

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**DESEMPENHO DE FILTROS FIBROSOS OPERANDO NA REMOÇÃO
DE PARTÍCULAS NANOMÉTRICAS DE AEROSSÓIS**

Juliana Steffens

São Carlos –SP

2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**DESEMPENHO DE FILTROS FIBROSOS OPERANDO NA REMOÇÃO DE
PARTÍCULAS NANOMÉTRICAS DE AEROSSÓIS**

Juliana Steffens

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Renato Coury

São Carlos – SP

2007

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

S817df

Steffens, Juliana.

Desempenho de filtros fibrosos operando na remoção de partículas nanométricas de aerossóis / Juliana Steffens. -- São Carlos : UFSCar, 2007.
206 f.

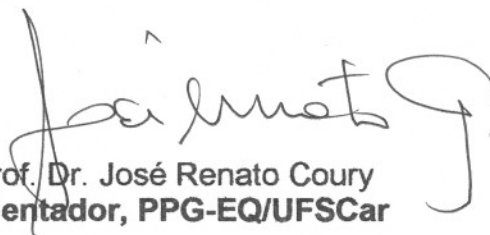
Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2007.

1. Filtração. 2. Nanopartículas. 3. Aerossóis. 4. Limpeza de gases. 5. Eficiência de coleta. 6. Mecanismo de coleta. I. Título.

CDD: 660.284245 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE JULIANA STEFFENS, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS EM 28 DE FEVEREIRO DE 2007.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. José Renato Coury
Orientador, PPG-EQ/UFSCar




Prof. Dr. César Costapinto Santana
FEQ/UNICAMP



Prof. Dr. Cristiano Piacsek Borges
PEQ/COPPE/UFRJ



Prof. Dr. Roberto Guardani
DEQ/EPUSP



Prof. Dr. José Antonio Silveira Gonçalves
PPG-EQ/UFSCar

*"O valor das coisas não está no tempo em que elas duram,
mas na intensidade com que acontecem.
Por isso existem momentos inesquecíveis,
coisas inexplicáveis e
pessoas incomparáveis".*

(Fernando Pessoa)

Aos meus pais Roque e Maria,
à minha irmã Clarice e ao Rogério
com muito amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador José Renato Coury "Zezão" pela orientação, incentivo, confiança, paciência, oportunidade, apoio e amizade durante a realização deste trabalho.

Aos professores José Antônio e Mônica, e aos funcionários do Departamento de Engenharia Química da UFSCar, que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

Aos meus pais Roque Inácio e Maria Rosa, que sempre me incentivaram, apoiaram, ajudaram em todos os momentos mesmo estando longe, mas que ligavam constantemente, que sem eles eu não teria alcançado mais esta vitória na minha vida.

À minha irmã Clarice que todos os dias incansavelmente me mandava e-mails para saber como eu estava e sempre dando seu apoio.

Ao Rogério, pelo apoio, amor, paciência, ajuda e compreensão dedicados em todos os momentos.

Ao Marcos, Leni, Patrícia, Sanderli, Estephani, Nicoli, Lígia, Daniela, Natália, Kelly e Camilo, pela amizade e apoio.

Aos meus colegas e amigos de laboratório Maria Carolina, Marcos Vinícios, Marcos Felicetti, Edmundo, Karina, Érica, Ana Paula, Wania, Vádila, Marina, Simone, Vanessa, Taísa, Juliana, Edinalda pelo companheirismo, ajuda e amizade que nunca serão esquecidos.

A todos meus familiares, que sempre estavam se preocupando comigo e torcendo pra que eu pudesse alcançar este título, sempre apoiando e ajudando, que sem estes não poderia alcançar o êxito do título de doutora em Engenharia Química.

Ao departamento de Engenharia Química da UFSCar pela disponibilidade dos laboratórios e da infra-estrutura utilizadas, para execução do trabalho experimental e principalmente pelo laboratório de controle ambiental.

A todos os amigos que fiz em São de São Carlos que sempre estiveram dando força e incentivo para continuar o doutorado, que estavam sempre do meu lado tanto nas horas boas como nas ruins.

Aos meus amigos do Monte Belo, Aratiba por me incentivarem a vir para São Carlos e continuar os estudos.

Ao CNPq e à FAPESP pelo auxílio financeiro disponibilizado, onde com o qual consegui me manter.

