

# PROTÓTIPO PARA ENSAIO DE DESGASTE EROSIVO<sup>1</sup>

Ronan Luis Pedroso Figueiredo<sup>2</sup>  
Paulo César Borges<sup>3</sup>

## Resumo

Equipamentos que simulem condições de desgaste erosivo são uma importante ferramenta no auxílio de projetos e manufatura de equipamentos utilizados no refino de petróleo, turbinas hidráulicas e caldeiras a vapor. Com o intuito de auxiliar na seleção de materiais e tratamentos de superfície para aplicações específicas de desgaste erosivo construiu-se um equipamento denominado Erosímetro. Este equipamento permite controlar as seguintes variáveis: velocidade do abrasivo, ângulo de impacto; temperatura de ensaio; vazão mássica de abrasivo; tamanho e tipo de abrasivo. A calibração deste equipamento consistiu na definição das condições de operação e do desenvolvimento de uma metodologia padrão para operação deste equipamento. Os resultados obtidos demonstram que o equipamento apresenta boa repetibilidade além de um bom controle das variáveis de operação nos ensaios a frio, enquanto para ensaios a quente serão necessários estudos futuros para melhoria do desempenho do equipamento.

**Palavras-chave:** Desgaste erosivo, erosímetro, calibração, alta temperatura.

## Abstract

Equipments that simulate erosive wear are an important aiding tool on the design and manufacturing of hydraulic turbines, oil refine equipments and boilers. A test rig called Erosímetro was designed and built in order to help in the selection of materials and superficial treatments, mainly for erosive wear applications. This rig can simulate various particle velocities, impact angles, test temperatures and abrasive mass flows. It can also be used with various particles sizes and abrasive types. The calibration of this equipment included the definition of operational parameters and the development of a suitable methodology for its uses. The calibration was carried out in two phases, first at room temperature (cold stage) and then at 500°C (high temperature stage). The results showed a great reliability for the cold stage. Also they showed a great control of the operational variables, although for the high temperature stage tests further studies will be necessary to improve the equipment performance.

**Key words:** Erosive wear; Erosímetro; Calibration, high temperature.

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada no 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

<sup>2</sup> Msc. Eng., UTFPR, Curitiba-PR.2005.

<sup>3</sup> D.Eng., UFSC, Florianópolis, SC, 1998.

# 1 INTRODUÇÃO

O desgaste erosivo apresenta-se como um fenômeno de fundamental importância para a indústria aeronáutica, equipamentos com turbinas a vapor, combustores de leitos fluidizados (FBC), equipamentos para transporte de minério e equipamentos utilizados em usinas petrolíferas para execução do processo de craqueamento catalítico [1,2,3]. Os custos anuais de manutenção estimados para estes equipamentos segundo Lindsley *et al* [4] são superiores a um milhão de dólares. Estes custos poderiam ser reduzidos com a seleção correta dos materiais empregados na construção mecânica dos componentes utilizados, assim como com a utilização de tratamentos de superfície adequados.

Na Tabela 1 encontra-se informações sobre características de outros equipamentos utilizados no estudo do desgaste erosivo segundo Wood, R.J.K e Wheeler, D.W. [5].

