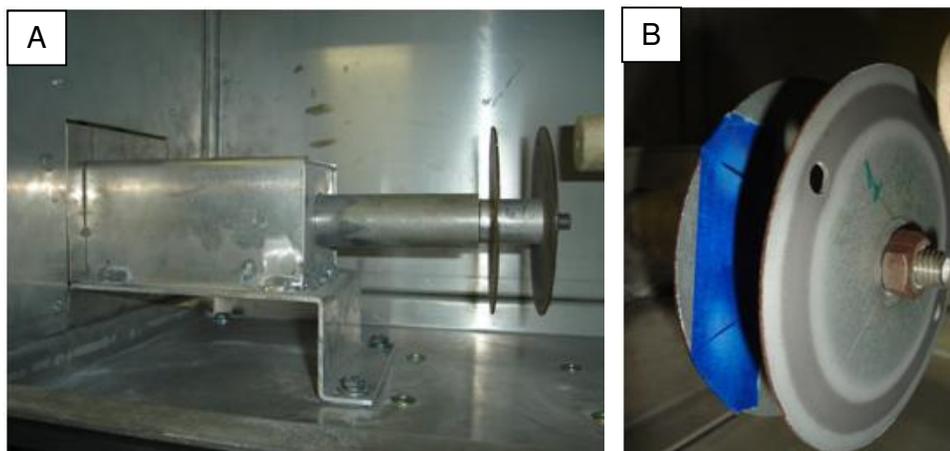


Figura 5 – Em “A”, mecanismo para medição da velocidade das partículas. Em “B”, marcações efetuadas no disco para medição da velocidade.

2.2 Materias para os Ensaiois

Os materiais aqui empregados foram aqueles ditados pela norma, ou seja, o aço SAE 1020 e o aço AISI 304. As partículas duras foram constituídas de alumina com diâmetro médio 50 μm .⁽¹¹⁾

2.3 Preparação dos Materiais

A preparação dos materiais era necessária para que fossem adequados aos requisitos da norma.

As amostras foram cuidadosamente cortadas, e, posteriormente, lixadas até, a lixa de 400 mesh conforme solicitado pela ASTM G 76. As topografias superficiais foram investigadas, através de três amostras retiradas aleatoriamente, a fim de analisar sua compatibilidade com a citada norma. A análise foi realizada em analisador topográfico com contato da marca Taylor Robson CLI 1000.

As partículas de alumina foram analisadas através de microscopia eletrônica de varredura e sua composição química via EDS.

2.4 Preparação do Teste

A quantidade de partículas que adentram ao fluxo de ar, depende da taxa de partículas que atinge a amostra em uma determinada área, no caso da norma em questão, requer-se que este valor seja de $2 \text{ mg} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Deve-se, então, conhecer a área que será impactada na amostra. Fez-se um pré-teste para conhecer esta área. Embora a norma indique que sejam utilizadas dez amostras por condição, neste trabalho, observou-se que com a metade do número de amostras, as taxas de erosão encontravam-se dentro dos valores estabelecidos.

Na tabela abaixo são apresentadas as condições para os ensaios segundo a norma citada.

Tabela 1 – Condição para realização dos ensaios segundo norma ASTM G 76

Condição	Aço SAE 1020		Aço AISI 304
Velocidade das partículas [m/s]	30	70	70
Material das partículas	Al_2O_3	Al_2O_3	Al_2O_3
Diâmetro médio das partículas [μm]	50	50	50
Duração do ensaio [min]	10	10	10
Ângulo de impacto [°]	90	90	90
Temperatura [°C]	18 a 28	18 a 28	18 a 28
Quantidade de amostras	10	10	10
Taxa de partículas que impactam a amostra [$\text{mg} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]	2	2	2

3 RESULTADOS

Abaixo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios para o desgaste sofrido por cada amostra, bem como a caracterização dos materiais que foram utilizados.

Também, são apresentadas micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura de duas regiões de uma amostra de aço AISI 304, na região central da cratera e na borda.

3.1 Caracterização dos Materiais Empregados

A caracterização dos materiais que foram empregados é importantíssima para que se possa garantir nos ensaios realizados neste trabalho as mesmas condições que foram empregadas em norma.

3.1.1 Caracterização das amostras

As amostras preparadas para ensaio, conforme salientado no item 2.3, tiveram sua topografia superficial analisada, donde se extraíram os valores abaixo.

