

# PROJETO E CONSTRUÇÃO DE EROSÍMETRO PARA TESTES EM ALTA TEMPERATURA<sup>1</sup>

*Diego Pagoto Calvi<sup>2</sup>*

*Wilton Gomes Costa Junior<sup>2</sup>*

*Rogério Silveira de Queiroz<sup>3</sup>*

*Marcelo Camargo Severo de Macêdo<sup>4</sup>*

*Cherlio Scandian<sup>5</sup>*

## Resumo

Erosímetro a altas temperaturas é um equipamento laboratorial que será utilizado para avaliar o desgaste erosivo em situações onde há particulados em escoamento de gases a altas velocidades e temperaturas. O comportamento do fluxo de ar nas condições desejadas (altas velocidades e temperaturas), e a interação entre o fluxo e as partículas erosivas que proporciona aceleração às mesmas. Algumas metas foram traçadas: a velocidade da partícula erosiva (90 m/s) e a temperatura de ensaio (450 °C). Como premissa, adotou-se que as partículas erosivas terão diâmetros característicos entre 50 e 500 µm. A partir daí algumas definições já puderam ser feitas. Protótipos foram montados para consolidar as definições tomadas. Mesmo não realizando testes em altas temperaturas, os resultados encontrados foram satisfatórios e de acordo com os estudos realizados. Com base nos experimentos com os protótipos, pôde-se especificar cada equipamento componente do erosímetro. Verificou-se a necessidade de materiais duros que conservem suas propriedades em altas temperaturas, nos trechos da alimentação e aceleração das partículas.

**Palavras-chave:** Erosímetro; Projeto; Desgaste erosivo; Alta temperatura.

## Abstract

High temperature erosimeter is a laboratorial equipment that will be used to evaluate the erosive wear by high temperature and velocity gases with particulates. The air flow behavior on the experiment conditions (high temperatures and velocities) and the relationship between the flow and the erosive particles provide their acceleration. Some goals were established: the erosive particle speed (90 m/s) and the experiment temperature (450 °C). The particles diameters were adopted between 50 and 500 µm. Prototypes were assembled to reinforce the established definitions. Although high temperature tests could not be simulated, the results were satisfactory and agreed with the studies. By the prototypes experiments, each erosimeter part was specified. Hard materials that conserve its properties under high temperatures must be used on the feeding and particles acceleration sections.

**Key-words:** Erosimeter; Project; Erosive wear; High temperature.

---

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Mecânico – UFES.*

<sup>3</sup> *Professor PPGEM/UFES - MSc.*

<sup>4</sup> *Professor PPGEM/UFES - Dr - INPL, França, 1995 – Membro da ABM.*

<sup>5</sup> *Professor PPGEM/UFES - Dr - INPL, França, 2000 – Membro da ABM.*

## 1 INTRODUÇÃO

A presença de partículas duras nos sistemas de ventilação das indústrias de beneficiamento de minério, onde circula ar em altas temperaturas e velocidades, gera desgaste erosivo nos ventiladores, acessórios (válvulas, conexões, etc.) e dutos. Com o propósito de auxiliar a seleção de materiais para essas situações, iniciou-se este estudo para projetar e construir um equipamento de bancada que avalie essas condições de desgaste. Este projeto fundamentou-se em buscar uma razão entre a velocidade do fluido, no caso o ar, e a velocidade final da partícula, para tanto, foi confeccionado um dispositivo de medição de velocidade a dois discos, como proposto em literatura específica. O erosímetro foi projetado para trabalhar com temperaturas de ensaio desde a ambiente até próximo de 450 °C, velocidade das partículas até 90 m/s e diâmetro das mesmas entre 50 e 500 µm. Como resultado, espera-se que o erosímetro reproduza os micromecanismos presentes no processo de desgaste em questão, além de permitir a avaliação das influências das principais variáveis presentes no processo de desgaste.