**Tabela 1.** Variáveis de controle utilizadas por outros pesquisadores em Ensaio Erosivos.

| Referência | Diâmetro do tubo de aceleração (mm) | Comprimento do tubo de aceleração (m) | Ângulo (°)    | Velocidade Partícula (m/s) | Fluxo de Partícula (kg/m <sup>2</sup> /s) | Erosivo e Tamanho de partícula     |
|------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------|----------------------------|---|------------------------------------|
| [1]        | 3                                   | 0,09                                  | 30, 90        | 15, 25, 35                 | 1,4, 13                                   | Sílica – 300 – 600                 |
| [5]        | 16 ou 20                            | 1                                     | 20-90         | 10 - 400                   | 0,05 – 8,0                                | Diversos - <1                      |
| [6]        | Não informado                       | Não informado                         | 90            | 250                        | 20,7                                      | Sílica – 140 – 300 (média 250 µm)  |
| [8]        | 4,95                                | 0,305                                 | 4 - 90        | 90                         | 0,25                                      | Esferas de aço (HRc 45) 250-350 mm |
| [9]        | 6                                   | 2                                     | 7,5, 22,5, 90 | 18 – 20<br>40 - 45         | Não informado                             | Sílica angular – 200 – 250         |
| [10]       | 6                                   | Não informado                         | 30            | 340                        | 2977                                      | Sílica                             |
| [11]       | desconhecido                        | 4                                     | 90            | 34, 59                     | 4,6                                       | Sílica – 300 – 600                 |
| [12]       | desconhecido                        | 4                                     | 90            | 26, 70, 75                 | 10,7, 48,8                                | Não informado                      |
| [13]       | desconhecido                        | 4                                     | 90            | 20, 34, 75<br>140, 200     | 10,5                                      | Não informado                      |
| [14]       | 4,72                                | 0,308                                 | 90            | 52, 81                     | 0,29                                      | Sílica angular – 125 – 150         |

Neste trabalho propõe-se a construção de um Erosímetro para o estudo de desgaste erosivo com as seguintes variáveis de controle: Abrasivo: diversos; tamanho de partículas: qualquer; Velocidade partículas: 10 a 90 m/s; Ângulo de ataque 3 a 90°; Fluxo de partículas<sup>1</sup>: até 42,5 kg/m<sup>2</sup>/s. Estas variáveis de controle foram escolhidas como requisitos de projeto por se mostrarem as de maior influência no desgaste erosivo dos materiais.

<sup>1</sup> Fluxo de massa de partículas dividido pela área de passagem no tubo de aceleração.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Amostra e Partículas

Para a confecção das amostras utilizou-se chapa de Aço AISI 1020 comercial laminada a quente, com dimensões de (3 x 100 x 95) mm, com superfície retificada. A dureza da amostra foi determinada através de ensaios de dureza *Vickers* à temperatura ambiente, com carga de 30 kg em um durômetro da marca WPM.

O material de partícula selecionado para a calibração do equipamento foi  $Al_2O_3$  com 98% de pureza, com tamanho de partícula entre 150-200  $\mu m$  (dados comerciais). O tamanho da partícula, assim como a geometria, foi determinada através da utilização de um *software* de análise ótica *Image Pro Plus 4.0*. Para obtenção dos valores foram analisados 5 campos óticos que somados continham 282 partículas. Para o cálculo do tamanho da partícula o *software* primeiro determinou o centróide e, através deste ponto, mede-se 90 diâmetros, de 2 em 2°, no intervalo 0 a 180°. O tamanho médio da partícula resulta da média aritmética destes valores. A geometria ou fator de forma da partícula foi calculado através da relação entre o seu maior e menor diâmetro, obtido previamente na determinação do tamanho da partícula.

Para determinar a dureza media das partículas foram realizados testes de microdureza *Vickers* com carga de 100g a temperatura ambiente. Cinco amostras de partículas abrasivas foram embutidas preparadas metalograficamente, para realização das medições.

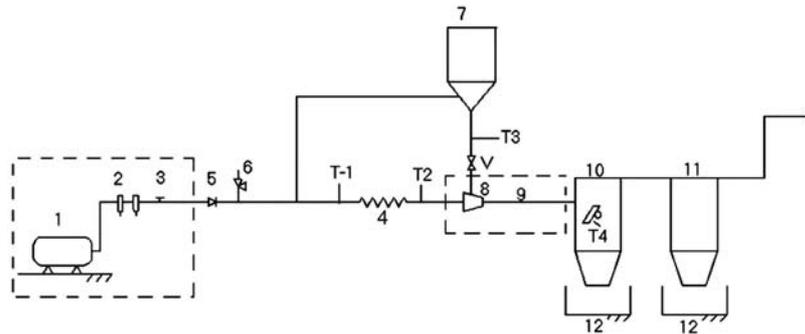
### 2.2 Erosímetro

As variáveis de controle (de projeto) a serem implementadas no erosímetro (Figura 1) durante os ensaios de desgaste erosivo, são vistas na Tabela 2:

**Tabela 2.** Variáveis de controle e condições de operação previstas para o erosímetro.

| Variáveis de Controle              | Condições de Operação      |
|------------------------------------|----------------------------|
| Velocidade da partícula            | De 10 a 80m/s              |
| Material de partícula              | Qualquer                   |
| Temperatura do ar e das partículas | De $T_{amb}$ a 700°C       |
| Tamanho de partícula               | Qualquer                   |
| Fração volumétrica de partícula    | Recomendado máximo de 0,1% |
| Ângulo de impacto                  | De 3 a 90°                 |

O medidor de vazão utilizado é do tipo bóia cônica, com escala de medição entre 4 e 40  $m^3/h$ , com precisão de 0,5  $m^3/h$ . O medidor foi calibrado, pelo fabricante, para utilização com ar comprimido a 200 kPa. O aquecedor de ar é um trocador de calor composto por seis bancos de resistências com potência de 1.000 W cada e projetado para alcançar temperaturas de até 900° C. O alimentador de partículas foi provido de um banco de resistências, dispostas ao redor do reservatório, projetadas para o aquecimento das partículas até 700°C. O reservatório do alimentador tem capacidade total de carga de 100 litros.



**Figura 1.** Diagrama esquemático do erosímetro.

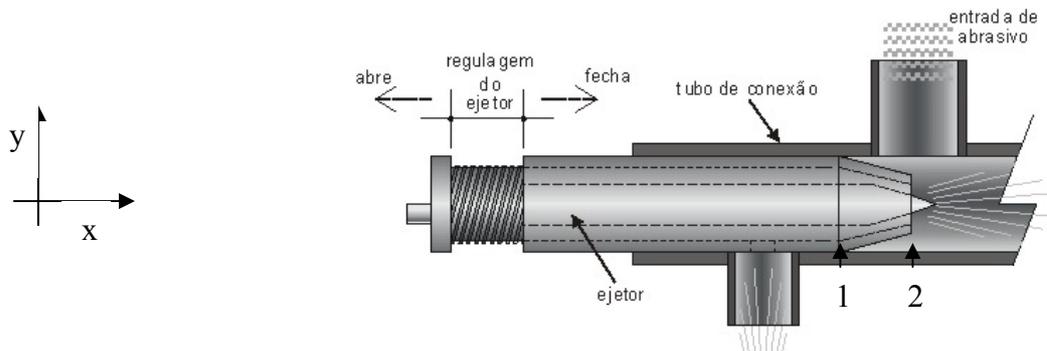
LEGENDA:

- |   |   |
|---|---|
| 1 – Compressor  | 8 – Ejetor  |
| 2 – Conjunto de filtro e regulador de pressão e vazão | 9 – Tubo de aceleração                              |
| 3 – Medidor de vazão (Rotâmetro)                      | 10 – Dispositivo de fixação de amostras             |
| 4 – Aquecedor de ar                                   | 11 – Ciclone  |
| 5 – Válvula de retenção                               | 12 – Coletor de Partículas                          |
| 6 – Válvula de segurança                              | T1, T2, T3 e T4 – Pontos de medição de temperatura. |
| 7 – Alimentador de partículas                         | V – Válvula de retenção                             |

O ejetor (Figura 2) dosa a quantidade de partículas em função da depressão gerada no ejetor. A depressão gerada é proporcional a alteração da velocidade do ar entre região 1 e 2 conforme equação 1.

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} \dots\dots\dots(1)$$

onde,  $P_n$  é a pressão,  $V_n$  a velocidade e  $\rho_n$  a densidade do fluido nos pontos 1 e 2 respectivamente. Como a vazão é constante ao longo do tubo a alteração da restrição no ejetor provoca uma alteração na Velocidade que por conseqüência implica na alteração da pressão no ponto 2 (entrada das partículas) conforme equação 1.



