

## INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE O PROCESSO DE ATOMIZAÇÃO DE LÍQUIDOS

**Alexandre Mendes**

**Marcos Sebastião de Paula Gomes**<sup>(\*)</sup> – mspgomes@mec.puc-rio.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica  
Rua Marquês de São Vicente 225 – Rio de Janeiro, RJ 22453-900

(\*) Autor para o envio de correspondência

**Resumo:** *O presente trabalho discute a geração de partículas líquidas e sólidas através do processo de atomização. O objetivo foi investigar, experimentalmente, a influência dos parâmetros de controle do processo (pressão de atomização, vazão de ar e vazão de líquido) no tamanho das partículas geradas, para uma determinada geometria de atomizador. Entre as várias aplicações de interesse prático, encontra-se a geração de partículas para a calibração da faixa de tamanho de coleta em amostradores para poluentes atmosféricos. Um atomizador foi projetado e construído para gerar partículas líquidas com tamanho pré-estabelecido, cobrindo a faixa de tamanho entre 0,5  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ , produzidas a partir da atomização de uma solução de sal em água. Em seguida, através da secagem por difusão das gotículas geradas, resultaram partículas sólidas de sal. Estas foram coletadas e analisadas por microscopia ótica, de tal forma que a distribuição de tamanhos pudesse ser obtida. Conhecendo-se a forma das partículas sólidas geradas e a concentração e o tipo de sal utilizado na solução, foram obtidos os valores do diâmetro médio de volume equivalente e do diâmetro médio de Sauter (SMD) das gotículas atomizadas. Apesar de apresentar alguma dispersão (desvio padrão geométrico entre 1,5 e 2,0), o método se mostrou aplicável na geração de partículas para a calibração de amostradores de poluentes atmosféricos.*

**Palavras-chave:** *Instrumentação para Aerossóis, Calibração, Atomização*

### 1 – INTRODUÇÃO

O trabalho de pesquisa teve por objetivo a investigação do processo de atomização de líquidos, com a finalidade de produzir partículas de tamanho predefinido na faixa de 0,5  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$ . O interesse prático em se poder gerar partículas com tamanho determinado, satisfazendo-se padrões e normas metrológicas, está associado a possibilidade de se utilizar estas partículas para fins de calibração de amostradores de aerossóis, tais como os utilizados para se quantificar a poluição atmosférica por material particulado.

Dependendo do método de medição empregado, os instrumentos utilizados para medir a distribuição de tamanho dos aerossóis podem necessitar de calibração periódica, o que pode se tornar muito custoso. Esta pesquisa tem como objetivo desenvolver um método mais barato

para se realizar tal tarefa, incluindo tanto a produção quanto para a calibração dos particulados gerados.

A idéia básica foi projetar um atomizador capaz de, a partir de uma solução salina em água, produzir partículas líquidas (gotículas). Em seguida, ao evaporar-se a água, são geradas partículas sólidas com diâmetro predeterminado. O controle do processo, para uma determinada geometria de atomizador, deve-se às variáveis de influência tais como: (1) a pressão do ar para a atomização, que está associada à vazão de ar no atomizador e à energia para a desintegração do jato líquido que em última instância irá determinar o tamanho das gotículas produzidas, (2) a vazão do líquido, e (3) a concentração do sal na solução. O mesmo atomizador poderá também ser utilizado para a geração de partículas líquidas (gotículas), desde que não se promova a evaporação das mesmas e se utilize um líquido não volátil.

O atomizador, também chamado de nebulizador, gera gotículas com uma concentração pré determinada de sal. Para que haja a cristalização da parte sólida, é necessário que a água se evapore. O método adotado para a evaporação foi a secagem por difusão, obtida através da passagem das gotículas em um fluxo de ar seco (18% de umidade relativa) e limpo (livre de contaminantes e partículas; para tal foram utilizados filtros absolutos na linha de ar comprimido), no interior de um duto. Dependendo do tamanho de partícula que desejamos gerar, podemos atomizar a solução contra ou à favor deste fluxo de ar seco e, desta forma, incluir um outro parâmetro de controle. Partículas maiores serão produzidas à saída do tubo de secagem quando o atomizador estiver gerando gotículas à favor do fluxo, pois neste caso não haverá efeitos de inércia atuando na remoção das partículas maiores. A vantagem de se gerar partículas sólidas está no fato de sua forma ser melhor preservada durante o processo de medição. Isto não ocorre com as gotículas que sofrem deformação ao se depositarem numa lâmina de microscópio e estão também sujeitas à evaporação.