## 2 METODOLOGIA – DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O erosímetro foi projetado de forma a proporcionar, através de um fluxo de ar previamente aquecido, aceleração às partículas que serão impactadas na superfície da amostra.

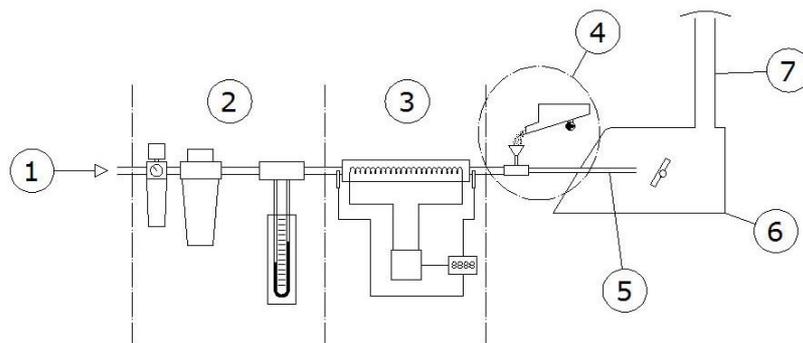
Todo o projeto foi baseado em literatura especializada e as concepções foram avaliadas em laboratório por meio de protótipos, estes com algumas adaptações no que diz respeito a materiais existentes no mercado. Para dimensionamento do sistema de aquecimento foram utilizadas informações de fabricantes de aquecedores elétricos.

Foram utilizados como dados de referência para o início do projeto:

- Velocidade máxima das partículas: 90 m/s;
- Faixa de temperatura de ensaio: da ambiente até 450 °C;
- Diâmetro característico das partículas:  $50 < \varnothing < 500 \mu\text{m}$ .

O erosímetro pode ser dividido em sete (7) 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;
7. Saída dos gases.



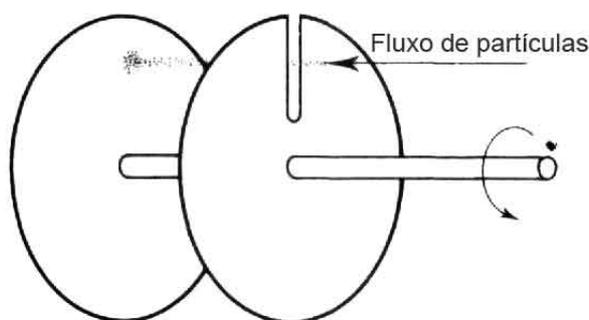
**Figura 1.** Desenho esquemático do erosímetro evidenciando as 7 (sete) etapas descritas anteriormente.

Um fluxo de ar comprimido (1) será utilizado para a aceleração das partículas. Esse será inicialmente filtrado, sua vazão a frio será medida por meio de um tubo venturi (ambos no setor 2) e o fluxo será aquecido (3). Em (4), as partículas serão inseridas no fluxo através de uma moega conectada imediatamente após um bico expansor. Este promove uma redução de seção no escoamento, criando uma região de baixa pressão. Por meio de um bocal cilíndrico (5) as partículas serão aceleradas até à velocidade de ensaio, que será realizado na câmara (6). Nesta câmara, um porta amostra permite que sejam ensaiados ângulos entre 20° e 90°. Após o ensaio, o ar é exaurido pela chaminé (7).

Antes de cada ensaio, deverá ser feita a aferição da velocidade das partículas erodentes, para tal será utilizada uma adaptação do mecanismo a dois discos, proposto por Hutchings<sup>(1)</sup> (Figura 2), onde dois discos solidários a um eixo, afastados em certa distância, giram a uma velocidade conhecida. O primeiro possui uma abertura por onde passam as partículas, estas se deslocam perpendicularmente ao plano dos discos, e, com estes em repouso, marcam o segundo numa posição alinhada com a abertura. Com o dispositivo em movimento, as partículas impactarão no segundo disco em uma posição defasada à primeira marcação. De posse do ângulo de defasagem, da rotação e da distância da entre os discos, pode-se obter a velocidade da partícula pela expressão:

$$v_p = \frac{n \cdot D \cdot 6,016 \cdot 10^{-3}}{\beta} [m/s] \quad (4.1)$$

Sendo  $n$  a rotação [rpm],  $D$  a distância entre os discos [mm] e  $\beta$  o ângulo de defasagem entre as marcações [graus].



