

8301  
C338d(RCET)  
022805



14011



022805

Paulo

E23



P.I. 18.2 DESENVOLVER UM ELUTRIADOR HORIZONTAL PARA DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS PARA UTILIZAÇÃO EM AMOSTRAGEM DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO.

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL  
BIBLIOTECA  
AV. PROF. FREDERICO H. M. JUNIOR, 045 CEP 05489 - PINHEIROS  
SAO PAULO - BRASIL

ARQUIVO TECNICO

Dezembro/78

DLEC/GLA

Superintendência de Tecnologia do Ar  
Diretoria de Saneamento do Ar e  
de Controle das Fontes de Poluição

8301  
C338d (RCET)  
022805

2

10-11 22805

22805  
C338d (RCET)  
022805

- I. INTRODUÇÃO
- II. A TEORIA DO ELUTRIADOR HORIZONTAL
- III. DETALHES DE CONSTRUÇÃO E DESENHOS
- IV. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA
- V. APLICAÇÕES DO INSTRUMENTO
- VI. CONCLUSÕES

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL  
BIBLIOTECA  
AV. PROF. FREDERICO HERMANN JR., 345 CEP 05489 PINHEIROS  
SÃO PAULO - BRASIL

I. INTRODUÇÃO CETESB - CIA. DE TÉCNOLOGIA E CONTROLE AMBIENTAL  
 BIBLIOTECA

Elutriação é um processo pelo qual partículas são separadas com base nos seus tamanhos, comparando as suas velocidades terminais de queda com a velocidade de uma corrente de ar junto com a qual elas se movem.

Os elutriadores são de dois tipos: vertical e horizontal. Embora a tendência geral tenha sido se concentrar no desenvolvimento do elutriador horizontal, alguns trabalhos tem sido feitos utilizando o elutriador vertical para amostragem. Elutriadores horizontais por outro lado, tem provado serem valiosos para amostragens de poeira respirável e no estudo de fatores da forma.

Impactadores de cascata e até em menor grau, instrumentos baseados na centrifugação são normalmente utilizados para amostrar aerossóis a fim de obter a distribuição de tamanho de partículas. É também possível utilizar elutriadores para esta finalidade. Comparado aos elutriadores, os impactadores tem a vantagem de serem mais compactos e concentram as amostras de aerossol em cima de áreas relativamente pequenas, para análises subsequentes. Porém, a calibração é sempre necessária e estes dispositivos estão sujeitos aos erros devido as perdas nas paredes e dos fenômenos ocorrendo na superfície de estágio do impactador. Por outro lado, a teoria de separação de partículas por elutriação é relativamente exata (Walton 1954) e o que é mais importante, a calibração do elutriador é normalmente considerada desnecessária. O que tende a confirmar isto são as experiências feitas por Stein (1966), Rimberg e Thomas (1970). Para as experiências feitas por Stein et al, o elutriador foi calibrado com nuvens de partículas esféricas de Latex de polistirene e também por partículas de Styrene Divinylbenzene. As trajetórias de partículas calculadas por teoria e aquelas observadas tinham uma diferença de 7% quando foram expressadas em termos de distância. O erro foi considerado pequeno.

Nas experiências de Rimberg e Thomas (1970), foi utilizada

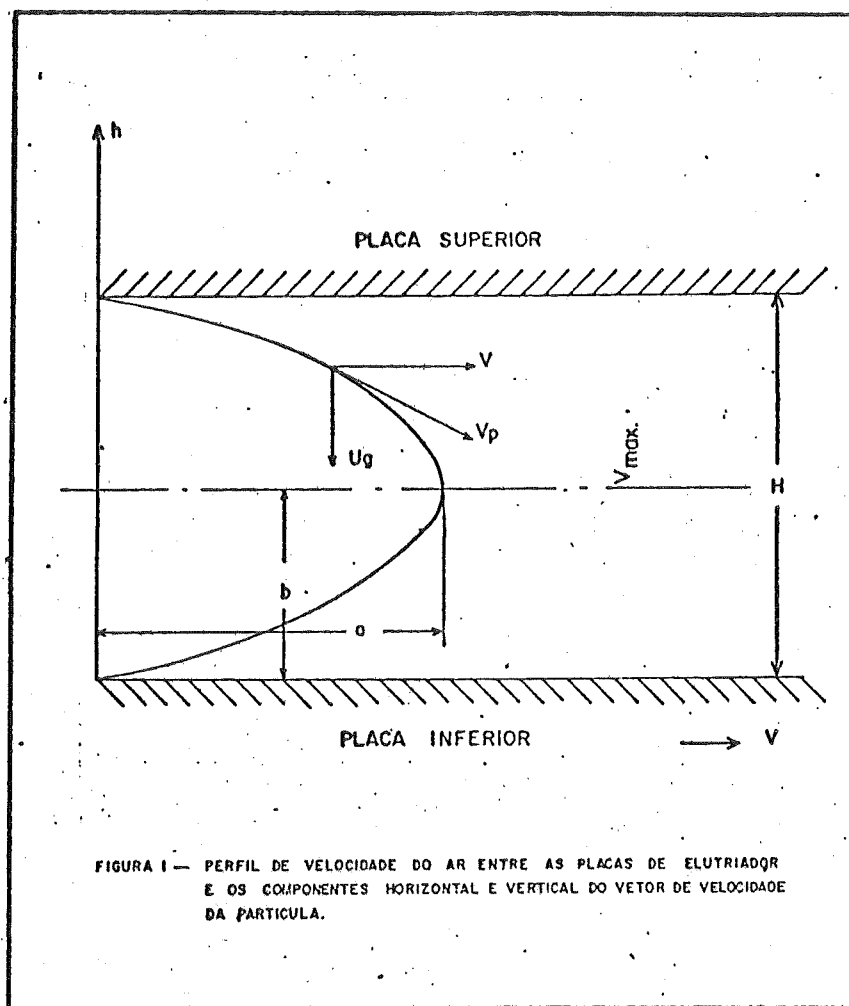
do um elutriador de 19 canais, com 20 cm de largura e 50 cm de comprimento, com espaçamento de 0.124 cm. O tamanho aparente das partículas de PSL (na faixa entre  $0.557\mu$  e  $1.947\mu$ ) foi calculado usando a equação dada por Fuchs, para a sedimentação gravitacional de um aerosol monodisperso. Uma comparação entre os diâmetros aparentes e reais das partículas mostrou que a diferença entre os dois variava entre 5 e 10%, que também foi considerada bastante razoável.