**Figura 2.** Desenho esquemático do ejetor.

Como as partículas partem de uma velocidade em x igual a 0, (ponto de entrada das partículas no fluxo), estas são aceleradas até a velocidade do ar ao longo do tubo de aceleração. Para uma condição fixa de tipo, material, tamanho e características superficiais da partícula a velocidade final será função da distância de aceleração, ou seja, comprimento do tubo. O tubo de aceleração, é composto de tubo de alumina com diâmetro interno igual a 10 mm e comprimento total 1500 mm encamisado com um tubo de aços AISI 310, foi projetado de forma a garantir que a velocidade das partículas do abrasivo atinja no mínimo 90% da velocidade do ar [2].

### **2.3 Medição da Velocidade das Partículas**

Para a medição da velocidade das partículas à temperatura ambiente foi utilizado um aparato desenvolvido com base nas recomendações da Divisão de Metalurgia do National Institute of Standards and Technology [14]. A velocidade das partículas a alta temperatura foi calculada através de um modelo teórico, compilado em um programa chamado Erosímetro [15], validado pelas medições realizadas, a temperatura ambiente, pelo aparato.

### **2.4 Calibração da Vazão Mássica de Partículas**

O procedimento para obtenção da vazão mássica de partículas consistiu em, ao final de cada ensaio, remover a massa de partículas utilizada, que foi coletada e separada em um receptáculo de massa conhecida que estava contido dentro do reservatório de fixação da amostra do equipamento. Subtraindo-se a massa do recipiente da massa total pesada e dividindo-se o valor obtido pelo tempo de ensaio, 20 minutos, tem-se o valor da vazão mássica para o referido ensaio. Este procedimento foi repetido para cada condição de ensaio realizado.

### **2.5 Medição da Temperatura do Sistema**

Para a realização das medições e monitoramento da temperatura do ar foram utilizados dois termopares, um pertencente ao aquecedor de ar e outro fixado na saída do tubo de aceleração. As medições foram realizadas até a temperatura de regime. Este procedimento foi repetido para as velocidades de 30, 50 e 80 m/s, até a temperatura de 500°C, temperatura do aquecedor, ininterruptamente.

A temperatura da amostra foi monitorada através de um termopar instalado na parte posterior do suporte de amostra e fixado junto a um orifício realizado no centro da superfície da mesma. A amostra foi aquecida pela simples passagem do ar quente, sem abrasivo, sobre a sua superfície.

A temperatura das partículas foi medida ao longo do reservatório do alimentador por três termopares. As medições da distribuição de temperatura e o tempo necessário para que as partículas atingissem a temperatura de teste foram realizadas no mesmo ensaio. O ensaio consistiu em ajustar o aquecedor do reservatório para a temperatura de 800°C (temperatura de controle do aquecedor), com as partículas a temperatura ambiente, e registrar as temperaturas indicadas nos termopares em intervalos de tempo constantes iguais a 30 minutos.

### **2.6 Calibração do Desempenho do Equipamento**

A metodologia para execução na calibração do desempenho foi baseada na norma G 97 da ASTM [16]. A calibração foi executada a frio (temperatura ambiente), e a alta temperatura (500°C), para três velocidades de partículas distintas, ver Tabela 3. Para obtenção da perda de massa das amostras, as mesmas foram pesadas no início e ao final de cada ensaio. O tempo de duração de cada ensaio foi 20 minutos e o ângulo de incidência das partículas 30°.

**Tabela 3.** Seqüência de ensaios para calibração do desempenho do equipamento.

| $C_c$ | $V_p$ (m/s) | $T_s$ (°C)                                   | $T_{mp}$ (µm) | mp(g/min) | Nr | Variável                      |
|-------|-------------|--|---------------|-----------|----|-------------------------------|
| 1     | 30          | $T_{amb}$ (frio) / 500<br>(alta temperatura) | 170           | 50        | 8  | Desgaste – perda de massa (g) |
| 2     | 50          |  |               |           |    |                               |
| 3     | 80          |  |               |           |    |                               |

Onde:  $C_c$  é a condição de calibração;  $V_p$  é a velocidade da partícula;  $T_s$  é a temperatura do sistema (ar, partícula e amostra);  $T_{mp}$  é o tamanho medio de partícula;  $T_{amb}$  é temperatura ambiente;  $m_p$  é vazão massica de abrasivo e  $Nr$  é o numero de repeticoes de cada condição de calibração.