O processo de medição utilizado na quantificação do tamanho das partículas geradas baseou-se em um software para processamento de imagens em microscópios. O software foi utilizado nas medições dos cristais, a partir de imagens digitalizadas de um microscópio ótico de luz transmitida, com ampliação de 1000 vezes. A técnica utilizada pelo software foi a de processar a imagem tornando-a binária (fundo da imagem preto e partícula de interesse branca). É necessário que o operador estipule um determinado comprimento padrão, para que o software "conte" o número de pixels existente no comprimento. Deste modo, a partir da contagem do número de pixels contidos nas partículas, pode-se estabelecer o tamanho das mesmas. Neste trabalho foi utilizada uma régua calibrada pelo INMETRO, com menor divisão de 10µm.

## **2 – ATOMIZAÇÃO**

A atomização pode ser realizada de várias formas. Essencialmente, necessita-se de uma velocidade relativamente alta entre o líquido a ser atomizado e o ar ou gás adjacente.

Dentre os vários tipos de atomizadores existentes, nos deteremos no atomizador do tipo "airblast" de jato único, por sua simplicidade de construção e eficiência na geração de gotículas para a faixa de atomização proposta neste trabalho.

O desempenho de atomizadores de jato único foi investigado em detalhe por Lorenzetto e Lefebvre (1977), usando um sistema especialmente projetado no qual poderiam ser variadas as condições de operação tais como as propriedades físicas do líquido atomizado, a relação ar/líquido e a velocidade do ar. As dimensões do atomizador também foram alteradas. Eles puderam examinar os efeitos dessas grandezas separadamente em relação à qualidade do spray. Um desenho esquemático do atomizador é mostrado na figura 1, abaixo.

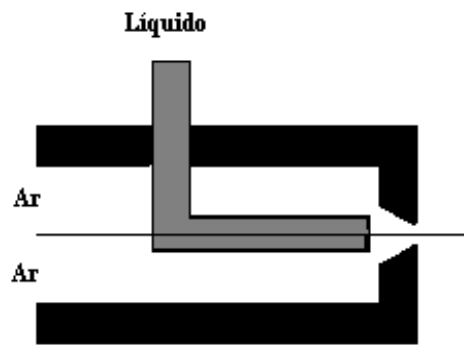


Figura 1 – Atomizador Airblast de jato único

Eles concluíram que a qualidade da atomização deteriora-se com aumentos de viscosidade e de tensão superficial do líquido. Para líquidos de baixa viscosidade, concluíram que o tamanho da gotícula é inversamente proporcional à velocidade relativa entre o ar e o líquido no bocal de saída do atomizador. Também foi observado, de acordo com Nukiyama e Tanasawa (1939), que as dimensões do bico parecem ter pequena influência no tamanho das gotículas para líquidos de baixa viscosidade. Para líquidos de alta viscosidade, o Diâmetro Médio de Sauter (SMD) das gotículas produzidas varia aproximadamente de acordo com  $d_0^{0,5}$ , onde  $d_0$  é o diâmetro do orifício de saída do ar.

O Diâmetro Médio de Sauter, é calculado dividindo-se o volume total das partículas pela área total de sua superfície. Para esferas, o diâmetro de Sauter é definido por:

$$SMD = \frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i^2} \quad (1)$$

Onde N é o número de partículas e D o diâmetro da partícula. A equação (1) define o SMD desconsiderando-se a constante 1/6.

De acordo com Lefebvre (1989), a partir de dados experimentais obtidos por vários pesquisadores em investigações sobre diferentes atomizadores do tipo airblast, pode-se concluir que:

1 – O tamanho médio da gota do spray aumenta diretamente com a viscosidade absoluta do líquido e com a tensão superficial, e inversamente com a relação  $\dot{m}_{ar} / \dot{m}_{líquido}$ . Idealmente, a relação da vazão mássica (ar / líquido) deveria exceder o valor 3, mas uma pequena melhora na qualidade da atomização é ganha elevando-se esta relação para um valor ao redor de 5.

2 – A densidade do líquido parece ter pequena influência no tamanho médio da gota. Para atomizadores de jato único, o tamanho médio da gota diminui ligeiramente com um aumento na densidade do líquido.

3 – As propriedades do ar que são importantes para a atomização do tipo airblast são: a densidade e velocidade do ar. Em geral, o tamanho médio das gotículas produzidas é aproximadamente inversamente proporcional a velocidade do ar.

4 – Para bicos atomizadores de jato único, o diâmetro de saída da tubulação de líquido tem pequeno efeito no tamanho médio das gotículas, para líquidos de baixa viscosidade. No caso de líquidos de alta viscosidade, a qualidade da atomização deteriora-se, ou seja, a dispersão no tamanho das gotículas aumenta com o aumento do diâmetro de saída da tubulação de líquido.