Finalmente elutriadores também possuem a vantagem de ter muito menos probabilidade de perdas nas paredes, ressaltando as partículas e desagregação.

A finalidade deste relatório é desenvolver um elutriador horizontal para amostrar material particulado em suspensão. Além de tratar rigorosamente a teoria de elutriação, detalhes completos são fornecidos para a construção de um elutriador para uso em futuro trabalho experimental. A teoria descrita abaixo segue estritamente aquela desenvolvida por Felix Stein na Universidade de Pittsburgh e os detalhes de construção e as dimensões, inclusive, foram tiradas do trabalho dele.

## II. A TEORIA DO ELUTRIADOR HORIZONTAL

Na sua forma mais simples um elutriador horizontal é composto de duas lamina paralelas finas (Figura 1). O vetor da velocidade ( $V_p$ ) de uma partícula em suspensão (carregada por um jato de ar) pode ser, durante a sua passagem entre as duas lamina, resolvida em dois vetores perpendiculares de velocidade. O vetor vertical ( $U_g$ ) é a velocidade terminal de queda da partícula e o vetor horizontal é assumido igual ao do ar mostrado naquele ponto ( $V$ ). Se o ar entre as placas está no regime de escoamento laminar ( $Re < 2100$ ), a distribuição de velocidade entre as placas é parabólica, com velocidade zero nas paredes e velocidade máxima num ponto que está na metade do caminho entre as duas placas, que é 1.5 vezes a velocidade média (Figura 1).



Se o número de Reynolds da partícula for menor do que um (1.0), a velocidade terminal da queda é constante para um dado diâmetro de Stokes (Equação 1).

$$U_t = \frac{\rho_p d_s^2 g}{18\mu} \quad (1)$$

onde

$d_s$  = diâmetro de Stokes

$\rho_p$  = densidade da partícula

$g$  = aceleração devido a gravidade

$\mu$  = viscosidade do ar

Se o diâmetro equivalente ( $d_e$ ), ou seja, diâmetro aerodinâmico for utilizado em vez do diâmetro do Stokes, equa-

ção I ficaria:

$$U_t = \frac{d_e^2 g}{18\mu} \quad (II)$$

Quando a origem de um sistema de coordenadas retangulares é colocada na entrada do "upstream edge" da placa inferior, o perfil de velocidade do ar pode ser expresso como função do  $h$ , a distância da placa inferior, (veja Figura 1) como

$$(h - b)^2 = 2p(v - a) \quad (III)$$

onde  $a = \frac{3}{2} \bar{V}$        $b = H/2$        $\bar{V} = Q/A$

sendo, que  $H$  é a largura do duto

sob consideração (veja Figura 1)

$\bar{V}$  = velocidade média por canal

$Q$  = vazão

$A$  = área de seção do duto

$p$  = é chamado o "Parabolic velocity parameter"

As constantes  $a$  e  $b$  são mostradas na figura 1. No estado de equilíbrio num duto de altura  $H$  e largura finita também há uma distribuição parabólica de velocidade no plano horizontal. Segundo o trabalho de Stein, as equações a serem deduzidas a seguir são baseadas na assunção de um perfil de velocidade parabólica somente no plano vertical. (Esta assunção foi baseada num cálculo teórico usando a teoria da camada limite desenvolvida por Schlichting (1962) e medidas experimentais feitas usando esferas de Latex de Polistrene)