### 3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 Caracterização dos Materiais

A dureza média das amostras obtida foi de 123,2 HV, com desvio padrão igual a 1,8 HV. A dureza média das partículas resultante foi de 1.935 HV com desvio padrão de 198,7 HV. A dureza da partícula medida é 15 vezes superior à dureza da amostra, evitando variações na taxa de desgaste erosivo referentes à dureza do abrasivo. Quanto ao fator de forma, 83% das partículas apresentaram tamanho de forma superiores a 1,8, sendo que os valores superiores a 1 (partículas esféricas) são recomendados para ensaios de amostras de aço AISI 1020 (material dúctil).

O tamanho médio da partícula foi de 168,8 µm com desvio padrão de 5,2 µm. O fator de forma média da partícula foi de 2,1 com desvio padrão de 0,08.

#### 3.2 Calibração da Vazão Mássica

A Tabela 4 apresenta a variação da vazão mássica média em relação à velocidade do ar.

Tem-se, conforme a Tabela 4, que para uma mesma vazão mássica os valores médios obtidos se aproximam muito do valor especificado, sendo que a maior variação de 6% ocorreu para a vazão mássica de 30g/min. As variações obtidas para uma mesma velocidade de partícula, desvio padrão, percentualmente permanecem praticamente constante, em media 11%, demonstrando uma boa confiabilidade neste parâmetro.

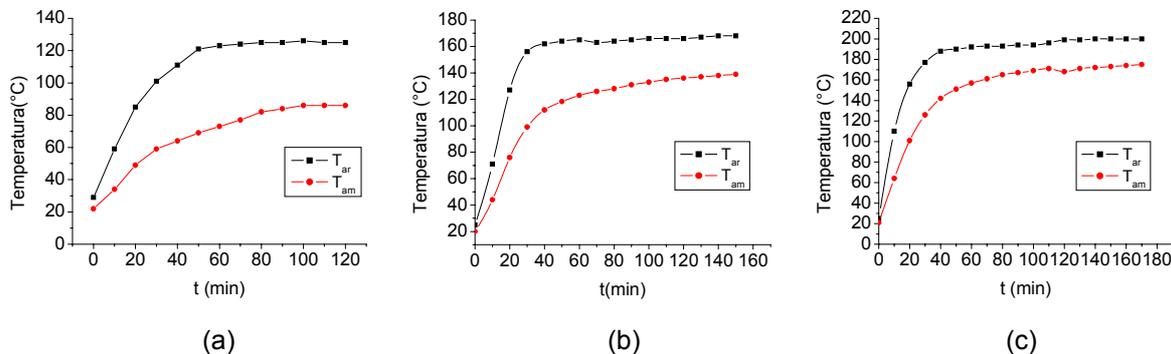
**Tabela 4.** Resultados para vazão mássica de abrasivo em função da velocidade do ar.

| $m_c$        | $V_{ar}$ (m/s) | $m_e$ (g/min) | dp (g/min) |
|--------------|----------------|---------------|------------|
| 30<br>g/min  | 30             | 29,7          | 3,5        |
|              | 50             | 28,2          | 2,3        |
|              | 80             | 30,0          | 4,4        |
| 50<br>g/min  | 30             | 51,9          | 6,2        |
|              | 50             | 50,4          | 4,0        |
|              | 80             | 50,0          | 6,7        |
| 100<br>g/min | 30             | 105,8         | 12,9       |
|              | 50             | 100,7         | 8,7        |
|              | 80             | 99,6          | 10,7       |

Onde:  $V_{ar}$  é a velocidade do ar ;  $m_c$  é vazão mássica de partícula especificada para o ensaio;  $m_e$  é vazão mássica media de partícula obtida experimentalmente e dp é o desvio padrão.

### 3.3 Calibração da Temperatura do Ar e da Amostra

A Figura 3 apresenta a variação da temperatura do ar e da amostra ao longo do tempo para as velocidades do ar de 30, 50 e 80 m/s.