**Fig. 2.2** Desenho esquemático do dispositivo de medição a dois discos para fluxo de partículas num ensaio erosivo.<sup>(1)</sup>

A partir da literatura, optou-se por utilizar um tubo cilíndrico (bocal) para a aceleração de partículas com comprimento nominal de 300 mm. Stevenson e Hutchings<sup>(2)</sup> mostram que, a partir de certo comprimento de tubo, a velocidade final das partículas tende a ser menor, e que a velocidade está fracamente ligada ao comprimento do tubo.

A partir do tamanho das partículas escolhidas para o ensaio (50 a 500  $\mu\text{m}$ ), escolheu-se um tubo de diâmetro nominal de 5 mm. Segundo Stevenson e Hutchings,<sup>(3)</sup> com partículas com diâmetros no intervalo escolhido, obtém-se a faixa de velocidades desejada com este diâmetro nominal de tubo.

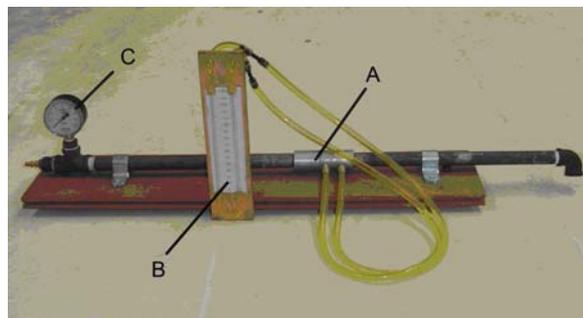
Sabendo que o tubo de aceleração estará sujeito ao impacto rasante das partículas erosivas, e que, materiais frágeis apresentam bom comportamento no que tange a erosão em ângulos próximos à zero, conforme mencionado na referência bibliográfica, foi escolhida a alumina, que tem como principal propriedade elevada dureza além de ser um bom isolante térmico.

### 3 EXPERIMENTOS

Um protótipo foi montado para avaliar o funcionamento dos principais componentes do erosímetro e estimar a velocidade de saída das partículas.

#### 3.1 Tubo Venturi

O tubo venturi utilizado nos experimentos foi construído em liga de alumínio comercial. Este foi montado entre dois trechos retos de tubulação (maior que 10 vezes o diâmetro do tubo) para reduzir os efeitos provenientes do desenvolvimento da camada limite. Para medir a diferença de pressão no Venturi, foi construído, também, um manômetro de tubo em “U” (Figura 3).



**Figura 3.** Tubo Venturi construído (A), manômetro em “U” para medir a pressão no Venturi (B) e manômetro para medir a perda de carga no bico expansor (C).

Um Venturi com dimensões padronizadas, possui um coeficiente de descarga tabelado. Como o construído para os testes teve que ser adaptado às condições de vazão, o coeficiente de descarga foi calculado através de comparações entre as vazões obtidas no Venturi e lidas em rotâmetro calibrado. O valor encontrado para este coeficiente,  $C=0,82$ , aproximou-se do calculado pelo programa disponível no site citado na referência IX,  $C=0,80$ . Esta diferença pode ser explicada devido ao fato de o programa citado ser próprio para cálculo com tubo Venturi de maiores dimensões.

### 3.2 Alimentação de Partículas

Inicialmente, foi avaliada a eficiência do dispositivo alimentador de partículas, constituído de um orifício de entrada acoplado a um tubo perpendicular à corrente de ar. A montante a este orifício havia uma redução na seção da tubulação para provocar uma queda de pressão próxima da alimentação, com o intuito de auxiliar a gravidade na sucção das partículas. Foram testados três diferentes diâmetros para esse furo: 3,0; 3,5 e 4,0 mm (Figura 4).

