

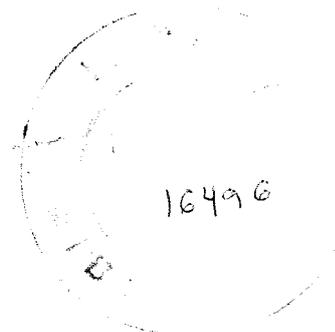
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AUTARQUIA ASSOCIADA A UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DETERMINAÇÃO, PELO MÉTODO DA
CHAMA DE SÓDIO, DA EFICIÊNCIA
DE FILTROS ABSOLUTOS DE AR,
PARA RETENÇÃO DE AEROSSÓIS.**

ROBERTO VICENTE

Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de "Mestre-Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear".

ORIENTADOR: DR. ACHILLES ALFONSO SUAREZ



SÃO PAULO

1980

a

Rialma

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui registrada minha gratidão às pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho fosse concluído. Em especial agradeço:

Ao Dr. Achilles Alfonso Suarez, pela orientação deste trabalho;

Ao mestre e amigo Eng^o Elías Palacios, pela contribuição inestimável à realização deste trabalho e à minha formação;

Ao casal Conti pelas primorosas fotografias que ilustram este trabalho;

À Sra. Margô Vania Hehl Rabello dos Santos, pelo paciente trabalho de microscopia;

Aos colegas da biblioteca, por sua atuação sempre atenciosa e dedicada;

Aos colegas da oficina mecânica, pelo seu trabalho solícito e preciso;

À Srta. Emi Miyamoto, pela análise estatística dos resultados experimentais;

À Srta. Hissae Miyamoto, pela confecção da capa e de vários desenhos;

Ao Sr. Goro Hiromoto, pela revisão gráfica do texto final;

Aos colegas do CPRD, pelo ótimo ambiente de trabalho que me têm proporcionado;

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, pela oportunidade que me concedeu de realizar este trabalho.

RESUMO:

São apresentados os resultados experimentais do estudo de um gerador de aerossóis de NaCl construído para operar em um banco de prova para filtros de ar de alta eficiência.

A característica de maior importância do aerossol obtido com este gerador é o diâmetro médio equivalente em massa da nuvem que é de 0,24 micra com um desvio padrão de 0,15 μm . Em consequência, cerca de 86 % da massa total do aerossol está concentrada nas partículas com tamanho no intervalo de 0,1 - 0,4 micra, tendo portanto este aerossol, um melhor espectro granulométrico para ensaio de filtros, que outros geradores de aerossol de NaCl utilizados até o momento para este tipo de teste.

A simplicidade de concepção e construção, aliada à baixa pressão de atomização requerida, e ao fato de operar fora do túnel de vento, são vantagens adicionais para sua utilização em ensaios de eficiência de filtração.

ABSTRACT:

Experimental results obtained with a NaCl aerosol generator to be used in a HEPA filter test rig are presented.

The main feature of this generator is to produce a cloud in which 86 % of the total mass are concentrated on particles in the 0,1 - 0,4 micrometer size range. This makes this aerosol more penetrative through filter media, than the other now available sodium chloride test aerosols.

The simple design and construction of this generator in addition to its low atomization pressure and outside wind tunnel operation make this HEPA filter test aerosol generator a recommendable one.

1. Introdução	
2. Conceitos teóricos	
.1 - Considerações gerais	
.1 - Métodos de análise de aerossóis	
.2 - Descontaminação atmosférica	
.2 - Normas de ensaio de eficiência	1
.1 - Aerossol padrão	1
.2 - Amostragem de aerossóis	2
3. Equipamentos e métodos	2
.1 - Descrição dos equipamentos utilizados	2
.1 - Banco de prova	2
.2 - Gerador de aerossóis	3
.3 - Espectrofotômetro Sartorius	3
.4 - Impactador	3
.5 - Determinação da massa de aerossol	4
.2 - Tratamento dos dados experimentais	4
.1 - Espectro obtido com o impactador	4
.2 - Espectro obtido com o espectrofotômetro	4
.3 - Reprodutibilidade do gerador de aerossóis	4
.4 - Determinação da massa de aerossol	4
4. Resultados experimentais	4
.1 - Espectrometria por impactação	4
.2 - Espectrofotometria	5
.3 - Reprodutibilidade do gerador de aerossóis	5
.4 - Determinação da massa de aerossol	5
.5 - Medida de eficiência de filtros absolutos	5
5. Conclusões	5
Apêndice A	5
Apêndice B	6
Apêndice C	6
Referências Bibliográficas	6

1. INTRODUÇÃO

A indústria nuclear, assim como qualquer outra indústria, produz uma certa quantidade de resíduos, como consequência natural de seu funcionamento, pois a produção de rejeitos é um fato comum a qualquer atividade humana, sejam eles na forma de matéria não aproveitável, sejam na forma de energia não recuperável.

O controle sobre a produção e liberação no ambiente de rejeitos radioativos tem, contudo, uma história diferente da que marca os rejeitos convencionais. Desde o princípio da indústria nuclear, os riscos potenciais dos resíduos radioativos foram avaliados e propostos amplos planos de gestão, ao contrário do que ocorreu com as demais indústrias. De fato, com frequência, os resíduos industriais foram lançados no ambiente sem que houvesse sido feito qualquer estudo das consequências que tal atitude acarretaria para o meio ambiente e para as gerações futuras e, somente depois de verificar-se um considerável aumento do nível de contaminação, foram adotadas medidas para limitar as descargas.

No caso particular dos resíduos gasosos, verificou-se logo quando os primeiros reatores nucleares estavam entrando em operação, que a instalação de sistemas de retenção de gases e aerossóis de grande eficiência nos sistemas de exaustão de ar, era uma precaução necessária para limitar, a valores aceitáveis, as descargas de material radioativo no ambiente.

No fim da década de 50, com a entrada em operação dos primeiros reatores comerciais para a produção de energia elétrica, os filtros absolutos para retenção de aerossóis já haviam assumido a posição de meio mais eficiente e confiável de operar economicamente instalações de descontaminação atmosférica.

A rápida difusão da energia nuclear com fins comerciais exigiu a normalização de métodos de ensaio dos filtros, para atestar sua qualidade e a das instalações de descontaminação atmosférica. Os testes de eficiência, em particular, foram normalizados nos EUA em 1956, quando surge a norma 'MIL STD 282: DOP-smoke penetration and air resistance of filters', que utilizava uma névoa de dioctil-ftalato produzida termicamente.⁵

Aos poucos, cada país desenvolveu seus próprios métodos de teste de filtros, dos quais podemos citar: a norma inglesa de 1965, 'BS 3928:65: Sodium flame test for air filters' que utilizava aerossol de NaCl produzido por atomização; a norma francesa de 1972, 'NF X 44 011: Méthode de mesure de l'efficacité des filtres au moyen d'un aerosol d'uranine', com aerossol de

fluoresceína di-sódio, produzida por atomização; a norma alemã de 1974, 'DIN 24 184: Typprüfung von Schwebstoff-Filtern', que utilizava como aerossóis de teste: névoa de parafina, aerossol atmosférico e pó de quartzo.

O método britânico, inicialmente desenvolvido pelo 'Porton Down Chemical Defense Establishment' foi modificado em Harwell no 'Atomic Energy Research Establishment', sendo normalizado pela British Standards Institution em 1965. Foi adotado pelo Comitê Europeu de Fabricantes de Equipamento para Tratamento de Ar (EUROVENT) e foi estudado no contexto da International Organization for Standardization (ISO), além de ser utilizado em vários outros países, tanto por seus órgãos oficiais no campo da energia nuclear, como por fabricantes de filtros e equipamentos para tratamento de ar.

Este método vem sendo aprimorado em vários estabelecimentos, inclusive industriais como o Centre Technique des Industries Aéronautiques e Thermiques (CETIAT) com a finalidade de torná-lo perfeitamente adequado ao ensaio de filtros absolutos. Entre as alterações que têm sido propostas, pode-se citar a substituição dos atomizadores de Collison pelos do tipo Dautrebande, o que implica na produção de aerossóis de NaCl com tamanho mais próximo do requerido para os testes de eficiência: modificações no sistema de detecção das partículas de aerossol para melhorar a reprodutibilidade do método; e alterações no banco de ensaios visando melhorar os perfis de velocidade, os sistemas de diluição e amostragem do aerossol e os dispositivos de medida de vazão. Alguns autores¹⁴ propõem inclusive a geração de aerossóis fora do conduto principal do banco de prova, o que é uma alteração profunda na concepção do método de ensaio e traz como contribuição, a eliminação dos problemas de variação do espectro de tamanho dos aerossóis em consequência de variações na vazão do banco de prova, além de apresentar vantagens com relação ao custo de construção do gerador e tamanho das instalações de teste de filtros.

Em vista destas tentativas de aprimoramento do método da chama de sódio, como é chamado o método britânico, e como consequência da aquisição pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, por intermédio de seu Centro de Proteção Radiológica e Dosimetria, de um espectrofotômetro marca Sartorius, de procedência alemã, decidiu-se realizar um trabalho consistindo basicamente em estudar as condições de construção e operação de um gerador de aerossóis de NaCl, operado fora do conduto do túnel de vento, para produção de partículas de tamanho inferior a 1 micron, visando a realização de ensaios de eficiência em filtros absolutos.

Os resultados que foram obtidos vêm confirmar a vantagem da produção de aerossóis fora do conduto principal do banco de prova, apresentando ainda, o gerador desenvolvido no presente trabalho, como um dispositivo ope-

racional, com vantagens sobre os geradores utilizados atualmente em relação à simplicidade de desenho e em relação ao seu melhor desempenho.

2. CONCEITOS TEÓRICOS

2.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Ao sistema formado por partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera, dá-se o nome de aerossol, sendo esta palavra empregada também para designar as próprias partículas.^{1,13}

Os processos físicos responsáveis pela formação dos aerossóis atmosféricos, tanto de origem artificial como natural, são a combustão de matéria orgânica, condensação de vapores lançados na atmosfera, reações químicas entre gases, suspensão de partículas de pó criadas por erosão sob a ação do vento, nebulização de líquidos, etc.⁴⁶

Os aerossóis atmosféricos são o resultado de um processo dinâmico, uma vez que partículas se formam e desaparecem continuamente, por mecanismos como coagulação, condensação, lavagem pela chuva, deposição gravitacional, evaporação e outros.³⁶

A concentração destas partículas, sua composição química, tamanho e forma variam muito de local para local e também ao longo do tempo dependendo de particularidades geográficas e meteorológicas assim como da intensidade e características da atividade humana na região. Na Figura 1 são mostrados alguns dos componentes líquidos e sólidos dos aerossóis atmosféricos, assim como alguns métodos de análise granulométrica das partículas destes aerossóis e dimensões de referência.

Os aerossóis radioativos são formados por partículas de um material radioativo ou por partículas de um aerossol atmosférico em que foram adsorvidos átomos ou moléculas de um gás ou vapor radioativos.

Estes aerossóis ocorrem na natureza como resultado de dois processos: emanação ou suspensão do solo, de elementos radioativos primordiais, como os das famílias do tório e urânio; e interação da radiação cósmica com os gases da atmosfera. A radioatividade natural do ar ao nível do solo, provém essencialmente do ^{222}Rn da família de decaimento do ^{238}U e do ^{220}Rn da família do ^{232}Th . Os produtos de decaimento destes dois núclídeos são metais pesados de meia-vida curta (polônio, chumbo, bismuto, tálio) que, à temperatura ambiente, são sólidos. No momento em que se formam, estas partículas estão fortemente ionizadas e se agregam rapidamente entre si e a outras partículas.³⁰

Como fontes artificiais de aerossóis radioativos, pode-se citar o manuseio de radioisótopos, a mineração de elementos que ocorrem associados a tório ou urânio, a fabricação de elementos combustíveis e o seu reprocessamen-

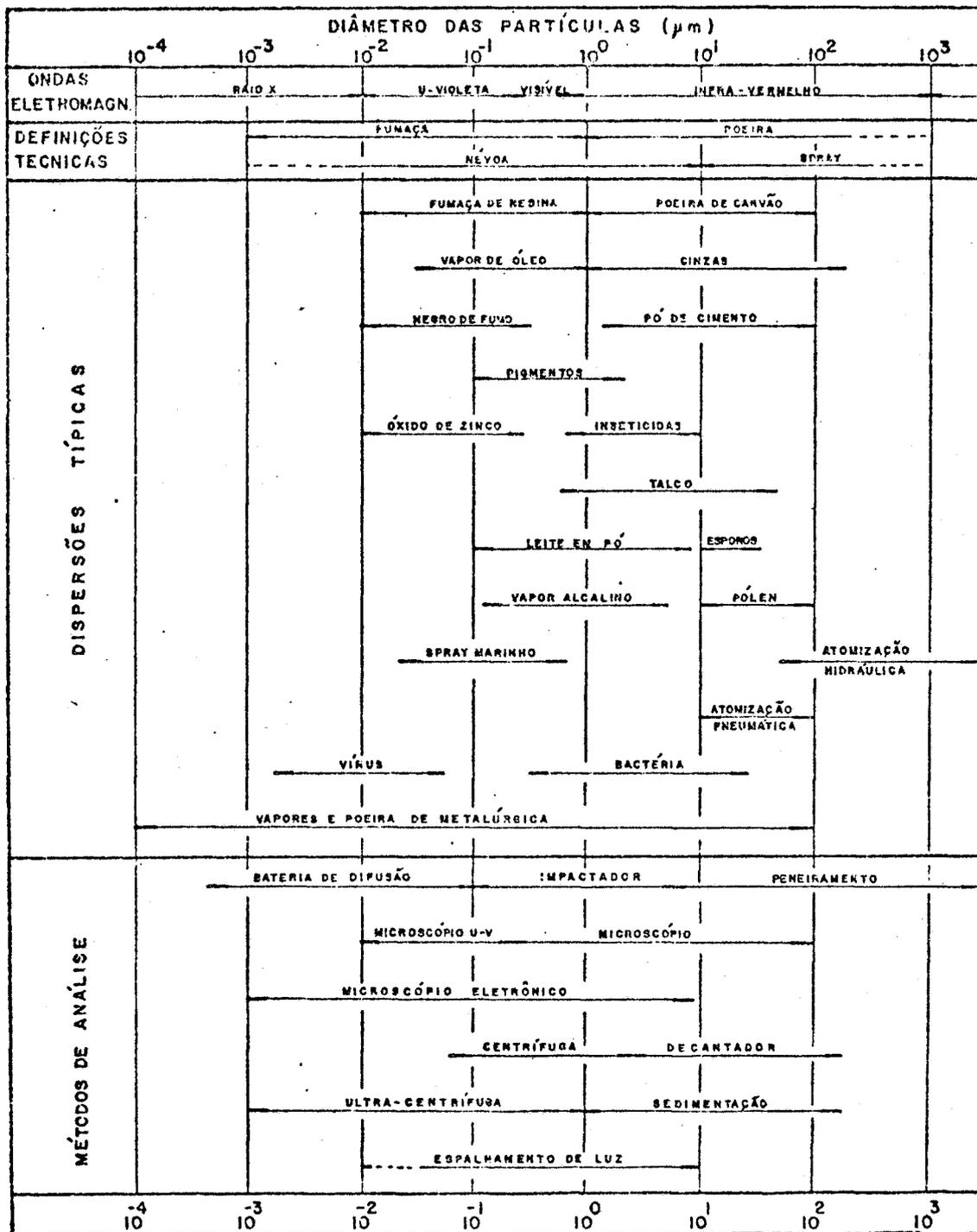


Figura 1: Componentes sólidos e líquidos que formam os aerossóis atmosféricos, alguns métodos de análise de aerossóis e dimensões de referência.³⁰

to para os reatores nucleares, a operação de centrais nucleares e as explosões nucleares na atmosfera e até mesmo a operação de usinas termelétricas convencionais a carvão.

2.1.1 - MÉTODOS DE ANÁLISE DE AEROSSÓIS

O conhecimento da distribuição de tamanho das partículas em suspen-

são é essencial para se prever o comportamento de um determinado aerossol, pois todas as propriedades físicas de um sistema de partículas podem ser relacionadas com o tamanho dessas partículas. Para que estas propriedades possam ser adequadamente descritas é preciso estabelecer uma quantidade para definir tamanho. Esta quantidade tem necessariamente um caráter arbitrário, devido à forma irregular da maioria das partículas e depende de convenções implícitas na definição da dimensão característica de tamanho ou dos princípios físicos empregados no procedimento de sua determinação. A esta quantidade se convencionou chamar 'diâmetro' ^{26,35}, o qual tem um significado físico diferente para cada método de determinação de sua grandeza.

a) diâmetros baseados nas características geométricas: o tamanho, como uma quantidade unidimensional, pode ser estimado diretamente como a distância entre dois pontos quaisquer do perfil da partícula vista ao microscópio, ou então definido a partir de suas duas dimensões mais significativas.²⁶ Para a análise ao microscópio, foram estabelecidos critérios que levaram à definição de diâmetros estatísticos, que representam a média de uma grande quantidade de medidas.

Cronologicamente, a primeira definição de diâmetro baseada nas características geométricas das partículas deu origem ao chamado 'diâmetro de Martin'.³⁵ Este diâmetro é definido pelo comprimento de uma corda, paralela a uma linha de referência, que divide o perfil da partícula ao meio, como mostra a Figura 2.

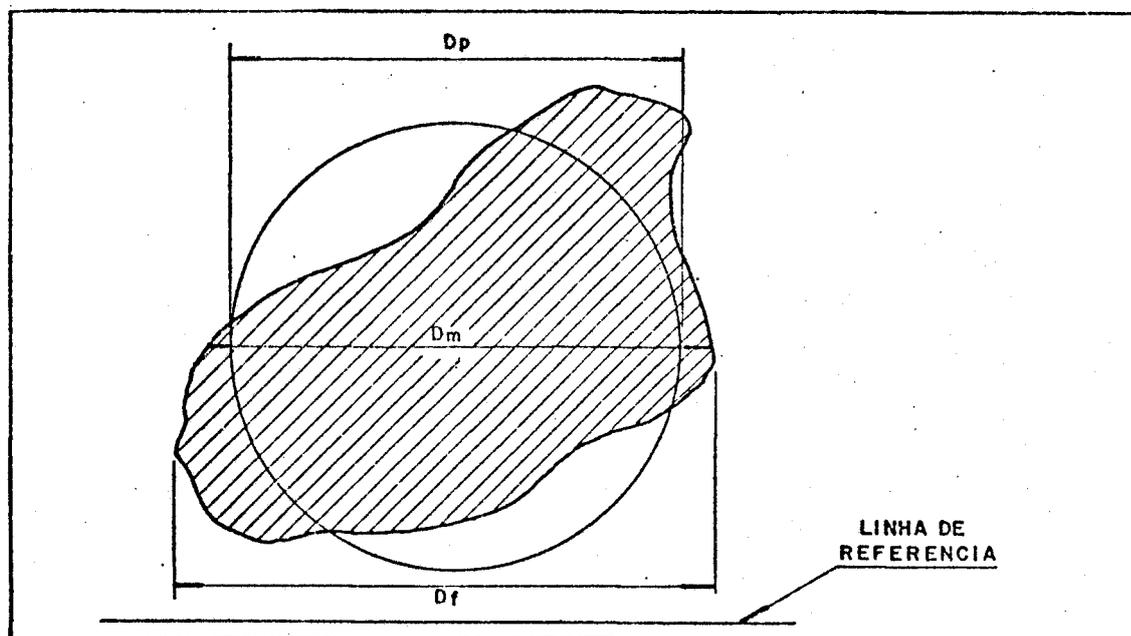


Figura 2: Diâmetros geométricos- D_M : diâmetro de Martin; D_F : diâmetro de Feret; D_P : diâmetro da área projetada.²⁶

O 'diâmetro de Feret' veio a seguir, tendo surgido por uma questão de conveniência. Com ele pretendia-se tornar as medidas de tamanho de partículas mais rápidas e menos sujeitas a erros por parte dos microscopistas, que antes tinham que decidir em que consistia 'duas áreas iguais do perfil da partícula'. Foi definido como o comprimento da projeção do perfil da partícula numa linha de referência.

Finalmente foi definido o 'diâmetro da área projetada' como o diâmetro de um círculo de mesma área que o perfil da partícula, quando vista em uma direção perpendicular ao plano de maior estabilidade. Esta última restrição é quase sempre desnecessária, uma vez que a condição citada é, em geral, satisfeita na amostragem de aerossóis.

Para estes três diâmetros existem relações que expressam o seu significado geométrico:

$$D_M = 4 \frac{A}{\pi} \quad \bar{D}_F = \frac{P}{\pi} \quad \overline{D_P^2} = 4 \frac{\bar{A}}{\pi} = \frac{S}{\pi}$$

onde

D_M é o 'diâmetro de Martin';

A é a área do perfil da partícula;

\bar{D}_F é a média de várias medidas do 'diâmetro de Feret' sobre o perfil da partícula, ou a média de medidas feitas em partículas diferentes, orientadas ao acaso;

P é o perímetro do perfil da partícula;

$\overline{D_P^2}$ é a média dos quadrados das medidas de D_P ('diâmetro da área projetada') sobre o perfil das partículas;

\bar{A} é a área média dos perfis das partículas; e

S é a superfície da partícula.

Além dos parâmetros enumerados acima, outros também servem para a definição de diâmetros, como por exemplo: a corda máxima e a corda mínima do perfil da partícula; o círculo de igual perímetro; o círculo circunscrito, e outros, convenientes para medidas automáticas feitas por sistemas acoplados a computador.

Existem várias maneiras de fixar as partículas dos aerossóis sobre uma superfície para que possam ser analisadas ao microscópio. A mais simples é esperar que se depositem sob a ação da gravidade sobre porta-amostras de microscopia, processo este chamado sedimentação.⁴³ Separar as partículas da fase gasosa dos aerossóis pode ser conseguido também acelerando-as em jatos ou condutos espiralados. A separação ocorre por causa da maior inércia das partículas, em relação às moléculas do ar. Outros métodos de amostragem

utilizam as propriedades elétricas das partículas, sua mobilidade devido ao movimento Browniano, difusão devido a gradientes térmicos, etc.^{26,35,43} Os dispositivos mais utilizados são os precipitadores térmicos e eletrostáticos, as câmaras de difusão e filtros de membrana ou fibrosos.

b) diâmetros baseados nas propriedades ópticas das partículas: as propriedades ópticas das partículas de um aerossol, como índice de refração, rugosidade da superfície e tamanho, governam o comportamento da interação luz-partícula.²⁶ A intensidade de luz espalhada por uma partícula, em uma determinada direção, é função, entre outros parâmetros, da superfície da partícula. A medida desta intensidade revela o tamanho da partícula, como a de uma esfera do mesmo material, que produz o mesmo efeito e em mesma intensidade.

A medida da diminuição de intensidade de um feixe luminoso ao atravessar um gás em que estão suspensas partículas de um aerossol, fornece uma estimativa do diâmetro médio das partículas.⁴⁶

c) diâmetros baseados na composição química das partículas: a composição química das partículas, desde que constante em toda a população de partículas, serve como indicador do tamanho delas. Por espectrometria de chama, ou análise por ativação, medindo a quantidade de uma determinada substância ou elemento presente em cada partícula, determina-se o tamanho desta, como o de uma esfera hipotética de mesma composição, e com a mesma massa do elemento analisado.^{41,44}

d) diâmetros baseados em autoradiografias das partículas: o conteúdo de material radioativo das partículas de um aerossol radioativo indica, pelo tamanho da mancha impressa num material fotográfico apropriado, o tamanho da partícula como o de uma esfera com a mesma atividade.²⁴ Basta que se deixe o aerossol em contato com o filme durante um certo tempo, para que sejam observáveis todas as partículas com atividade acima de um certo valor mínimo, estimando-se os diâmetros pelo tamanho das manchas deixadas no autoradiograma.

2.1.2 - DESCONTAMINAÇÃO ATMOSFÉRICA

Os contaminantes atmosféricos apresentam-se sob duas formas físicas distintas: formando soluções com o ar (vapores ou gases) ou formando suspensões (partículas sólidas e gotas líquidas).

A remoção das partículas e gotas do meio gasoso é um processo bastante complexo, em que atuam vários mecanismos: força de origem gravitacional e inercial; interceptação; precipitação eletrostática e térmica; difusão Brow-

niana; aglomeração Browniana e sônica; etc.