### 3 – MEDIÇÃO COM O MICROSCÓPIO

A observação microscópica de sistemas de aerossóis permite uma medida direta do tamanho das partículas. O microscópio permite a oportunidade de se observar a forma da partícula e só requer uma quantidade pequena de amostra. Em geral, métodos microscópicos para determinar a distribuição do tamanho das partículas são tediosos e requerem consistência, habilidade e cuidado.

Na medição do tamanho das partícula com um microscópio, é necessário associar a cada partícula um tamanho baseado em sua imagem projetada bidimensionalmente (silhueta). A figura 2 abaixo mostra uma fotografia digitalizada das partículas de cloreto de sódio (NaCl) que foram geradas durante este trabalho.

Para esferas, este é simplesmente o diâmetro da silhueta circular observado no microscópio, mas para o caso mais comum de partículas irregulares, nós temos que usar diâmetros equivalentes.

Estes diâmetros equivalentes são baseados na geometria da silhueta. Em contraste, existem outros tipos de diâmetros equivalentes, tais como os que são baseados no comportamento aerodinâmico das partículas, por exemplo. A determinação deste tipo de diâmetro equivalente necessita uma técnica que envolva o movimento da partícula em um campo conhecido.

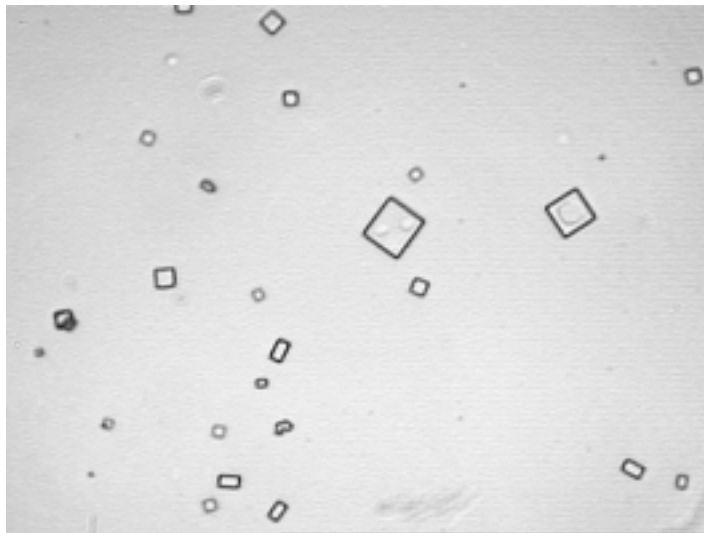


Figura 2 – Fotografia digitalizada das partículas de NaCl

O diâmetro geométrico equivalente mais usado nos casos de caracterização ótica de partículas, é o diâmetro da área projetada  $d_{PA}$ . Este é definido como sendo o diâmetro do círculo que tem a mesma área projetada da partícula em questão. Para partículas irregulares é difícil se fazer uma determinação exata do  $d_{PA}$ . Não obstante, é extensamente utilizado na avaliação de uma coleção de partículas, através da comparação visual entre a área das partículas e círculos com área conhecida, e permite uma rápida avaliação de diâmetros médios. Tais comparações permitem agrupar partículas, rapidamente, em faixas de tamanho baseadas na área projetada.

Medidas microscópicas de partículas irregulares necessitam freqüentemente da conversão de diâmetros obtidos em projeções bi-dimensionais, como o diâmetro da área projetada ( $d_{PA}$ ), para outros diâmetros equivalentes que descrevam melhor a partícula em três dimensões. O mais útil é o diâmetro de volume equivalente ( $d_v$ ) que representa o diâmetro de uma esfera que possui o mesmo volume da partícula em questão,  $V_p$ . O fator de forma de

volume de uma partícula  $\alpha_v$ , relaciona o volume  $V_p$  de uma partícula com um dos diâmetros equivalentes da silhueta. Êle pode ser definido para o diâmetro da área projetado ( $d_{PA}$ ) como:

$$\alpha_v = \frac{V_p}{d_{PA}^3} \quad (2)$$

O fator de forma de volume baseado no diâmetro de área projetado tem um valor máximo de  $\pi/6 = 0,52$  para uma esfera. Ele pode ser facilmente calculado para formas geométricas regulares. A maioria das partículas sólidas de cloreto de sódio geradas neste trabalho tem o formato de um cubo, pois esta é a configuração de cristalização básica. Aparecem também, com menor frequência, aglomerados de cubos formando outras geometrias (basicamente paralelepípedos). Para o cubo, o fator de forma de volume vale 0,38, e este foi o valor assumido nos cálculos realizados neste trabalho.