Tabela 2 – Valores de Sq [μm] das amostras analisadas

Amostra	Sq	Média
1	0,0581	0,0577
2	0,0666	
3	0,0486	

Abaixo, na Figura 6, pode ser observado uma região de 1 mm² de uma amostra de aço AISI 304.

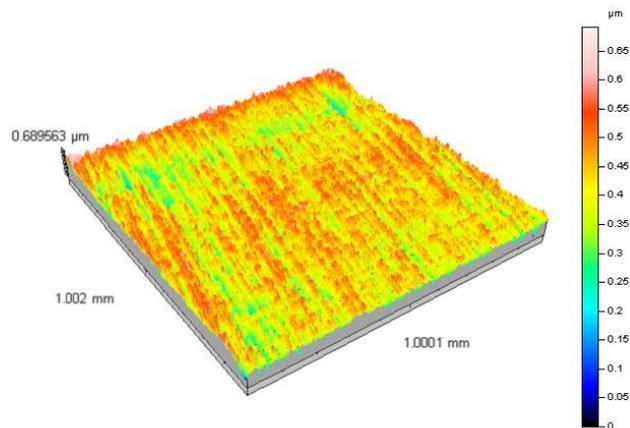


Figura 6 – Superfície de uma amostra de aço AISI 304 anterior ao teste.

3.1.2 Caracterização da alumina

O desgaste erosivo varia grandemente de acordo com características do material erosivo, como, dureza, forma e tamanho. Por isso, fez-se necessário uma cuidadosa caracterização deste material através do microscópio eletrônico de varredura.

A seguir, encontra-se uma microscopia eletrônica de varredura de uma amostra de alumina anterior ao teste (Figura 7, “A” e “B”) e posterior a este (Figura 7, “C” e “D”).