Substituindo  $a$  e  $b$  na equação III, temos:

$$(h - H/2)^2 = 2p(V - \frac{3}{2} \bar{V}) \quad (IV)$$

Pondo  $h = H$  e  $V = 0$ , (Nota-se que  $h = H$ ,  $V = 0$  é uma condição de contorno, já que sabemos que a velocidade é zero nas paredes do elutriador. Esta condição de contorno é justamente o que é utilizado para calcular o parame-

tro p) temos

$$\frac{H^2}{4} = -3p\bar{V} \quad (V)$$

e portanto

$$p = -\frac{H^2}{12\bar{V}} \quad (VI)$$

Substituindo para p em IV e resolvendo para V, teremos

$$\left(h - \frac{H^2}{2}\right)^2 = -\frac{H^2}{6\bar{V}} (V - 3/2 \bar{V}) \quad (VII)$$

$$V = \left[ \frac{6\bar{V}}{H} \right] (h - h^2/H) \quad (VIII)$$

A velocidade do ar em qualquer ponto entre as placas pode ser calculada usando a equação VIII. A velocidade horizontal média  $\dot{V}$  do ar entre h e a placa inferior ( $h = 0$ ) é

$$\dot{V} = \frac{\int_0^h V dh}{\int_0^h dh} \quad (IX)$$

Utilizando o valor do V dado pela equação VIII, em IX e integrando, teremos

$$\dot{V} = \frac{\int_0^h \left\{ \frac{6\bar{V}}{H} \right\} (h^2 - h^2/H) dh}{\int_0^h dh}$$

$$= \left\{ \frac{6\bar{V}}{H} \right\} \left( \frac{h^2}{2} - \frac{h^3}{3H} \right) / h \quad \text{ou}$$

$$V = \frac{6\bar{V}}{H} \left( \frac{h}{2} - \frac{h^2}{3H} \right) \quad (X)$$

A partícula entrando no duto numa altura h, ficará em suspensão para um tempo  $\theta$  onde

$$\theta = h/u_t \quad (XI)$$

Se a qualquer instante a partícula tem uma velocidade horizontal igual a corrente de ar, a distância horizontal percorrida pela partícula será

$$s = \dot{V}\theta = \dot{V}h/u_t \quad (XII)$$

Substituindo X em XII, teremos

$$s = \left\{ \frac{6\bar{V}}{HU_t} \right\} \left( \frac{h^2}{2} - \frac{h^3}{3H} \right) \quad (XIII)$$

Usando a teoria da camada limite (Schlichting 1962) é possível demonstrar que a transição de um perfil de velocidade de plana na entrada do duto para um perfil parabólico acontece sobre uma distância muito curta (Veja Apendice I). Portanto S pode ser medida do plano da entrada vertical do elutriador horizontal.

Cálculo de concentração de partículas em suspensão utilizando a concentração na base do elutriador

Quando condições de equilíbrio prevalecem, o número de partículas atravessando um elemento vertical de área dh.dw por unidade de tempo com velocidade V é igual ao número de partículas sedimentadas no elemento horizontal da área ds.dw (isto é devido ao segundo teorema de Walton (1954)). (Veja também Figura II)

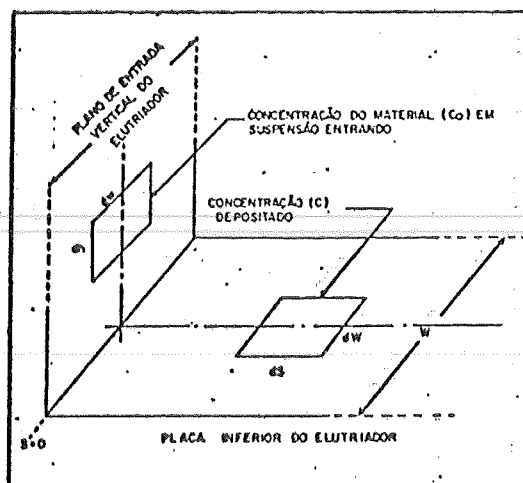


Fig. II ESQUEMA PARA A DERIVAÇÃO DE CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS EM SUSPENSÃO

Sendo  $C_o$  a concentração de partículas no ar que está entrando no elutriador (número de partículas/cm<sup>3</sup>) e  $C$  a concentração na base do elutriador (número de partículas/cm<sup>3</sup>) e  $t_s$  o tempo de amostragem, nos teremos então

$$C_o \cdot dh \cdot dw \cdot v \cdot t_s = C \cdot ds \cdot dw \quad (XIV)$$

ou

$$C_o = \frac{ds}{dh} \cdot \frac{C}{V t_s} \quad (XV)$$

O valor de  $S$  é dado por XIII, utilizando este valor em XV teremos os seguintes passos

$$S = \left\{ \frac{6\bar{V}}{H U_t} \right\} \left( \frac{h^2}{2} - \frac{h^3}{3H} \right) \quad (XVI)$$

$$\frac{ds}{dh} = \left\{ \frac{6\bar{V}}{H U_t} \right\} \left( h - \frac{h^2}{H} \right) \quad (XVII)$$

Os valores  $C$  e  $t$  são avaliados examinando a placa do elutriador com um microscópio e medindo o tempo de amostragem respectivamente.  $U_t$ , a velocidade terminal de queda, é calculada usando a equação II.