A utilização de equipamentos de remoção de partículas em suspensão no ar, nas indústrias convencionais, baseados nestes mecanismos é determinada pelas características do aerossol e pelo custo do equipamento.

Na indústria nuclear, os filtros fibrosos revelaram-se o meio mais eficaz, confiável e barato de controlar os níveis de contaminação do ar pela remoção dos aerossóis radioativos produzidos durante operação normal das instalações.³⁴

Os mecanismos básicos de remoção das partículas pelas fibras dos filtros são o impacto inercial, a interceptação direta e a difusão Browniana.¹⁸ Outros fatores como cargas elétricas nas partículas e fibras, sedimentação sob a ação da gravidade, termoforese, etc. desempenham um papel secundário e são, em geral, desprezados no estudo do processo de filtração por fibras.

a) Eficiência de filtração: a eficiência de retenção de partículas de um conjunto de fibras pode ser avaliada a partir da eficiência de uma fibra isolada, extrapolando para o conjunto os efeitos observados numa única fibra. Esta eficiência é função da distribuição das linhas de fluxo do ar que flui ao redor da fibra, do diâmetro da fibra e da densidade e diâmetro das partículas do aerossol.^{18,35,36}

A distribuição de linhas de fluxo ao redor da fibra é função do número de Reynolds, definido abaixo, e a influência que tem na eficiência de captura pode ser visualizada na Figura 3, que mostra as linhas de fluxo para $Re = 0,2$ e 10 e para um fluido ideal. A captura é favorecida quando a deflexão das linhas de fluxo ocorre em regiões bem próximas da fibra.

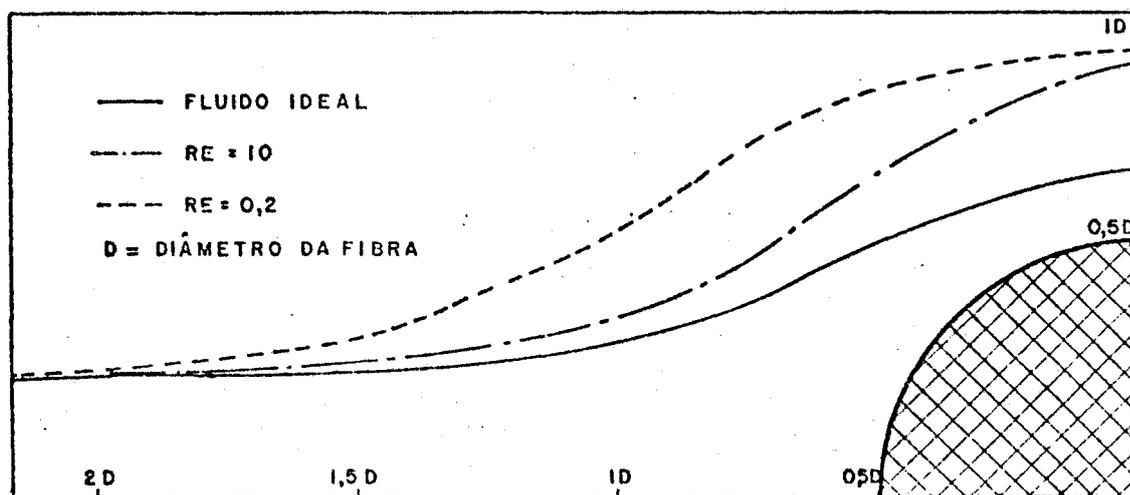


Figura 3: Linhas de fluxo ao redor de uma fibra cilíndrica de diâmetro D , em função do número de Reynolds Re , e para fluxo ideal, (não viscoso).⁴⁶

O número de Reynolds, para uma fibra de diâmetro D e para um fluido de densidade ρ , coeficiente de viscosidade μ e velocidade a montante da fibra v_o , é dado por:⁶

$$Re = \frac{v_o \cdot \rho \cdot D}{\mu}$$

Para cada um dos mecanismos básicos que atuam na filtração foi estabelecido um modelo para descrever o comportamento do fenômeno de captura em função do diâmetro das partículas e do diâmetro da fibra.

Na Figura 4a está ilustrado o fenômeno de captura por impactação inercial. Supondo que as partículas são esferas movendo-se junto com o fluido e sujeitas a força viscosa, que uma vez tenham tocado a fibra, ficam a ela aderidas, foi obtida a seguinte expressão para a eficiência de captura:⁴⁶

$$\epsilon_{ii} = \frac{Y_{lim}}{D/2}$$

onde

ϵ_{ii} é a eficiência de captura por impacto inercial;

Y_{lim} é o maior valor de Y para o qual as partículas são capturadas;

O valor de Y_{lim} é obtido pela solução da equação de movimento da partícula, sujeita à força viscosa do fluido, impondo a condição de que se $Y < Y_{lim}$, como é mostrado na Figura 4a, todas as partículas são capturadas.

O fenômeno de interceptação, ilustrado na Figura 4b, é caracterizado por um parâmetro R , dado pela razão entre o diâmetro da partícula e da fibra. Se a partícula passa a uma distância da fibra, inferior ao seu próprio raio, toca necessariamente sua superfície e é então retirada do fluxo.

A expressão encontrada para descrever este comportamento, em função do parâmetro R e do número de Reynolds é:³⁵

$$\epsilon_i = \frac{1}{2 - \ln Re} \left\{ (1 + R) \cdot \ln(1 + R) - \frac{R \cdot (2 + R)}{2 \cdot (1 + R)} \right\}$$

Finalmente, o mecanismo de difusão Browniana é o principal responsável pela captura de partículas de tamanho inferior a poucos décimos de micron.^{26,46} Devido ao movimento Browniano das partículas suspensas no ar, como consequência da agitação térmica das moléculas, a probabilidade de que a fibra seja tocada torna-se grande para partículas muito pequenas. A expressão matemática que expressa a eficiência de captura em função do raio da par

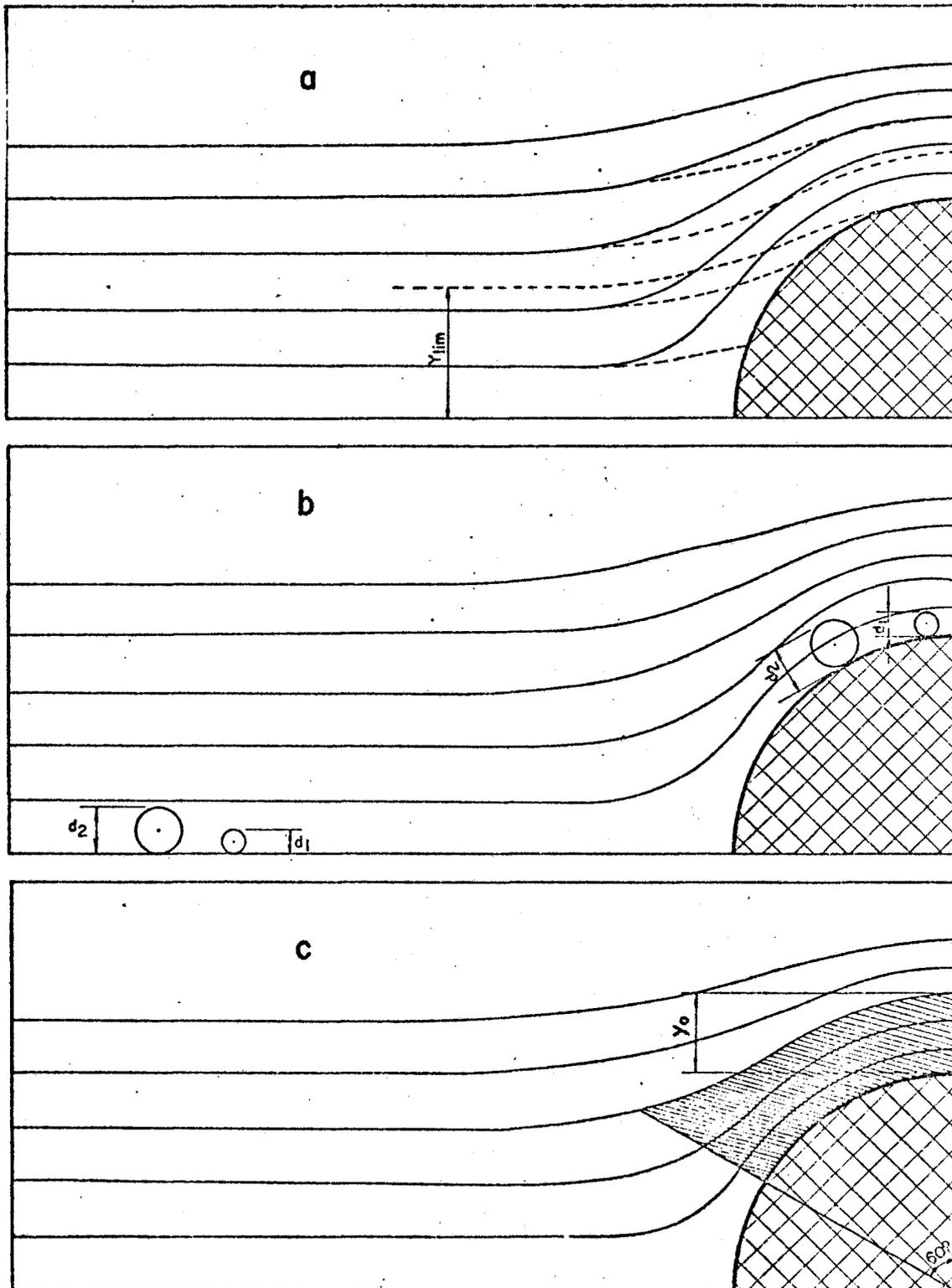


Figura 4: Fenômenos de captura de partículas por fibras: a) impacto inercial; b) interceptação; e c) movimento Browniano.⁴⁶

tícula e da fibra, é essencialmente a mesma que para interceptação, exceto que aqui o parâmetro R é definido como a razão entre o deslocamento médio da partícula, como consequência do movimento Browniano, e o diâmetro da fibra. Na Figura 4c, a região hachurada é aquela em que a partícula está 'disponível' para captura, sendo y_0 o deslocamento médio da partícula.

Considerando-se todos os mecanismos descritos, conjuntamente, pode-se definir para uma fibra isolada, um índice de filtração γ , como a razão entre a espessura de uma camada do fluido da qual são removidas todas as partículas e o diâmetro da fibra.¹⁶

Para um conjunto de fibras de diâmetro \bar{D} e índice de filtração médio $\bar{\gamma}$, formando um filtro de densidade de fibras β , a fração de partículas que fica retida em uma espessura dH do filtro é dada pela equação:

$$\frac{dN}{N} = \frac{4 \cdot \bar{\gamma} \cdot \beta \cdot dH}{\pi \cdot (1 - \beta) \cdot \bar{D}}$$

Integrando esta equação e chamando o fator constante de Γ , índice de filtração do filtro, chega-se à equação básica da filtração:³⁵

$$\epsilon = 1 - \exp(-\Gamma \cdot H)$$

onde ϵ é a fração de partículas retidas no filtro.

b) Qualidade de filtração: a eficiência de filtração é, contudo, insuficiente para qualificar um filtro, pois a resistência à passagem do ar, que determina o custo de operação do filtro, é um parâmetro importante para a especificação da sua qualidade.

Introduzindo na equação básica da filtração, a quantidade 'perda de carga' Δp , obtém-se:

$$\epsilon = 1 - \exp(-K \cdot \Delta p)$$

onde K é o fator de qualidade do filtro, expresso por:³⁵

$$K = \frac{\Gamma \cdot H}{\Delta p}$$

As especificações de um filtro são, portanto, sua eficiência e a perda de carga, ou resistência à passagem do fluido, para um dado regime de trabalho.

c) Filtros absolutos: os filtros de ar absolutos, também chamados de filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air Filters), são sistemas de descontaminação atmosférica seguros e de eficiência com valor próximo a 100%. São constituídos por um emaranhado bastante denso de fibras com diâmetro da ordem de 1 micrón.⁸ A relação 'volume de fibras'/'volume do filtro' é da or-

dem de 0,1 para os filtros mais comuns, que são empregados na obtenção de ambientes estéreis nas indústrias eletrônicas, farmacêuticas e cirúrgicas e na descontaminação do ar de exaustão de instalações nucleares, onde altos fatores de descontaminação são exigidos, seja por razões radio sanitárias, seja por razões econômicas, na recuperação de materiais valiosos como aerossóis de U e Pu.

O sistema de ventilação e os bancos de filtros são os principais dispositivos de proteção radiológica para controlar os níveis de contaminação do ar nas áreas de trabalho e para limitar a valores aceitáveis a quantidade de material radioativo eliminado no ambiente.

Por definição, um filtro HEPA é um filtro seco, não recuperável, de meio extenso, que tem uma eficiência mínima de 99,97 % para partículas de 0,3 micra de diâmetro, e perda de carga máxima, quando novo, de 25 mm H₂O, se operado à vazão nominal indicada pelo fabricante.⁸

O valor de eficiência mínima fixado, foi estabelecido como um compromisso razoável entre as tolerâncias de fabricação e a proteção oferecida pelo filtro.⁷ Embora este valor seja mantido no presente, os elementos filtrantes apresentam atualmente, fatores de descontaminação até uma ordem de grandeza mais altos que os correspondentes a este valor de eficiência, para partículas de 0,3 micra.^{9,33} Por outro lado, a eficiência é indicada para partículas deste tamanho, pela disponibilidade no início da indústria nuclear, de um método reprodutível de geração de um aerossol não tóxico e não explosivo, monodisperso, cujas partículas tinham tamanho no intervalo de maior penetração através dos filtros, adequado portanto, aos ensaios de eficiência de filtração.⁸

O valor da perda de carga (25 mm H₂O = 1 polegada de água) indicado na definição é arbitrário, mas é especificado para permitir comparação direta entre unidades filtrantes de diferentes desenhos e procedências ou ainda entre testes realizados no mesmo filtro em tempos e locais diferentes.⁷ O emprego deste valor não é restritivo, podendo o filtro ser operado com valores diferentes de perda de carga.

Um outro parâmetro importante na qualificação dos filtros absolutos é sua capacidade de retenção de pó, e a influência que tem na evolução da perda de carga do filtro, ou seja, no custo de operação do sistema. Este parâmetro não é especificado pelo fabricante tendo sido determinado pelos usuários de filtros. A capacidade de retenção de pó é função do seu tipo, só podendo ser determinada por simulação em condições comparáveis às de uso. Como esta capacidade é, em geral, pequena (cerca de 1,5 Kg de pó para as unidades que operam com vazão de 3.000 m³/h) e por ser o filtro HEPA um dispositi

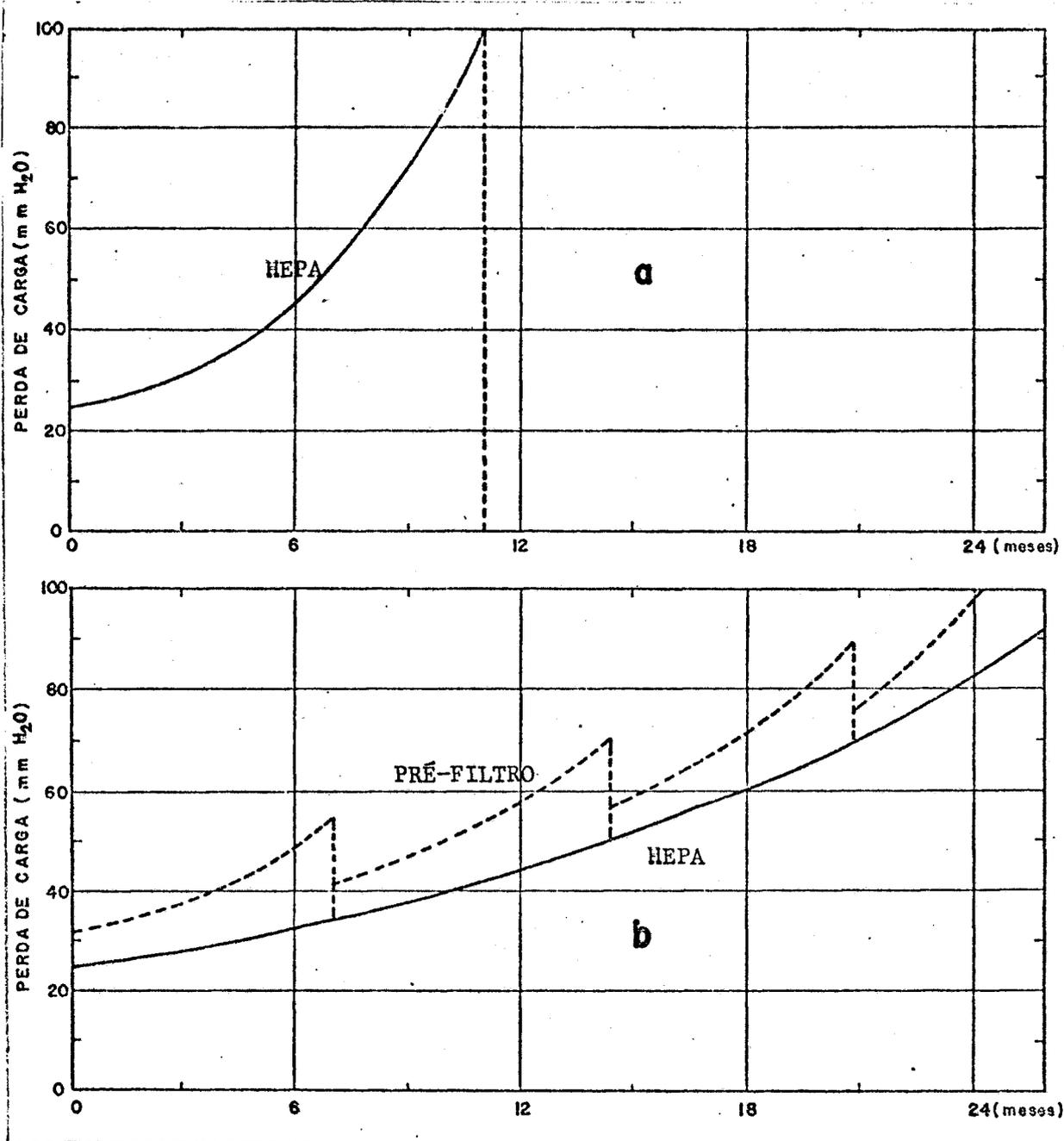


Figura 5: Curva de perda de carga de filtros absolutos em função do tempo de utilização: a) sem pré-filtro; b) com pré-filtro (substituídos sempre que sua perda de carga atinge um valor três vezes superior ao inicial).⁸

vo caro, são utilizados pré-filtros para aumentar a sua vida útil. Estes pré filtros retêm com eficiência alta somente as partículas grandes, ficando a cargo dos filtros absolutos a remoção das partículas pequenas. O tempo de utilização de um filtro absoluto pode, assim, ser duplicado, sendo a frequência de substituição determinada por fatores econômicos e pela perda de carga do sistema, que pode chegar a quatro vezes o valor inicial, como mostra a Figura 5.

O papel de filtro com o qual é construído o elemento filtrante é

feito de fibras de diâmetro inferior a 1 micron sobre uma matriz de fibras mais largas, com diâmetro entre 2 e 4 micra. Um adesivo orgânico é adicionado numa proporção de 5 % em peso, para manter as fibras unidas durante o processo de fabricação. O material de que são feitas as fibras varia de acordo com as características exigidas ao filtro, como resistência ao calor, à umidade, a atmosferas corrosivas, etc. São em geral de fibra de vidro, asbesto e celulose.⁸ O suporte ou estrutura do filtro é de madeira (aglomerada ou com pensada) ou aço (inox ou galvanizado). Sobre ele é dobrado o papel de filtro formando um plissado, com pregas separadas por chapas onduladas de alumínio, plástico ou asbesto, ou ainda por fios de barbante colados às dobras do papel. Todas as bordas do papel de filtro são coladas com um adesivo elastomérico à estrutura do filtro. Na Figura 6 está esquematizado um filtro absoluto mostrando seus diferentes componentes.

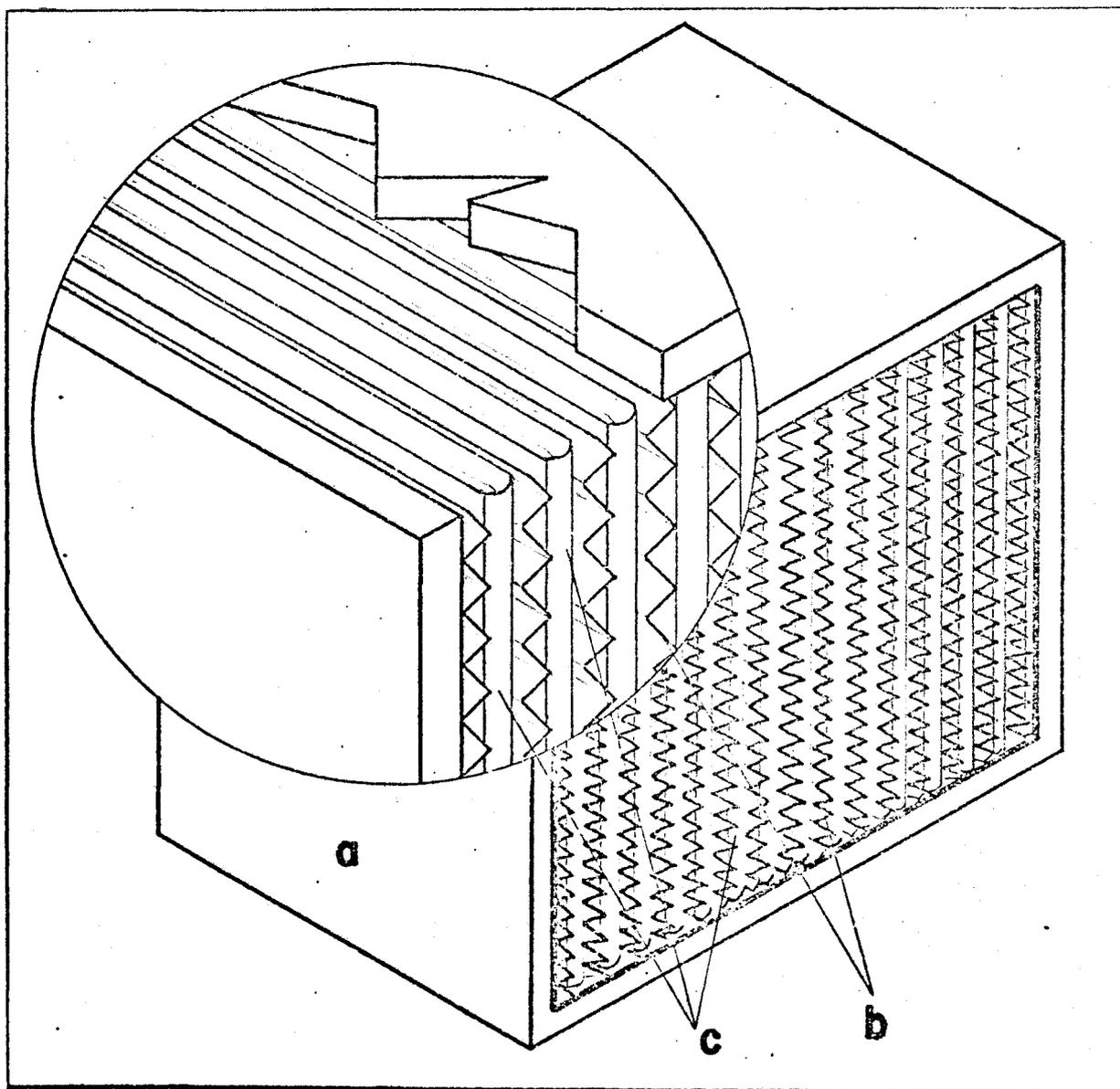


Figura 6: Filtro HEPA: a) estrutura do filtro; b) separadores; e c) folha de papel de filtro dobrada em zig-zag.

Cada um dos materiais componentes de um elemento filtrante deve satisfazer uma série de especificações estabelecidas de acordo com as condições de operação do filtro. Também o filtro acabado deve satisfazer certos requisitos de caráter geral, como resistência ao choque, à deformação, à vibração, etc., ou de caráter mais específico como resistência ao calor, por exemplo. O sentido exato dado a estes termos está esclarecido nas normas de construção e teste de filtros absolutos.