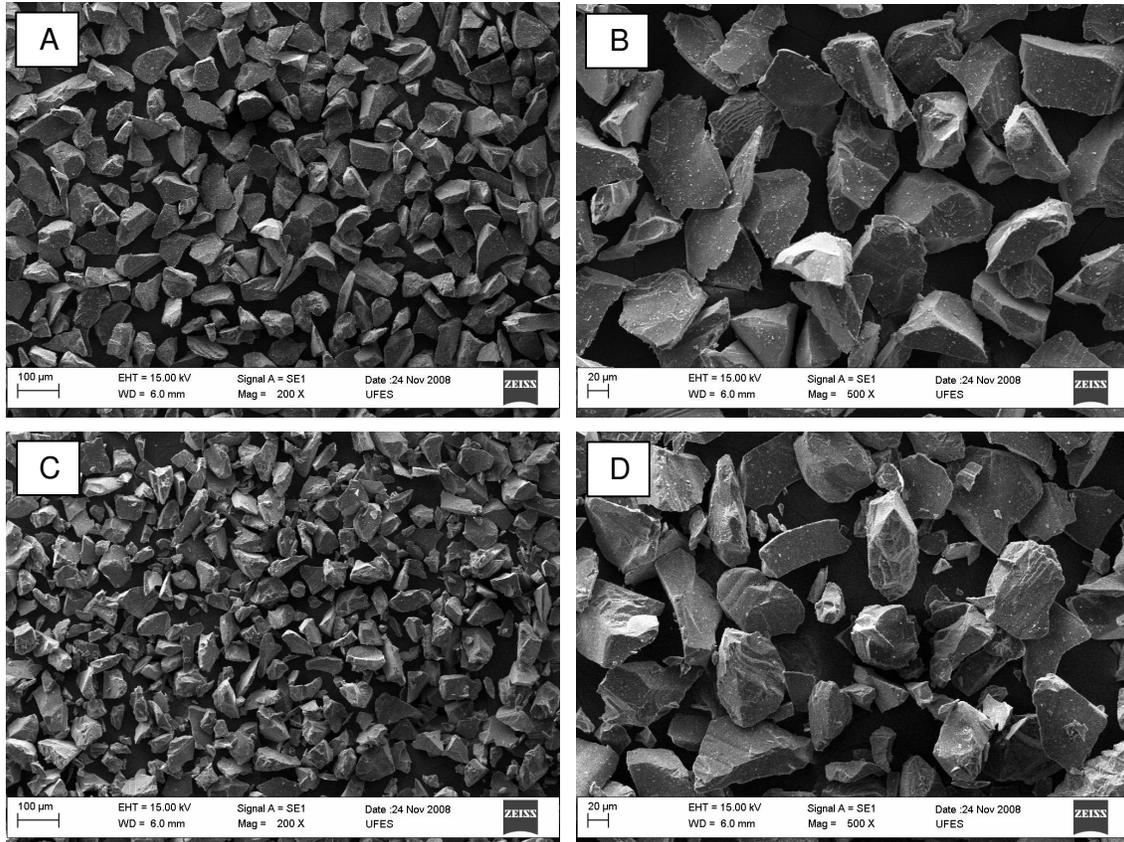


Figura 7 – Micrografia eletrônica de alumina nova com ampliação de 200x em “A”, em “B”, com ampliação de 500x. Em “C” e “D”, podemos observar com a mesma ampliação, respectivamente, alumina depois de utilizada.

Observando a figura acima, nota-se que o diâmetro médio das partículas é de aproximadamente 50 µm.

3.2 Resultados dos Testes

Abaixo, serão apresentados os resultados dos ensaios para as três situações descritas, bem como a comparação destes com os fornecidos pela norma. A média da taxa de desgaste apresentada é calculada com base na perda de massa de cinco amostras.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios nas três situações

Situação	Média da Taxa de Desgaste [$.001 \text{ mm}^3/\text{g}$]	Desvio Padrão
Aço SAE 1020 30 m/s	2,247	0,193
Aço SAE 1020 70 m/s	24,326	1,46
Aço AISI 304 70 m/s	24,487	1,26

Na Figura 8, pode ser observada a comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os fornecidos pela norma.