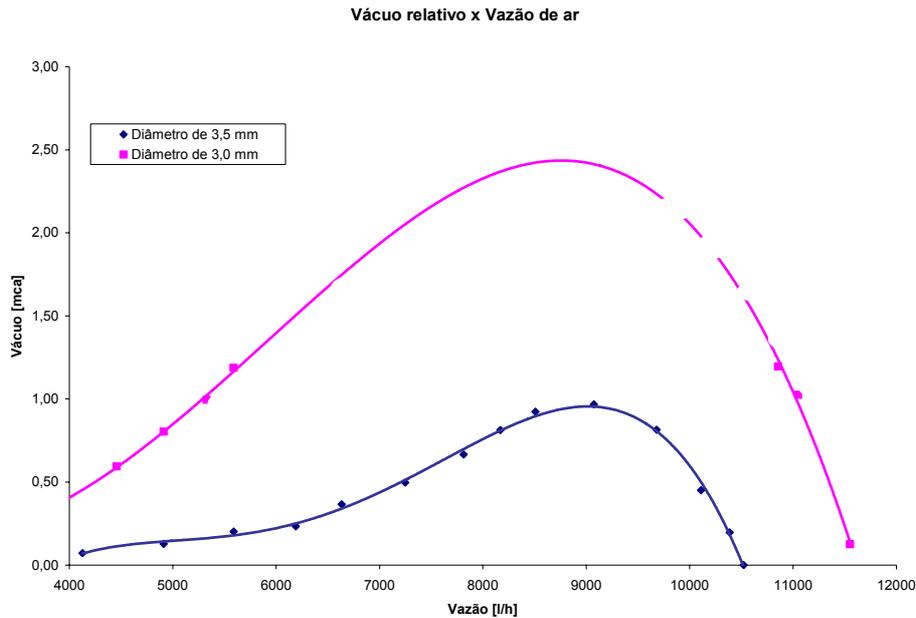


**Figura 4** Bicos expansores utilizados nos testes (diâmetros de 3,0; 3,5 e 4,0 mm, da esquerda para a direita).

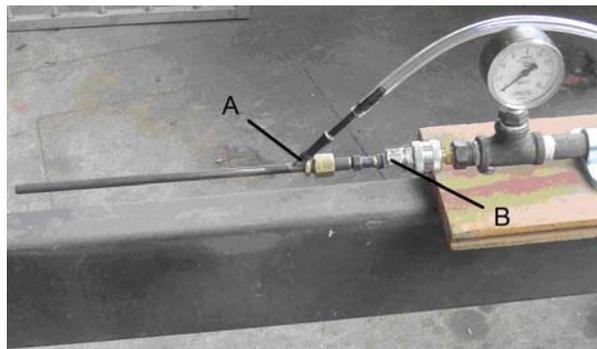
Estes diâmetros de bicos geram diferentes perdas de carga, isto irá influenciar diretamente na pressão de operação do equipamento. Com diâmetros menores (e.g. 3,0 mm) pode-se trabalhar com maiores vazões mantendo-se o vácuo na alimentação (Figura 5), entretanto, a perda de carga é maior, o que exige maiores potências no sistema de alimentação de ar.

Observou-se que, em vazões mais elevadas, ocorria uma pressão positiva no orifício de alimentação das partículas, impedindo a entrada das mesmas no escoamento. Optou-se, então, por testar uma alimentação oblíqua ao escoamento, com a intenção de aumentar a perda de carga no orifício de alimentação, garantindo, assim, pressões negativas mesmo em altas vazões (Figura 6).

Este vácuo foi medido através de outro manômetro em “U”, este com dimensões maiores devido ao vácuo ser relativamente alto. Os valores obtidos, para bicos expansores de 3,0 e 3,5 mm, estão plotados no gráfico abaixo.