O diâmetro de volume equivalente é relacionado ao fator de forma de volume  $\alpha_v$  por (Hinds, 1982):

$$d_e = \left( \frac{6V_p}{\pi} \right)^{1/3} = d_{PA} \left( \frac{6\alpha_v}{\pi} \right)^{1/3} \quad (3)$$

#### 4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de construir um atomizador capaz de produzir partículas sólidas de cloreto de sódio (NaCl), de diâmetro pré – determinado na faixa de  $0,5\mu\text{m}$  a  $5,0\mu\text{m}$ , escolhemos o atomizador airblast. Isto deveu-se a o fato deste ter um projeto mais simples, ser de fácil fabricação, e atender a faixa de tamanho de partícula relevante a esse trabalho.

A Fig 3 mostra o atomizador airblast, desenvolvido e projetado neste trabalho. O diâmetro de saída do orifício de ar,  $\phi$  vale 1,2mm. Ele foi desenvolvido em duas partes, para facilitar a alteração do diâmetro do orifício do ar.

O atomizador, que foi construído em aço inoxidável, está inserido em um tubo de acrílico (tubo para a evaporação das gotículas) que possui 1,0 metro de comprimento e 12,7 cm de diâmetro (5 polegadas), conforme a Fig 4. Por este tubo entra, por uma das extremidades, ar limpo e seco. A pressão interna no interior do tubo é de aproximadamente uma atmosfera.

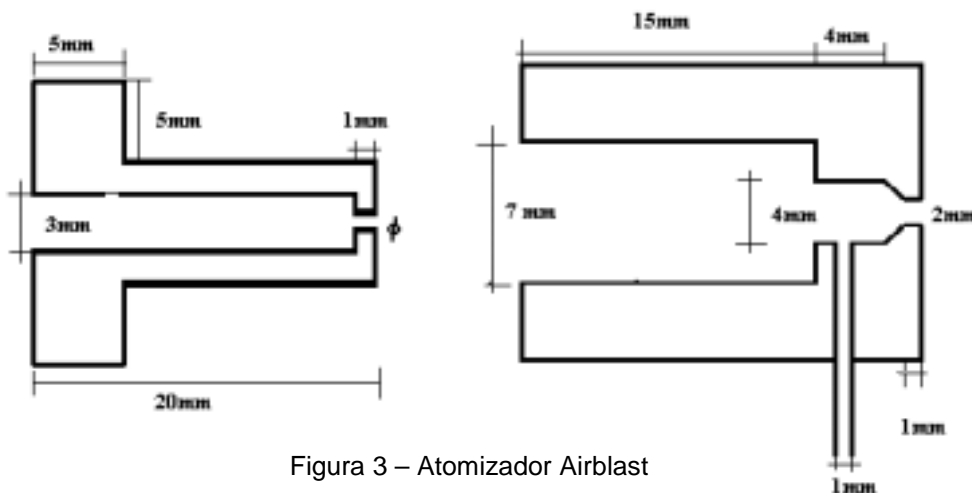


Figura 3 – Atomizador Airblast

A outra extremidade do tubo está ligada a uma câmara, também de acrílico, de dimensões 30cm x 30 cm x 62 cm, que representa a câmara de amostragem, onde as partículas sólidas resultantes da evaporação das gotículas serão coletadas. Ela é aberta em sua parte superior, onde foi colocado um filtro de ar, para evitar a contaminação do ambiente do laboratório onde a experiência estava sendo realizada. O atomizador é alimentado com ar seco e limpo, livre de partículas contaminantes, a uma pressão controlada. Os valores utilizados nos experimentos foram:  $0,5 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0,8 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $1,0 \text{ kgf/cm}^2$  e  $1,5 \text{ kgf/cm}^2$ .

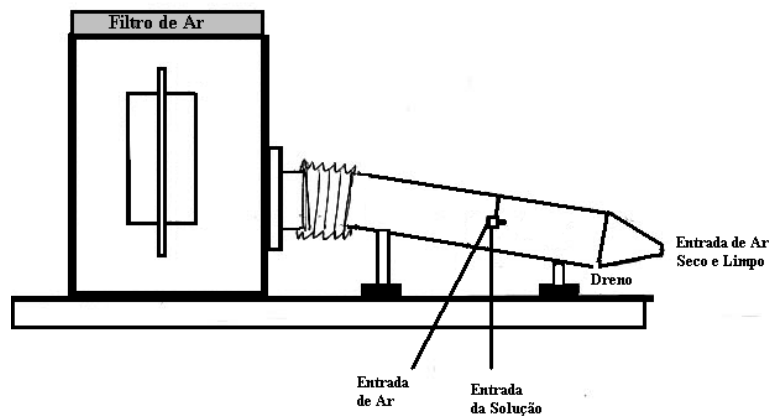


Figura 4 – Aparato Experimental

#### 4.1 – Produção de Partículas

Com a finalidade de produzir partículas sólidas de diâmetro conhecido, podemos atomizar, por exemplo, soluções salinas com concentração de soluto predeterminadas, e em seguida evaporar o líquido, restando assim as partículas do sal.