Portanto

$$C_o = \left\{ \frac{6\bar{V}}{H U_t} \right\} \left( h - \frac{h^2}{H} \right) \frac{C}{\left\{ \frac{6\bar{V}}{H} \right\} \left( h - \frac{h^2}{H} \right) t_s}$$

ou simplificando a expressão acima

$$C_o = C / U_t \cdot t_s \quad (XVIII)$$

A expressão XVIII nos diz então que a concentração de partículas de um determinado tamanho aerodinâmico depositada na placa inferior depende somente da concentração em suspensão da partícula do mesmo tamanho, tempo de amostragem e da velocidade terminal da queda característica.

Já foi mencionado que é possível demonstrar que a transição de um perfil de velocidade plana na entrada do duto para um perfil parabólico acontece sobre uma distância muito curta. Também pode ser mostrada nesta distância que a distribuição de partículas no ar não será alterada pela aceleração do fluido ou mudança na direção do fluxo do fluido

na zona de transição.

### III. DETALHES DE CONSTRUÇÃO E DESENHOS

Detalhes do desenho do elutriador a ser construído são mostrados na Figura III (a, b, c). De novo nenhuma pretensão

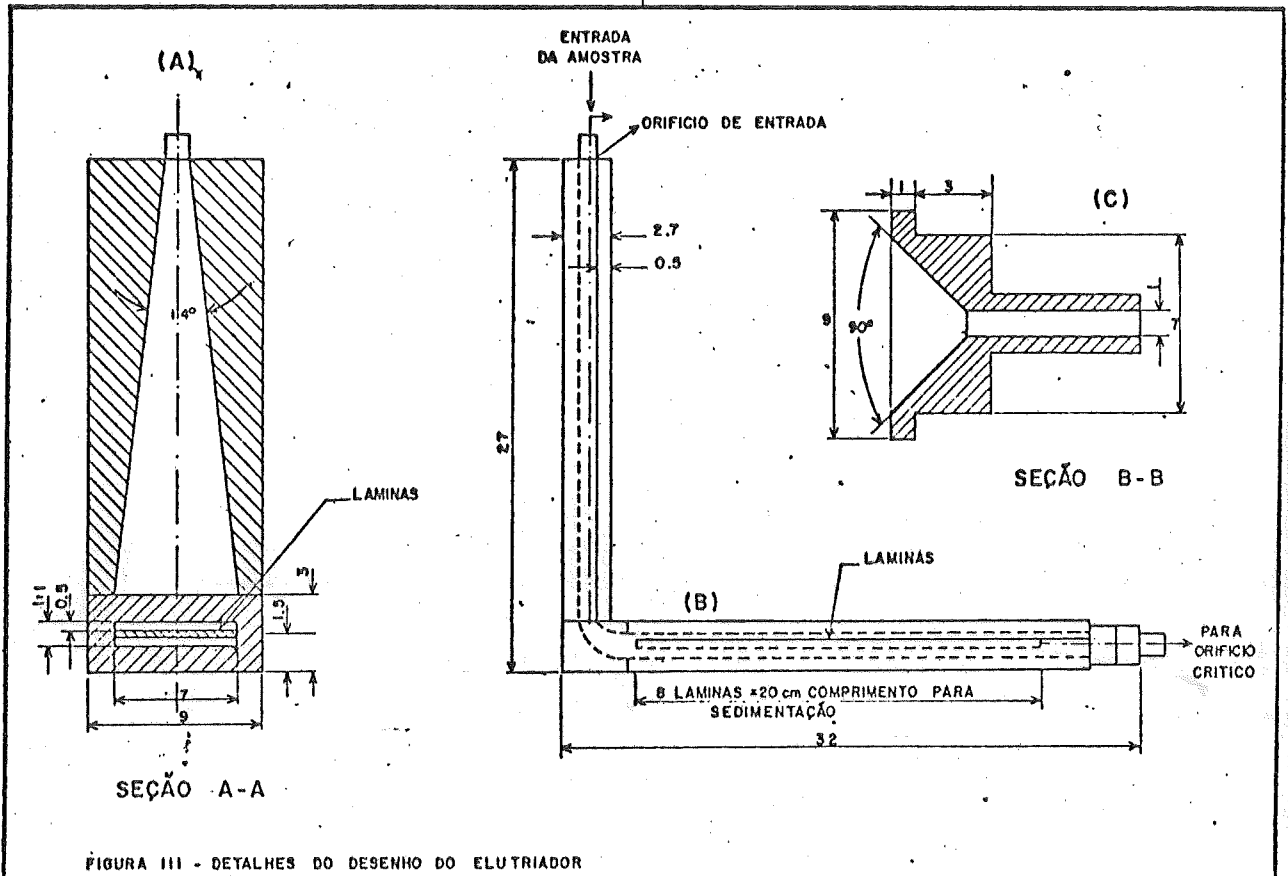
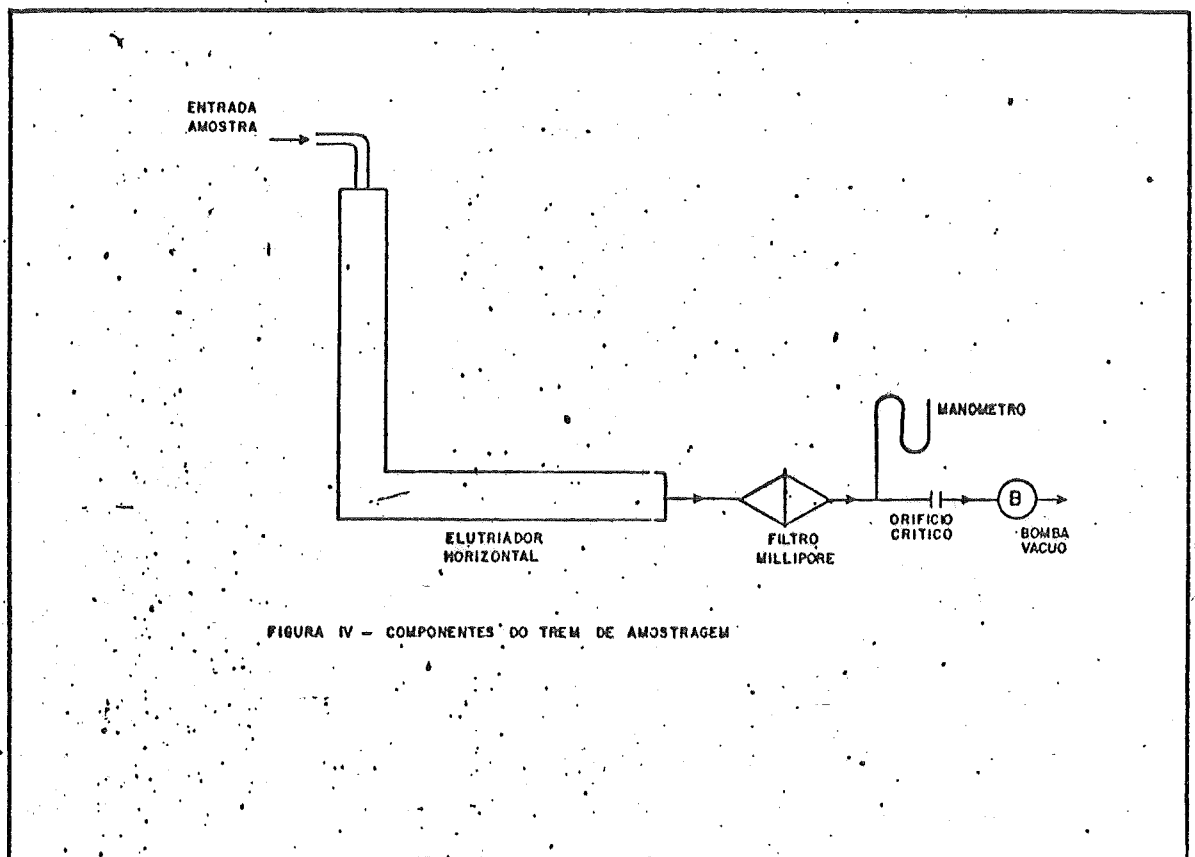


FIGURA III - DETALHES DO DESENHO DO ELUTRIADOR