2.2 - NORMAS DE ENSAIO DE EFICIÊNCIA

O ensaio de eficiência de retenção de partículas é comum a todos os tipos de filtro e é talvez, o mais importante por estar ligado à função primordial do filtro.

A normalização do ensaio de eficiência é necessária pois a penetração de partículas através dos filtros é diferente para condições de operação diferentes e para aerossóis diferentes.⁴⁰ Os testes de eficiência devem, portanto, ser realizados em condições padronizadas e com um aerossol de teste padronizado.

O teste de eficiência consiste basicamente na medida das concentrações de aerossol a montante e a jusante do filtro, estabelecendo-se a eficiência de filtração pela relação:

$$\epsilon = \frac{C_m - C_j}{C_m}$$

onde ϵ é a eficiência do filtro; e

C_m e C_j são as concentrações a montante e a jusante do filtro, respectivamente.

A penetração é definida como o complemento à unidade, da eficiência de filtração, sendo ambas, na maioria das vezes, indicadas em termos percentuais.

Os métodos de teste de eficiência de filtração podem ser classificados em: gravimétrico, colorimétrico e fotométrico, conforme o princípio físico empregado no procedimento de determinação das concentrações a montante e a jusante do filtro.⁵

No método gravimétrico contudo, não é feita medida de concentração à jusante, sendo este método caracterizado por pesagem do aerossol de teste e pesagem do filtro sob teste. Uma massa de aerossol bem determinada é injeta-

da no fluxo de ar que atravessa o filtro. A diferença de massa deste, antes e após o ensaio indica a eficiência de retenção de partículas. Este método só se aplica a pré-filtros e filtros de condicionamento de ar, como indicam algumas normas como AFI e BS 2831:57 para teste de filtros de ar condicionado.⁵

O método colorimétrico pode ser utilizado para ensaio de filtros absolutos e se caracteriza pela utilização de aerossóis coloridos para a determinação de eficiências de filtração. Amostras do aerossol de ensaio são tomadas antes e após o filtro sob teste, em papéis de filtro de alta eficiência e por comparação da coloração dos dois papéis obtém-se o valor de eficiência de retenção.¹⁹ Nesta categoria se incluem os métodos descritos pelas normas BS 2831:57,⁵ com aerossol de azul de metileno e a norma AFNOR NF X 44 011 desenvolvida na França^{39,48} que utiliza aerossol de uranina, uma substância fluorescente, também chamada fluoresceína di-sódio.

No método fotométrico distinguem-se dois tipos de teste de filtro, diferentes quanto à propriedade das partículas que é medida. O método fotométrico baseado na dispersão de luz caracteriza-se pela medida da intensidade de luz espalhada por cada partícula em uma dada direção, ao passar em frente a um feixe de luz intenso.¹⁵ A espectrometria de emissão ou espectrofotometria de chama mede a intensidade de luz emitida por uma partícula quando esta é levada à temperatura de emissão das substâncias que a compõem.^{6,21,36} Em ambos os métodos, a intensidade de luz indica o tamanho da partícula e a frequência dos pulsos luminosos a concentração delas nas amostras analisadas. No primeiro tipo incluem-se as normas MIL-STD 282 de 1956, que utiliza aerossol de DOP; a DIN 24 184, de 1974 que utiliza aerossol de parafina e atmosférico; a ANSI N.101.1 de 1972, com aerossol de DOP; etc. No segundo tipo tem-se a norma BS 3928-65, com aerossol de NaCl e a norma EUROVENT 4/4.

Desse modo, a caracterização de um método de ensaio de filtros absolutos é feita pela indicação do aerossol padrão, modo como é produzido e método de medida das concentrações a montante e a jusante do filtro.

2.2.1 - AEROSSOL PADRÃO

A lista dos processos de produção de aerossóis é extensa podendo-se citar, como exemplos, a dispersão seca de um material sedimentado, a dispersão de uma suspensão líquida com subsequente evaporação do veículo, atomização de soluções, vaporização de líquidos com posterior condensação, etc.

Destes processos citados, somente a dispersão seca ou úmida (suspensão líquida) de partículas sólidas e a condensação controlada de vapor podem

produzir aerossóis monodispersos em quantidades suficientes para a realização de testes de eficiência de filtração, que é tecnicamente bastante difícil.

Os aerossóis monodispersos são preferíveis para a realização de ensaios de filtros, pois podem simplificar os métodos de medida e tornar as medidas mais acuradas. Por outro lado, aerossóis polidispersos, desde que com espectro conhecido, são adequados e apresentam, em geral, a vantagem da simplicidade de produção.

As definições técnicas dos termos 'mono-' e 'polidisperso' variam um pouco de autor para autor, mas são em geral dadas pela relação:³

$V < 0,15$ ou $0,20 \rightarrow$ aerossol monodisperso

$V > 0,15$ ou $0,20 \rightarrow$ aerossol polidisperso

onde V é o coeficiente de variação da distribuição de tamanhos das partículas do aerossol, dado pela expressão:

$$V = \frac{\sigma}{\mu}$$

onde μ é a média da distribuição; e σ é o seu desvio padrão.

Um aerossol monodisperso, além de ter partículas com tamanho aproximadamente igual, deve ser homogêneo quanto à composição química e forma das partículas.

O aerossol de NaCl descrito na norma BS 3928:65 é polidisperso, com partículas de tamanho variando desde 0,02 até 2 μm ,⁶ com diâmetro médio em massa (diâmetro equivalente) de 0,6 μm . Recentemente, com algumas alterações introduzidas, o aerossol de NaCl passou a ter tamanho entre 0,02 e 1,1 μm , e diâmetro médio equivalente em massa de 0,45 μm .²⁰ Esses aerossóis são produzidos por atomização pneumática de uma solução de NaCl com uma concentração de 2 a 10 % em massa.

A atomização pneumática de líquidos é um processo cujos mecanismos vêm sendo estudados desde o século passado, mas que não é ainda totalmente compreendido.³⁶ As gotas são formadas por transferência de energia de um jato de ar em alta velocidade, para o líquido atomizado. O jato é obtido pelo escoamento de ar comprimido através de um orifício. A expansão do gas é aproximadamente adiabática e provoca uma depressão nas vizinhanças do jato que gera um fluxo de líquido para o seu interior. Parte da energia transferida

ao líquido é consumida em acelerá-lo e parte é consumida na criação de superfície livre no líquido, ou seja, na produção de gotas.

Nukiyama & Tanasawa^{31,37} estabeleceram uma equação empírica para estimar o diâmetro médio das gotas produzidas por atomização pneumática, que se aplica para baixas taxas de produção de aerossóis e para baixas velocidades do jato. Uma estimativa mais acurada do diâmetro médio pode ser feita usando a equação semi-empírica obtida por Glukhov²³ que calcula o diâmetro da gota de massa média, em função das características do atomizador e das propriedades do líquido atomizado. A expressão é da forma:

$$d = D \cdot A \cdot \left\{ 1 - B \cdot \left(\frac{q_l}{q_g} \cdot \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^m \right\} : \left(\frac{g \cdot v \cdot D}{\sigma_l} \right)^{-0,45}$$

onde d é o diâmetro da gota de massa média;
 D é o diâmetro do orifício por onde flui o líquido;
 q_l e q_g são as vazões de líquido e gas, respectivamente;
 ρ_l e ρ_g são as densidades do líquido e do gas, respectivamente;
 v é a velocidade do gás; e
 A e B são funções do parâmetro adimensional:

$$\frac{\mu_l^2}{\rho_l \cdot \sigma_l \cdot D}$$

onde μ_l e σ_l são o coeficiente de viscosidade e a tensão superficial do líquido, respectivamente.

Segundo Glukhov ainda, m assume o valor 2 e B o valor 0,011, ambos obtidos experimentalmente.

Quando o parâmetro adimensional tem valor menor que 0,01, o que se verifica para líquidos com viscosidade próxima ou igual à da água, a constante A assume o valor 0,64.

A nuvem de gotas formadas se evapora rapidamente.^{12,21,25} Neste processo há a tendência ao estabelecimento de um equilíbrio entre o líquido da gota e a fase gasosa do mesmo material (vapor). Vários fatores influem no processo, tais como volatilidade do líquido, grau de saturação da fase gasosa na atmosfera circunvizinha, diâmetro da gota, etc.

Para um dado material, a pressão de vapor no equilíbrio, de uma pequena gota é maior que a pressão de vapor de uma superfície plana do mesmo lí

quido, à mesma temperatura, no equilíbrio. A razão entre os dois valores depende do inverso do diâmetro da gota, o que implica em que gotas menores evaporam-se mais rapidamente.

A presença de um sal dissolvido no líquido tem também influência no processo de evaporação das gotas.³⁸ No início do processo, a velocidade de evaporação é independente da presença de substâncias dissolvidas no líquido; num segundo estágio a taxa de evaporação é diminuída pelo abaixamento da pressão de vapor do líquido.

Em condições ambientais normais (20 °C e 80 % de umidade relativa) uma gota de água pura com diâmetro inicial de 20 µm se evapora em 2,35 segundos, enquanto que uma gota de 10 µm tem uma vida de somente 0,64 segundos.³⁸ A diminuição da taxa de evaporação da gota, pela presença de um sal dissolvido, não chega a alterar significativamente estes valores. Partindo de um tamanho de gota que existiria em equilíbrio a aproximadamente 100 % de umidade relativa, para uma solução de cloreto de sódio, o tempo de evaporação é de 0,135 segundos para um gota que forma um cristal de NaCl de 2 µm de diâmetro equivalente em massa. Para um cristal de 0,2 µm de diâmetro equivalente, o tempo de evaporação é da ordem de 1,3 ms.³⁸

O diâmetro equivalente em contagem de um cristal de cloreto de sódio formado pela evaporação da água de uma gota de solução com concentração C é obtido pela expressão:

$$d_c = d_g \cdot \sqrt[3]{(\pi \cdot \rho_g \cdot c) \div (6 \cdot \rho_c)}$$

onde d_c e d_g são os diâmetros equivalentes do cristal e da gota, respectivamente;

ρ_g e ρ_c são as densidades da gota e do cristal; e

c é a concentração do sal, em termos de fração de massa da solução.

O tamanho das partículas de aerossol de NaCl produzidas por atomização pneumática é também determinado por outros fatores. O principal deles é a eliminação de gotas grandes da névoa inicial por um processo de impactação na superfície interna do atomizador. Processos de coagulação devido à agitação térmica das moléculas e partículas do sistema, deposição gravitacional e deposição por difusão podem ser desprezados pela pequena influência que exercem na determinação do espectro final do aerossol, frente à intensidade do primeiro fenômeno de separação.

As variações no espectro de tamanho do aerossol produzido por atomização pneumática, devido ao fenômeno de separação por impactação na parede do gerador, foram estudadas por Glukhov.²² Seus resultados não estão, contudo, disponíveis para consulta. Não temos, portanto, meios de prever parâmetros da distribuição de tamanho das partículas do aerossol de NaCl, exceto em que o diâmetro médio em massa deve ser menor que um dado valor, obtido pela aplicação das expressões para calcular o diâmetro médio da nuvem de gotas e o diâmetro equivalente do cristal para um dado diâmetro de gota.

2.2.2 - AMOSTRAGEM DE AEROSSÓIS

Dos vários métodos de análise de aerossóis já citados, alguns se prestam para as medidas de concentração de partículas em bancos de prova de filtros, sendo as qualidades requeridas para o método: rapidez de resposta, capacidade de distinguir aerossóis diferentes, tamanhos de partículas diferentes, grande sensibilidade para poder medir baixas concentrações de aerossol a jusante dos filtros e grande capacidade para poder medir as altas concentrações a montante, etc.

Em geral, equipamentos que satisfazem algumas dessas exigências são utilizados nos ensaios de filtros porque o custo é um fator importante na seleção dos métodos de amostragem dos aerossóis.

Para as medidas de concentração do aerossol polidisperso de NaCl, descrito nas normas que adotam o método da chama de sódio, são usados dispositivos que medem a massa total de partículas em um dado volume de ar amostrado. A simplicidade é que determina a escolha destes dispositivos, pois não distinguem partículas de tamanhos diferentes. O princípio de funcionamento do método de medida é o mesmo dos espectrofotômetros de chama, citados nos métodos de teste de eficiência, e que serão descritos com maior detalhe mais adiante.

Os valores de concentração de aerossóis determinados, seja por espectrofotometria de chama, seja pela medida da massa total de aerossol, estão sujeitos a erros provenientes de alguns fatores que alteram a concentração e distribuição de tamanhos do aerossol. Os fatores que se pode distinguir como mais importantes são: erros sistemáticos do instrumento de medida, que podem ser identificados e avaliados por comparação dos seus resultados com os apresentados por outro método de medida; amostragem do aerossol de maneira não isocinética, o que pode ser evitado pelo desenho adequado das sondas de amostragem; perda de partículas por deposição nos condutos das tomadas de amostragem, o que pode ser avaliado e minimizado.

a) Impactação: a impactação é um meio simples de fixar as partículas de um aerossol sobre uma superfície para que possam ser analisadas quanto ao seu tamanho e número.^{4,27,28} Essa análise é feita por microscopia eletrônica e objetiva determinar o espectro granulométrico do aerossol, para comparação com os resultados de espectrofotometria.

Neste processo, uma amostra de ar a ser analisada em seu conteúdo de partículas em suspensão, é introduzida em um orifício cilíndrico ou de seção retangular, onde sua velocidade pode atingir valores próximos às do som no ar.⁴ Ao emergir, choca-se contra uma superfície adjacente, plana e perpendicular ao eixo do orifício. As partículas com massa acima de um certo valor possuem inércia suficiente para desviar das linhas de fluxo do ar, no momento em que ocorre a deformação do jato, indo de encontro à superfície e fixando-se nela.

A eficiência com que ocorre a fixação das partículas depende de fatores tais como distância entre o orifício e a superfície coletora, velocidade do ar ao emergir do orifício, tamanho e massa das partículas do aerossol, viscosidade do ar, etc.²⁷ Esta dependência está quantificada no chamado parâmetro de impactação do qual a eficiência de captura é função. Atualmente este parâmetro é conhecido como número de Stokes Stk , e é escrito na forma:

$$Stk = \frac{d_A \cdot \rho \cdot C \cdot v}{18 \cdot \mu \cdot D}$$

onde d_A é o diâmetro aerodinâmico equivalente das partículas;
 ρ é a densidade das partículas;
 C é o fator de 'escorregamento' de Cunningham;
 μ é o coeficiente de viscosidade do ar; e
 D é o diâmetro do orifício.

O fator de 'escorregamento' é necessário para corrigir a lei de Stokes do movimento de uma esfera num fluido viscoso. Este fator de correção é dependente do diâmetro da partícula, e se torna importante quando este é da mesma ordem de grandeza do livre caminho médio das moléculas do fluido. Para uma dada temperatura e pressão nas vizinhanças do jato, o livre caminho médio das moléculas pode ser calculado e o valor de C avaliado para cada diâmetro de partícula, pelas expressões abaixo:²⁸

$$C = 1 + \frac{2 \cdot \lambda}{d_A} \cdot \left\{ 1,2 + 0,4 \cdot \exp(-0,45 \cdot \frac{d_A}{\lambda}) \right\}$$

$$\lambda = \frac{1,75 \times 10^{-5} \cdot T}{P}$$

onde λ é o livre caminho médio das moléculas do ar;
 T é a temperatura absoluta do gás, em K; e
 P é a pressão do gás, em mm Hg.

Para valores de \sqrt{Stk} acima de 0,5 ou 0,6 dependendo do espaçamento entre o orifício e a superfície coletora, as partículas correspondentes são capturadas com eficiência próxima a 100 % e para valores abaixo de 0,3 ou 0,4 conforme o espaçamento, a eficiência de impactação torna-se muito pequena.²⁷

Na Figura 7 mostra-se esquematicamente as linhas de fluxo do ar na saída do orifício e sua deformação devido à presença da superfície coletora, com os valores de velocidade relativa indicados. Na Figura 8 estão expostos alguns gráficos da relação entre a eficiência de captura e o valor do parâmetro de impactação para valores diferentes da razão entre diâmetro do orifício e espaçamento da superfície coletora.

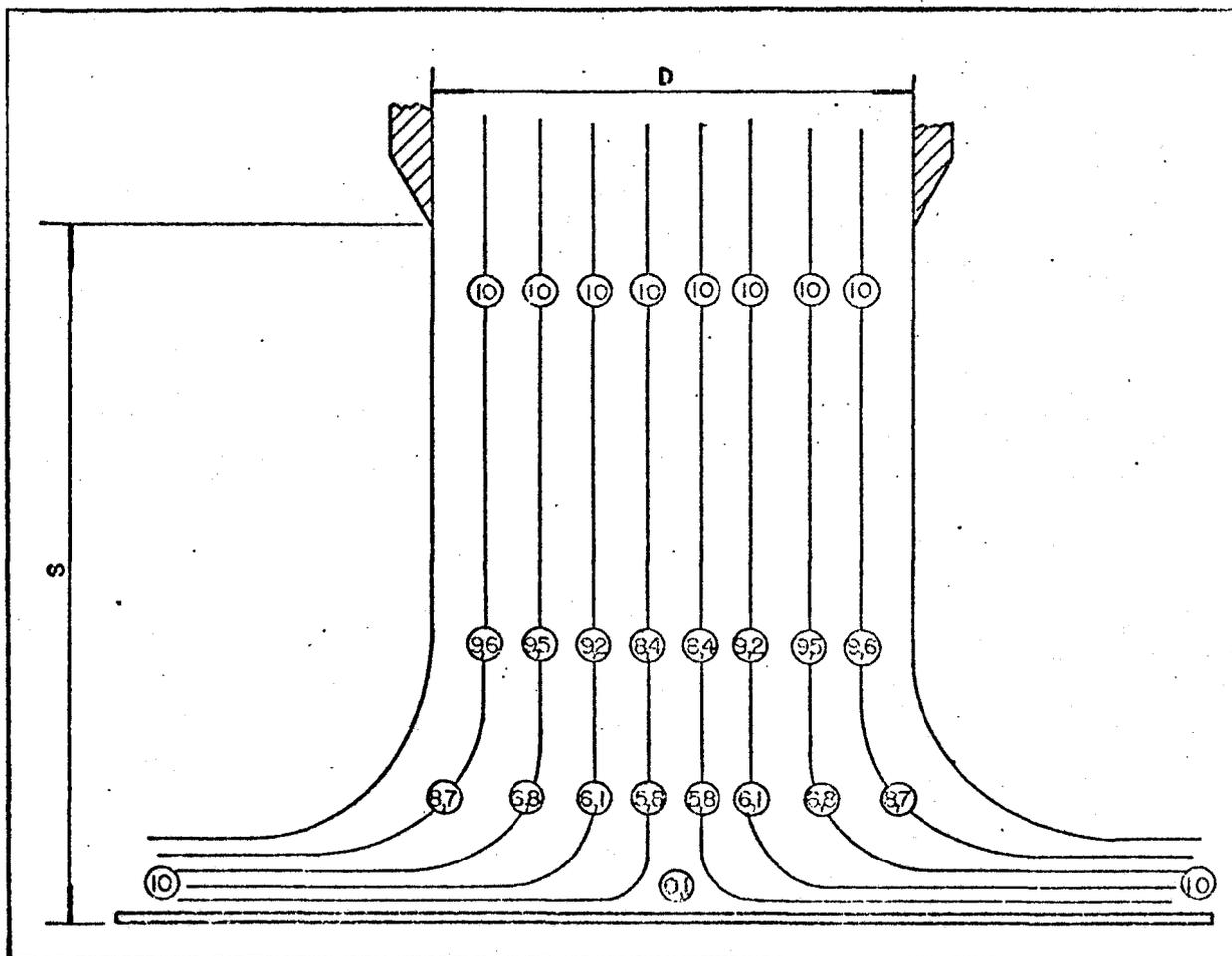


Figura 7: Linhas de fluxo de ar na saída de um orifício de impactação, com indicação das velocidades relativas em cada ponto. D = diâmetro do orifício e S = espaçamento à superfície coletora.⁴⁶

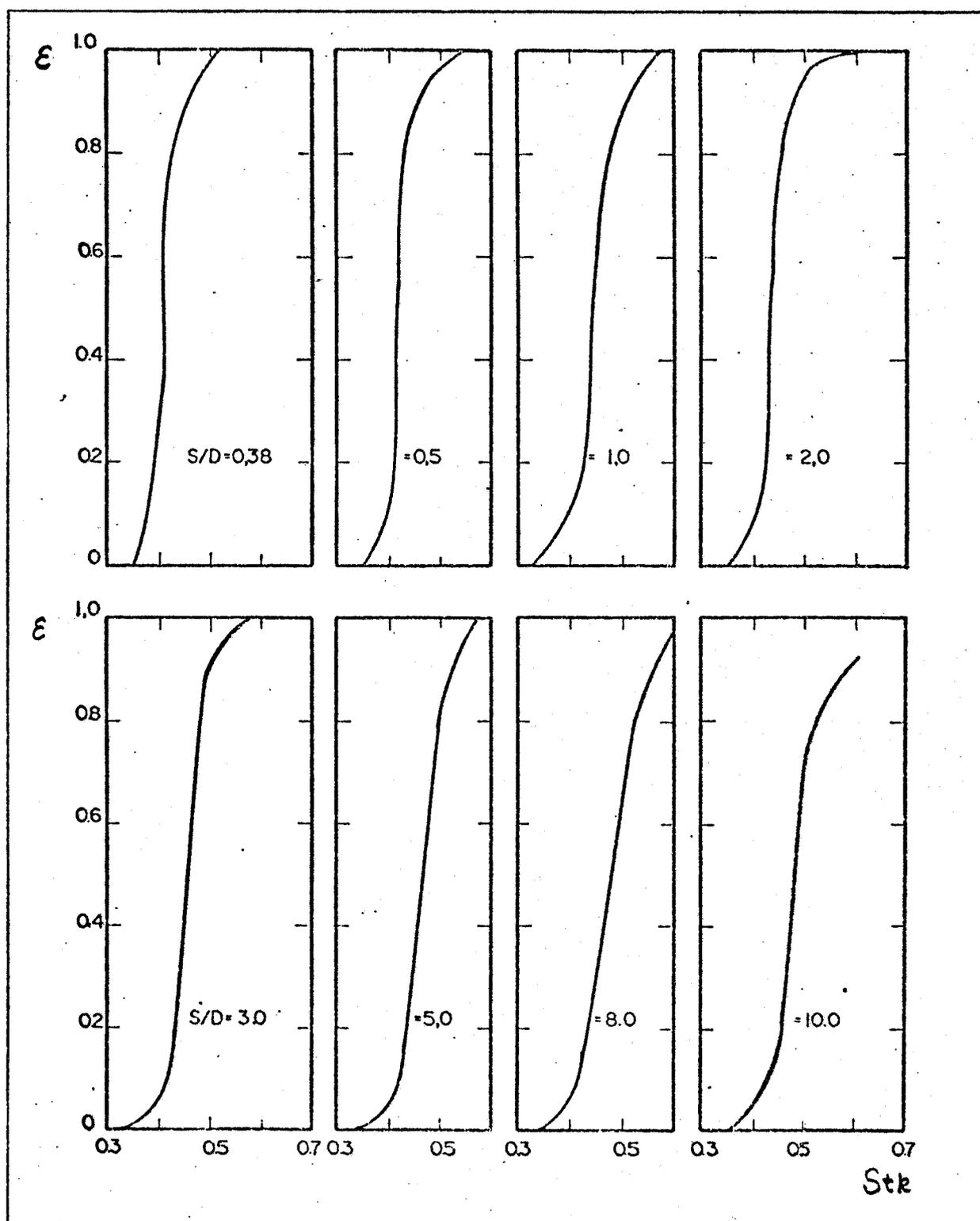


Figura 8: Curvas experimentais de eficiência de captura por impactação em função do número de Stk , para valores diferentes de S/D .³⁵

b) Amostragem isocinética: amostras representativas de aerossóis que se movem num fluxo de gás devem ser obtidas ajustando a velocidade de amostragem de modo a igualá-la à velocidade do fluxo de gás.^{32,45} Essa condição de amostragem em que a velocidade do fluido se mantém inalterada à entrada da sonda de amostragem chama-se 'isocinética'. As consequências da amostra-

gem não isocinética são os erros na determinação da concentração de massa e na determinação da distribuição de tamanhos das partículas do aerossol amostrado. Este erro surge em consequência da diferença de inércia que apresentam partículas com tamanho diferente e com comportamento aerodinâmico diferente. Na Figura 9 são expostas esquematicamente três situações: uma de amostragem isocinética e duas de amostragem não isocinética. As partículas com grande inércia não acompanham as variações de direção das linhas de fluxo nas proximidades da sonda de amostragem. Se a velocidade do ar na entrada da sonda for maior que a velocidade do fluxo principal, a quantidade de partículas