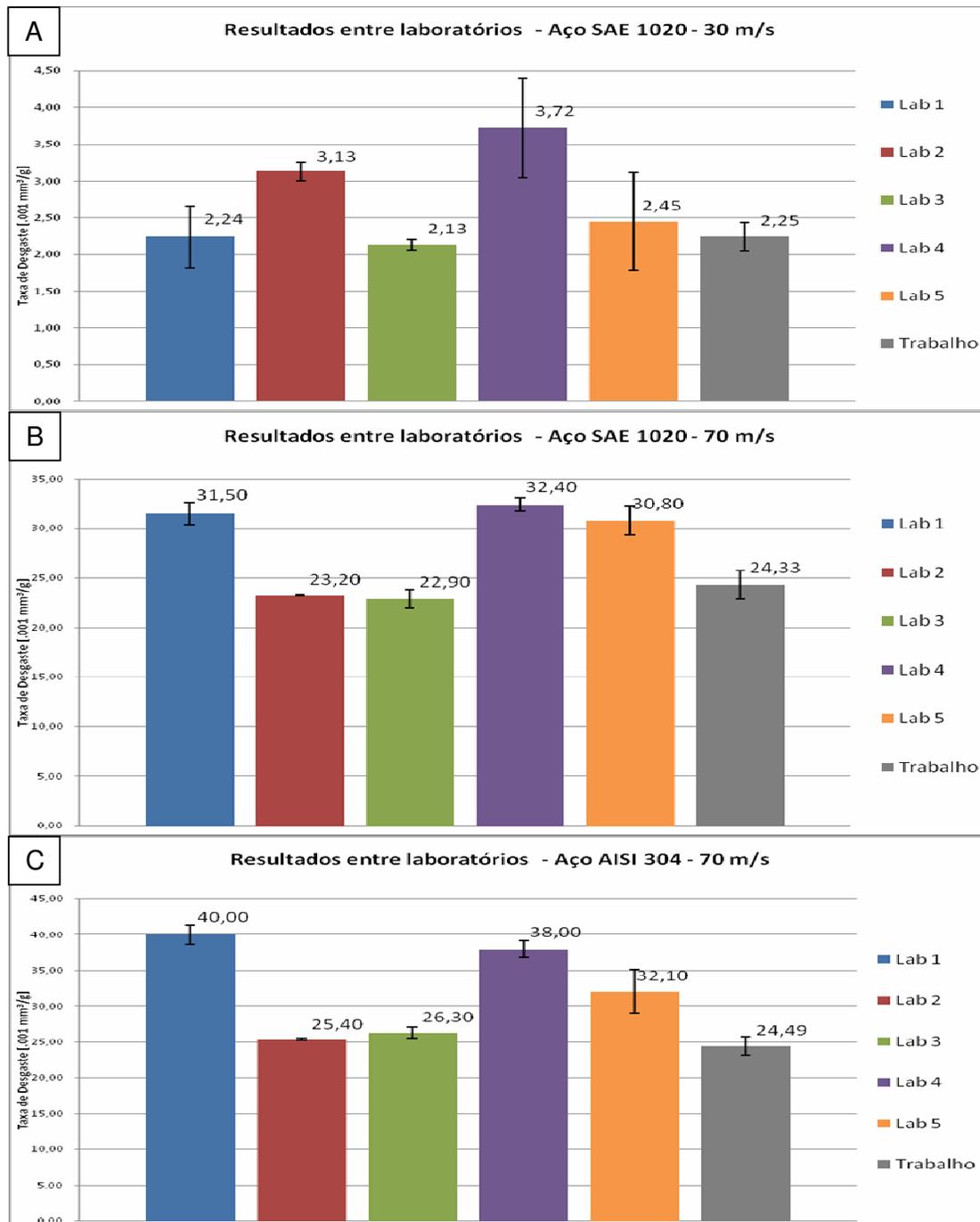


Figura 8 – Comparação dos resultados do trabalho com os fornecidos pela norma. Em “A”, aço SAE 1020 e partículas a 30 m/s. Em “B”, aço SAE 1020 e partículas a 70 m/s. Em “C”, aço AISI 304 e partículas a 70 m/s.

A seguir, pode ser visualizado o perfil das crateras formadas nas três diferentes situações de ensaio.