Como soluto escolhemos o cloreto de sódio e como solvente a água. Esta combinação é muito feliz pois o NaCl se dilui na água até aproximadamente 36% em massa de água, ou seja para cada 1 litro de água podemos diluir aproximadamente 360 g de cloreto de sódio antes que ocorra a saturação da solução, a partir da qual começamos a precipitar o soluto.

A concentração mássica escolhida para os experimentos foi de 30g de NaCl para cada 100ml de água. Como a massa específica do Cloreto de Sódio à temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  é de  $2,165\text{g/ml}$ , podemos calcular a concentração volumétrica. Esse valor é de 12,2%.

A estratégia adotada para a obtenção das partículas sólidas de NaCl foi a seguinte: Geramos as partículas através da produção de gotas da solução de cloreto de sódio e em seguida evaporamos a parcela de água contida na gota, com um fluxo de ar seco e limpo no interior do tubo de acrílico (tubo de secagem por difusão), que continha um corredor de ar a baixa umidade (aproximadamente 17% de umidade relativa e temperatura de  $22^{\circ}\text{C}$ ). Em seguida essas partículas, já no seu estado sólido (cristais de NaCl) foram coletadas em uma lâmina para uma análise posterior no microscópio. A coleta foi realizada na câmara plena de amostragem.

A produção das partículas foi realizada através de dois processos distintos, definidos quanto à direção do jato atomizado relativa ao fluxo de ar no tubo de secagem por difusão, quais sejam: processo contra o fluxo de ar e processo a favor do fluxo de ar. Em ambos os casos, alguns parâmetros foram fixados durante os experimentos (95,4% de confiabilidade metrológica). Foram eles:

- O diâmetro de saída do orifício de ar que irá se chocar com o jato de fluido no interior do atomizador, para a formação das gotículas de solução de cloreto de sódio foi de  $(1,20 \pm 0,05) \text{ mm}$ .

- A vazão volumétrica de ar que foi utilizada para secar as gotículas, formando um corredor de ar no interior do tubo de secagem, por onde os cristais de sal se formaram, foi de  $(82,9 \pm 1,7)$  l/min.
- A viscosidade da solução foi de  $(0,00200 \pm 0,00012)$  kg/ms.
- A tensão superficial da solução foi de  $(0,087 \pm 0,006)$  N/m.

#### **4.1.1 – Produção de Partículas contra o Fluxo de Ar**

Nesta etapa do processo as gotículas viajaram de encontro ao fluxo de ar, percorrendo um caminho maior até atingirem a câmara plena de amostragem, e, conseqüentemente, dando mais tempo para a formação de cristais. Outra característica deste processo é que as partículas maiores estavam sujeitas à retenção por inércia no interior do tubo de secagem, uma vez que elas primeiro eram dirigidas de encontro ao fluxo de ar seco e teriam que ser desaceleradas e mudar de sentido, de forma a se dirigirem à câmara plena de amostragem. Assim sendo, chegaram à lâmina somente as partículas menores. Foram escolhidos quatro valores de pressão de atomização para a realização do experimento neste processo. Foram eles:  $0,5 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $0,8 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $1,0 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $1,5 \text{ kgf/cm}^2$ .

As partículas foram coletadas numa lâmina de microscópio que ficou exposta no centro da caixa de acrílico (fig. 3) à 18 cm de altura da sua base, durante seis (6) minutos, para todos os valores de pressão acima citados.

#### **4.1.2 – Produção de Partículas a favor do Fluxo de Ar**

Nesta etapa do processo as gotículas viajaram a favor do fluxo, percorrendo um caminho menor e conseqüentemente tendo menos tempo para secarem e formarem seus cristais. Outra característica desta forma de produção de partículas é que as maiores não foram retidas, como no caso anterior. Assim sendo, chegaram à lâmina partículas maiores. Foram escolhidos dois valores de pressão para este processo. Foram eles:  $0,5 \text{ kgf/cm}^2$  e  $0,8 \text{ kgf/cm}^2$ .

As partículas foram coletadas numa lâmina, posicionada em um plano horizontal, que ficou exposta no centro da caixa de acrílico (fig. 4.2) à 28 cm de altura da sua base, durante dois (2) minutos, independentemente dos valores de pressão acima citados. A deposição de partículas na lâmina deve-se, predominantemente, a um processo de sedimentação natural das partículas geradas e presentes na câmara de amostragem. As velocidades das correntes de ar envolvidas são relativamente baixas.