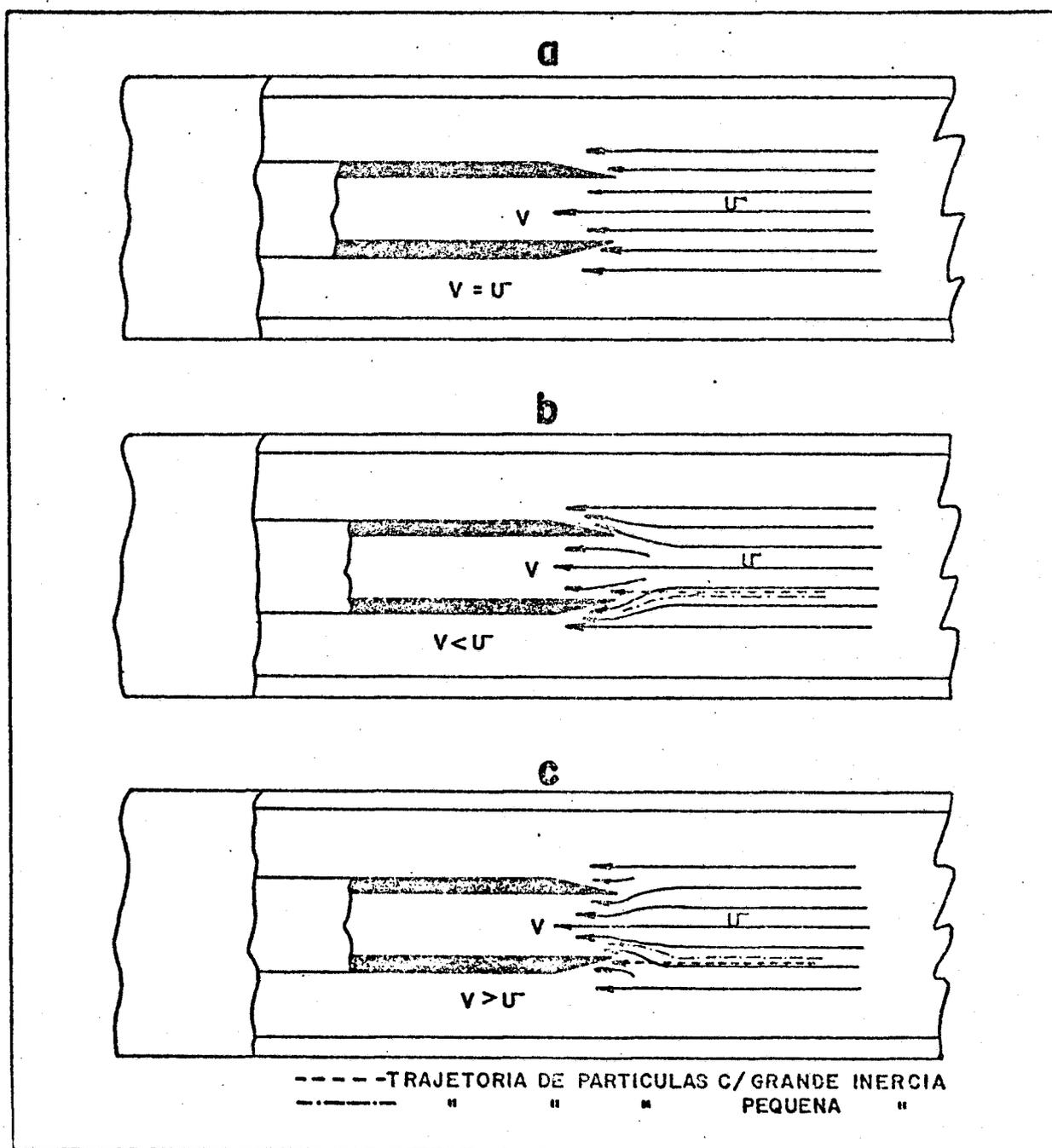


Figura 9: Condições de amostragem para várias relações entre as velocidades de amostragem V e do fluxo principal U : a) condição isocinética; e b) e c) condições de amostragem não isocinética.

pequenas na amostra será relativamente maior que na população amostrada. Ocorre uma diminuição relativa do número de partículas pequenas na amostra no caso em que a velocidade de amostragem for menor que a do fluxo principal.

Para uma razão entre as velocidades de amostragem e do fluxo principal que se mantenha entre os valores 0,25 e 4, e para partículas de tamanho inferior a 1 μm , os erros oriundos de uma amostragem não isocinética se mantêm inferiores a 10 %.³⁵ A Figura 10 mostra os gráficos da relação entre as concentrações observadas e reais em função da relação de velocidades dos fluxos de amostragem e do conduto principal, para vários tamanhos de partículas, representados pelos números de Stokes.

Devem ser tomados, contudo, cuidados no desenho da sonda de amostragem para minimizar as perturbações no fluxo de ar, pela presença da sonda. Para garantir velocidades iguais, o diâmetro da sonda de amostragem deve ser dimensionado de modo a que a razão entre os diâmetros da sonda e do conduto do fluxo principal obedeça a relação:

$$\frac{d_s}{d_p} = \sqrt{q/Q}$$

onde d_s e d_p são os diâmetros da sonda e do conduto do fluxo principal;
 q e Q são as vazões volumétricas da sonda e do conduto principal, respectivamente.

c) Deposição de partículas em condutos: as partículas sólidas e líquidas em suspensão em um gás estão sujeitas a quatro tipos de forças:⁴³ forças devido à presença de campos gravitacional, elétrico e magnético; forças devido à inércia da partícula e ao movimento do fluido, como atrito, força centrífuga, transporte convectivo, etc.; forças devido a processos estocásticos, como difusão Browniana, presença de gradientes térmicos ou de concentração de espécies no gás; outros processos como fotoforese, movimento sônico e outros.

Os movimentos resultantes da ação deste conjunto de forças podem fazer com que as partículas toquem a superfície interna dos condutos por onde flui o aerossol. Após contato entre a partícula e a superfície as forças de aderência são, em geral, maiores que as forças que tendem a ressuspender a partícula.^{29,42} A partícula é, portanto, retirada do fluxo.

Existe uma grande dependência entre as forças que agem sobre a partícula em suspensão e o diâmetro desta. Portanto, este processo de retirada

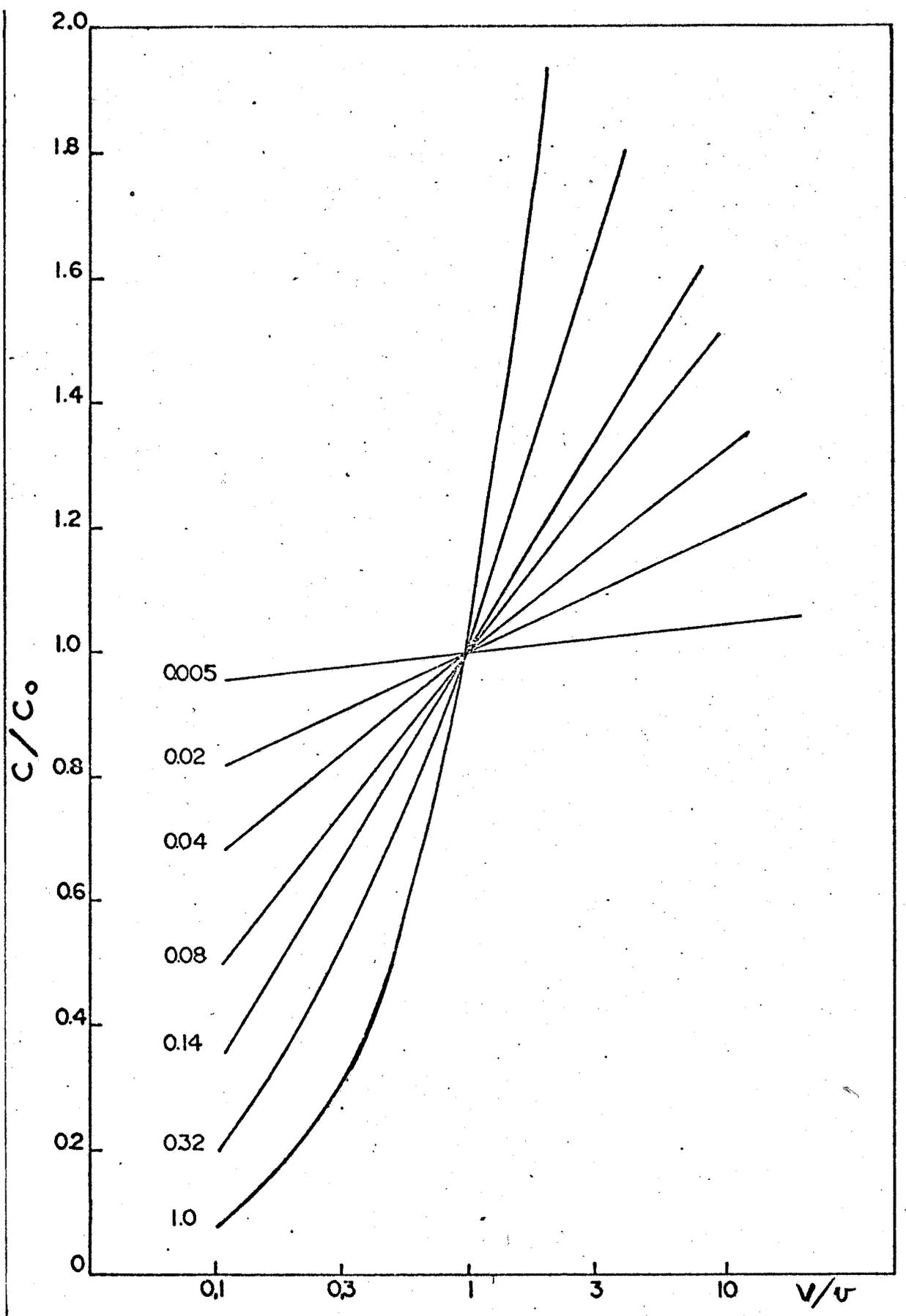


Figura 10: Relação entre as concentrações observadas e reais em função da relação de velocidades dos fluxos de amostragem e do conduto principal, para vários valores do número de Stokes.

de partículas do fluxo, se ocorre nos condutos de amostragem, altera a distribuição de tamanho das partículas do aerossol amostrado além de alterar o valor real das concentrações.

Por outro lado, a complexidade das forças envolvidas no processo de deposição impede a elaboração de um estudo teórico completo do fenômeno. Modelos simplificados mostram que para partículas de tamanho superior a $1 \mu\text{m}$ os efeitos de deposição gravitacional e/ou turbulenta são os mais importantes, prevalecendo para partículas pequenas a ação de processos estocásticos.⁴²

Uma série de cuidados com as sondas de amostragem podem minimizar as perdas por deposição nos condutos. A utilização de tubos tão curtos quanto possível é a medida de maior eficácia. Além disso, o uso de condutos com diâmetro tal que o fluxo seja laminar, o uso de tubos metálicos, e, no caso de duplicação de condutos, o uso de tubos do mesmo comprimento, são métodos eficientes de reduzir as perdas ou torná-las inoperantes.

3. EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

As alterações introduzidas no gerador de aerossóis e a utilização de um espectrofotômetro em lugar de um fotômetro, para a detecção dos aerossóis e medidas de concentração e granulometria, permitiram a introdução de modificações em todo o banco de prova de filtros, como túnel de vento mais curto, inexistência de uma caixa de geradores de aerossol intercalada no conduto principal, como prevêm as normas BSI e EUROVENT, etc.

Os dispositivos, equipamentos e instrumentos utilizados nos ensaios serão descritos individualmente, a seguir, quanto às suas dimensões e demais características. São citados também, a maneira como foram realizadas algumas medidas e o tratamento matemático e estatísticos dos resultados obtidos.

3.1 - DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

O ensaio de filtros absolutos requer um banco de prova, um gerador de aerossóis e um instrumento de medida das concentrações de aerossol.

Para o estudo do comportamento do gerador de aerossóis em função dos parâmetros de operação foi utilizado um impactador de dois estágios, um porta-filtro para ensaio de amostras de papel de filtro, além de microscópio eletrônico e balança analítica.

3.1.1 - BANCO DE PROVA

O banco de prova de filtros é constituído basicamente por um túnel de vento, com ventilador e porta-filtros, munidos de dispositivos para medidas de pressão e vazão de ar e de tomadas de amostragem de aerossol a montante e a jusante do porta-filtro, como mostra a Figura 11a.

O túnel de vento é constituído de um tubo plástico transparente de 310 mm de diâmetro e 0,2 mm de espessura. O comprimento da secção a montante do porta-filtro é de 7 m de comprimento, a secção a jusante tem 4 m de comprimento, havendo um cotovelo de 90° em cada secção com um raio de curvatura de 620 mm.

O ventilador é do tipo centrífugo e tem capacidade para fornecer $1.000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a uma pressão de 40 mm H₂O, operando com um motor elétrico de 1 HP.

O porta-filtros é constituído por uma caixa metálica de dimensões adequadas para receber filtros absolutos de 600 mm x 600 mm x 290 mm e está ligado ao conduto principal por dois cones de latão de 250 mm de comprimento

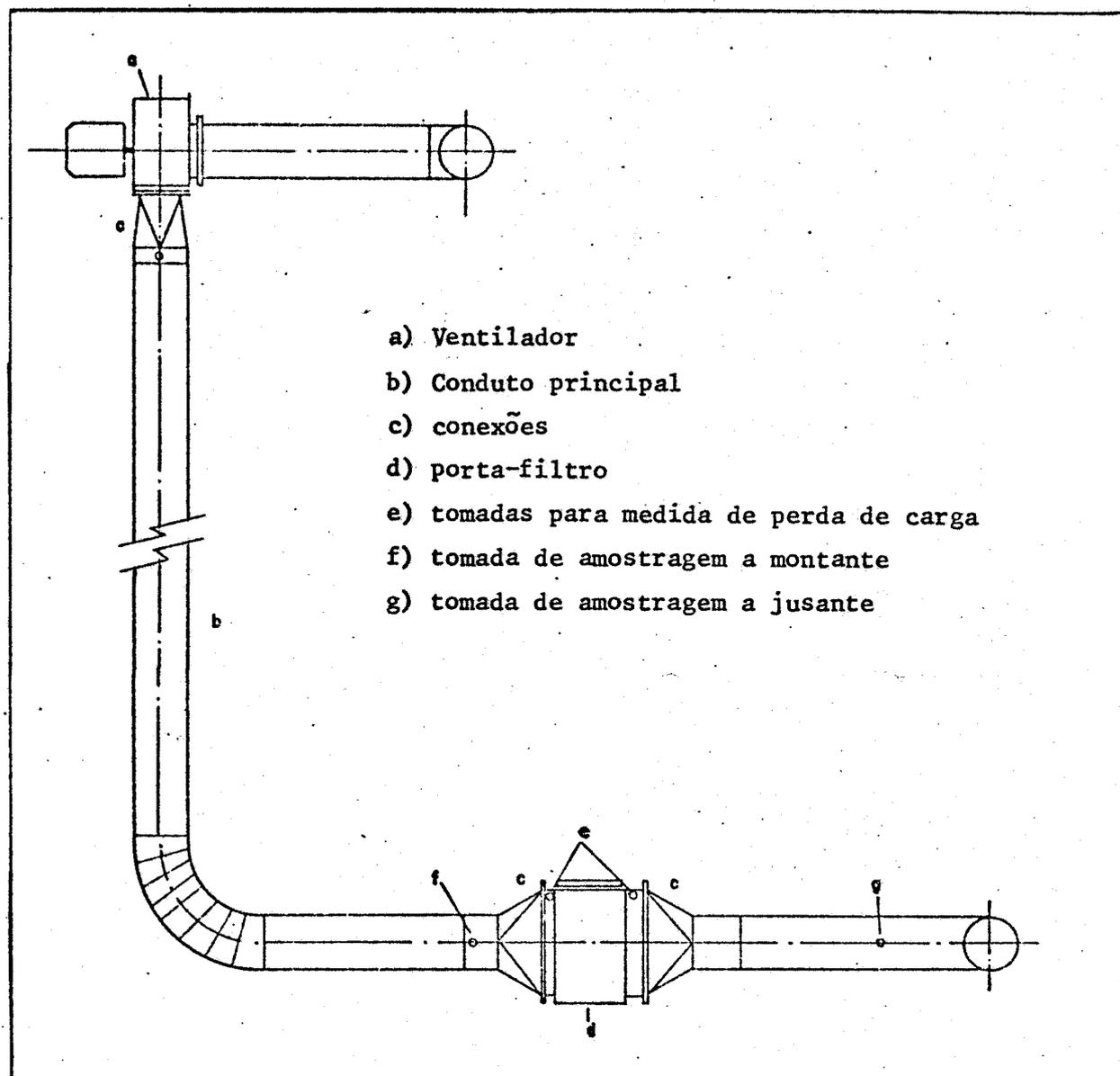


Figura 11: Banco de prova de filtros absolutos

cada um. Os filtros são introduzidos por uma abertura que se fecha hermeticamente e há no interior da caixa uma flange móvel que se ajusta ao filtro e o mantém comprimido contra uma das paredes internas da caixa. A Figura 11b é uma fotografia da caixa porta-filtros recebendo um filtro absoluto para teste.

A montante e a jusante existem aberturas onde são introduzidas tomadas para medida da perda de carga no filtro sob teste. Esta medida é realizada com um micromanômetro de tubo inclinado marca Dwyer modelo Mark II.

As tomadas de amostragem de aerossol estão montadas a 400 mm de distância da face anterior do filtro e a 2.000 mm da face posterior. São constituídos por tubos de aço inox de 8 mm de diâmetro, dobrados em 'L' segundo mostra a Figura 12, sendo montados no túnel de vento de modo a que o ramo mais curto seja paralelo e coaxial ao conduto principal, com a abertura voltada na direção contrária ao fluxo de ar.

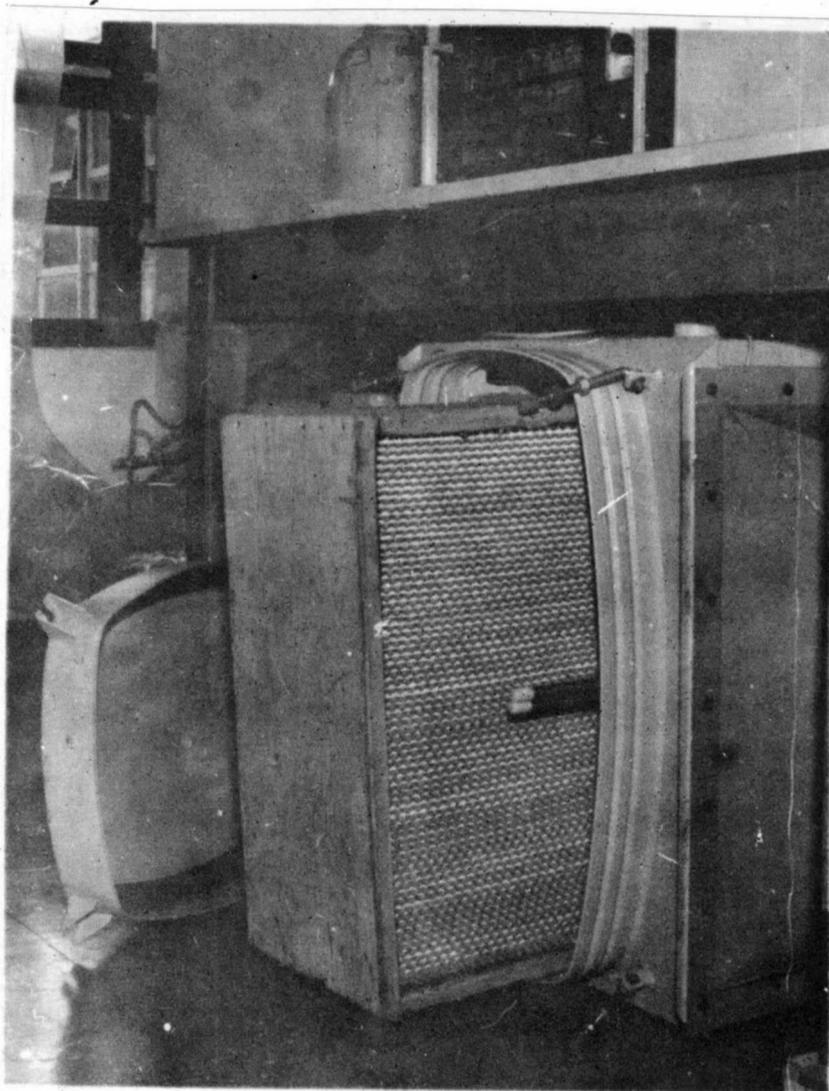


Figura 11b: Porta-filtro do banco de prova.

As dimensões da sonda de amostragem foram fixadas objetivando a obtenção de mesma velocidade de passagem do ar no conduto principal e no conduto de amostragem. A ligação destas tomadas com o espectrofotômetro é feita usando-se dois tubos de borracha de mesmo comprimento e diâmetro, para que as perdas por deposição nos condutos não introduzam erros na determinação da eficiência dos filtros.

As medidas de vazão do túnel de vento foram realizadas com um anemômetro marca Casella modelo T16200, que opera na faixa de velocidade do ar de 50 a 1.000 m min^{-1} . Para as medidas realizadas numa secção do conduto de 310 mm de diâmetro, os limites de operação correspondentes em termos de vazão são 212 a 4530 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$.

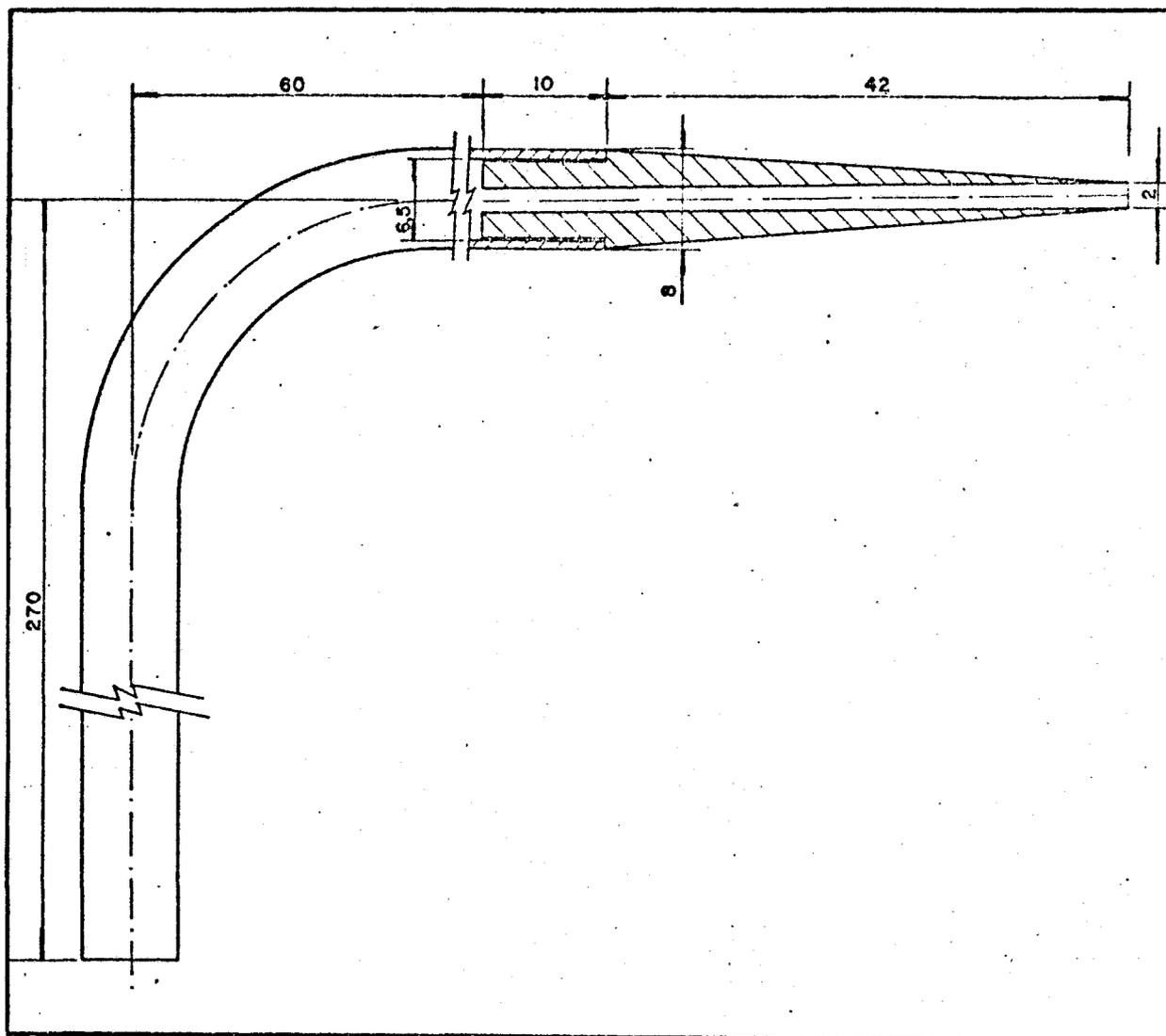


Figura 12: Tomada de amostragem isocinética, com dimensões características, (mm)

3.1.2 - GERADOR DE AEROSSÓIS

O gerador de aerossóis é do tipo atomizador pneumático e produz uma nuvem de gotas a partir de uma solução de cloreto de sódio. Após evaporação do solvente, resta um aerossol formado por cristais de NaCl. Na Figura 13 está exposto o desenho do atomizador com suas dimensões críticas.