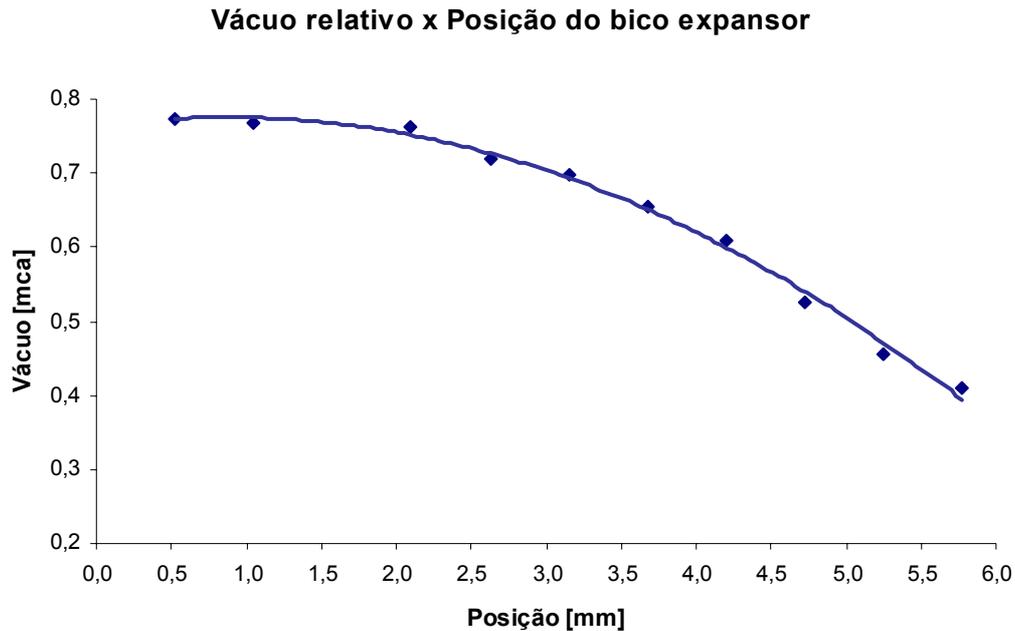
**Figura 5.** Variação do vácuo medido na moega com entrada inclinada em 45°. As duas curvas mostram o comportamento dos bicos de 3,0 e 3,5 mm com a variação da vazão. O manômetro utilizado possuía um limite de leitura de 1,2 mca.



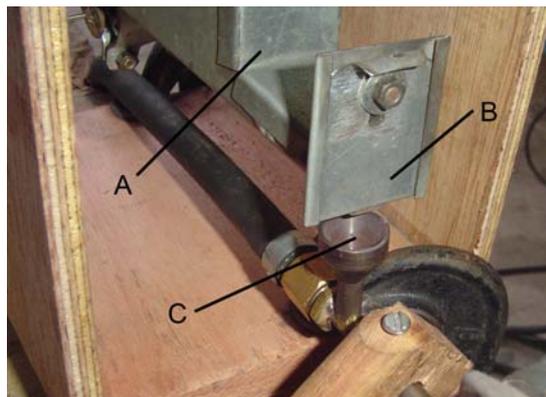
**Figura 6.** Teste do sistema de alimentação oblíqua. A é a entrada das partículas no escoamento formando um ângulo de 45° com a direção do fluxo. B é o bico expansor conectado ao alimentador e ao bocal de aceleração.

Foi avaliado, também, o vácuo no orifício de alimentação em relação à distância da saída do bico expansor e a entrada das partículas no fluxo de ar. Para isso, os bicos expansores utilizados nos testes possuíam roscas que facilitavam o ajuste da posição. O gráfico abaixo foi obtido alterando-se a posição do bico expansor de 3,0 mm de diâmetro a uma vazão fixa de 85 l/min. Observa-se que o vácuo é prejudicado com o aumento da distância do bico expansor (Figura 7)

Com o objetivo de orientar a entrada das partículas na moega, foi testada a eficiência de uma calha. Prevendo que poderia ocorrer aglomeração das partículas na saída, adaptou-se um pequeno motor com um desbalanceamento no eixo, promovendo uma ligeira vibração na calha. Para controlar a quantidade de partículas que entram no escoamento, utilizou-se uma válvula tipo guilhotina na extremidade da calha (Figura 8).