A VECO e a Ginnocciari por doarem o meio filtrante para realização deste estudo.

Agradeço principalmente a Deus pela oportunidade de alcançar mais uma vitória em minha vida. Deus esteve do meu lado em todos os momentos. Nele sempre me apoiei para me dar paciência, força, coragem, esperança, saúde e sempre pedindo a ele que me ajudasse a superar as dificuldades. Principalmente na saudade que sentia de minha família e da minha terra.

Ao departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar pelas Análises realizadas no MEV e ao departamento de Química da UNESP de Araraquara pelas análises efetuadas no MET.

A todos o meu sincero muito obrigada.

SUMÁRIO

RESUMO	x
ABSTRACT	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xviii
LISTA DE SÍMBOLOS	xix
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 - Nanopartículas.....	4
2.1.1 - Aplicações das nanopartículas	5
2.1.2 - Efeitos Nocivos	7
2.2 - Continuidade do Meio	12
2.3 - Correção para escoamento em meio não contínuo.....	14
2.4 - Filtração.....	18
2.4.1 - Conceitos Gerais	18
2.5 - Filtros	19
2.6 - Eficiência de coleta	22
2.7 - Mecanismos de coleta	25
2.7.1 - Mecanismo difusional	26
2.7.2 - Mecanismo inercial	30
2.7.3 - Mecanismo de interceptação direta.....	31
2.7.4 - Mecanismo gravitacional	32
2.7.5 - Mecanismo eletroforético.....	33
2.7.6 - Coleta simultânea por diversos mecanismos.....	35
2.8 - Queda de pressão no filtro.....	37
2.9 - Movimento Browniano	38
2.10 - Filtração de nanopartículas.....	39
3 - MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 - Unidade Experimental.....	43
3.1.1 - Detalhamento do equipamento de filtração.....	45
3.1.1.1 - Dispositivo de filtração	45
3.1.1.2 - Medidor de vazão	47
3.1.1.3 - Medidor de umidade	48
3.1.1.4 - Medidor de temperatura	48
3.1.1.5 - Medidor de queda de pressão	48
3.1.1.6 - Gerador de partículas	48
3.1.1.7 - Contador de Partículas	53
3.1.1.9 - Filtros de purificação do ar.....	55
3.2 - Material utilizado	56
3.2.1- Material particulado	56
3.2.2 - Filtros	59
3.2.2.1 - Filtro de Poliéster	59
3.2.2.2 - Filtro HEPA	60
3.2.2.3 - Determinação do diâmetro das fibras.....	62
3.2.2.4.1 - Metodologia de determinação da porosidade dos filtros.....	63
3.3 - Procedimentos Experimentais	65

3.3.1 - Determinação das curvas de corrente-tensão para o gerador	65
3.3.2 - Coleta das partículas geradas para cada concentração de solução	66
3.3.3 - Determinação do diâmetro das partículas geradas	67
3.3.4 - Determinação da eficiência dos filtros	68
3.3.5 - Condições de operação	70
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
4.1 - Calibração do Gerador de Partículas	71
4.2 - Determinação dos diâmetros das fibras dos filtros.....	76
4.3 - Determinação da porosidade dos filtros.....	79
4.4 - Desempenho dos filtros de celulose (HEPA) e poliéster na remoção de nanopartículas	81
4.4.1 - Determinação experimental da eficiência dos filtros	81
4.4.2 - Eficiência do filtro de Poliéster	82
4.4.2.1 - Eficiência experimental	82
4.4.2.2 - Experimental vs teoria.....	85
4.4.2.3 - Proposta deste trabalho	92
4.4.3 - Eficiência do filtro HEPA	103
4.4.3.1 - Eficiência experimental.....	103
4.4.3.2 - Experimental vs teoria.....	106
4.4.3.3 - Proposta deste trabalho	110
5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	116
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
APENDICE A.....	128
Determinação do diâmetro das fibras	128
APENDICE B.....	129
Detalhes do Gerador de Partículas	129
APÊNDICE C.....	132
Determinação das condições de operação do gerador	132
APENDICE D.....	141
Determinação do diâmetro das partículas de NaCl geradas	141
APÊNDICE E.....	150
Avaliação do desempenho do gerador	150
APÊNDICE F.....	156
Determinação da porosidade dos filtros	156
APÊNDICE G.....	159
Eficiências de coleta pelo mecanismo inercial e gravitacional para os filtros de Poliéster e HEPA.....	159
APÊNDICE H.....	164
Resultados das eficiências experimental e teórica do filtro HEPA.....	164
APÊNDICE I.....	171
Eficiências experimental e teórica do filtro HEPA	171
APÊNDICE J.....	174
Resultados das eficiências experimental e teórica do filtro de poliéster	174
APÊNDICE L.....	181
Eficiência individual do filtro de poliéster e HEPA	181
APÊNDICE M.....	200