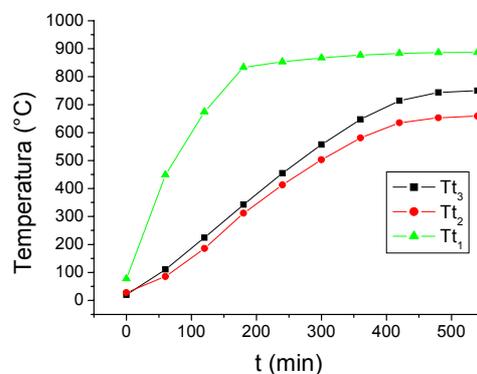
**Figura 3.** Variação da temperatura do ar e da amostra ao longo do tempo para velocidade do ar de 30 (a), 50 (b) e 80m/s (c) e temperatura do aquecedor de 500°C.

Nota-se que a temperatura, tanto do ar como da amostra, aumentam com o aumento da velocidade do ar, respectivamente de 125 para 200°C e de 86 para 175°C. Tem-se também o aumento da eficiência de transferência de calor do ar para amostra de 69 para 87,5%. As temperaturas máximas do ar e amostra ocorrem na maior velocidade, 80 m/s, sendo respectivamente 200 e 175°C. A maior eficiência de aquecimento do ar é 40% para a velocidade de 80 m/s.

O desempenho do aquecedor de ar ficou muito abaixo do necessário para esta calibração. A temperatura máxima alcançada pelo ar foi de 200°C, somente para a velocidade de 80 m/s, enquanto o especificado é de 500 °C. Este resultado, possivelmente, é proveniente da baixa troca de calor dentro do aquecedor de ar e das perdas ao longo da tubulação de ar quente, associado a uma execução inadequada do projeto original do equipamento, devendo então futuramente serem verificados tanto falhas no projeto do aquecedor quanto a possibilidade de utilização de isolantes mais eficientes ao longo da linha.

### 3.4 Calibração da Temperatura das Partículas

A Figura 4 apresenta a variação da temperatura das partículas ao longo do tempo, para temperatura de aquecimento de 800°C.

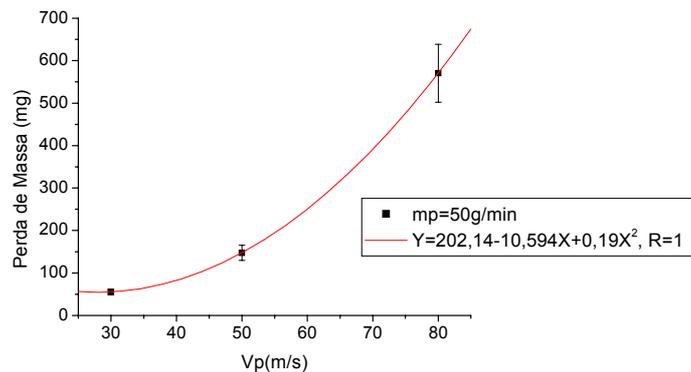


**Figura 4.** Variação da temperatura das partículas ao longo do tempo.

Nota-se que a temperatura das partículas vizinhas à parede do reservatório ( $T_{t1}$ ) estabiliza em 200 minutos, enquanto que as partículas presentes no centro do reservatório ( $T_{t2}$  e  $T_{t3}$ ) necessitam de 500 minutos. A temperatura máxima alcançada pelas partículas no centro inferior do alimentador, medida no termopar 3, é de 750°C, enquanto as partículas que também estão no centro, mas na parte superior do reservatório, termopar 2, atingem no máximo 660 °C, uma diferença de 90°C.