**Figura 7.** Variação do vácuo medido na moega com entrada inclinada em 45°. A curva mostra o comportamento do bico de 3,0 mm com a variação da distância deste em relação à alimentação.



**Figura 8.** Protótipo do conjunto calha/moega. As partículas armazenadas na calha (A), são controladas por uma válvula guilhotina (B) e entram no fluxo de ar através da moega (C).

### 3.3 Velocidade Final das Partículas

Em seguida, foi feita uma avaliação da velocidade final das partículas. Para isso, tentou-se simular as condições de escoamento do projeto, exceto a temperatura. Utilizou-se um bocal cilíndrico de aço carbono comercial de 250 mm de comprimento, 50 mm menor que o projetado, por facilidades de obtenção de material para construção do protótipo. Para estimar a velocidade de impacto, construiu-se o dispositivo de medição a dois discos, mencionado, anteriormente, com devidas adaptações. A figura do protótipo encontra-se abaixo.



**Figura 9.** Protótipo do dispositivo utilizado para mensurar a velocidade das partículas nos testes. Nota-se a primeira marcação (M), alinhada com o furo do primeiro disco, foi feita com o dispositivo em repouso. As marcas defasadas, entre (A) e (B), indicam que as partículas não possuem a mesma velocidade, portanto, para o cálculo da velocidade adotou-se uma marca média (C). Um tacômetro (T) foi utilizado para medir a rotação do dispositivo.

Nos experimentos, obteve-se uma velocidade final das partículas em torno de 80 m/s, medida através do dispositivo a dois discos. Este não é o valor desejado para o projeto, onde foi colocada como meta uma velocidade final de, aproximadamente, 90 m/s. Contudo, o valor medido contém vários erros vindos de limitações, entre elas:

- a) O dispositivo de medição não está igual ao proposto no artigo citado, devido a limitações e facilidades na aquisição de material, inferindo erros além daqueles já impostos por este equipamento;
- b) As partículas utilizadas no ensaio tinham diâmetros na ordem de 1 mm, enquanto que, no projeto, irão ser ensaiadas partículas com diâmetro característico entre 50 e 500  $\mu\text{m}$ . Nos testes com o protótipo não se detinham as ferramentas necessárias para fazer a separação dos diâmetros. Com partículas menores, podem-se atingir maiores velocidades finais devido à menor massa e inércia das partículas;
- c) A temperatura do fluxo de ar não estava de acordo com a do projeto. Este dado pode não ser favorável, já que em altas temperaturas o ar é mais rarefeito, podendo prejudicar o arraste das partículas. Acredita-se que, devido à alta velocidade do fluxo de ar, a menor densidade do ar em altas temperaturas não deve ser um fator limitador;

Como citado, foi utilizado no protótipo um bocal de comprimento 250 mm, enquanto que, para o erosímetro, foi dimensionado um de 300 mm. Com este, podem-se atingir velocidades maiores.

## 4 DIFICULDADES ENCONTRADAS

### 4.1 Fluxo de Ar Quente

O fluxo de ar aquecido imprime alguns obstáculos na execução do projeto:

- a. Dificuldade quanto à aquisição de equipamentos de leitura devido ao alto investimento necessário;
- b. Inexistência de fabricantes nacionais dos aquecedores elétricos especificados neste projeto;

- c. Dificuldade quanto à seleção dos materiais para as tubulações e acessórios após o aquecedor devido à alta temperatura do fluxo de ar;
- d. Adequação dos equipamentos e dos materiais para que a perda de calor seja minimizada;
- e. Preocupação com a segurança do operador e do equipamento devido ao calor próximo ao equipamento.