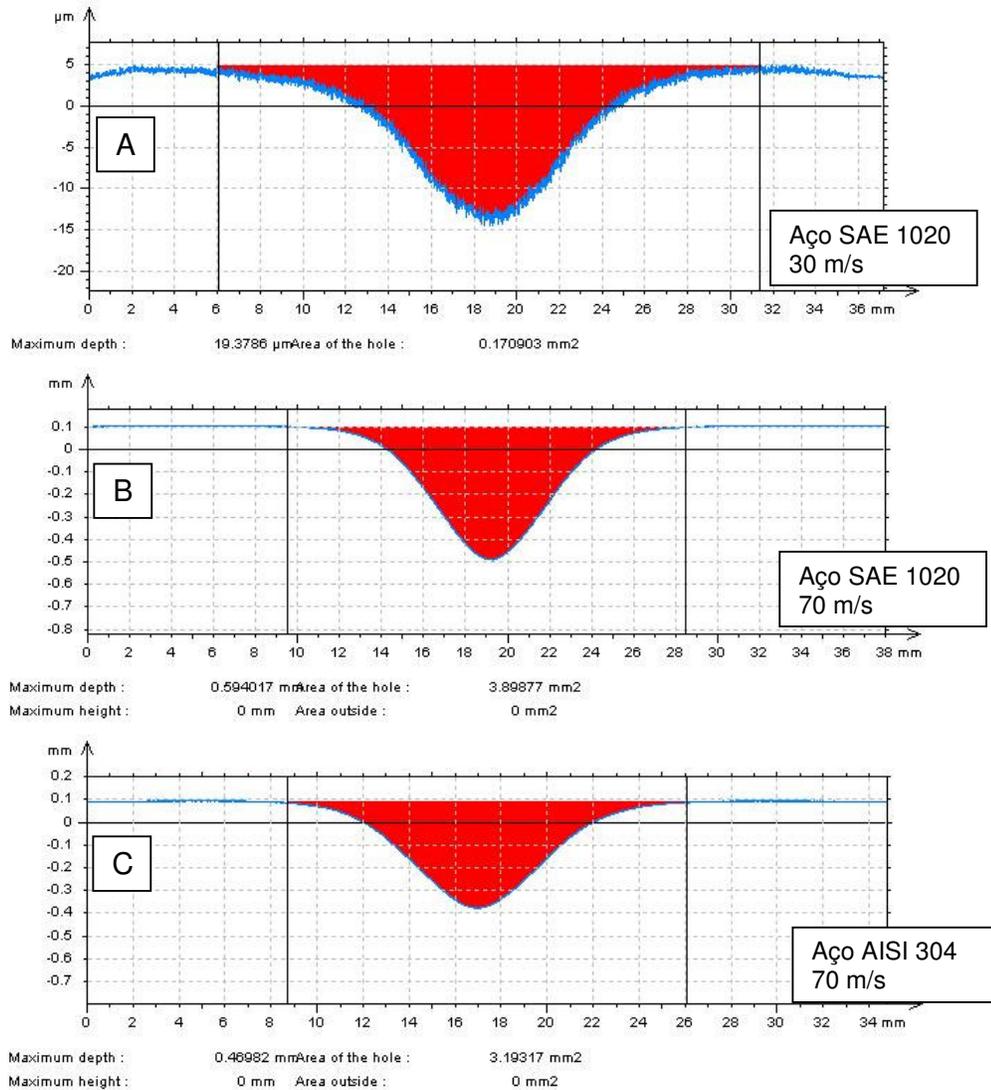


Figura 9 - Perfil da cratera de desgaste para as três situações de ensaio.

Na Figura 10, também, podemos observar micrografias eletrônicas de varredura em duas regiões diferentes da área impactada, centro e borda.

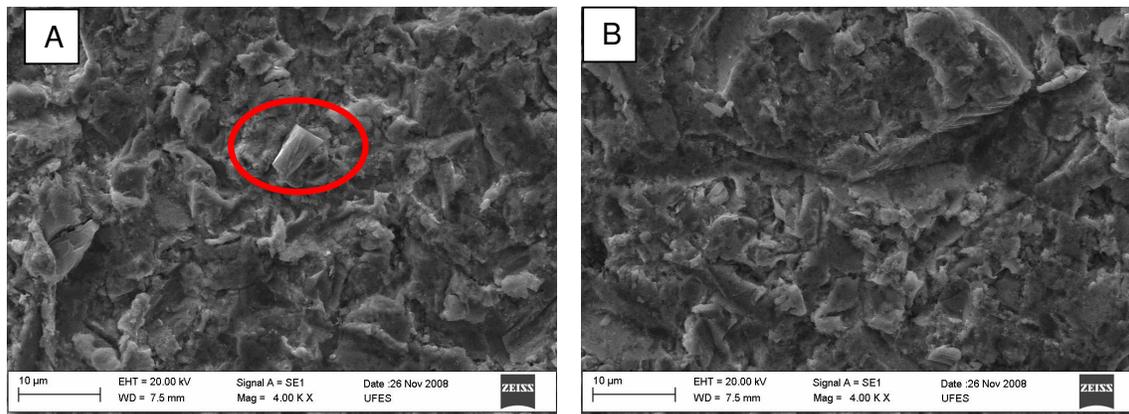


Figura 10 – Em “A” micrografia eletrônica do aço inoxidável AISI 304 impactado por partículas a 70 m/s na borda da cratera, e em “B” no centro.

4 DISCUSSÃO

Conforme pôde ser verificado na Tabela 1, na preparação das amostras, os resultados do parâmetro do acabamento superficial S_q se mostrou muito inferior ao valor máximo exigido pela norma ($1 \mu\text{m}$), sendo dispensado a análise de todas as amostras (Tabela 1).

A caracterização da alumina, que foi feita através de microscopia eletrônica de varredura, apresentou apreciável angulosidade e diâmetro médio próximo ao especificado em norma.

A Figura 7, em “C” e “D”, apresenta micrografias de alumina utilizada onde percebe-se que ocorreu a cominuição da mesma.

Na análise dos resultados das taxas de desgaste para o aço SAE 1020 impactado a 30 m/s (Figura 8 “A”), pode ser verificado que a média está entre os valores máximos e mínimos dos ensaios apresentados pela norma, porém inferior a média (Figura 8). Este fato pode ser justificado devido à pequena pressão negativa criada para inserir as partículas no sistema, ocasionando que nem toda a quantidade de partículas que saiu do reservatório impactou a amostra. Por isso, foi feita uma correção nos cálculos da taxa de desgaste, que é função da quantidade de partículas que impactam o material. Este problema pode ser resolvido com uma aproximação da amostra em relação à saída do tubo de aceleração, reduzindo a área impactada e, conseqüentemente, reduzindo a taxa de partículas que impactaram.

Para o aço SAE 1020 impactado por partículas a 70 m/s (Figura 8 “B”), não ocorreu problemas com a inserção de partículas na moega, como no caso acima. Apenas ocorreu uma pequena dificuldade de saída da alumina do reservatório, devido à umidade presente no ambiente. Porém como uma simples agitação das partículas no reservatório, a aglomeração destas foi reduzida.