Concentração de partículas na entrada e saída dos filtros	200
APÊNDICE N.....	204
Queda de pressão dos filtros.....	204

RESUMO

A crescente escalada da poluição do ar nas últimas décadas vem causando um sensível aumento no monitoramento e no controle de emissões de material particulado na atmosfera, visando minimizar os problemas causados ao meio ambiente e à saúde humana. Particularmente, o comportamento de partículas nanométricas no ar necessita atenção especial. Os filtros de fibras, um dos métodos mais antigos de remoção de material particulado, são, em princípio, capazes de atuar nessa faixa de tamanho, mas dados sobre seu desempenho são ainda escassos. Neste trabalho estudou-se o comportamento de um filtro industrial de poliéster e de um filtro de alta eficiência (HEPA) com o intuito de avaliar o desempenho dos mesmos operando na remoção de partículas nanométricas de aerossóis. O filtro de poliéster tinha porosidade de 0,884, espessura de 4,5 mm e diâmetro de fibra de 16 μ m e o filtro HEPA uma porosidade de 0,920, espessura de 0,4 mm e diâmetro de fibras entre 0,075 e 2,35 μ m. O aerossol de teste era composto por partículas monodispersas de NaCl, que foram obtidas a partir de um gerador de partículas Electro Spray Aerosol Generator, modelo 3480, da TSI, utilizando soluções de sal nas concentrações de 0,5 a 5,0 g/L. O tamanho das partículas geradas variou de 8,4 a 94,8 nm. Para determinar este diâmetro foram obtidas imagens do Microscópio Eletrônico de Transmissão e analisadas no Programa Image Pro Plus, 3.0. O dispositivo de filtração foi construído em acrílico com área de filtração de 40 cm². O desempenho dos filtros foi avaliado através da análise da eficiência de remoção das partículas nanométricas, através da contagem de partículas, utilizando um contador de partículas, da TSI, modelo 3007. O filtro de poliéster apresentou eficiência de coleta máxima de 0,990. O filtro HEPA demonstrou possuir uma grande capacidade de coletar partículas nesta faixa de tamanho, obtendo eficiências maiores que 0,99994. O aumento da velocidade de filtração, bem como o aumento do diâmetro das partículas proporcionou queda na eficiência em ambos os filtros, comportamento típico de filtros operando na região de predominância do mecanismo difusional. Quando avaliados os modelos presentes na literatura, verificou-se que os mesmos não se ajustaram aos dados experimentais. Portanto, propôs-se um ajuste ao modelo de LIU & RUBOW (1990), considerando um aumento efetivo no mecanismo de interceptação direta causado pelo movimento Browniano. No caso dos filtros HEPA, frente à observada discrepância entre teoria e experimentos, foi proposto um equacionamento que levou em conta a distribuição de tamanho das fibras do filtro. Em ambos os casos verificou-se uma sensível melhora no ajuste da previsão teórica aos dados experimentais.

Palavras-chave: Filtração de nanopartículas, aerossóis, eficiência de coleta, mecanismos de coleta, limpeza de gases.