#### **4.2 Material do Tubo de Aceleração de Partículas**

O bocal deve atender às seguintes características:

- a. Alta resistência à erosão em baixos ângulos de impacto (elevada dureza);
- b. Manutenção das propriedades mecânicas e físicas em altas temperaturas;
- c. Boa isolamento térmica, já que o fluxo de ar que através deste estará em torno de 450°C, na pior situação;
- d. Facilidade de aquisição, pois, mesmo este tendo boa resistência ao desgaste, o bocal deverá ser substituído após certas horas de experimentos, para que a boa fidelidade nos resultados seja mantida;
- e. Facilidade de fabricação.

#### **4.3 Bico Expansor e Capa do Alimentador**

As principais dificuldades encontradas nestes equipamentos foram:

- a. Material do bico e da capa. Estes equipamentos devem possuir uma boa resistência à temperatura e à erosão;
- b. Método de ligação da capa ao tubo de aceleração, onde se encontram o bico e a moega.

#### **4.4 Armazenagem e Alimentação das Partículas**

As partículas erosivas devem entrar no fluxo de ar de forma controlada, para que a vazão das mesmas seja tão constante quanto for possível. Há o risco destas partículas se aglomerarem na saída do silo, por isso optou-se pelo uso de uma calha vibratória, que será um setor intermediário entre o silo e a moega. A vibração movimentará as partículas impedindo que elas obstruam a saída da calha.

### **5 CONCLUSÕES**

Concluiu-se, que o venturi pode ser utilizado para a medição da vazão de ar no circuito. Para isso, basta este ser aferido com um rotâmetro para que seja conhecido o coeficiente de descarga, já que, devido às dimensões da tubulação, o venturi não será normalizado.

Como materiais de fabricação dos componentes, adotaram-se liga de alumínio da série 6000 para o tubo Venturi, alumina com 99,0% de pureza para o bocal de aceleração, metal duro com 8,0% de cobalto para o bico expansor e inserto do alimentador e aço inox AISI 304 para a moega e capa do alimentador.

No que diz respeito à alimentação de partículas, observou-se que a determinadas vazões têm-se valores positivos para a pressão na moega, o que não é desejável, já que impede a entrada das partículas no fluxo de ar. Assim, optou-se

por utilizar entradas com um ângulo de 45° com o intuito de aumentar a perda de carga neste setor e impedir que o ar escape pela moega.

Também, foi testada a posição do bico com relação à entrada das partículas, variando-a a partir de um dispositivo enroscado. Observou-se que o aumento da distância gera influência negativa para o vácuo relativo gerado na moega. Assim, decidiu-se por usar a saída do bico expensor alinhado com a entrada do particulado.

## REFERÊNCIAS

- 1 HUTCHINGS, Ian M.. **Tribology friction and wear of engineering materials**, Cambridge, Ed. Butterworth Heinemann, 1992.
- 2 STEVENSON, A.N.J.; HUTCHINGS, I.M.. **The influence of nozzle length on the divergence of the erodent particle stream in gas-blast erosion rig**, Wear, 189, (1995b), 66-69.
- 3 STEVENSON, A.N.J.; HUTCHINGS, I.M.. **Scaling laws for particle velocity in the gas-blast erosion test**, Wear, 181-183, (1995a), 56-62.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 FLOWMETER DIRECTORY, programa disponível em: <[http://www.flowmeterdirectory.com/flowmeter\\_venturi\\_calc.html](http://www.flowmeterdirectory.com/flowmeter_venturi_calc.html)>. Acesso em 28 out. 2006.
- 2 MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**, 2ª ed., e-papers, Rio de Janeiro, 2002.
- 3 SILVA, Flávio José da. **Desenvolvimento e avaliação de infra-estrutura para estudo da corrosão-erosão em equipamentos da indústria petrolífera**, XXII CONBRASCOR - Congresso Brasileiro de Corrosão de 19 a 21 de Agosto de 2002.