O gás sob pressão é descarregado através de 6 orifícios de 0,5 mm de diâmetro, cujos eixos subentendem ângulos de 60° , situados em um plano perpendicular ao eixo do atomizador. A diminuição da pressão nas vizinhanças do jato, faz com que a solução flua em direção a ele. A velocidade alcançada pela nuvem de gotas formada é suficientemente grande para fazer com que as gotas maiores se choquem contra a parede interna do gerador, voltando assim para a solução. Um segundo separador de gotas grandes é montado à saída do

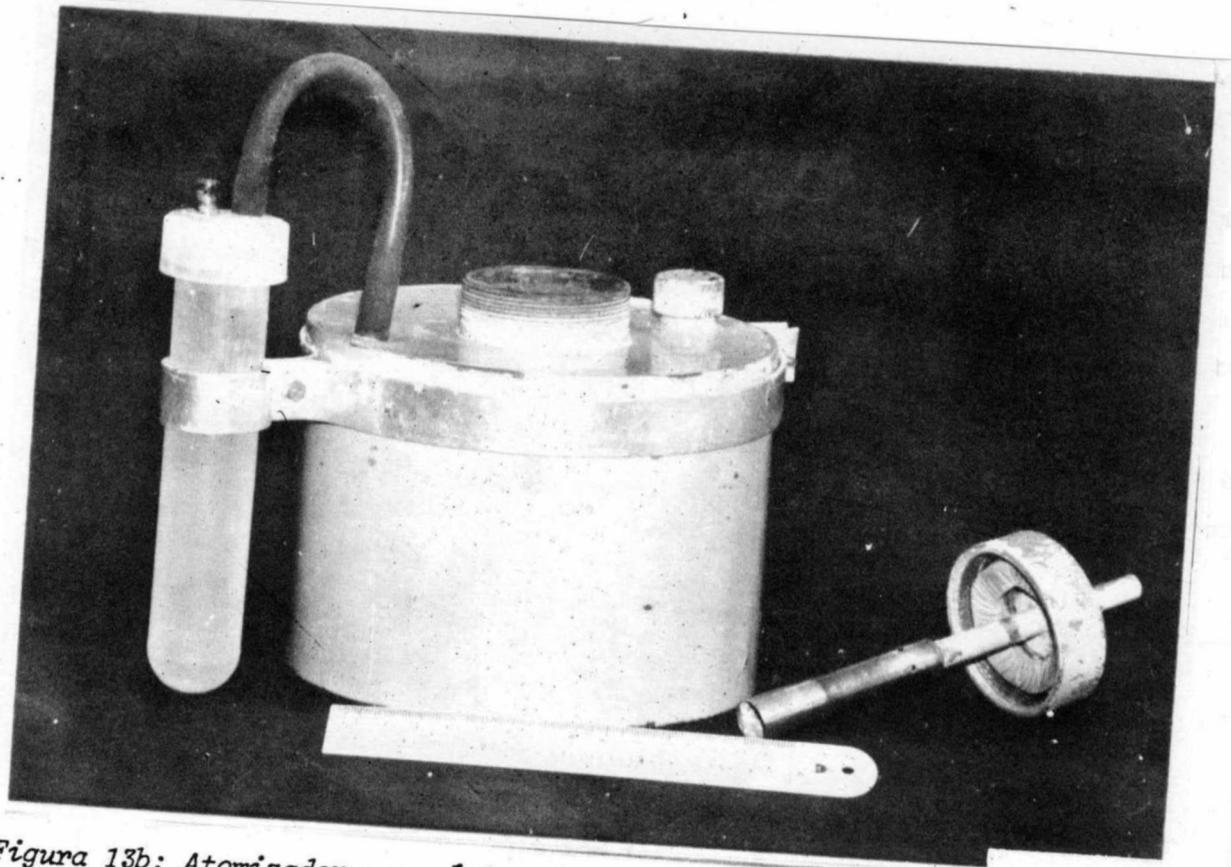


Figura 13b: Atomizador pneumático da solução de NaCl.

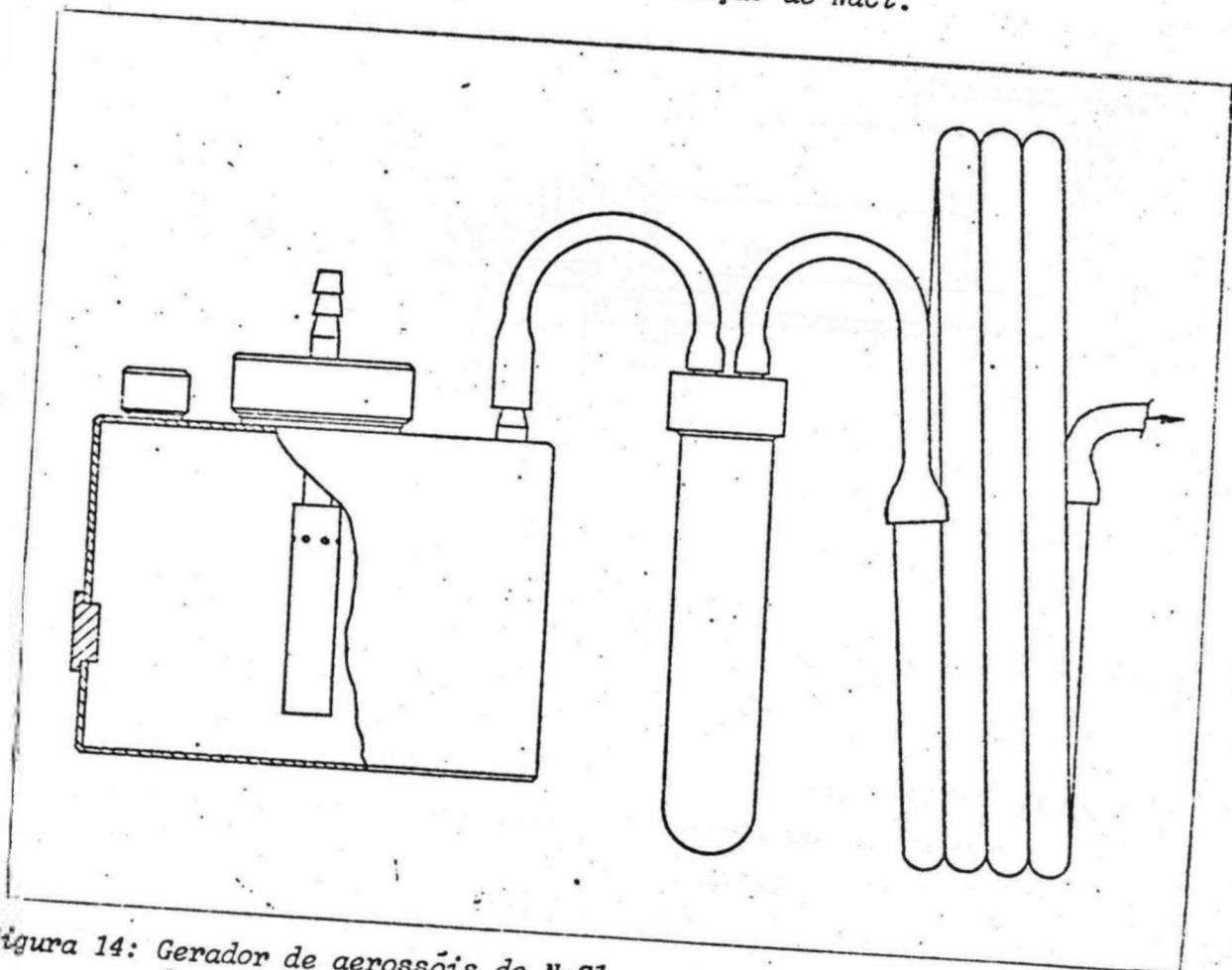


Figura 14: Gerador de aerossóis de NaCl, mostrando o atomizador, o separador de gotas e o tubo secador.

3.1.3 - ESPECTROFOTÔMETRO SARTORIUS

As medidas de concentração de aerossol de teste no ensaio de eficiência de filtros, assim como a determinação do espectro granulométrico produzido pelo gerador de aerossóis de cloreto de sódio foram feitas com um espectrofotômetro de chama de hidrogênio marca Sartorius. O princípio de funcionamento deste aparelho está baseado na emissão de luz pelos constituintes químicos da partícula de aerossol quando esta é levada à temperatura de excitação das moléculas destes constituintes.^{41,44}

As partículas de aerossol são introduzidas individualmente em uma câmara de aquecimento, que contém um queimador de chama de hidrogênio, como mostra a Figura 15.

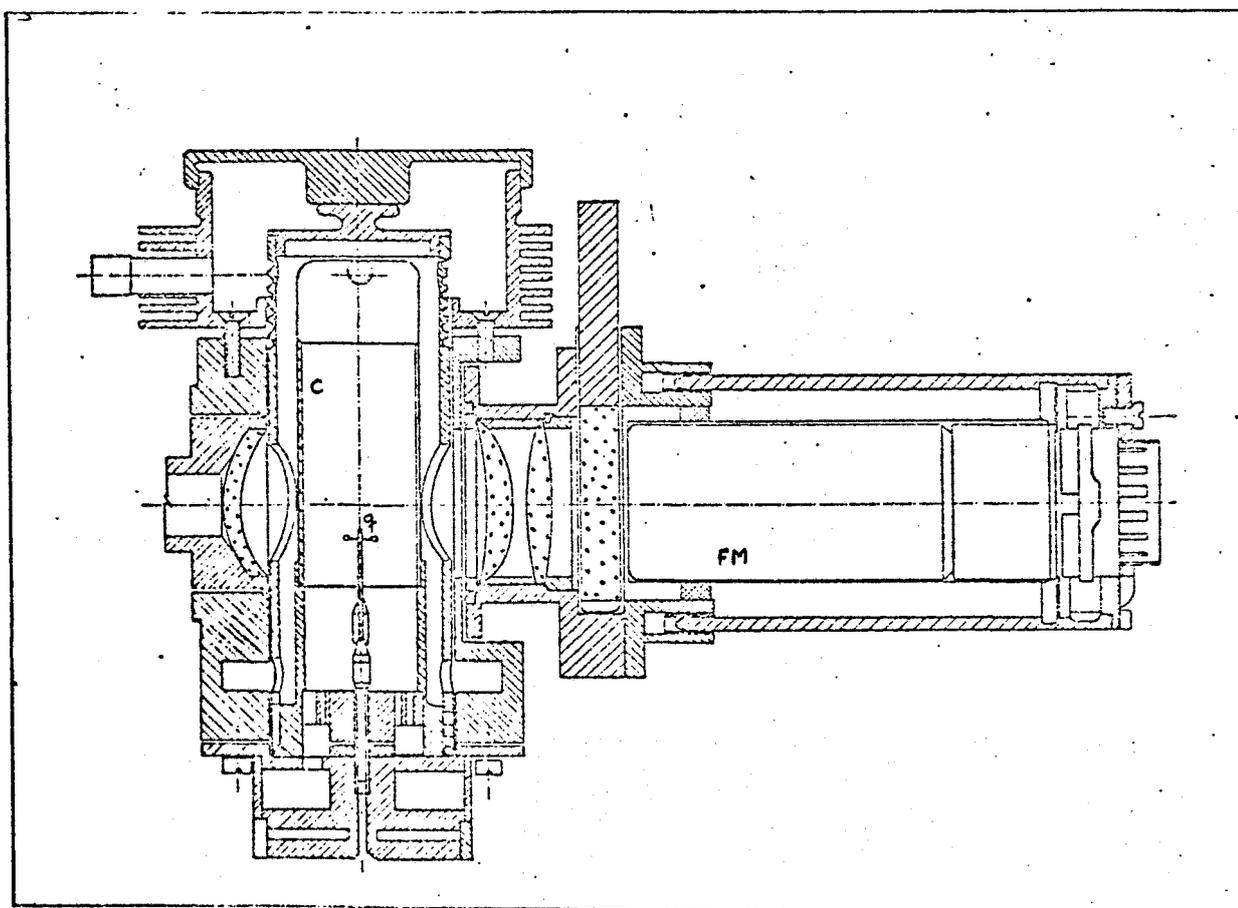


Figura 15: Câmara de aquecimento, C, mostrando o queimador de hidrogênio, q, e a fotomultiplicadora, FM.

Este queimador produz uma chama de seção elíptica que proporciona condições térmicas extremamente estáveis. Os átomos ou moléculas da partícula são aquecidos na chama até sua temperatura de excitação e emitem, durante este processo um pulso de luz, cuja estrutura espectral é característica da composição química da partícula. A intensidade de luz emitida é proporcional à massa

da partícula, de modo que se pode estabelecer uma relação do tipo:⁴¹

$$I = k \cdot d^3$$

onde I é a intensidade do pulso luminoso emitido pela partícula;
 k é uma constante de proporcionalidade; e
 d é o diâmetro equivalente em massa da partícula.

O sinal luminoso passa através de um filtro óptico do tipo duplo-interferencial que seleciona um determinado comprimento de onda. O sinal incide então em um tubo fotomultiplicador que o converte em um pulso elétrico. Este é analisado em um analisador de altura de pulsos com saída em 10 canais, estando esquematizado na Figura 16b os circuitos do espectrofotômetro. A Figura 16a é uma fotografia do painel frontal do aparelho.

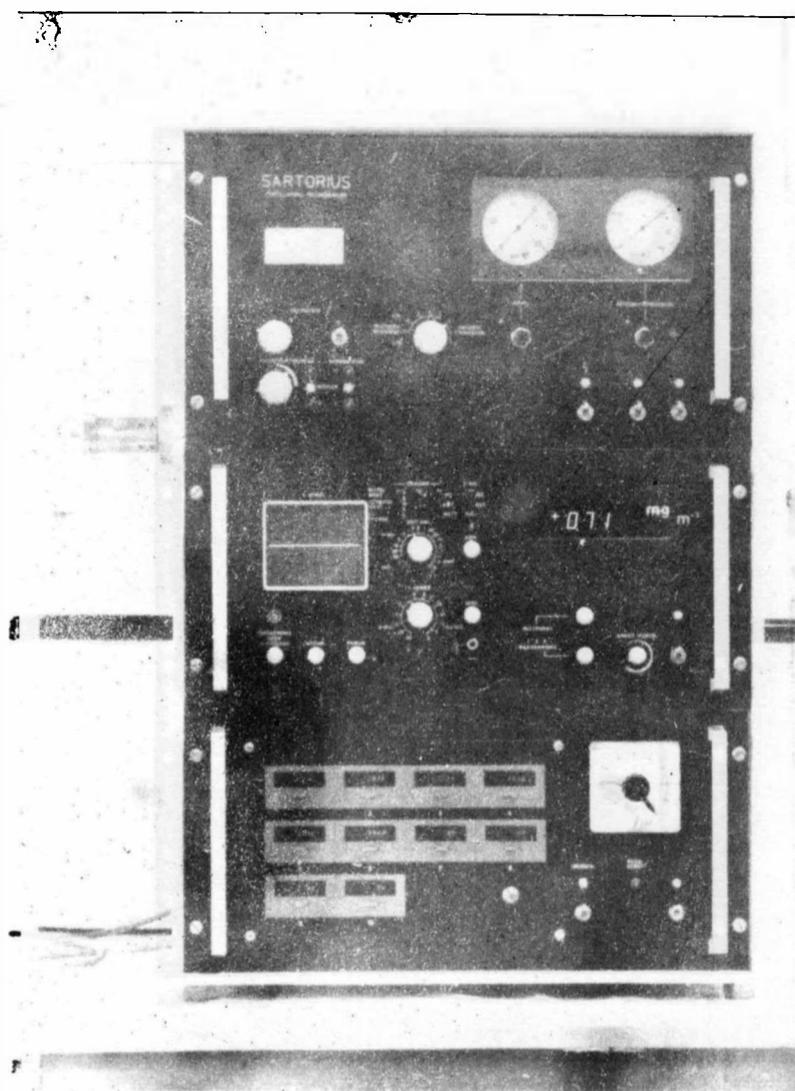


Figura 16a: Painel frontal do Espectrofotômetro Sartorius.

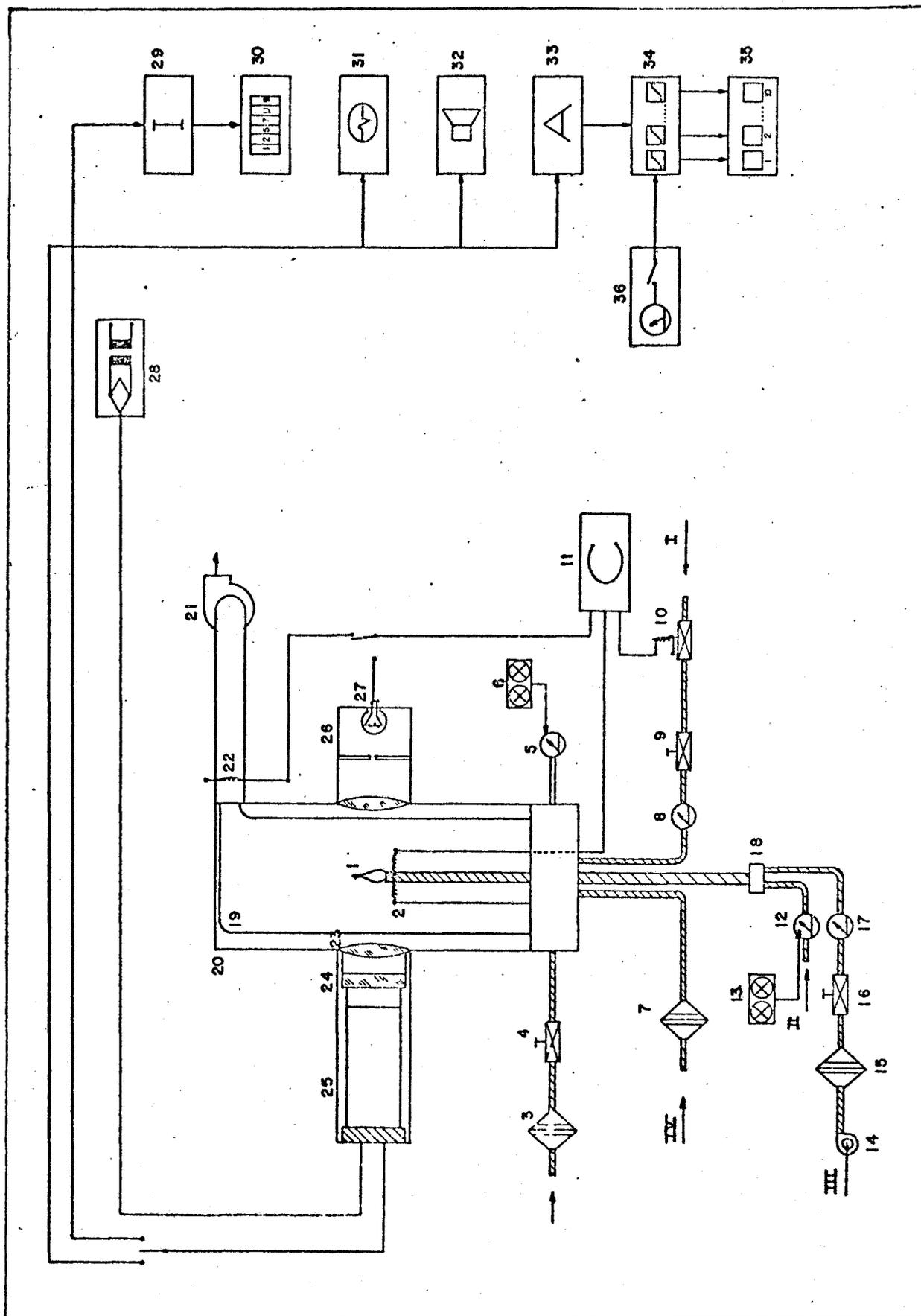


Figura 16b: Esquema geral dos circuitos do espectrofotômetro Sartorius. Na página seguinte estão relacionados os componentes numerados na figura.

1. *Chama de hidrogênio*
2. *Filamento helicoidal para ignição do hidrogênio*
3. *Filtro de entrada de ar para refrigeração e combustão*
4. *Válvula reguladora da depressão da câmara*
5. *Medidor de depressão da câmara*
6. *Indicador de depressão da câmara*
7. *Filtro de entrada de ar de refrigeração*
8. *Micromanômetro de controle da vazão de hidrogênio*
9. *Válvula reguladora da vazão de hidrogênio*
10. *Válvula solenóide*
11. *Controle automático da entrada de hidrogênio*
12. *Medidor da pressão de entrada do aerossol*
13. *Indicador da pressão de entrada do aerossol*
14. *Ventilador para o ar de diluição do aerossol*
15. *Filtro de entrada de ar de diluição*
16. *Válvula reguladora de vazão do ar de diluição*
17. *Micromanômetro de controle da vazão de ar de diluição*
18. *Câmara de diluição do aerossol*
19. *Câmara de combustão de vidro*
20. *Cilindro de refrigeração da câmara de combustão*
21. *Ventilador para despressurizar a câmara de combustão*
22. *Elemento termossensível para controle do filamento de ignição*
23. *Lentes condensadoras ópticas*
24. *Monocromador tipo duplo-interferencial*
25. *Fotomultiplicadora*
26. *Diafragma do dispositivo de calibração da fotomultiplicadora*
27. *Gerador de pulsos luminosos*
28. *Fonte de alta tensão*
29. *Integrador de pulsos da fotomultiplicadora*
30. *Voltímetro digital indicador de concentração de aerossol*
31. *Osciloscópio*
32. *Sinalizador acústico de pulsos*
33. *Analizador de altura de pulsos*
34. *Analizador multicanal*
35. *Contadores digitais*
36. *Cronômetro para controle automático do tempo de contagem*

Figura 16b: Relação dos componentes do espectrofotômetro Sartorius.

A relação sinal-ruído do sistema é tal que permite a detecção de partículas com diâmetro equivalente em massa acima de 0,035 μm . O filtro óptico utilizado, com banda passante de 589 nm, é adequado para a análise de aerossóis de cloreto de sódio, fluoresceína di-sódio, etc.

O tempo mínimo de intervalo entre a entrada de duas partículas de aerossol consecutivas, na câmara de combustão, para que dêem origem a dois pulsos luminosos detectáveis é 20 ms. Se o intervalo entre a entrada de uma partícula e outra é menor que este, ocorrerá um erro de coincidência, sendo contada uma só partícula. Como a vazão do sistema de aerossol do espectrofotômetro é 150 $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$ a taxa de contagem total do aparelho está limitada a 3.000 partículas por minuto, ou seja, está limitada a uma concentração de partículas no ar amostrado de 20 partículas por cm^3 . Esta limitação é superada pela diluição do aerossol, no caso de maiores concentrações, havendo incorporado ao espectrofotômetro um sistema de diluição variável de 0 a 100 %.