ABSTRACT

The increase in the air pollution in the last decades is causing a strong increase in the monitoring and control of emissions of particulate matter in the atmosphere, in order to minimize the problems caused to the environment and to the human health. Particularly, the behavior nanometric particles in the air needs special attention. The fiber filters, one of the oldest methods of particle removal, are, in principle, capable to operate in this size range, but data on their performance are still scarce. In this work, the behavior of an industrial filter of polyester and of a high efficiency (HEPA) filter was studied with the intention of evaluating their performance operating in the removal of nanometric particles from aerosols. The polyester filter had a porosity of 0.884, a thickness of 4.5 mm and diameter of fiber of 16 μm and the HEPA filter the porosity of 0.920, thickness of 0.4 mm and diameter of fibers between 0.075 and 2.35 μm . The test aerosol was composed by monodispersed NaCl particles, obtained from the Electro Spray Aerosol Generator, model 3480, from TSI, using salt solutions in concentrations from 0.5 to 5.0 g/L. The size of the generated particles varied from 8.4 to 94.8 nm. To determine this diameter, images in an Electronic Transmission Microscope were obtained and analyzed in the image analyzer Image Pro Plus, 3.0. The filtration device was built in acrylic with a filtration area of 40 cm^2 . The performance of the filters was evaluated through the analysis of the collection efficiency of the nanometric particles, by counting the particles before and after the filter, using a TSI Condensation Nuclei Particle Counter, model 3007. The filter of polyester showed a maximum collection efficiency of 0.990. The HEPA filter demonstrated its capacity to collect particles in this size range, obtaining larger efficiencies than 0.99994. The increase of the filtration velocity, as well as the increase of the diameter of the particles resulted in smaller efficiencies in both filters, typical behavior of filters operating in the range of predominance of the diffusional mechanism. When compared to theoretical models from the literature, it was verified poor fitting. Therefore, it is suggested an adjustment to the LIU and RUBOW (1990) model, and an effective increase in the mechanism of direct interception caused by the Brownian motion was introduced. In the case of the HEPA filters, considering the observed discrepancy between theory and experiment, an approach that took into account the fiber size distribution of the filter was proposed. In both cases a sensitive improvement was verified in the adjustment of the theoretical prediction to the experimental data.

Keywords: Nanoparticle filtration; aerosols; collection efficiency; collection mechanisms, gas cleaning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 – Esquema do Sistema Respiratório (HINDS, 1999).....	9
Figura 2. 2 -Mecanismos físicos de coleta (SPURNY, 1998).....	26
Figura 2. 3 - Interação dos mecanismos de coleta e eficiência resultante.....	35
Figura 2. 4 - Eficiência do filtro com relação ao tamanho.....	36
Figura 2. 5- (a)Trajetória da molécula de gás com $\lambda=0,066\mu\text{m}$ e tempo percorrido= $1,6\text{ ns}$;...	39
Figura 3. 1- Vista geral da unidade experimental.....	44
Figura 3. 2 – Foto do dispositivo de filtração.....	45
Figura 3. 3 - Dispositivo de filtração: Vista lateral com cotas (cm).....	46
Figura 3. 4 - Detalhe do suporte do filtro.....	46
Figura 3. 5 - Esquema expandido do dispositivo de filtração.....	47
Figura 3. 6 - Foto do gerador de partículas.....	49
Figura 3. 7 - Esquema de funcionamento do gerador de partículas (manual de funcionamento do gerador modelo 3480, da TSI).....	50
Figura 3. 8 - Detalhe: a) Porta-amostra , b) Câmara de acrílico.....	51
Figura 3. 9 - Fonte de Amerício.....	52
Figura 3. 10 - Contador de partículas.....	53
Figura 3. 11 - Esquema de funcionamento do contador de partículas.....	54
Figura 3. 12 - Filtros para purificação de ar.....	56
Figura 3. 13 - Concentração de partículas na corrente gasosa gerada pelo compressor com relação do tempo em minutos.....	58
Figura 3. 14 - Vista do filtro de Poliéster.....	59
Figura 3. 15 - Vista do filtro de Poliéster.....	60
Figura 3. 16 - Vista lateral do filtro HEPA.....	61
Figura 3. 17 - Vista lateral do filtro HEPA.....	61
Figura 3. 18 - Fotografia das amostras dos filtros embutidos (a) poliéster e (b) HEPA.....	63
Figura 3. 19 - (a e b) Fotografias dos filtros HEPA e poliéster respectivamente (c e d) fotografias dos filtros HEPA e poliéster onde as fibras foram marcadas pelo software. .	65
Figura 4. 1 - Imagem das partículas obtidas com a solução 5g/L.....	73
Figura 4. 2 - Micro análise para a amostra com concentração de NaCl de a 5,0 g/L.....	73
Figura 4. 3 - Determinação do diâmetro em função da concentração de NaCl na solução.....	74
Figura 4. 4 - Distribuição do Diâmetro das fibras.....	77
Figura 4. 5 - Eficiência experimental do filtro de poliéster em relação a d_p para U_0 de 3,0 a 6,4 cm/s.....	83
Figura 4. 6 - Eficiência experimental do filtro de poliéster em relação a d_p para U_0 de 7,0 a 10,2 cm/s.....	83
Figura 4. 7 - Eficiência experimental do filtro de poliéster em relação a d_p para U_0 de 11,5 a 25 cm/s.....	84
Figura 4. 8 - Eficiência experimental do filtro de poliéster em função.....	85
Figura 4. 9 - Eficiência experimental e teórica (Equação de LIU & RUBOW (1990))em relação a d_p do filtro de poliéster para $U_0= 3,0$ a 25 cm/s.....	86
Figura 4. 10 - Comparação entre as eficiências de coleta experimental e teórica do filtro de poliéster, utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990).....	87
Figura 4. 11 - Eficiências individuais de coleta do filtro de poliéster em relação a d_p com $U_0= 3,0$ cm/s (Equação de LIU & RUBOW (1990)).....	88