ã originalidade é feita, e o desenho é baseado inteiramente no modelo desenvolvido por Stein. A seção da entrada vertical permite a corrente de ar se expandir de um diâmetro de 1 mm no orifício de entrada para dentro de um canal horizontal de seção retangular com dimensões de 70mm x 11mm. As partículas são depositadas sobre oito laminas de vidro cujas dimensões são 25 mm x 75 mm x 1 mm, que divide a corrente de ar amostrada e age como base para a corrente de ar superior na seção horizontal do instrumento. Este arranjo servirá para minimizar a deposição de partículas associadas com "efeitos de parede" na curva de 90° na base do instrumento.

Além disto, este tipo de montagem permitira um exame da parte inferior das lamínas o que por sua vez permitirá uma avaliação dos efeitos de difusão de partículas.

O trem de amostragem para medidas, tanto no ambiente quanto no laboratório, consistirá do elutriador, um orifício limitante e uma bomba de vácuo, conforme mostrado na Figura IV.



#### IV. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

Apesar do fato que foi mencionado na introdução, que as experiências tanto do Stein quanto do Rimberg e Thomas indicaram que a correspondência entre a distância de deposição e tamanho de partículas medidas pelo elutriador e aquela calculada por teoria coincidiam dentro de 10%, para dar maior confiabilidade nas medidas futuras que serão feitas com o aparelho, seria recomendável calibrar o instrumento.