3.1.4 - IMPACTADOR

O objetivo da utilização de um impactador para análise granulométrica do aerossol foi tentar estabelecer uma comparação entre os resultados obtidos com o espectrofotômetro e outro método de espectrometria de aerossóis. A finalidade é determinar com exatidão o espectro de aerossóis produzido pelo gerador.

Como os valores de eficiência de impactação baseados nos modelos teóricos já descritos estão sujeitos a erros, devido a inexatidões nas dimensões do impactador e em seus parâmetros de operação, surgindo daí erros na determinação do espectro de tamanho das partículas do aerossol, construiu-se um impactador de dois estágios com todas as dimensões iguais para terem mesma eficiência de captura. Na Figura 17 está exposto o desenho do impactador. Esta eficiência pode ser determinada experimentalmente com o próprio aerossol que está sendo estudado. Para partículas com tamanho d_i a eficiência de captura é dada pela expressão:

$$\epsilon_i = \frac{n_{1i} - n_{2i}}{n_{1i}}$$

onde n_1 e n_2 são o número de partículas de tamanho d_i no primeiro e segundo estágios do impactador respectivamente.

A superfície de impactação foi preparada cobrindo-se uma tela porta-amostra de microscopia eletrônica com um filme de Parlodio, e montada sobre

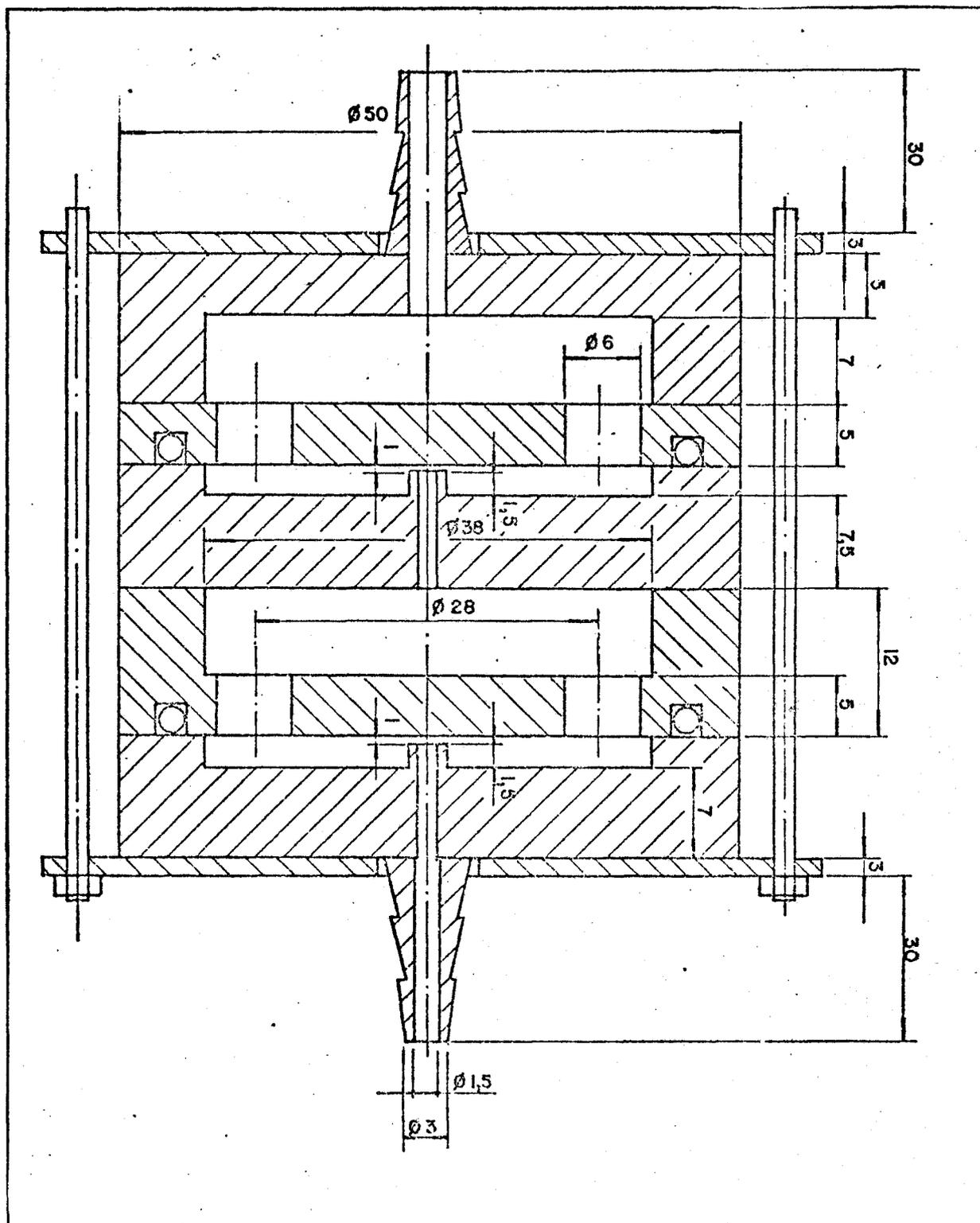


Figura 17a: Impactador de aerossóis, de dois estágios.

um disco de Parafilm. Após a colheita da amostra, o porta-amostra é observado em um microscópio eletrônico de transmissão e as partículas de aerossol fotografadas para posterior contagem. A Figura 17b é uma fotografia do impactador desmontado.

O impactador foi operado com uma bomba de vácuo-pressão, marca Milli

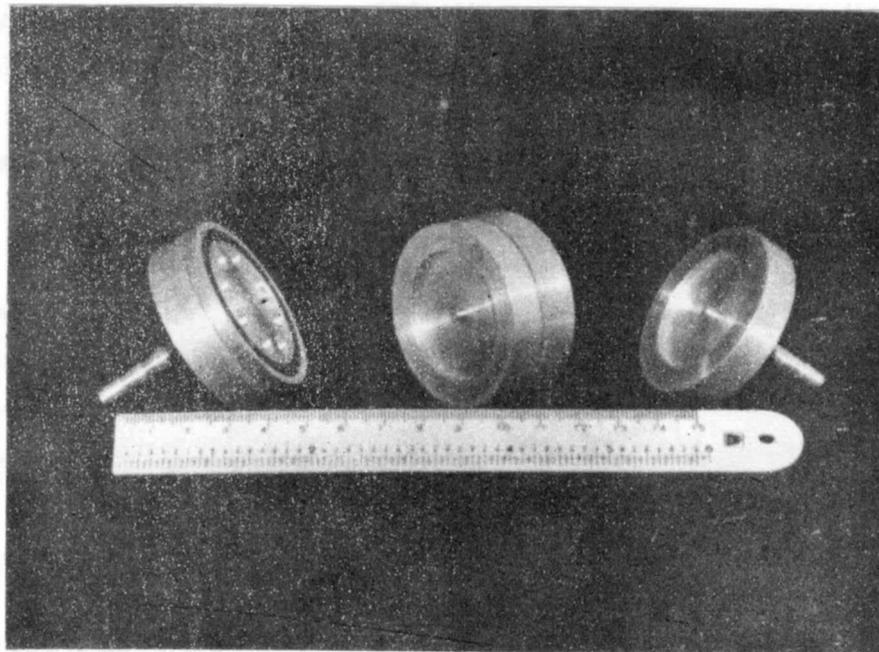


Figura 17b: Impactador de aerossóis, de dois estágios.

pore, medindo-se a vazão com um fluxômetro volumétrico marca Galileo, modelo G3A2, a montante do impactador. Esta vazão foi corrigida para a pressão absoluta a jusante do impactador, determinada com um manômetro acoplado à bomba de vácuo. A pressão de operação foi de 450 mm Hg.

3.1.5 - DETERMINAÇÃO DA MASSA DE AEROSSOL

A quantidade de aerossol disponível para a realização de testes de eficiência de filtros é um dado importante no dimensionamento de outros sistemas do circuito de teste, como por exemplo, o sistema de diluição de aerossóis, e importante para a avaliação da capacidade do gerador de aerossóis como fonte de aerossol padrão para o ensaio 'in situ' de sistemas de filtros com grande vazão.

A massa de aerossol seco produzida, por unidade de tempo, foi determinada recolhendo-se todas as partículas produzidas durante um certo tempo, em um filtro absoluto, confeccionado a partir de uma folha de papel de filtro marca Dexiglas, utilizado na fabricação de filtros HEPA. Determinou-se a massa do aerossol, pesando o papel de filtro antes e após recolher as partículas. As pesagens foram realizadas em uma balança analítica marca Metler, cuja precisão é de $\pm 10 \mu\text{g}$, colocada no interior de uma caixa-de-luvas com atmosfera seca. Para a obtenção da atmosfera seca, foi colocado dentro da caixa, aproximadamente 1 kg de sílica-gel previamente tratada. Antes de realizar as medidas, os papéis de filtro foram deixados por 48 horas aproximadamente, no interior da caixa-de-luvas para que se estabelecesse o equilíbrio.

É necessário que os papéis de filtro estejam secos, e numa atmosfera controlada, porque são bastante higroscópicos, e portanto, sua massa varia muito dependendo da quantidade de água incorporada.

3.2 - TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados esperados neste trabalho podem ser classificados, de acordo com os objetivos de cada ensaio em: comparação da distribuição de diâmetros obtida por espectrofotometria e por espectrometria com o impactador; ajuste da distribuição de diâmetros a uma distribuição log-normal; verificação da reprodutibilidade do gerador de aerossóis; determinação da massa de aerossol seco produzida por unidade de tempo; e determinação da eficiência de filtração de alguns filtros absolutos.

3.2.1 - ESPECTRO OBTIDO COM O IMPACTADOR

Na Figura 18 está esquematizado o perfil das partículas de NaCl, como são observadas num microscópio eletrônico de transmissão (TEM). Medindo-se o lado 1 dos perfis das partículas nas micrografias ampliadas do aerossol pode-se estimar o diâmetro equivalente em massa destas partículas, conforme definição dos diâmetros equivalentes dada no Apêndice A.

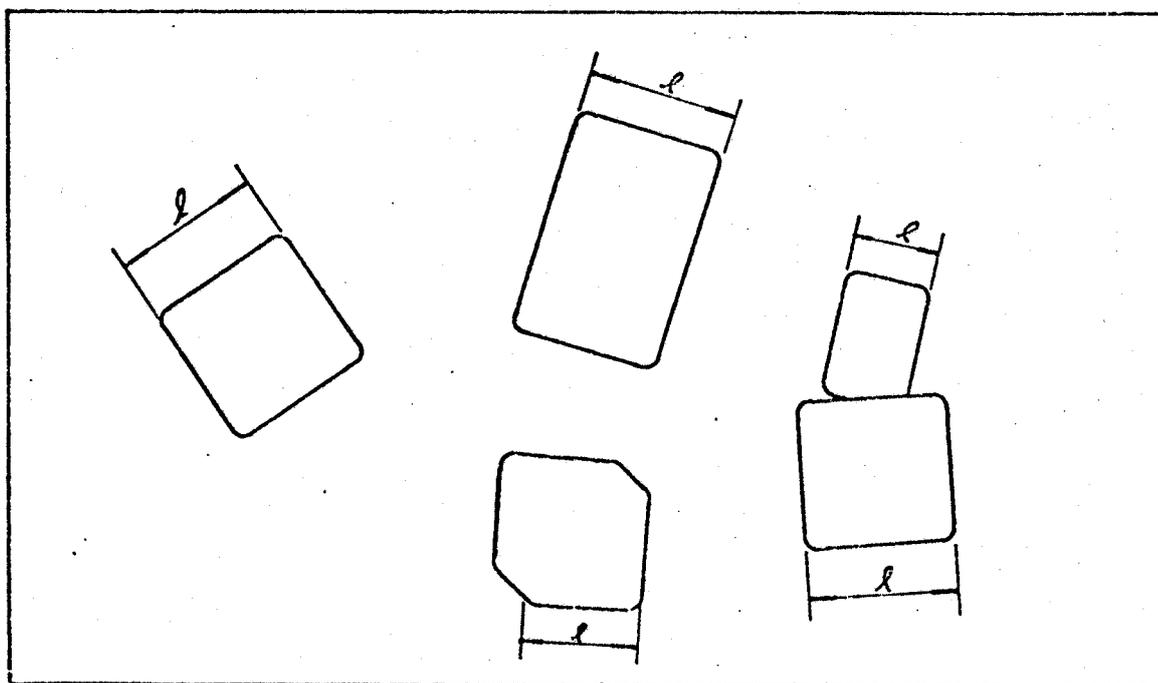


Figura 18: Perfil das partículas de NaCl, como são vistas em um microscópio eletrônico de transmissão, com indicação da dimensão da partícula que é medida na análise dos tamanhos.

Pela enumeração das partículas com diâmetro num intervalo de valor médio d_i , obtém-se a distribuição de tamanhos do aerossol impactado no estágio j do impactador.

O espectro granulométrico da população amostrada é obtido pela expressão abaixo, que dá a frequência de partículas em cada intervalo de tamanho:

$$N(d_i) = N_1(d_i) \cdot \frac{N_1(d_i)}{N_1(d_i) - N_2(d_i)}$$

onde $N_j(d_i)$ é a frequência de partículas na amostra do estágio j do impactador, que têm diâmetro no intervalo representado pelo valor d_i .

O número de partículas de um determinado tamanho é sempre maior no primeiro estágio que no segundo, pois por construção ambos os estágios têm a mesma eficiência.

3.2.2 - ESPECTRO OBTIDO COM O ESPECTROFOTÔMETRO

Na Figura 19 estão esquematizados os valores dos limites inferiores dos 10 intervalos de classe, para os vários modos de operação do analisador de pulsos, do espectrofotômetro.

Ao fim de um certo tempo de amostragem, em cada canal i , é apresentada um número n_i que representa o número de partículas com diâmetro maior que um certo valor d_i que é o limite inferior do intervalo de classe, amostrado naquele intervalo de tempo. Para cada intervalo de classe é tirada uma média de v determinações do espectro, sendo estas médias dadas pela expressão:

$$\bar{n}_i = \sum_k^v n_{ik} / v$$

O modelo proposto para ajustar os resultados obtidos é uma distribuição log-normal, como é definida no Apêndice B, e o teste de aderência é feito pelo método de χ^2 . Para cada intervalo de classe é calculada a frequência esperada, obtida pela integração da função log-normal ajustada pelos parâmetros m e s da amostra (média e desvio padrão da amostra). O valor de χ_{ob}^2 é dado por:

$$\chi_{ob}^2 = \sum_i \frac{\bar{n}_i - \tilde{n}_i}{\tilde{n}_i}$$

CANAL \ MODO	MODO LOG (μm)	MODO LINEAR (μm)			
		1	2	3	4
1	0,035	0,035	0,10	0,165	5,7
2	0,10	0,10	0,165	0,95	5,7
3	0,18	0,18	0,24	1,35	8,5
4	0,34	0,31	0,39	2,2	11,5
5	0,57	0,52	0,65	2,6	22,0
6	0,68	0,60	0,75	4,2	
7	0,75	0,67	0,85	4,7	
8	0,85	0,75	0,95	5,3	
9	1,05	0,85	1,05	5,9	
10	1,3	0,90	1,10	6,2	

Figura 19: Limites inferiores dos intervalos de classe do analisador de pulsos do espectrofotômetro Sartorius, para cada modo de operação.

onde \bar{n}_i e \tilde{n}_i são as frequências observadas e esperadas, respectivamente.

A probabilidade de que uma amostra ao acaso de uma distribuição log-normal dê um valor de χ^2 é obtida em uma tabela de χ^2 , usando $(\Sigma i - 3)$ graus de liberdade e um nível de significância α . Se a probabilidade é pequena, a hipótese de normalidade é rejeitada, ou seja, os dados não se ajustam a uma distribuição log-normal.

3.2.3 - REPRODUTIBILIDADE DO GERADOR DE AERROSSÓIS

O espectro granulométrico do aerossol de NaCl, $n_{ij}(d_k)$ é obtido com o espectrofotômetro, onde os d_k são os diâmetros correspondentes aos k intervalos de classe em que são apresentadas as frequências observadas n_{ij} em cada repetição i do ensaio j . A reprodutibilidade do gerador será verificada, testando a igualdade das frequências entre os vários ensaios.

Em cada ensaio, tira-se a média das frequências observadas em todas

as repetições:

$$\bar{n}_j(d_k) \equiv \bar{n}_j^k = \frac{\sum_i n_{ij}(d_k)}{\sum_i i}$$

O teste estatístico utilizado será o χ^2 ; a partir da tabela de frequências médias observadas e dos parâmetros definidos abaixo:

$$n_j = \sum_k \bar{n}_j^k$$

$$n^k = \sum_j \bar{n}_j^k$$

$$\bar{n}_j^k = \frac{n_j \cdot n^k}{\sum_j n_j} = \frac{n_j \cdot n^k}{\sum_k n^k}$$

calcula-se o valor de χ_{ob}^2 pela expressão:

$$\chi_{ob}^2 = \sum_j \sum_k \frac{\bar{n}_j^k - \bar{n}_j^k}{\bar{n}_j^k}$$

Compara-se então o valor de χ_{ob}^2 com o valor de $\chi_{\alpha, \ell}^2$ onde α é o nível de significância considerado e ℓ é o número de graus de liberdade dado por:

$$\ell = (j - 1)(k - 1)$$

Se $P(\chi_{\alpha, \ell}^2 > \chi_{ob}^2) > \alpha$ a hipótese de independência é aceita ou seja, os dados foram obtidos de uma mesma população.

3.2.4 - DETERMINAÇÃO DA MASSA DE AEROSSOL

Os ensaios de medida da massa de aerossol seco produzida por unidade de tempo originaram conjuntos de dados que foram analisados por análise de variância. As hipóteses de igualdade de variância nos diversos ensaios, de independência e de normalidade foram verificadas através de gráficos de resíduos. Para comparações múltiplas entre as diversas médias foi aplicado o teste de Duncan.

Os cálculos e a análise dos dados foram efetuados usando o SAS (Statistical Analysis System) instalado no IBM 370/155 do CPD do IPEN.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais são apresentados a seguir, com indicação das condições em que foram realizados os ensaios e com comentários que se façam necessários para esclarecimento das condições de ensaio ou dos resultados.

4.1 - ESPECTROMETRIA POR IMPACTAÇÃO

Na primeira tentativa de determinação da granulometria do aerossol, o gerador de aerossóis foi operado com uma solução a 2% em massa de NaCl e uma pressão de alimentação de $0,8 \text{ kg cm}^{-2}$. A pressão de operação do impactador foi de 450 mm Hg, que garante uma vazão constante através dos orifícios do impactador, de $12,5 \text{ l min}^{-1}$.

Os porta-amostras foram fotografados em um microscópio eletrônico de transmissão com aumentos de 1.800 e 4.700 vezes. Foram obtidas 18 micrografias de regiões do porta-amostras escolhidas aleatoriamente. Na Figura 20 estão expostas duas das micrografias obtidas.

Não foi possível obter amostras do segundo estágio, pois a tela de microscopia despreendeu-se de seu suporte de Parafilm durante a operação do impactador.

As micrografias foram projetadas em um ampliador de fotografias e o comprimento do lado dos perfis das partículas foi medido e classificado em intervalos equivalentes a $\sim 0,08 \mu\text{m}$.

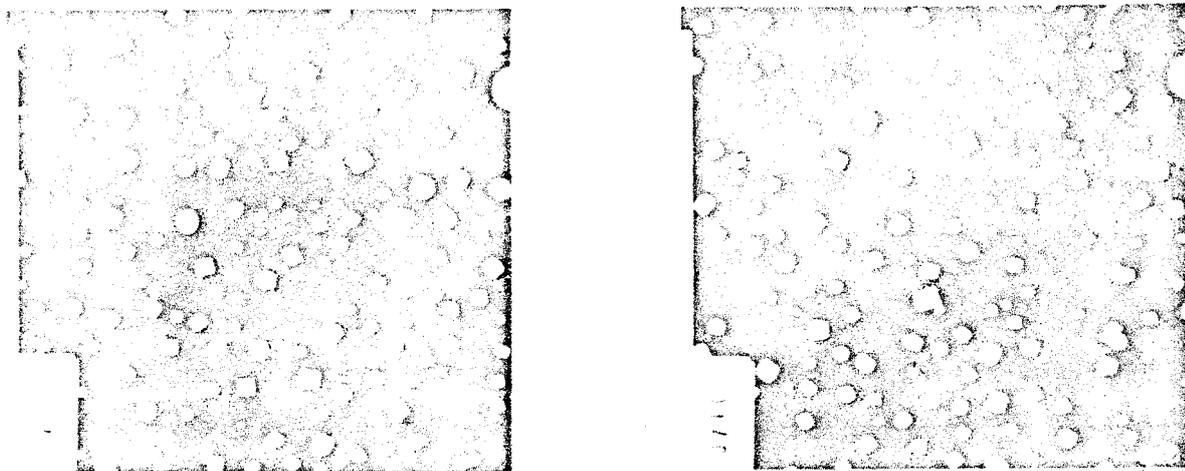


Figura 20: Amostras de aerossol de NaCl impactado sobre Parlodion e fotografadas em um microscópio eletrônico de transmissão.

O número de partículas encontradas em cada intervalo de classe está exposto na Tabela 4.1.1, com as porcentagens do total correspondentes indicadas também. Os valores de tamanho referen-se ao limite inferior do intervalo de classe.

TABELA 4.1.1 - FREQUÊNCIA DE PARTÍCULAS NO PRIMEIRO ESTÁGIO DO IMPACTADOR

Aresta do cubo (μm)	n	% do total	Aresta do cubo (μm)	n	% do total
0,04	3319	100	0,51	402	12
0,12	3125	94	0,59	201	6
0,20	2682	61	0,67	100	3
0,28	1841	55	0,75	44	1,3
0,36	1237	37	0,83	13	0,4
0,43	712	21	0,91	5	0,2

Na Figura 21 está exposto o gráfico que relaciona os diâmetros das partículas com as freqüências acumuladas da tabela acima.

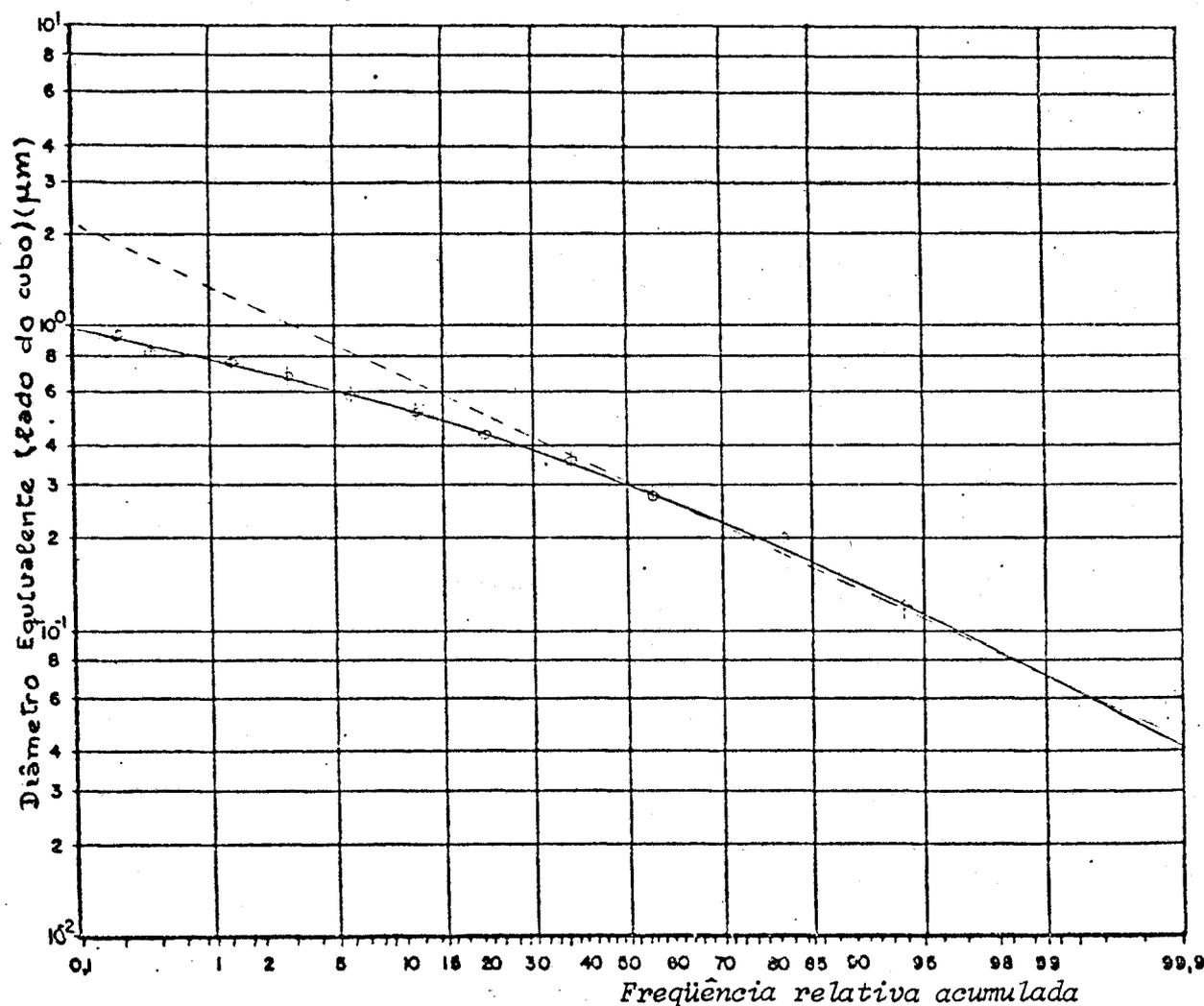


Figura 21: Gráfico da distribuição de diâmetros do primeiro estágio do impactador de aerossóis.