### **4.2 – Aquisição das Imagens**

Após as partículas (cristais de NaCl) serem coletadas nas lâminas, sua imagem foi digitalizada por uma câmara acoplada ao microscópio ótico de luz transmitida com um aumento de 1000 vezes e em seguida, os arquivos correspondentes foram armazenados em formato "tif" (vide figura 2)

Essas imagens foram, posteriormente, analisadas por um software chamado KS-400 que determinou o diâmetro da área projetada ( $d_{PA}$ ) das partículas investigadas.

## **5 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS**

A distribuição normal, embora extensamente utilizada, não é satisfatória para caracterizar a distribuição de tamanhos da maioria das populações de aerossóis. Isto deve-se ao fato de a maioria das populações de aerossóis não possuir uma distribuição de tamanhos

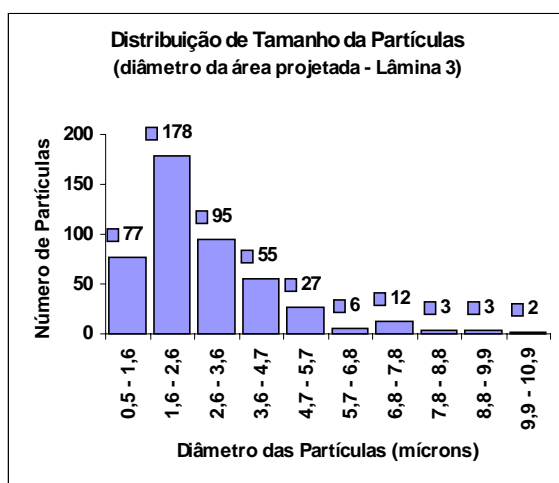
que seja simétrica em relação à média dos tamanhos. Para os aerossóis produzidos naturalmente, existe um grande número de partículas pequenas e um número menor de partículas maiores. A distribuição normal aplica-se mais adequadamente a aerossóis monodispersos (aqueles produzidos artificialmente através de processos que tentam reproduzir o mesmo tamanho ao longo de toda a produção). Um exemplo deste caso refere-se às esferas de látex especialmente produzidas para a calibração (partículas de PSL)

Um segundo problema na aplicação da distribuição normal para as partículas de aerossóis está associado ao fato de a distribuição normal requerer que uma certa fração das partículas tenham tamanho negativo, o que se constitui em uma impossibilidade física. Este problema, combinado com a forma alongada da curva (cauda) para tamanhos de partículas maiores dentro da distribuição real, conduziu ao uso de uma distribuição lognormal para descrever a população de partículas geradas durante a atomização. Com a utilização de uma escala logarítmica para o eixo horizontal, correspondente ao tamanho das partículas de aerossol, ao invés de se utilizar uma escala linear, a distribuição de frequência passa a ser simétrica em relação à média. Isto pode ser observado na figura 5.

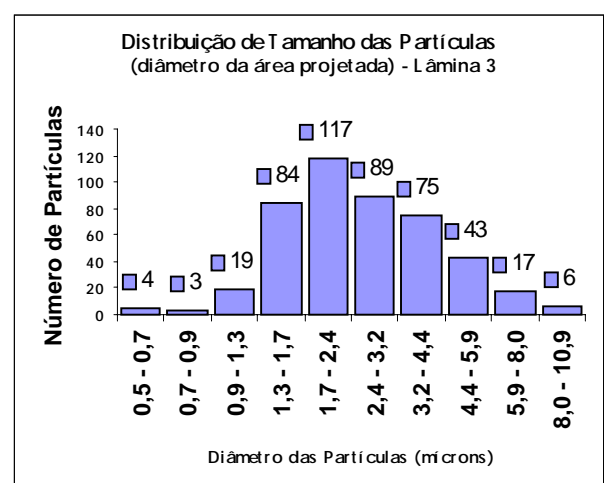
Na distribuição lognormal, o valor de tendência central é determinado pela média geométrica  $D_g$ . O desvio padrão  $\sigma$  é substituído pelo desvio padrão logarítmico, chamado desvio padrão geométrico,  $\sigma_g$ .

Para um número de partículas maior que  $N = 30$ , com 95,45% de confiabilidade, encontraremos a média geométrica no intervalo de:  $\bar{D}_g / \sigma_g^2$  até  $\bar{D}_g \sigma_g^2$  (Hinds, 1982)

A dispersão na produção das partículas, dada pelo intervalo acima citado, não representa a incerteza de medição e sim a diversidade de tamanhos produzida pelo atomizador. Apresenta-se na Tabela 1, abaixo, os valores experimentais e suas respectivas incertezas com 95,4% de confiabilidade metrológica. Onde  $p_{ar}$  é a pressão do ar,  $Q_{solução}$  é a vazão volumétrica da solução,  $m_{solução}$  é a vazão mássica da solução,  $Q_{ar}$  é a vazão volumétrica do ar,  $m_{ar}$  é a vazão mássica do ar e  $d_{pA}$  é o diâmetro da área projetada da partícula de NaCl. A tabela 2, mostra a média geométrica dos diâmetros das respectivas partículas por lâmina e sua dispersão.