Para esta finalidade partículas monodispersas de esferas de Latex de Polistrene (PSL) podem ser utilizadas. Partícu

las esfericas e monodispersas deste material, ou qualquer outro material adequado, por ex.: DOP, Azul de Metileno, etc, cujos tamanhos são conhecidos até uma precisão de 1%, podem ser geradas usando o Berglund Liu modelo 3050, gerador de aerosol monodisperso (que está sendo adquirido dentro do Pg. 18 da STAR). As partículas podem ser dispersadas dentro da câmara de poeira através de tubulação (Veja Figura V) no ponto A e amostrada na saída da câmara no ponto B.

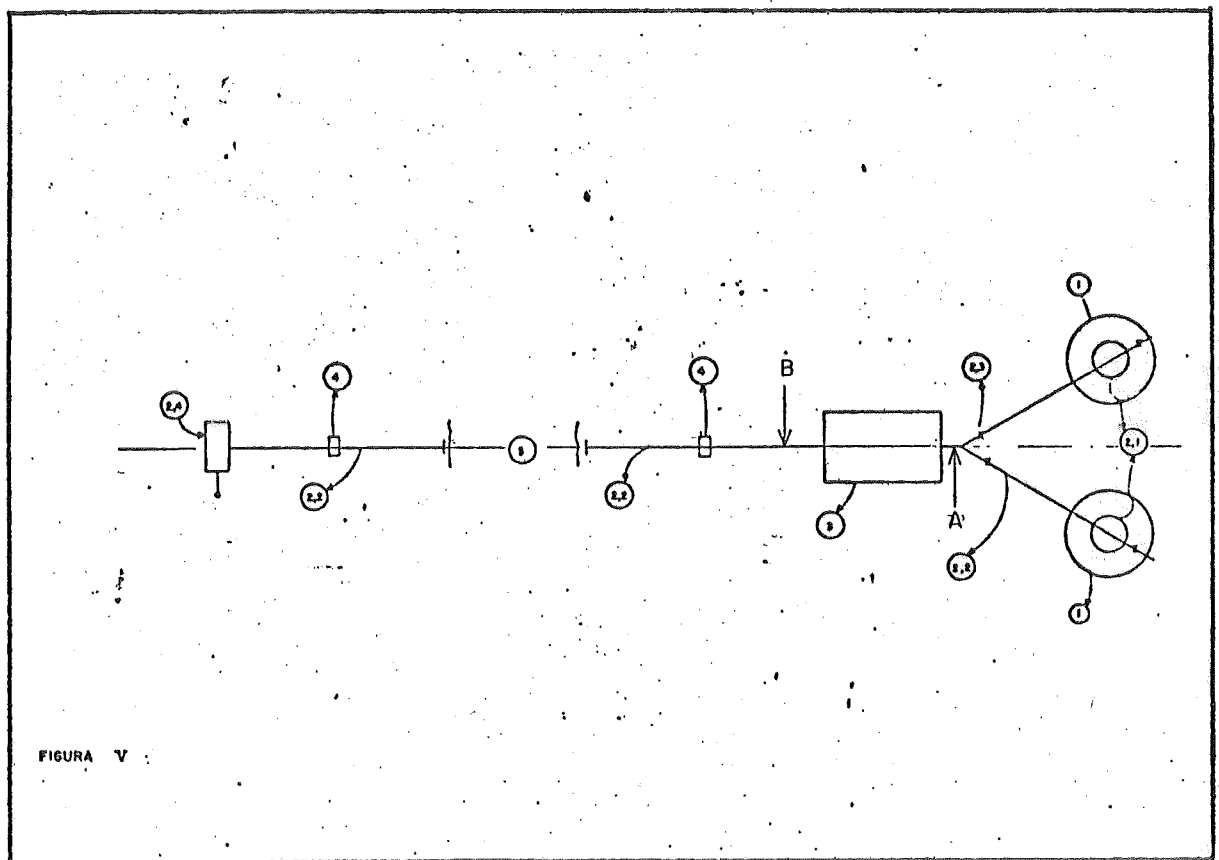


FIGURA V

Uma comparação pode então ser feita entre a distância de deposição calculada pela teoria da seção II e aquela medida pelo elutriador.

#### V. APLICAÇÕES DO INSTRUMENTO

O elutriador, cuja teoria e detalhes de construção foram discutidos nas seções anteriores, é previsto inicialmente

para as seguintes aplicações:

- a. Um estudo comparativo do diâmetro aerodinâmico de partículas irregulares medido pelo Royco OPC e o elutriador. Os problemas associados com a medida de diâmetros de partículas irregulares que absorvem luz pelos contadores óticos, foram delineados no Relatório DLEC.04-A/78. Dois métodos para calibrar tais contadores para partículas irregulares, um usando o microscópio e o outro usando um impactador especificamente projetado para esta finalidade, também foram discutidos neste relatório. O elutriador horizontal sugere uma outra maneira de resolver este problema (Figura VI).