A linha contínua na Figura 21 indica a curva que ajusta visualmente os pontos obtidos. A linha pontilhada indica a curva de uma distribuição log-normal com mesma mediana e mesmo desvio padrão que a distribuição que deu origem aos pontos do gráfico.

O fato de a inclinação da curva diminuir à medida que aumenta o tamanho das partículas indica uma deficiência no número de partículas grandes na amostra. Se supõe-se que a população de partículas amostrada tem diâmetros que se distribuem segundo uma função log-normal, isto pode ter ocorrido em razão de a amostra não ser significativa da população amostrada, considerando-se que a distribuição de partículas sobre o porta-amostra não é homogênea e que pode, além disso, ter ocorrido rebatimento das partículas sobre a superfície de impactação durante a colheita das amostras.

Foram feitas algumas tentativas de obtenção de amostras de aerossol nos dois estágios do impactador, o que não se conseguiu ou por desprendimento, durante amostragem, das telas de microscopia de seus suportes de Parafilm ou por rompimento dos filmes de Parlodio.

Numa tentativa bem sucedida obteve-se tres micrografias de cada estágio do impactador, estando os resultados apresentados na Tabela 4.1.2 .

TABELA 4.1.2 - FREQUÊNCIA DE PARTÍCULAS DE NaCl EM CADA ESTÁGIO DO IMPACTADOR

Aresta do cubo (μm)	diâm.aerodin. equiv. d_A (μm)	n (1º estágio)	n (2º estágio)
0,1 - 0,2	0,17 - 0,35	17	96
0,2 - 0,3	0,35 - 0,52	12	133
0,3 - 0,4	0,52 - 0,70	18	138
0,4 - 0,5	0,70 - 0,87	47	110
0,5 - 0,6	0,87 - 1,05	64	23
0,6 - 0,7	1,05 - 1,22	53	3
0,7 - 0,8	1,22 - 1,40	54	0
0,8 - 0,9	1,40 - 1,57	45	0
0,9 - 1,0	1,57 - 1,74	44	0
1,0 - 1,1	1,74 - 1,92	28	0
1,1 - 1,2	1,92 - 2,10	28	0
1,2 - 1,3	2,10 - 2,27	23	0
1,3 - 1,4	2,27 - 2,45	18	0
1,4 - 1,5	2,45 - 2,62	21	0

O parâmetro de impactação Stk , que governa a eficiência com que as partículas de aerossol se fixam à superfície de impactação, para os diâmetros

relacionados na tabela acima, está listado na Tabela 4.1.3, juntamente com os valores de eficiência esperados e observados experimentalmente. Os valores de eficiência esperada foram obtidos nos gráficos da Figura 8 a partir dos valores de $\sqrt{\text{Stk}}$ para cada diâmetro de partícula e os valores de eficiência observados foram obtidos empregando a expressão do item 3.1.4 da página 39.

TABELA 4.1.3 - EFICIÊNCIA DE IMPACTAÇÃO ESPERADA E OBTIDA EXPERIMENTALMENTE.

d_A (μm)	Stk	$\epsilon_{\text{esp.}}$ (%)	$\epsilon_{\text{obt.}}$ (%)
0,10	0,07	0	*
0,20	0,16	10	*
0,26	0,23	90	*
0,44	0,49	100	*
0,61	0,84	100	*
0,79	1,27	100	*
0,96	1,82	100	64
1,14	2,47	100	94
1,31	3,18	100	100
> 1,49	> 4,02	100	100

(*) Valores de eficiência sem significado físico (número de partículas no primeiro estágio menor que o número de partículas no segundo estágio)

Há uma grande discrepância entre os valores de eficiência esperados e obtidos neste ensaio. Pode-se apontar duas razões principais para este resultado: em primeiro lugar, há que se considerar que o número de partículas contado em cada micrografia deveria ser corrigido para dar conta do número total de partículas retidas no estágio correspondente. Isto deve ser levado em conta, porque a densidade de partículas sobre o porta-amostra apresenta variações de ponto a ponto importantes com relação à área da superfície abrangida por cada micrografia. Em segundo lugar a pressão de operação do segundo estágio do impactador pode ter sido ligeiramente inferior à do primeiro o que pode ocasionar diferenças nas velocidades dos jatos e nos livres caminhos médios das moléculas do ar. Estes fatos, aliados a pequenas diferenças na geometria do impactador podem ocasionar eficiências de impactação diferentes.

A solução para estes últimos problemas seria melhorar o sistema de fixação das telas de microscopia no impactador e operá-lo com uma diferença de pressão maior para garantir que a velocidade do ar nos dois estágios atinja a velocidade do som. Por outro lado, deve ser contado o maior número possível de partículas em cada estágio, para eliminar os problemas de densidade de partículas diferente nas regiões abrangidas pelas micrografias.

4.2 - ESPECTROFOTOMETRIA

Os objetivos deste ensaio são o estudo da granulometria do aerossol de NaCl e suas variações como consequência de variações em parâmetros de operação do gerador de aerossóis, tais como concentração da solução de NaCl usada como carga no gerador e pressão do gás de atomização. Dispõe-se contudo, somente dos resultados de espectrometria com o gerador operando com uma solução de NaCl a 2% em massa e uma pressão de $0,8 \text{ kg cm}^{-2}$, devido a problemas técnicos surgidos com o espectrofotômetro que deixou de operar.

Nas condições citadas acima, obteve-se 60 repetições da determinação do espectro granulométrico em função do diâmetro equivalente em massa. Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 4.2.1, onde estão expostos os valores de frequência esperados em uma distribuição log-normal com mesmo desvio padrão e média.

TABELA 4.2.1 - RESULTADOS DE FREQUÊNCIA OBTIDOS COM O ESPECTROFOTÔMETRO.

diâm. equiv. em massa (μm)	n	f _{obs.}	f _{esp.}
0,035 - 0,10	560	0,128	0,152
0,10 - 0,18	1459	0,334	0,340
0,18 - 0,34	1753	0,401	0,363
0,34 - 0,57	559	0,128	0,120
0,57 - 0,68	26	0,006	0,015
0,68 - 1,05	12	0,003	0,011

Aplicando o teste de χ^2 nos resultados da tabela acima, observa-se que para um nível de significância de 5% estes resultados não se ajustam a uma distribuição log-normal.

Apesar disso, locou-se num diagrama log-probabilidade os pontos obtidos, como mostra a Figura 22 onde também foram indicados os pontos correspondentes às distribuições de diâmetro aerodinâmico equivalente e distribuições de massa e superfície do aerossol de NaCl. Para um ajuste visual, os pontos obtidos podem ser considerados como pertencentes a uma reta, podendo-se assim derivar graficamente os parâmetros da distribuição de tamanho das partículas do aerossol.

Na Tabela 4.2.2 estão resumidos os resultados da análise gráfica dos parâmetros da distribuição de tamanhos das partículas do aerossol, de acordo com as definições do Apêndice A e conforme método descrito no Apêndice C; os dois valores de σ que aparecem na tabela referem-se aos dois modos possíveis de obtê-los pelo gráfico da Figura 22.

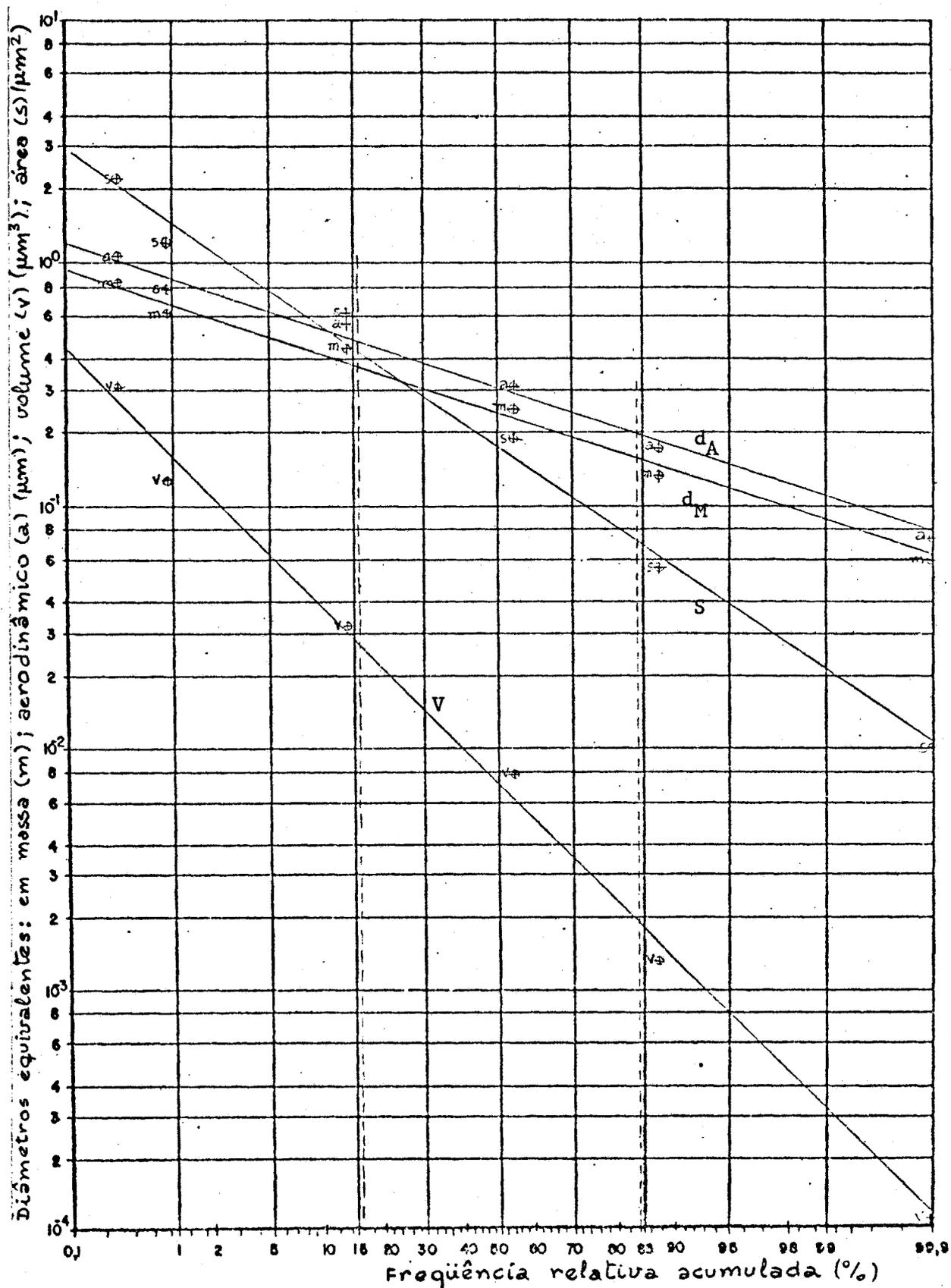


Figura 22: Gráfico do diâmetro equivalente em massa, diâmetro equivalente aerodinâmico, volume e superfície das partículas de NaCl, contra os percentuais acumulados de frequência relativa

TABELA 4.2.2 - PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DO AEROSSOL DE NaCl.

Diâmetros Médios (μm)						Área Média		Volume Médio (μm^3)	
em Massa		em Área		Aerodinâmico		\bar{S}	$\sigma_{\bar{S}}$	\bar{V}	$\sigma_{\bar{V}}$
\bar{d}_M	$\sigma_{\bar{d}_M}$	\bar{d}_S	$\sigma_{\bar{d}_S}$	\bar{d}_A	$\sigma_{\bar{d}_A}$				
0,24	0,18 0,19	0,22	0,19 0,19	0,30	0,19 0,19	0,18	0,38 0,38	0,007	0,56 0,58

Obs.: Os valores de σ estão duplicados representando cada valor o desvio padrão da distribuição obtido por d_{84} ou d_{16} , conforme definições do Apêndice C.

4.3 - REPRODUTIBILIDADE DO GERADOR DE AEROSSÓIS

Foram realizados três ensaios com três soluções diferentes de NaCl a 2%. Ao fim de cada ensaio a solução utilizada era retirada do gerador, este era lavado com água destilada e recarregado com uma solução nova. Em cada ensaio foram feitas 20 determinações do espectro granulométrico, colhendo-se amostras do aerossol e analisando no espectrofotômetro durante 1 minuto cada uma. Nas Tabelas 4.3.1 a 4.3.3, estão expostos os resultados das determinações (i) de cada ensaio (j), em função dos diâmetros equivalentes em massa de cada intervalo de classe (d_k).

TABELA 4.3.1 - FREQUÊNCIAS OBSERVADAS PARA $j = 1$ EM FUNÇÃO DOS d_k

i	0,035	0,10	0,18	0,34	0,57	0,68
1	548	1388	1914	722	38	13
2	503	1467	2002	672	38	18
3	506	1427	1918	751	31	15
4	560	1385	1910	645	34	20
5	517	1421	1974	730	38	20
6	601	1339	1707	616	34	17
7	592	1360	1753	589	39	28
8	572	1384	1673	519	23	15
9	539	1376	1720	643	33	9
10	537	1407	1700	575	30	12
11	572	1424	1567	573	23	14
12	566	1431	1668	548	24	7
13	544	1453	1589	553	28	15
14	540	1499	1602	516	27	21
15	586	1443	1601	550	28	13
16	532	1362	1637	569	27	17
17	543	1380	1711	621	26	12
18	578	1348	1681	550	25	15
19	621	1346	1759	598	17	10
20	512	1386	1713	648	42	19

TABELA 4.3.2 - FREQUÊNCIAS OBSERVADAS PARA $j = 2$ EM FUNÇÃO DOS d_k

i	0,035	0,10	0,18	0,34	0,57	0,68
1	620	1481	1690	500	24	8
2	562	1466	1736	517	25	7
3	590	1487	1696	475	19	10
4	608	1609	1658	450	16	11
5	589	1515	1716	440	16	21
6	542	1533	1721	519	26	10
7	652	1467	1700	489	30	9
8	554	1501	1722	497	17	9
9	585	1562	1691	480	12	10
10	574	1561	1757	532	23	7
11	593	1500	1782	508	18	11
12	545	1469	1905	528	21	4
13	559	1467	1859	495	25	8
14	605	1524	1655	450	18	7
15	588	1457	1629	528	25	13
16	571	1451	1660	563	23	13
17	591	1447	1715	540	27	10
18	545	1415	1665	543	20	9
19	535	1497	1808	635	21	12
20	491	1441	1972	629	29	13

TABELA 4.3.3 - FREQUÊNCIAS OBSERVADAS PARA $j = 3$ EM FUNÇÃO DOS d_k

i	0,035	0,10	0,18	0,34	0,57	0,68
1	524	1481	1772	673	22	10
2	491	1520	1857	626	21	14
3	512	1452	1875	602	37	10
4	552	1468	1788	563	27	10
5	569	1415	1828	519	22	10
6	514	1504	1842	607	28	18
7	503	1495	1817	522	36	14
8	515	1537	1873	598	25	8
9	500	1478	1833	590	41	14
10	584	1409	1877	628	31	14
11	624	1472	1637	484	14	7
12	575	1485	1755	501	19	4
13	646	1588	1566	392	18	5
14	573	1456	1669	539	21	11
15	532	1491	1735	512	23	13
16	582	1521	1759	503	27	3
17	557	1442	1686	517	25	8
18	579	1462	1730	567	24	8
19	520	1507	1853	513	26	8
20	522	1464	1799	577	28	19

Foi aplicado o teste de χ^2 para a verificação da independência dos resultados com a repetição do ensaio. Na Tabela 4.3.4 estão expostos os valores de frequência esperados e observados. O valor de χ_{ob}^2 resultante é 15,4, conforme definido no item 2.3 do Capítulo 3. O valor de $P(\chi^2 > \chi_{ob}^2) = 0,1186$.

Portanto, para um nível de significância de 5 %, é aceita a hipótese de

independência do espectro granulométrico em função da repetição.

TABELA 4.3.4 - TABELA DO CÁLCULO DE χ^2

j	\bar{n}_j^{-1}	\tilde{n}_j^{-1}	\bar{n}_j^{-2}	\tilde{n}_j^{-2}	\bar{n}_j^{-3}	\tilde{n}_j^{-3}	\bar{n}_j^{-4}	\tilde{n}_j^{-4}	\bar{n}_j^{-5}	\tilde{n}_j^{-5}	\bar{n}_j^{-6}	\tilde{n}_j^{-6}	n_j
1	553	557	1401	1454	1744	1747	609	557	30	25	15	12	4352
2	574	557	1492	1453	1736	1746	515	556	21	25	10	12	4348
3	550	563	1482	1468	1777	1764	551	562	25	25	10	12	4395
n^k	1677		4375		5257		1675		76		35		13095

4.4 - DETERMINAÇÃO DA MASSA DE AEROSSOL

Os resultados de pesagem dos papéis de filtro, estão expostos na Tabela 4.4.1.

A análise de variância indicou que houve diferença nas médias dos valores de massa dos papéis de filtro, e portanto, na massa de aerossol seco produzido de ensaio para ensaio. O teste de Duncan, indicou por outro lado, que as três médias dos três ensaios realizados, são significativamente diferentes ao nível de 5 % de confiança.

Estes resultados podem ser explicados, em primeiro lugar, pelo pequeno número de observações, que deve influir bastante; em segundo lugar, podem ter ocorrido falhas no controle da experiência, como por exemplo, o nível inicial da solução dentro do gerador, nível de líquido dentro do separador de gotas, etc.

TABELA 4.4.1 - MASSA DE AEROSSOL PRODUZIDA (MASSA DOS PAPÉIS DE FILTRO)

Filtr.	massa inicial (g)	massa final (g)	massa aerossol (g)
1	1,14446 ± 0,00019	1,16715 ± 0,00005	0,02269 ± 0,00020
2	1,11286 ± 0,00014	1,13791 ± 0,00001	0,02505 ± 0,00014
3	1,10389 ± 0,00007	1,12762 ± 0,00033	0,02373 ± 0,00034

A quantidade de aerossol seco produzido por unidade de tempo, nos ensaios realizados, está então, entre os valores $453,8 \pm 6,0$ e $501,0 \pm 5,7$ μg por minuto.

4.5 - MEDIDA DE EFICIÊNCIA DE FILTROS ABSOLUTOS

Foram realizadas medidas de eficiência de retenção de partículas por filtros HEPA, utilizando-se como aerossol de teste, o produzido pelo gerador

operando a uma pressão de $0,8 \text{ kg cm}^{-2}$ e com uma solução de NaCl a 2 %.

Estes valores foram fixados, baseando-se em que a norma British Standard BS 3928-65 recomenda uma concentração de sal de 2 %, sendo que esta quantidade regula o tamanho das partículas do aerossol e a umidade relativa no banco de prova. A pressão de alimentação do atomizador foi estabelecida considerando-se que com uma pressão acima de $0,5$ ou $0,6 \text{ kg cm}^{-2}$ começa a ocorrer a produção contínua de aerossóis, tendo-se fixado o valor de $0,8 \text{ kg cm}^{-2}$ como um valor aceitável para garantir produção contínua e estável de aerossóis, com baixo consumo de nitrogênio gasoso pressurizado, utilizado no gerador.

Embora ambos os valores devam ser objeto de estudo visando otimização, a produção de um aerossol que se mostra operacional para os ensaios de eficiência de filtração, justifica essa escolha.

Foram ensaiados 8 filtros destinados ao sistema de ventilação de um dos laboratórios do Centro de Engenharia Química do IPEN. Os filtros são de procedência francesa, fabricados pela Indústria Sofiltra, sendo especificados para operação a uma perda de carga inicial de 25 mm de H_2O , com uma vazão de $3.000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. A eficiência de retenção de aerossóis atestada pelo fabricante é de 99,97 % para partículas de DOP de $0,3 \text{ }\mu\text{m}$, monodisperso.

Os resultados obtidos no ensaio de eficiência com aerossol de NaCl estão expostos na Tabela 4.5.1, para partículas de tamanho no intervalo 0,16 a $0,39 \text{ }\mu\text{m}$.

TABELA 4.5.1 - EFICIÊNCIA DE FILTROS ABSOLUTOS

Filtro nº	ϵ (%)
6.300	99,999
7.428	99,997
7.729	99,996
7.730	99,999
7.733	99,999
7.739	99,994
7.741	99,999
7.742	99,999

5. CONCLUSÕES

O gerador de aerossóis analisado neste trabalho produz um aerossol com espectro granulométrico deslocado no sentido de tamanhos menores, em comparação com outros geradores de aerossol de NaCl em uso nos ensaios de eficiência de filtros absolutos pelo método da chama de sódio, conforme mostra a Figura 23.

A mediana da distribuição de diâmetros equivalentes em massa do aerossol produzido tem o valor $0,24 \mu\text{m}$ e o desvio padrão logarítmico estimado da população amostrada é $0,19$ que equivale a um desvio padrão de $1,5 \mu\text{m}$. Resulta que 86 % da massa de aerossol produzido está concentrada nas partículas com tamanho no intervalo $0,1 - 0,4 \mu\text{m}$, o que qualifica o aerossol como especialmente útil para a realização de testes de eficiência de filtração, pois que esta faixa de tamanho é teoricamente a mais penetrante em filtros fibrosos. Pode-se, por isso, esperar resultados comparáveis com os obtidos pelo método de DOP monodisperso com partículas de $0,3 \mu\text{m}$.

Este espectro é bastante estável, não sofrendo variações significativas durante a operação do gerador por intervalos de tempo de até meia hora, como ficou evidenciado nos ensaios visando verificar a reprodutibilidade do gerador. Em tais ensaios o gerador foi operado continuamente durante este tempo, tendo-se registrado, em intervalos de 1 minuto aproximadamente, o espectro produzido.

Durante intervalos de tempo maiores podem ocorrer variações na quantidade de aerossol produzido. Em três ensaios em que se mediu a massa de aerossol seco gerado durante 50 minutos, observou-se variações significativas nos resultados, devendo-se contudo frisar que: 1) as variações na massa de aerossol produzido são inferiores a 5% do valor de massa intermediário dos três valores obtidos no ensaio; 2) o fato de haver variações durante um intervalo de tempo desta ordem de grandeza é sem importância pois um ensaio de eficiência requer um tempo de operação do gerador de poucos minutos.

Por outro lado, os resultados obtidos nestes três ensaios mostram que a quantidade de aerossol seco produzido por unidade de tempo situa-se entre os valores 450 e $500 \mu\text{g min}^{-1}$, aproximadamente, o que credencia este gerador para ensaios 'in situ' de instalações de descontaminação atmosférica com vazão de até $80.000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Para ensaios em laboratório, com vazões da ordem de $1.000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ essas quantidades de aerossol não apresentam problemas de formação de depósitos nos condutos, e a massa total de água incorporada ao sistema, $2,5 \text{ mg}$ por

mínuto aproximadamente, proveniente da evaporação das gotas, não altera o valor da umidade relativa do ar do túnel de vento que se situa entre 60 e 80 %, à temperatura ambiente.