### 3.5 Verificação do Desempenho do Equipamento

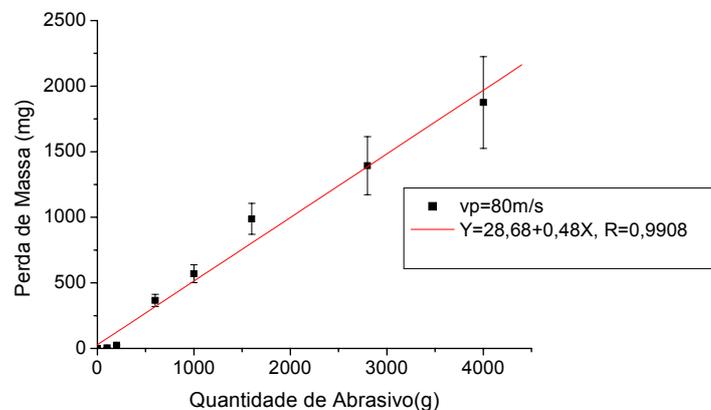
A Figura 5 apresenta influência da velocidade das partículas nos resultados de desgaste a frio com 50 g/min de vazão mássica.



**Figura 5.** Desgaste em função da velocidade de partícula para a vazão de 50 g/min.

Observa-se que no desgaste tem-se uma variação exponencial da perda de massa com a velocidade da partícula, demonstrando que esta é uma das variáveis mais críticas no estudo do desgaste erosivo, conforme esperado. A vazão mássica, ou seja, a quantidade de abrasivo utilizada durante o ensaio, apresenta uma relação de proporção, em torno de 14,7% em média, com o desgaste apresentado pelas amostras, sendo outra variável de fundamental importância no estudo deste fenômeno.

A Figura 6 apresenta a influência da quantidade de partículas (vazão mássica) no desgaste erosivo a  $T_{amb}$ . com velocidade de partícula de 80 m/s.



**Figura 6.** Variação do desgaste erosivo, avaliado através da perda de massa da amostra, em função da vazão mássica para a velocidade de partícula de 80 m/s.

Na Figura 6 pode-se observar um aumento linear do desgaste à medida que a vazão mássica cresce, sendo esta razão determinada pelo coeficiente angular da reta. Esta relação não é válida para massas muito pequenas, 5 e 10 g/min, denominadas “massas de incubação” (ver Tabela 5).

Conforme a Tabela 5, o maior desgaste é obtido para vazão mássica de 200 g/min, 1875 mg, enquanto para vazão mássica de 30 g/min tem-se um desgaste de 367 mg, aproximadamente 5 vezes menor. A taxa de desgaste, neste ensaio foi avaliada como a relação entre a perda de massa da amostra e a massa de abrasivo necessária para obter esta perda, para este sistema é igual a 0,48.

**Tabela 5.** Perda de massa para velocidade de partícula de 80 m/s.

| $m_a$ (g) | $m_p$ (g/min) | D (mg) | dp (mg) |
|-----------|---------------|--------|---------|
| 100       | 5             | 5      | 0       |
| 200       | 10            | 25     | 1       |
| 600       | 30            | 367    | 47      |
| 1000      | 50            | 570    | 68      |
| 1600      | 80            | 988    | 118     |
| 2800      | 140           | 1394   | 222     |
| 4000      | 200           | 1875   | 350     |

Onde:  $m_a$  é a quantidade total de abrasivo e D é perda de massa para  $V_{ar}$  de 80 m/s.

Durante a calibração do equipamento a alta temperatura, ocorreu bloqueio na passagem das partículas de abrasivo no tubo de alimentação próximo à válvula de retenção. Isto inviabilizou a realização dos ensaios a quente. Supõe-se que este problema deva-se à alteração da umidade das partículas e conseqüentemente na sua escoabilidade. Entretanto fazem-se necessários estudos mais aprofundados para elucidação da causa deste problema.

#### 4 MELHORIAS FUTURAS DO EQUIPAMENTO

Para solucionar os problemas encontrados durante a realização dos ensaios a alta temperatura sugere-se:

- Implantação de um sistema autônomo de aquecimento para a amostra.
- Inserção de um sistema de desbloqueio da tubulação através da implantação de uma entrada de ar pressurizada junto à saída de partículas ou alimentação das partículas por fuso.
- Revisão do projeto/necessidade de aquecimento do ar/partículas para realização de ensaios.

#### 5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para a calibração da vazão mássica demonstram pouca variação entre os valores médios obtidos, 0,7 g/min em média,

O equipamento apresentou boa repetibilidade para ensaios à temperatura ambiente tanto para ensaios com baixa (30 m/s) e alta velocidade (80 m/s) assim como para pequenas (30 g/min) e grandes (200 g/min) vazões mássicas.