Figura 4. 12 - Eficiências individuais de coleta do filtro de poliéster em relação a d_p com $U_0=12,8$ cm/s (Equação de LIU & RUBOW (1990)).	88
Figura 4. 13- Eficiências individuais de coleta do filtro de poliéster em relação a d_p com $U_0=25,0$ cm/s (Equação de LIU & RUBOW (1990)).	89
Figura 4. 14 - Eficiências de coleta experimental e teórica em relação a d_p (Equação de PAYET et al. (1992)) para o filtro de poliéster.	90
Figura 4. 15 - Comparação entre eficiências de coleta experimental e teórica do filtro de poliéster, utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).	90
Figura 4. 16 - Eficiência de coleta individual em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=3,0$ cm/s (Equação de PAYET et al. (1992)) do filtro de poliéster	91
Figura 4. 17 - Eficiência de coleta individual em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=12,8$ cm/s (Equação de PAYET et al. (1992)) do filtro de poliéster.	91
Figura 4. 18 - Eficiência de coleta individual em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=25,0$ cm/s (Equação de PAYET et al. (1992)) do filtro de poliéster.	92
Figura 4. 19 – Diâmetro efetivo da partícula (a) e semi-perímetro de uma fibra (b).	94
Figura 4. 20 - Eficiência experimental e teórica do filtro de poliéster com d_p' em R (Equação de LIU & RUBOW (1990)).	96
Figura 4. 21 - Eficiência experimental e teórica do poliéster com d_p' em R (Equação de PAYET et al. (1992)).	96
Figura 4. 22 - Comparação entre as eficiências de coleta experimental e teórica (LIU & RUBOW (1990)) com d_p' em R.	97
Figura 4. 23 - Comparação entre as eficiências de coleta experimental e teórica (PAYET et al. (1992)) com d_p' em R para o filtro de poliéster.	98
Figura 4. 24 - Eficiência de coleta individual (Equação de LIU & RUBOW (1990)) com d_p' em R, em relação a d_p para velocidade de 3,0 cm/s para o filtro de poliéster.	98
Figura 4. 25 - Eficiência de coleta individual (Equação de LIU & RUBOW (1990)) com d_p' em R, em relação a d_p para velocidade de 12,8 cm/s para o filtro de poliéster.	99
Figura 4. 26 - Eficiência de coleta individual (Equação de LIU & RUBOW (1990)) com d_p' em R, em relação a d_p para velocidade de 25,0 cm/s para o filtro de poliéster.	99
Figura 4. 27 - Eficiência de coleta individual (Equação de PAYET et al. (1992)) com d_p' em R, em relação a d_p para velocidade de 3,0 cm/s para o filtro de poliéster.	100
Figura 4. 28 - Eficiência de coleta individual (Equação de PAYET et al. (1992)) com d_p' em R, em relação a d_p para velocidade de 12,8 cm/s para o filtro de poliéster.	101
Figura 4. 29 - Eficiência de coleta individual (Equação de PAYET et al. (1992)) com d_p' em R, em relação a d_p para velocidade de 25,0 cm/s para o filtro de poliéster.	101
Figura 4. 30 - Eficiência de coleta individual em relação ao diâmetro de partícula com ampla faixa de diâmetro para $U_0=6,4$ cm/s calculada com as Equações LIU & RUBOW (1990).	102
Figura 4. 31 - Eficiência de coleta individual em relação ao diâmetro de partícula com ampla faixa de diâmetro para $U_0=6,4$ cm/s calculada com as	103
Figura 4. 32 - Eficiência experimental do filtro HEPA em relação ao diâmetro das partículas para as velocidades de 3,0 a 6,4 cm/s.	104
Figura 4. 33 - Eficiência experimental do filtro HEPA em relação ao diâmetro das partículas para as velocidades de 7,0 a 10,2 cm/s.	105
Figura 4. 34 - Eficiência experimental do filtro HEPA em relação ao diâmetro das partículas para as velocidades de 11,5 a 25,0 cm/s.	105
Figura 4. 35 - Eficiência experimental do filtro HEPA em relação a	106
Figura 4. 36 - Eficiência experimental e teórica do filtro HEPA em relação ao diâmetro das partículas para $\overline{D}_f=0,72$ μm (Equação de LIU & RUBOW(1990)).	107