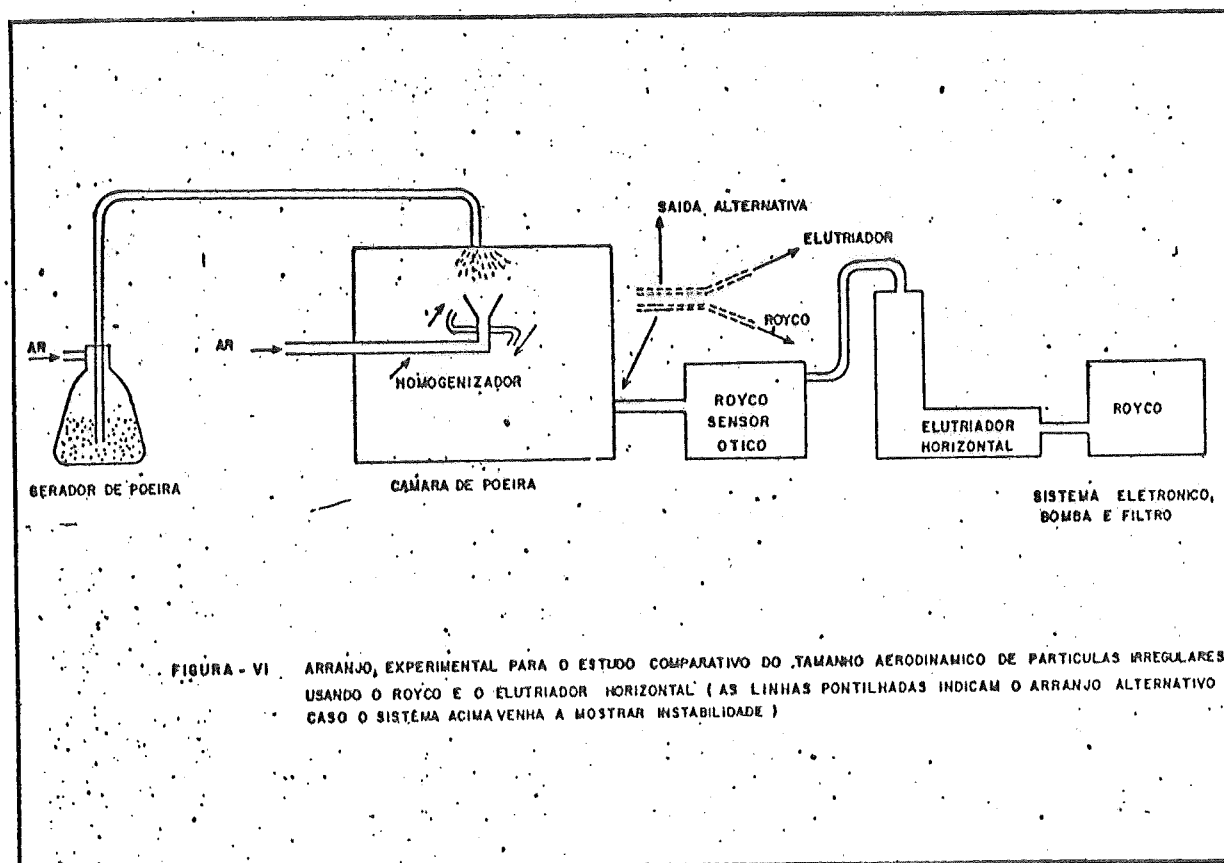


FIGURA - VI ARRANJO EXPERIMENTAL PARA O ESTUDO COMPARATIVO DO TAMANHO AERODINAMICO DE PARTICULAS IRREGULARES USANDO O ROYCO E O ELUTRIADOR HORIZONTAL (AS LINHAS PONTILHADAS INDICAM O ARRANJO ALTERNATIVO CASO O SISTEMA ACIMA VENHA A MOSTRAR INSTABILIDADE)

Nesta figura a poeira é gerada pelo conjunto da bomba e gerador de poeira e injetado dentro da câmara de poeira, onde ela é misturada e homogenizada pelo homogenizador. A saída na parte inferior da câmara é ligada à entrada do Royco. As partículas, depois de passarem pelo volume do "sensoreamento" do contador, automática-

mente entram no elutriador, cuja entrada é ligada à saída do OPC. Partículas que não sedimentam no elutriador são captadas pelo filtro especial que se encontra dentro do próprio Royco. Examinando-se as lamínas no chão do elutriador com um microscópio e usando a teoria já descrita, os diâmetros aerodinâmicos e concentrações de partículas que passaram pelo contador ótico podem ser medidos. Convém mencionar aqui que o sucesso desta experiência dependerá inteiramente da estabilidade do Royco. Experiências iniciais utilizando um filtro Millipore na saída do Royco para coletar as partículas após a sua passagem pelo volume do sensoriamento, mostram que o OPC tende a ficar instável com a introdução deste filtro no circuito do fluxo do ar, devido provavelmente a incapacidade da bomba do Royco em superar a alta resistência oferecida pelo filtro. Isto não deveria ser o caso com o elutriador, já que a sua introdução no circuito efetivamente aumentaria o comprimento do circuito do fluxo do ar com um mínimo aumento em resistência. Porém, evidentemente a vazão do sistema mudará e ela terá que ser recalibrada.