Histograma A



Histograma B

Figura 5 - Histogramas representando a distribuição de tamanho das partículas coletadas na Lâmina 3 – No gráfico A temos o eixo X em escala linear e no Gráfico B temos o eixo X em escala logarítmica.



As lâminas 1,2,3 e 4 são amostras de partículas produzidas contra o fluxo de ar seco e limpo capaz de secar as gotículas. As lâminas 5 e 6 são amostras de partículas produzidas à favor do fluxo de ar.

Tabela 1 – Dados Experimentais no Processo de Atomização

	$P_{ar}^{(1)}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$Q_{solução}^{(2)}$ x10 <sup>-9</sup> (m <sup>3</sup> /s)	$m_{solução}^{(2)}$ x10 <sup>-5</sup> (kg/s)	$Q_{ar}^{(3)}$ x10 <sup>-6</sup> (m <sup>3</sup> /s)	$m_{ar}$ x10 <sup>-4</sup> (kg/s)	$d_{PA}$ μm
<b>Lâmina 1</b>	0,50±0,05	18,6±0,9	2,1±0,1	268,3±5,4	3,2±0,2	2,7 ± 0,4
<b>Lâmina 2</b>	0,80±0,05	18,7±0,9	2,1±0,1	321,7±6,4	3,8±0,2	3,2 ± 0,4
<b>Lâmina 3</b>	1,00±0,05	19,9±1,0	2,3±0,1	375,0±7,5	4,5±0,2	2,5 ± 0,4
<b>Lâmina 4</b>	1,50±0,05	16,9±0,8	1,9±0,1	470,0±9,4	5,6±0,2	2,7 ± 0,4
<b>Lâmina 5</b>	0,50±0,05	33,0±1,7	3,8±0,2	268,3±5,4	3,2±0,2	4,1 ± 0,4
<b>Lâmina 6</b>	0,80±0,05	33,3±1,7	3,8±0,2	321,7±6,4	3,8±0,2	3,9 ± 0,4

(1) Medida a montante do atomizador.

(2) Densidade da solução = (1141 ± 1) kg/m<sup>3</sup>.

(3) Medida a jusante do atomizador, nas condições de 1 atm. e temperatura de (22,5 ± 1)°C.

Densidade do ar = (1,19 ± 0,06) kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 2 – Dispersão de tamanho das partículas produzidas no processo de atomização, para diferentes condições de operação do atomizador.

	( $d_{PA}$ ) Média Geométrica (μm)	Desvio Padrão Geométrico	Limite Inferior (μm)	Limite Superior (μm)
<b>Lamina1</b>	2,7 ± 0,4	1,7	0,9	8,3
<b>Lamina2</b>	3,2 ± 0,4	1,7	1,1	9,1
<b>Lamina3</b>	2,5 ± 0,4	1,7	0,9	6,9
<b>Lamina4</b>	2,7 ± 0,4	1,5	1,2	6,4
<b>Lamina5</b>	4,1 ± 0,4	2,0	1,0	17,2
<b>Lamina6</b>	3,9 ± 0,4	2,1	0,9	16,5

### 5.1 –Diâmetro de Volume Equivalente da Partícula

Para converter o diâmetro da área projetada ( $d_{PA}$ ) da partícula de sal, no seu diâmetro do volume equivalente é necessário aplicar a equação 4, abaixo:

$$de_{partícula} = d_{PA} \sqrt[3]{\frac{6\alpha_v}{\pi}} \quad (4)$$

Conforme discutido anteriormente, o fator de forma  $\alpha_v$  empregado foi 0,38.

### 5.2 –Diâmetro Médio de Sauter (DMS)

Para converter o diâmetro do volume equivalente da gota ( $de_{gota}$ ) no diâmetro médio de Sauter da gota de solução salina que é produzida pelo atomizador, é necessário aplicar-se a equação 5 (Hinds, 1982)

$$SMD_{gota} = de_{gota} e^{\left(q+\frac{1}{2}\right) \ln^2 \sigma_g} \quad (5)$$

O valor de  $q$  para o diâmetro médio de Sauter vale 2. Para cada valor de pressão do ar no atomizador temos um valor do desvio médio geométrico  $\sigma_g$ .