Os problemas ocorridos durante a realização dos ensaios a alta temperatura indicam a necessidade de revisar o projeto do equipamento para futuros estudos.

A transferência de calor do aquecedor de ar para o ar comprimido é muito baixa, apresentando perdas de até 75%. Por outro lado, a eficiência de aquecimento

da amostra pelo ar varia de 69 a 87,5%. A utilização de um sistema autônomo para pré-aquecimento da amostra aumentaria a eficiência de aquecimento da mesma.

Devido a baixa influencia da temperatura das partículas na temperatura do ar e da amostra tem-se que o aquecimento das partículas, para este abrasivo, não é necessária. No caso da utilização de outros abrasivos estes dados devem ser reavaliados.

## REFERÊNCIAS

- 1 Hutchings, I. M., Tribology – Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Editora Edward Arnold (1992).
- 2 Borges, P. C., Negrão, C. O. R., Fofano, S., Penteado, J. C., das Neves, J. C. K, Mafra, M., Serafim, C. L., Figueiredo, R. L. P. e de Oliveira, F. T., Estudos preliminares para projeto e construção de um erosímetro à alta temperatura – modelação e planejamento do experimento, 2º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - 2002, Universidade Federal da Paraíba.
- 3 Finnie, I., Erosion of surfaces by solid particles, *Wear* 3 (1960) pp. 87-103.
- 4 Lindsley, B., Stein, K. e Marder, A. R., The design of high-temperature erosion apparatus for studying solid particle impact, *Meas. Sci. Technol.* 6 (1995) pp. 1169-1174.
- 5 Wood, R.J.K. e Wheeler, D.W., Design and performance of a high velocity air – sand jet impingement erosion facility, *Wear* 220 (1998) pp. 95-112.
- 6 Nokleberg, L. Sontvedt, T., Erosion in choke valves: oil and gas industry applications, *Wear* 186-187 (1995) pp. 401-412.
- 7 Sheldon, J., Maji, J. e Crowe, C.T., Erosion of a tube by gas-particle flow, *Trans. ASME J. Eng. Mater. Technol.* 99 (1977) pp. 138-142.
- 8 Haugen, K., Kvernold, O., Ronold, A. e Sandberg, R., Sand erosion of wear-resistant material: erosion in choke valves, *Wear* 186-187 (1995) pp. 179-188.
- 9 Seger, O., e Maroofian, I., Erosion, cavitation and abrasion resistance of choke trim materials, *Proc. 16<sup>th</sup> Annual Offshore Technology Conference (OTC)*, Houston, (1984), pp. 9-16.
- 10 Feng, Z., Tzeng, Y., e Field, J.E., Solid particle impact of CVD diamond films, *Thin solid Films* 212 (1992) pp. 35-42.
- 11 Hayward, L.P., e Field, J.E., The solid particle erosion of diamond. *J. Hard Materials I* (1) (1990) 53-64.
- 12 Feng, Z., Field, J.E. Solid particle erosion of diamond, a polycrystalline diamond composite and a polycrystalline boron nitride composite, *J. Hard Materials* 1 (4) (1991) pp. 273-287.
- 13 Shipwaw, P.H. e Hutchings, L.M., Influence of nozzle roughness on conditions in a gas-blast erosion rig, *Wear* 162-164 (1993) pp. 148-158.
- 14 Doyle, P. A. e Levy, A. V., The elevated temperature erosion of 1100 aluminium by a gas – particle stream, *Corrosion-erosion behavior of materials* (1978) pp. 162-176.
- 15 Figueiredo, R. L. P., Negrão, C. O. R., Penteado, J. C., Borges, P. C., Modelo matemático para cálculo da velocidade de partícula em ensaio de desgaste erosivo, 61º Congresso Anual da ABM Internacional de 24 a 27 de Julho de 2006, Rio de Janeiro, RJ.
- 16 ASTM Standard G 76, Conducting erosion test by solid particle impingement using gas jets (1995).pp. 308-312.