Figura 4. 37 - Comparação entre as eficiências de coleta experimental e teórica do filtro HEPA, utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990).	108
Figura A. 1 - Foto do filtro HEPA obtida pelo MEV com aumento de 10000 vezes, analisada com o Programa Image Pró Plus.	128
Figura B. 1 - Representação dos modos de operação do gerador: 1) sem escoamento de líquido, 2) modo gotejante e 3) modo jato cônico (Manual da TSI).	129
Figura B. 2 - Vista do gerador de partículas com ampliação do capilar.....	131
Figura C. 1 - Curva corrente-tensão para a solução de NaCl	133
Figura C. 2 - Curva corrente-tensão para a solução NaCl.....	134
Figura C. 3- Curva corrente-tensão para a solução de NaCl	134
Figura C. 4 - Curva corrente-tensão para a solução de NaCl	135
Figura C. 5 - Curva corrente-tensão para a solução de NaCl	135
Figura C. 6 - Curva corrente-tensão para a solução de NaCl	136
Figura C. 7 - Curva corrente-tensão para a solução de NaCl	136
Figura C. 8 - Curva corrente-tensão para a solução de NaCl	137
Figura C. 9 - Curva corrente-tensão para a solução de NaCl	137
Figura C. 10 - Curva corrente-tensão para a solução de NaCl	138
Figura D. 1 - Partículas obtidas com a solução de NaCl	141
Figura D. 2 - Partículas obtidas com a solução de NaCl	142
Figura D. 3 - Partículas obtidas com a solução de NaCl	142
Figura D. 4 - Partículas obtidas com a solução de NaCl	143
Figura D. 5 - Partículas obtidas com a solução de NaCl	143
Figura D. 6 – Micro análise para a amostra com concentração de NaCl 0,5 g/L.....	144
Figura D. 7 – Micro análise para a amostra com concentração de NaCl de 1,0 g/L.	144
Figura D. 8 – Micro análise para a amostra com concentração de NaCl de 1,5 g/L.	145
Figura D. 9 – Micro análise para a amostra com concentração de NaCl de 2,5 g/L.	145
Figura D. 10 – Micro análise para a amostra com concentração de NaCl de 4,5 g/L.	145
Figura D. 11 -Várias formas do cristal de NaCl.....	148
Figura E. 1 - Vazão de 0,1 L/min com concentração média de Na Cl de $1,06 \cdot 10^4 \text{ \#/cm}^3$	150
Figura E. 2 -Vazão de 0,2 L/min com concentração média de NaCl de $5,76 \cdot 10^3 \text{ \#/cm}^3$	151
Figura E. 3 - Efeito do acúmulo de NaCl para os primeiros 2 min.	151
Figura E. 4 - Efeito do acúmulo de NaCl após 2 min.....	152
Figura E. 5- Efeito do acúmulo de NaCl após 4 min.....	152
Figura E. 6 - Ensaio sem acúmulo de NaCl (concentração de $1,80 \cdot 10^4 \text{ \#/cm}^3$).	153
Figura E. 7 - Ensaio sem acúmulo de NaCl (concentração de $1,81 \cdot 10^4 \text{ \#/cm}^3$).	153
Figura E. 8 - Ensaio sem acúmulo de NaCl (concentração de $1,81 \cdot 10^4 \text{ \#/cm}^3$).	153
Figura E. 9- Concentração de NaCl igual 0,5 g/L e	154
Figura E 10 -Concentração de NaCl igual 1,0 g/L e	154
Figura E. 11 - Concentração de NaCl igual 1,5 g/L e	154
Figura F. 1 - Vista do POREMASTER, da QUANTACROME	157
Figura I. 1 - Eficiência experimental e teórica em relação a d_p para $U_0 = 4,0 \text{ cm/s}$ utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990).	171