Caso o sistema tenda a instabilidade, um método alternativo pode ser usado conforme segue: em vez de uma única saída da câmara, a saída pode ser na forma de um Y. Um lado deste Y é ligado a entrada do Royco e o outro é ligado ao elutriador. O tamanho de partículas medidas por ambos os instrumentos pode agora ser comparado.

- b. Estudos sobre o "fator de forma" do aerossol urbano. Usando o trem de amostragem composto do elutriador, filtro membrana e bomba de vácuo, fazer amostragens no ambiente para estudar a razão do diâmetro projetado para o diâmetro aerodinâmico equivalente. É importante saber a variação desta razão como função de tamanho, local de amostragem e durante diferentes condições atmosféricas. Evidentemente, neste caso, um número razoável de amostras terão que ser feitas antes de tirar quaisquer conclusões.

c. Finalmente, o elutriador pode ser operado lado a lado com o Hi-Vol com cabeça Andersen para amostrar o material particulado em suspensão na atmosfera de São Paulo, a fim de determinar e comparar a distribuição de tamanho destas partículas.

## VI. CONCLUSÕES

Este relatório discutiu detalhes sobre o projeto de construção de um Elutriador Horizontal para amostrar material particulado em suspensão. Além de tratar rigorosamente a teoria de elutriação, o relatório apresentou a informação pertinente e desenhos práticos para a construção de um elutriador.

Aplicações para o elutriador projetado, tais como: medidas de distribuição de tamanho de material particulado, comparação com instrumentos como o Royco e o Hi-Vol com o objetivo de verificar a sua equivalencia, e medição de fatores de forma do aerosol urbano também foram esboçados. Maiores detalhes sobre a construção, calibração e desempenho do instrumento, além dos resultados das aplicações mencionadas comporão o assunto de futuros relatórios.

13

R E F E R Ê N C I A S

DUNMORE, J.H.; HAMILTON, R.J. and SMITH, D.S.G. J. Sci. Instrument 41, 669, 1964

RIMBERG, D. and THOMAS, J.W. J. Colloid and Interface Sci. 32, 101, 1970

SCHLICHTING, H. Boundary Layer Theory, McGran Hill Book Company, 1962

STEIN, F. M.S. Thesis Univ. of Pittsburgh (Unpublished)

STEIN, F.; QUINLAN, R. and CORN, M. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 27, 39, 1966

THOMAS, J.W. J. Aerosol Sci. 5, 583, 1974

WALTON, W.H. British J. Appl. Phys., Suppl. 3, Paper A5, 1954

## A P E N D I C E I

## A. CÁLCULO DE COMPRIMENTO DE CANAL NECESSÁRIO PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM PERFIL PARABOLICO DE VELOCIDADE NO PLANO VERTICAL

O comprimento necessário para o desenvolvimento do perfil parabolico de velocidade entre a placa inferior e superior, segundo Schlichting (1962), é

$$L = 0.16 \frac{H^2}{4} \frac{\bar{V}}{\nu} \quad (A-1)$$

onde  $\bar{V} = Q/A \quad (A-2)$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (A-3)$$

e  $H = 0.55$  (é a distância entre as placas Fig.II)

Em equações A-2 e A-3 acima

$Q$  = vazão em  $\text{cm}^3/\text{min}$

$A$  = área de secção do elutriador

$\bar{V}$  = viscosidade cinemática do ar

$\mu$  = viscosidade do ar

$\rho$  = densidade do ar

Para uma vazão de  $170 \text{ cm}^3/\text{seg}$  e as dimensões do elutriador nos desenhos da Fig. III, teremos

$$\bar{V} = \frac{170}{1.1 \times 7 \times 60} \text{ cm/seg} = 0.37 \text{ cm/seg}$$

$$\nu = 0.15 \text{ cm}^2/\text{seg} \quad (\text{para ar})$$

e portanto

$$L = 0.16 \times \frac{(0.55)^2}{4} \times \frac{0.37}{0.15}$$

$$= 0.03 \text{ cm}$$

A transição para um perfil parabolico de velocidade ocorre portanto numa distância bem pequena.

B. COMPRIMENTO NECESSÁRIO NO PLANO HORIZONTAL

No plano horizontal o comprimento necessário para transição é dado por

$$L = 0.16 \cdot \frac{W^2}{4} \cdot \frac{\bar{V}}{v} \quad (A-4)$$

onde  $W$  = largura do canal do elutriador (7 cm no presente caso e o resto é como definido no A-2 e A-3).

Com  $\bar{V} = 0.37$  cm/seg e  $v = 0.15$  cm<sup>2</sup>/seg

Teremos  $L = 4.83$  cm