O ensaio com o aço AISI 304 impactado por partículas a 70 m/s (Figura 8 “C”), também, teve problemas de dificuldade na saída da alumina do reservatório, maiores que na situação anterior, devido à grande umidade presente no ambiente. Por isso o equipamento deverá ser provido ou de um sistema de aquecimento para as partículas sólidas, ou estas deverão ser aquecidas pouco antes do ensaio em muflas, por exemplo.

Na Figura 9, pode ser observado o perfil das crateras formadas nas três situações citadas. Com o aumento da velocidade das partículas de 30 m/s para 70 m/s ocorreu um significativo aumento na profundidade. Antes, em torno de $20 \mu\text{m}$, passando para aproximadamente $600 \mu\text{m}$ no aço SAE 1020 e $450 \mu\text{m}$ no aço AISI 304.

Ocorre, também, uma modificação no diâmetro da cratera, onde, apesar de não ser tão pronunciada, reduz de aproximadamente 25 mm para 17 mm .

A Figura 10 apresenta micrografias eletrônicas de varredura na região da borda e central da amostra, onde nota-se um mecanismo de remoção de material através do destacamento por ruptura plástica em função dos múltiplos eventos - impactos. Na mesma figura, em “A”, observa-se uma partícula de alumina engastada, fato que não foi encontrado na região central da amostra.

Uma observação deve ser feita, correlacionar a dureza sub-superficial com a taxa de desgaste pode fornecer interessantes trabalhos futuros, conforme apresentado por Hutchings.⁽⁸⁾

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que o erosímetro apresentou bons resultados nos testes realizados segundo a norma ASTM G 76, como pôde ser comprovado com os valores da taxa de desgaste obtidos e comparados com os apresentados pela norma.

Os valores que apresentaram maiores distanciamentos, aço SAE 1020 e velocidade de impacto das partículas de 30 m/s, podem ser melhorados significativamente pela aproximação da amostra da saída do tubo de aceleração de partículas.

Faz-se necessário uma nova série de testes, uma vez que em cada uma das três situações já citadas, deveriam ter sido feitos dez ensaios ao invés de cinco. Também é imprescindível a instalação de um sistema de exaustão que retire as poeiras geradas pelo impacto das partículas sólidas.

Agradecimentos

Agradecimentos à Samarco Mineração S.A. pelo apoio financeiro e ao técnico metalurgista do TRICORRMAT/UFES Carlos Alberto Zampieri pela preparação das amostras de ensaio.

REFERÊNCIAS

- 1 FINNIE, I. Some reflections on the past and future of erosion. *Wear*, 186-187, 1995. 1-10
- 2 CALVI, D.P.; COSTA JUNIOR, W.P.; QUEIROZ, R.S.; MACÊDO, M.C.S.; SCANDIAN, C. Projeto e construção de erosímetro para testes em alta temperatura. Contribuição técnica ao 62º congresso anual da ABM.
- 3 Standart terminology relating to wear and erosion – ASTM G 40 – 02
- 4 LINDSLEY, B.; STEIN, K.; MARDER, A.R. The design of a high temperature erosion apparatus for studying solid particle impact. *Meas. Sci. Technol.* 6, 1995. 1168-1174.
- 5 DENG, T.; BINGLEY, M.S.; BRADLEY, M.S.A.; DE SILVA, S.R. A comparison of the gas-blast and centrifugal-accelerator erosion testers: The influence of the particles dynamics. *Wear*, 268, 2008. 945-955.
- 6 HAYASHI, N.; KAGIMOTO, Y.; NOTOMI, A.; TAKEDA, Y.; KATO, K. Development of new testing method by centrifugal erosion tester at elevated temperature. *Wear*, 258, 2005. 443-457.
- 7 LIU, X. A study on the erosion and erosion-oxidation of metal matrix composites. Helsinki, 2003.
- 8 HUTCHINGS, I.M. Tribology, friction and wear of engineering materials, Cambridge, Ed. Butterworth Heinemann, 1992.
- 9 RUFF, A.W.; IVES, L.K. Measure of solid particle velocity in erosive wear. *Wear*, 35, 1975. 195-199.
- 10 STEVENSON, A.N.J.; HUTCHINGS, I.M. Scaling laws for particle velocity in the gas-blast erosion test. *Wear*, 181-183, 1995. 56-62.
- 11 Standart test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas blast – ASTM G 76 – 02