Figura I. 2 - Eficiência experimental e teórica em relação a d_p para $U_0= 5,0$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990).	171
Figura I. 3 - Eficiência experimental e teórica em relação a d_p para $U_0= 7,0$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990).	172
Figura I. 4 - Eficiência experimental e teórica em relação a d_p para $U_0= 7,7$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990).	172
Figura I. 5- Eficiência experimental e teórica em relação a d_p para $U_0= 10,2$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990).	173
Figura I. 6 - Eficiência experimental e teórica em relação a d_p para $U_0= 11,5$ cm/s utilizando Equação de LIU & RUBOW (1990).	173
Figura J. 1– Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=3,0$ cm/s.	174
Figura J. 2 – Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=4,0$ cm/s.	175
Figura J. 3 – Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=5,0$ cm/s.	175
Figura J. 4 – Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=6,4$ cm/s.	176
Figura J. 5– Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=7,0$ cm/s.	176
Figura J. 6– Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=7,7$ cm/s.	177
Figura J. 7 – Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=9,0$ cm/s.	177
Figura J. 8 – Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=10,2$ cm/s.	178
Figura J. 9 – Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=11,5$ cm/s.	178
Figura J. 10– Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=12,8$ cm/s.	179
Figura J. 11 – Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=19,2$ cm/s.	179
Figura J. 12 – Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=25,0$ cm/s.	180
Figura L. 1 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 4,0$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).	181
Figura L. 2- Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 5,0$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).	182
Figura L. 3 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 6,4$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).	182
Figura L. 4 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 7,0$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).	183
Figura L. 5- Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 7,7$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).	183
Figura L. 6- Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 9,0$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).	184
Figura L. 7- Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 10,2$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).	184

Figura L. 8 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 11,5$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).	185
Figura L. 9 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 19,2$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).	185
Figura L. 10 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 4,0$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).	186
Figura L. 11 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 5,0$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).	186
Figura L. 12 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 6,4$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).	187
Figura L. 13 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 7,0$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).	187
Figura L. 14- Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 7,7$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).	188
Figura L. 15 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 9,0$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).	188
Figura L. 16 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 10,2$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).	189
Figura L. 17 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 11,5$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).	189
Figura L. 18 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 19,2$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).	190
Figura L. 19 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 4,0$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p' em R.	190
Figura L. 20 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 5,0$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p' em R.	191
Figura L. 21- Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 6,4$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p' em R.	191
Figura L. 22 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 7,0$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p' em R.	192
Figura L. 23 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 7,7$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p' em R.	192
Figura L. 24 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 9,0$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p' em R.	193
Figura L. 25 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 10,2$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p' em R.	193
Figura L. 26- Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 11,5$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p' em R.	194
Figura L. 27 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 19,2$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p' em R.	194
Figura L. 28 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 4,0$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p' em R.	195
Figura L. 29 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 5,0$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p' em R.	195
Figura L. 30 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 6,4$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p' em R.	196
Figura L. 31 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 7,0$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p' em R.	196
Figura L. 32- Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 7,7$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p' em R.	197

Figura L. 33 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 9,0$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p' em R.	197
Figura L. 34 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 10,2$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p' em R.	198
Figura L. 35 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 11,5$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p' em R.	198
Figura L. 36 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 19,2$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p' em R.	199
Figura N. 1 - Variação da queda de pressão do filtro de Poliéster em função do tempo para $U_0= 3,0$ a $25,0$ cm/s e $d_p= 94,8$ nm.	204
Figura N. 2 - Variação da queda de pressão do filtro HEPA em função do tempo para $U_0= 3,0$ a $25,0$ cm/s e $d_p= 94,8$ nm.	205