Além de apresentar este baixo consumo de solução, o gerador apresenta baixo consumo de nitrogênio gasoso que é utilizado para atomizar a solução de NaCl. Para uma pressão de alimentação do atomizador de $0,8 \text{ g cm}^{-2}$ são consumidos 20 l min^{-1} de nitrogênio. Estes dois valores são pequenos se comparados com os parâmetros de operação de geradores em uso nos testes de eficiência pelo método da chama de sódio.

Além destas características, o gerador descrito no presente trabalho tem as qualidades de simplicidade de construção, de tamanho compacto e de operar fora do túnel de vento, sendo assim, insensível a variações na vazão do banco de prova que em geral afeta a estabilidade do espectro granulométrico do aerossol. A nuvem de teste penetra no túnel de vento totalmente seca, o que traz como consequência, a necessidade de menores comprimentos de tubulação do túnel, baixando as dimensões da instalação e diminuindo seu custo.

Futuros trabalhos em seqüência a este deverão conter estudos de otimização dos parâmetros de operação do gerador de aerossóis, como pressão de atomização e concentração da solução de NaCl, e ensaios 'in situ' de instalações de descontaminação atmosférica utilizando este gerador como fonte de aerossol de teste.

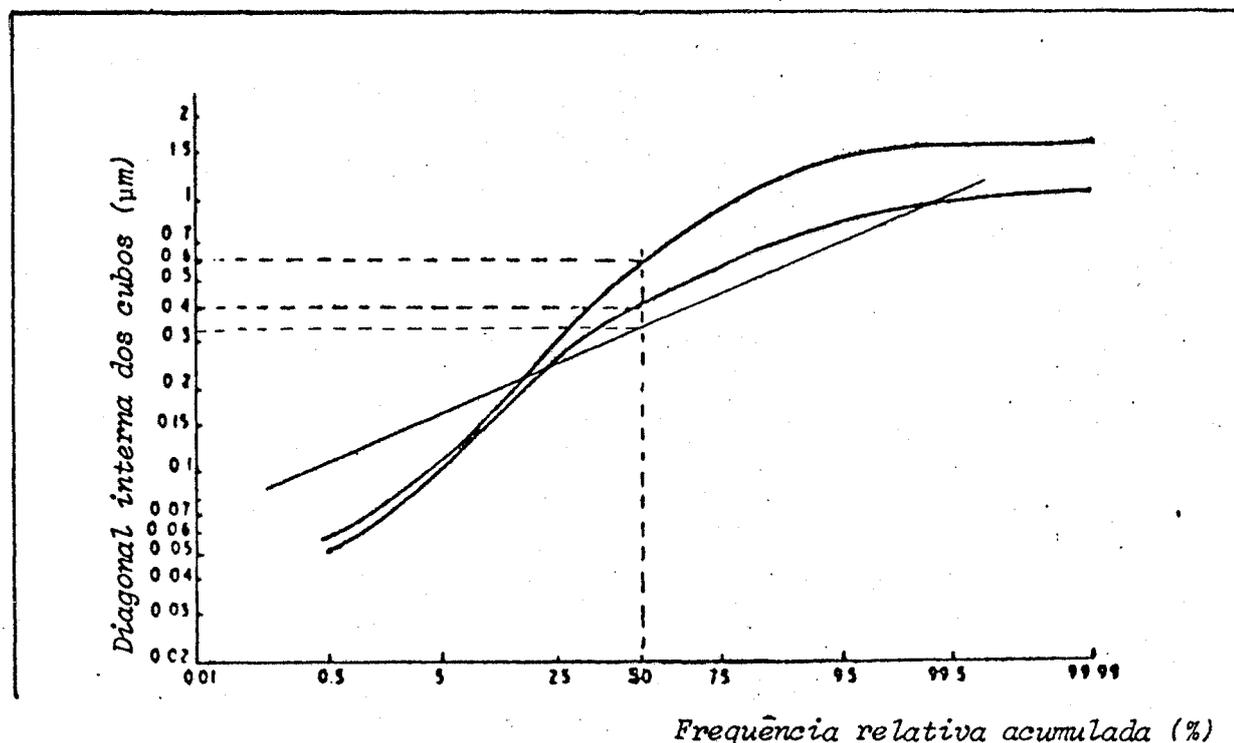


Figura 23: Comparação dos espectros de aerossol produzidos pelos geradores de Collison, Dautrebande e pelo atomizador descrito neste trabalho.

A P Ê N D I C E ADEFINIÇÃO DE TAMANHO PARA PARTÍCULAS DE NaCl.

1. Quantidade física medida: Massa

a) diâmetro equivalente em massa: d_M b) diâmetro equivalente aerodinâmico: d_A

≡ diâmetro de uma esfera de densidade unitária que apresenta a mesma velocidade terminal de deposição que a partícula de NaCl,

$$d_A = (\rho \cdot \pi)^{1/2} \cdot 18^{-1/4} \cdot d_M$$

onde ρ é a densidade do NaCl.

c) diâmetro equivalente de Stokes: d_{Stk}

≡ diâmetro de uma esfera de mesma densidade que a partícula de NaCl e que apresenta a mesma velocidade terminal de deposição,

$$d_{Stk} = \pi^{1/2} \cdot 18^{-1/4} \cdot d_M$$

d) diâmetro equivalente em contagem: d_C

≡ comprimento da aresta do cubo de NaCl,

$$d_C = \pi^{1/3} \cdot 6^{-1/3} \cdot d_M$$

e) diâmetro equivalente em área: d_S

≡ diâmetro de uma esfera de mesma superfície,

$$d_S = 6^{1/2} \cdot \pi^{-1/2} \cdot d_M$$

2. Quantidade física medida: Aresta do cubo

a) diâmetro equivalente em contagem: d_C b) diâmetro equivalente em massa: d_M

≡ diâmetro de uma esfera de mesma massa e densidade que a partícula de NaCl,

$$d_M = 6^{1/3} \cdot \pi^{-1/3} \cdot d_C$$

c) diâmetro aerodinâmico equivalente: d_A

$$d_A = \rho^{1/2} \cdot 2^{-1/4} \cdot d_C$$

d) diâmetro equivalente de Stokes: d_{Stk}

$$d_{Stk} = 2^{1/4} \cdot d_C$$

e) diâmetro equivalente em área: d_S

$$d_S = 6^{1/2} \cdot \pi^{-1/2} \cdot d_C$$

3. Diâmetros representativos de distribuições de partículas:

a) diâmetros médios: \overline{d}_δ , ($\delta = C, M, A, Stk, S$)

$$\overline{d}_\delta = \frac{\sum_i n_i \cdot d_{\delta i}}{\sum_i n_i}$$

onde n_i é a frequência com que partículas com diâmetro equivalente no intervalo representado por $d_{\delta i}$ aparecem na amostra.

b) diâmetros médios geométricos: d_g

$$\overline{d}_{g\delta} = \exp \frac{\sum_i n_i \cdot \ln d_{\delta i}}{\sum_i n_i}$$

A P Ê N D I C E B

FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE LOG-NORMAL

Se a quantidade $x = \ln d$ se distribui segundo uma distribuição normal, então a distribuição da quantidade d é log-normal.

A função de densidade de probabilidade é da forma:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma (2\pi)^{1/2}} \exp - \frac{(x - \mu_0)^2}{2 \sigma^2}$$

onde σ é o desvio padrão da distribuição; e μ_0 é a média da distribuição.

Estas quantidades são expressas por:

$$\sigma = \ln \sigma_g \quad e$$

$$\mu_0 = \ln d_{og}$$

onde σ_g é o desvio padrão geométrico da distribuição de d ; e d_{og} é a média geométrica desta distribuição.

a) Parâmetros da amostra de uma população que se ajusta a uma distribuição log-normal: Se os valores de d são medidos e agrupados em intervalos de classe, os parâmetros da população μ_0 e σ^2 podem ser estimados por:

$$\mu_0 \rightarrow \bar{x} = \ln d_{og} = \frac{1}{N} \sum_i n_i \cdot \ln d_i$$

$$\sigma^2 \rightarrow s^2 = \ln^2 s_g = \frac{1}{N-1} \sum_i n_i \cdot (\ln d_i - \ln d_{og})^2$$

onde μ_0 e σ^2 são a média e a variância da população, respectivamente; \bar{x} e s^2 são a média e a variância da amostra, respectivamente; d_{og} e s_g são a média geométrica e o desvio padrão geométrico da amostra, respectivamente;

n_i é o número de indivíduos no i -ésimo intervalo de classe;

d_i é o valor médio do i -ésimo intervalo de classe.

b) Conversão para outras distribuições de interesse: Se uma quantidade Q pode ser relacionada com a quantidade d pela relação:

$$Q_r = \alpha_r \cdot d^r$$

onde α_r é uma constante chamada 'fator de forma'; e
 r é um número inteiro,

então a densidade de probabilidade para a quantidade Q é uma função da forma:

$$f(\ln Q_r) = \frac{1}{r (2\pi)^{1/2}} \exp - \frac{(\ln Q_r - \ln Q_{rg})^2}{2 \cdot r^2 \sigma^2}$$

onde Q_{rg} é a média geométrica da distribuição de Q_r .

A média geométrica da distribuição de Q_r pode ser relacionada com a média geométrica da distribuição de d pela relação:

$$Q_{rg} = \alpha_r \cdot d_{og}^r$$

O valor médio da distribuição de Q_r , $\overline{Q_r}$ é dado pela relação:

$$\overline{Q_r} = \alpha_r \cdot d_{og}^r \cdot \exp \frac{r^2 \sigma^2}{2}$$

com desvio padrão dado por:

$$\sigma(Q_r) = r \cdot \sigma$$

O valor d_{rg} , média geométrica 'equivalente' na quantidade Q' é dado por:

$$d_{rg} = d_{og} \cdot \exp r \sigma^2$$

e a média aritmética $\overline{d_r}$ 'equivalente' na quantidade Q' é dada pela expressão:

$$\overline{d_r} = d_{og} \cdot \exp \frac{r \sigma^2}{2}$$

A P Ê N D I C E C

PAPEL DE GRÁFICO LOG-PROBABILIDADE

A função de densidade de probabilidade $f(x)$ de uma distribuição log-normal tem a propriedade:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$$

A fração de todos os indivíduos da população que têm valor de x maior que um valor especificado x_a é dada por:

$$F(x_a) = \int_{x_a}^{\infty} f(x) dx$$

onde $F(x_a)$ é chamada função de distribuição cumulativa.

Um gráfico de $F(x_a)$ contra os valores de $(x_a - \mu_0)/\sigma$ tem a forma de uma sigmóide como mostra a Figura 23a.

Uma forma mais útil da distribuição cumulativa é obtida se a sigmóide é convertida em uma reta, alterando-se a escala das ordenadas, de modo a que a distância entre $F(x_a) - 0,5$ e zero seja proporcional a $(x_a - \mu_0)/\sigma$, como mostra a Figura 23b.

A função $F(x)$ encontra-se tabelada na forma:

$$F(x_a) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^{z_a} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz$$

onde z_a é o valor da variável z correspondente a x_a ; e z é dado por:

$$z = \frac{x - \mu_0}{\sigma}$$

Como a população segue uma distribuição log-normal, os gráficos da Figura 23 podem apresentar em lugar de x o logaritmo de d , nas abcissas.

Os parâmetros estatísticos de uma amostra desta população podem ser estimados, colocando-se no gráfico de $F(x_a)$ vs. log.d, os percentuais acumulados:

$$P_j = 100 \frac{\sum_{i=j}^k n_i}{\sum_{i=1}^k n_i}$$

contra os limites inferiores d_j dos j -ésimos intervalos de tamanho, e ajustando visualmente a melhor reta que representa os pontos obtidos.

O diâmetro médio geométrico d_{og} é aquele para o qual $F(x_a)$ é igual a 0,5 ou 50 %.

Como $F\{x_a = \mu - \sigma\} = 0,841$, o desvio padrão s da amostra é dado por:

$$s = \log s_g = \log d_{og} - \log d_{84}$$

onde d_{84} é o diâmetro d para o qual $F(x_a)$ é igual a 0,84 ou 84 %.

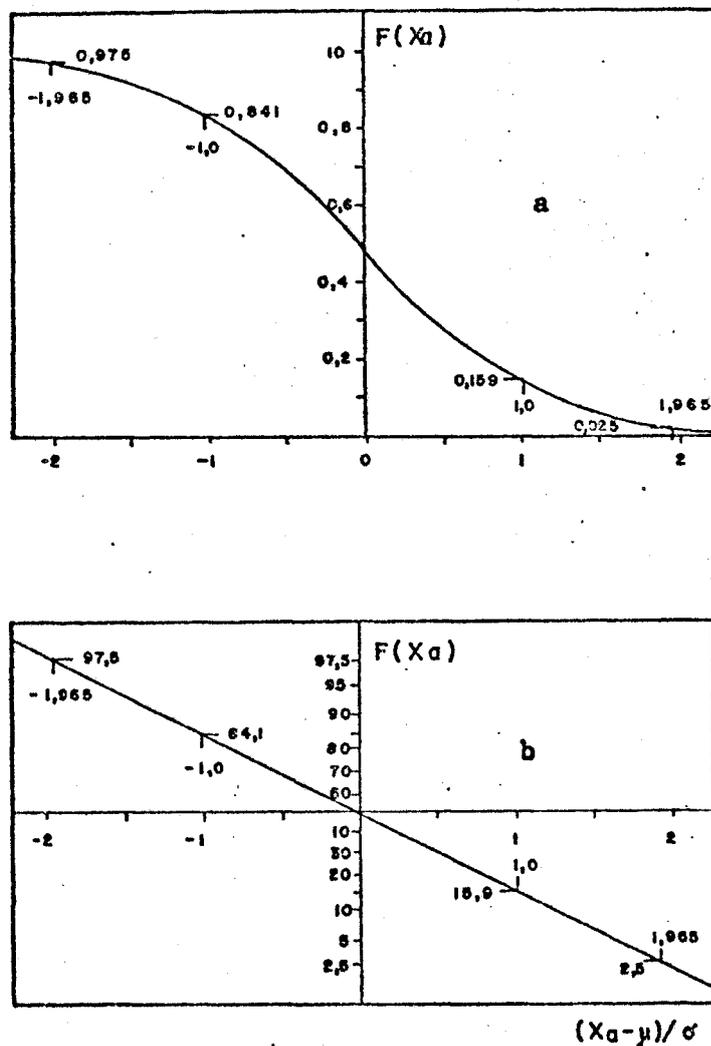


Figura 23: Gráficos da função de distribuição normal acumulada em função da variável x_a normalizada: a) escala linear; b) escala ajustada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AVY, A.P. Les aerosols. Paris, Dunod, 1956 apud MILLA, E. Estudio sobre la generaci3n y granulometria de un aerosol patron de ClNa ... Madrid, Junta de Energia Nuclear, 1978. p.2 (JEN 428 Sp)
2. BILLARD, F.; MADELAINE, G.; DELHAYE, J. Quelques remarques sur la generation et la mesure des spheres de latex polystyrene. Aerosol Sci., 1:357-67, 1970.
3. BILLINGS, C.E. & GUSSMAN, R.A. Dynamic behavior of aerosols. In: DENNIS, R. Handbook on aerosols. Oak Ridge, 1976, p. 40-65.
4. BRINK, JR., J.A.; KENNEDY, E.D.; YU, H.S. Particle Size measurements with cascade impactors. AIChE Symp. Ser., 70(137):333-40, 1974.
5. BRION, J. Methodes de mesure de l'efficacite des filtres a air. sem local, Commissariat a l'Energie Atomique, 1969.
6. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Method of test for low-penetration air filters. 1965. (BS 3928:1965)
7. BURCHSTED, C.A. Requirements for fire resistant high efficiency particulate air filters. In: ATOMIC ENERGY COMMISSION. AEC air cleaning: proceedings of the Ninth Conference ... held in Boston, 13-16 September, 1966, vol.1. p. 62-74. (CONF 660904)
8. BURCHSTED, C.A. & FULLER, A.B. Design, construction, and testing of high-efficiency air filtration systems for nuclear application. Oak Ridge, Oak Ridge National Lab., Jan. 1970. (ORNL-NSIC-65)
9. CESTARO, G. & DWORSCHAK, H. Exploitation du systeme de filtration de l'air dans l'installation de retraitement des combustibles irradiés EUREX. In: COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. High efficiency aerosol filtration: proceedings of a seminar on ... held in Aix-en-Provence, 22-25 November, 1976, Luxembourg, 1977. p. 365-82.
10. COHEN, B.L. & LEE, I. A catalog of risk. Health Phys., 36(6):707-22, 1979.
11. DAUTREBANDE, L. Microaerosols. New York, Academic, 1962.
12. DAVIES, E.J.; RAY, A.K.; CHANG, R. Experimental determination of aerosol evaporation rates at large and small Knudsen numbers. AIChE Symp. Ser., 74(175):190-203, 1978.
13. DAVIES, C.N. Aerosol Science. New York, Academic, 1968 apud MILLA, E. Estudio sobre la generaci3n y granulometria de un aerosol patron ... Madrid, Junta de Energia Nuclear, 1978. p. 2. (JEN 428 Sp)

14. DELHAYE, J. & MICHEL, J. Contribution a l'amelioration de la methode d'essais des filtres à air au chlorure de sodium. In: COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. High efficiency aerosol filtration: proceedings of a seminar on ... held in Aix-en-Provence, 22-25 November, 1976, Luxembourg, 1977. p. 241-248.
15. DEUTSCH INSTITUT FÜR NORMUNG. Typprüfung von Schwebstofffiltern. Oktober, 1974. (DIN 24 184)
16. DORMAN, R.G. Filtration theory. In: COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. High efficiency aerosol filtration: proceedings of a seminar on ... held in Aix-en-Provence, 22-25 November, 1976, Luxembourg, 1977. p. 15-31.
17. DORMAN, R.G.; EDWARDS, J.; POYNTING, R. The sodium chloride aerosol test for high efficiency air filter installations. In: COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. High efficiency aerosol filtration: proceedings of a seminar on ... held in Aix-en-Provence, 22-25 November, 1976, Luxembourg, 1977. p. 127-43.
18. DYMENT, J. The penetration of fibrous media by aerosols as a function of particle size. In: INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES E TECHNIQUES NUCLEAIRES. La pollution radioactive des millieux gazeaux: colloque international sur ..., Saclay, 12-16 Novembre, 1963, v.2. Paris, 1965, p. 395-403.
19. DYMENT, J. & DORMAN, R.G. Filter testing by the manufacturer and in the laboratory. In: COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. High efficiency aerosol filtration: proceedings of a seminar on ... held in Aix-en-Provence, 22-25 November, 1976, Luxembourg, 1977. p. 283-306.
20. DYMENT, J. & POYNTING, R. An improved sodium flame test for high efficiency air filters. Filtr. Sep., May/Jun:249-51, 1977.
21. COMITÉ EUROPÉEN DES CONSTRUCTEURS DE MATÉRIEL AÉRAULIQUE. Sodium chloride aerosol test for filters using flame photometrie technique. sem local, sem data. (EUROVENT 4/4)
22. GLUKHOV, S.A. Nov. Med. Tekh., 1:125, 1966 apud GLUKHOV, S.A. Theory and calculation of ejection atomizers. Biomed. Eng., 2(6):324-9, 1968.
23. GLUKHOV, S.A. Theory and calculation of ejection atomizers. Biomed. Eng., 2(6):324-9, 1968.
24. HIRLING, J. & HARGITTAI, J. Application of microautoradiografic methods for determination of the particle-size distribution of submicron size radioactive aerosols. Nukleonika, 21(2):175-81, 1976.
25. HOCHRAINER, D. Physical behavior and sampling of airborne particles. In: MALISSA, H. Analysis of airborne particles by physical methods. West Palm Beach, Florida, CRC, 1978. p.8-26.

26. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Particle size analysis in estimating the significance of airborne contamination, Vienna, 1978. (Technical Reports Series, 179)
27. JACKSON, M.L.; CHIMONAS, S.T.; PATTERSON, R.G. Sample collection of solid and liquid aerosols by sonic flow impingement. AIChE Symp. Ser., 72(156):145-53, 1976.
28. JACKSON, M.L. & PATTERSON, R.G. Fine particle collection in multihole, sonic- and supersonic-flow impingers. AIChE Symp. Ser., 71(147):47-51, 1975.
29. KASAHARA, M. & TAKAHASHI, K. Numerical calculation of aerosol particle concentration passing through diffusion tube. Tech. Rep. Inst. At. Energy Uni., 165:1-31, 1974.
30. LAPPLE, C.E. Characteristics of particles and particles dispersoids. J. Stanford Res. Inst., 5:95, 1961.
31. LEWIS, H.C.; EDWARDS, D.G.; GOGLIA, M.J.; RICE, R.I.; SMITH, L.W. Atomization of liquids in high velocity gas streams. Ind. Eng. Chem., 40(1):67-74, 1948.
32. LOGAN, T.J.; FELDER, R.M.; FERRELL, J.K. Experimental investigation of isokinetic and anisokinetic sampling of particulates in stack gases. AIChE Symp. Ser., 70(137):310-16, 1974.
33. MAZZINI, M.; CUCCURU, A.; KUNZ, P. Experiments on high efficiency aerosol filtration. In: COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. High efficiency aerosol filtration: proceedings of a seminar on ... held in Aix-en-Provence, 22-25 November, 1976, Luxembourg, 1977. p. 545-67.
34. MEGAW, W.J. The aerosol problem in nuclear installations. In: COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. High efficiency aerosol filtration: proceedings of a seminar on ... held in Aix-en-Provence, 22-25 November, 1976, Luxembourg, 1977, p. 1-14.
35. MERCER, T.T. Aerosol technology in hazard evaluation. New York, Academic, 1973.
36. MILLA, E. Estudio sobre la generación y granulometría de un aerosol patron de ClNa para la determinación de eficacias filtrantes de filtros absolutos. Madrid, Junta de Energía Nuclear, 1978. (JEN 428 Sp)
37. MUGELE, R.A. & EVANS, H.D. Droplet size distribution in sprays. Ind. Eng. Chem., 43(6):1317-24, 1951.
38. ORR, JR., C. Particulate technology, New York, Macmillan, 1966.

39. PRADEL, J. & BRION, J. Methode d'essais de filtres a haute efficacité par aerosol d'uranine. Thermique et Aéraulique, 1(12):51-63, 1970.
40. PRADEL, J. & DUPOUX, J. Influence de la dimension des particules e de la vitesse de filtration sur l'efficacité des filtres a air. sem local, Commissariat a l'Energie Atomique, Janvier, 1974.
41. SARTORIUS-MEMBRANFILTER GmbH. Manual de opera o do espectrofotômetro SM 167 16. Göttingen, 1977.
42. SCHWENDIMAN, L.C.; SEHMEL, G.A.; POSTMA, A.K. Radioactive particle retention in aerosol transport systems. In: INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES ET TECHNIQUES NUCLEAIRES. La pollution radioactive des millieux gazeaux: colloque international sur ..., S aclay, 12-16 Novembre, 1963, v.2. Paris, 1965, p. 373-85.
43. SILVERMAN, L.; BILLINGS, C.E.; FIRST, M.W. Particle size analysis in industrial higiene. New York, Academic, 1971.
44. STENHOUSE, J.I.T.; FORMBY, J.; SINCLAIR, I. An experimental determination of the retention of submicron particles in fibrous materials. In: COMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. High efficiency aerosol filtration: proceedings of a seminar on ... held in Aix-en-Provence, 22-25 November, 1976. Luxembourg, 1977, p. 623-31.
45. STENHOUSE, J.I.T. & LLOYD, P.J. Sampling errors due to inertial classification. AIChE Symp. Ser., 70(137):307-9, 1974.
46. STRAUSS, W. Industrial gas cleaning. Oxford, Pergamon, 1966.
47. TELLER, A.J.; MILLER, S.A.; SCHEIBEL, E.G. Liquid-gas systems. In: PERRY, J.H. Chemical Engineers' Handbook, New York, McGraw-Hill, 1963.
48. UNICEN: COMMISSIONE UNI ENERGIA NUCLEARE. Collaudo di efficienza dei sistemi filtranti per particelle installati nei condotti di ventilazione. 5 dicembre 1973. (UNICEN 7)