A Tabela 3, apresenta os valores médios para os diâmetros de área projetada, os diâmetros de volume equivalente das partículas e das gotículas correspondentes, bem como os diâmetros Médios de Sauter obtidos para cada uma das situações de operação do atomizador. A apresentação dos resultados através do SMD é comum em atomização e servirá para facilitar a comparação com outros trabalhos.

Tabela 3 – Diâmetros característicos das partículas e gotículas geradas nos experimentos para cada uma das condições investigadas.

	$d_{PA}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{e \text{ partícula}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{e \text{ gota}}$ ( $\mu\text{m}$ )	SMD <sub>gota</sub> ( $\mu\text{m}$ )
<b>Lamina1</b>	$2,7 \pm 0,4$	$2,5 \pm 0,4$	$5,0 \pm 0,8$	$10,7 \pm 1,7$
<b>Lamina2</b>	$3,2 \pm 0,4$	$2,9 \pm 0,4$	$5,8 \pm 0,8$	$11,4 \pm 1,6$
<b>Lamina3</b>	$2,5 \pm 0,4$	$2,3 \pm 0,4$	$4,6 \pm 0,8$	$8,6 \pm 1,5$
<b>Lamina4</b>	$2,7 \pm 0,4$	$2,4 \pm 0,4$	$4,9 \pm 0,8$	$7,8 \pm 1,3$
<b>Lamina5</b>	$4,1 \pm 0,4$	$3,7 \pm 0,4$	$7,4 \pm 0,8$	$26,9 \pm 2,9$
<b>Lamina6</b>	$3,9 \pm 0,4$	$3,5 \pm 0,4$	$7,0 \pm 0,8$	$25,9 \pm 3,0$

## 6 – CONCLUSÃO

O presente trabalho descreve a investigação sobre o processo de geração de partículas com diâmetro na faixa de  $0,5 \mu\text{m}$  a  $10 \mu\text{m}$ . A idéia básica foi projetar um atomizador capaz de, a partir de uma solução de sal em água, produzir partículas líquidas. Em seguida, ao evaporar-se a água, são geradas partículas sólidas com diâmetro predeterminado. O controle do processo deve-se às variáveis de influência tais como a pressão do ar para a atomização, as vazões do ar e do líquido, e a concentração do sal na solução. As partículas resultante da atomização (cristais de cloreto de sódio) são analisadas no microscópio ótico de luz transmitida, com ampliação de 1000 vezes, para posterior fotografia. As imagens dos cristais foram digitalizadas, processadas e medidas pelo software KS – 400, utilizando o processo interativo de segmentação de imagem. Uma possível aplicação do sistema desenvolvido se dá na calibração de medidores de partículas de uma maneira geral (medidores de aerossóis).

## REFERÊNCIAS

- Lefebvre, A. H., 1989, Atomization and Sprays, Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- Lorenzetto, G. E and Lefebvre, A. H., 1977, Measurements of Drop Size on a Plainjet Airblast Atomizer, AIAA Journal, vol. 15, n. 7, pp. 1006-1010.
- Vuolo, J. H., 1996, Fundamentos da Teoria de Erros, 2<sup>a</sup> ed., Editora Edgard Blucher LTDA., São Paulo.
- Hinds, W. C., 1982, Aerosol Technology, John Wiley e Sons, New York.
- Vargaftik, N. B., 1975, Handbook of Physical Properties of Liquids and Gases, 2<sup>nd</sup> ed., hemisphere Publishing, New York.
- Nukiyama, S, and Tanasawa, Y., 1939, Experiments on the Atomization of Liquids in an Airstream, Trans. Soc. Mech. Eng. Jpn, vol. 5, pp. 68-75.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE ATOMIZATION OF LIQUIDS

**Abstract:** *The work studies the generation of liquid and solid particles by the atomization process. The main objective was to investigate, experimentally, the influence of control parameters such as the atomization pressure and the air and liquid flow rates, in the size of the generated particles for a given atomizer geometry. Among the applications of practical interest we may find the generation of particles for the calibration of atmospheric samplers. An atomizer was designed and built for producing droplets in the size range between 0,5  $\mu\text{m}$  and 10  $\mu\text{m}$ , as a result of the atomization of a salt-water solution. The droplets were then dried by diffusion in dry air, producing solid particles. These particles were collected and analyzed by optical microscopy for the determination of the size distribution. By knowing the shape of the particles and the concentration of the salt solution, the mean equivalent volume diameter and the droplets Sauter mean diameter (SMD) were calculated. Despite some dispersion in the generation process (geometric standard deviation between 1,5 and 2), the method may be applied to the generation of particles in the calibration of atmospheric samplers.*

**Keywords:** *Aerosol Instrumentation, Calibration, Atomization*