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 - Características da água utilizada.	57
Tabela 4. 1 - Diâmetro das partículas para diferentes concentrações e seus	75
Tabela 4. 2 - Resultados comparativos dos diâmetros de partículas deste trabalho com FALAGUASTA (2005).....	76
Tabela 4. 3 - Dados de diâmetros de fibras do filtro de poliéster.....	77
Tabela 4. 4 - Números de fibras com seus respectivos diâmetros e fração acumulada.....	79
Tabela 4. 5 - Dados de porosidade para o filtro de Poliéster utilizando a metodologia de AGUIAR (1995) e a metodologia do Porosímetro.....	80
Tabela 4. 6 - Dados de porosidade para o filtro HEPA utilizando a metodologia de AGUIAR (1995) e a metodologia do Porosímetro.	80
Tabela C. 1 - Condutividade das soluções de diversas concentrações de NaCl.....	133
Tabela C. 2 - Tensões aplicadas para as diversas concentrações de NaCl.....	140
Tabela G. 1 - Resultados das eficiências inercial e gravitacional calculadas pelas Equações 2.44 e 2.51, para todas as velocidades e d_p estudados, para o filtro de poliéster.....	159
Tabela G. 2 - Resultados das eficiências inercial e gravitacional calculadas pelas Equações 2.44 e 2.51, para todas as velocidades e d_p estudados, para o filtro HEPA com	162
Tabela M. 1 - Concentração de partículas na entrada e saída do filtro de poliéster.....	200
Tabela M. 2 – Concentração de partículas na entrada e saída do filtro HEPA para todas as velocidades estudadas.....	202
Tabela N.1 - Valores de queda de pressão do filtro de poliéster e HEPA.....	226

LISTA DE SÍMBOLOS

A- área do filtro.....	[L ²]
A _p - área projetada pelas fibras.....	[L ²]
C- concentração de partículas.....	[M/L ³]
C ₀ - concentração de partículas na entrada do filtro.....	[M/L ³]
C _c - fator de escorregamento de Cunningham.....	[-]
C _d - fator de correção para o efeito difusional.....	[-]
C _d '- fator de correção para $\eta_d < 1$	[-]
C _E - concentração de partículas na saída do filtro.....	[M/L ³]
C _r - termo de correção para o efeito de interceptação direta.....	[-]
D-coeficiente de difusividade.....	[L ² /t]
D _f -diâmetro das fibras.....	[L]
\bar{D}_f - diâmetro médio das fibras.....	[L]
D _{fi} – diâmetro de fibras com determinada faixa de tamanho.....	[L]
d _p - diâmetro da partícula.....	[L]
d _p '- diâmetro virtual da partícula.....	[L]
d _C - variação da concentração de partículas.....	[-]
d _H - elemento diferencial da espessura do filtro.....	[L]
E- eficiência do filtro.....	[-]
E _e - eficiência experimental do filtro.....	[-]
F _w - força de arraste.....	[ML/t ²]
g- aceleração da gravidade.....	[L/t ²]
Ga- número de Galileu.....	[L/t ²]
H- espessura do do filtro.....	[L]
K _B - constante de Boltzmann.....	[-]
K _M -parâmetro adimensional do mecanismo dipolo imagem.....	[-]
k _d - coeficiente de arraste.....	[M/t]
Kn – número de Knudsen da partícula.....	[-]
Kn _f - número de Knudsen da fibra.....	[-]
Ku- fator hidrodinâmico de Kuwabara.....	[-]
L-semi-perímetro de uma fibra.....	[L]
L _f - comprimento da fibra por unidade de volume.....	[L]
\bar{M} - massa atômica da partícula.....	[M]
m _g - massa do gás.....	[M]
m _p - massa da partícula.....	[M]
N-número total de fibras.....	[-]
N' -densidade do gás em número.....	[M/L ³]
N _c - número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo.....	[-]
n _i - número de partículas com determinado diâmetro de fibras.....	[-]
N _p -número de partículas depositadas por unidade de tempo.....	[-]
P- penetração.....	[-]
P' - pressão absoluta.....	[M/Lt ²]
Pe- Número de Peclet.....	[-]
q- carga da partícula.....	[C]
R- parâmetro de interceptação direta.....	[-]
r _p – raio da partícula.....	[L]

ΔP - queda de pressão máxima de operação	[M/Lt ²]
St- número de Stokes.....	[-]
\bar{s} - distância média percorrida por uma partícula de diâmetro d_p	[L]
T- temperatura absoluta.....	[T]
T_m - temperatura de fusão.....	[T]
U_0 - velocidade do gás.....	[L/t]
V_m - volume específico do sólido no ponto de fusão.....	[L ³ /mol]
V_S -velocidade terminal de sedimentação da partícula.....	[L/t]
v- velocidade intersticial do gás.....	[L/t]
x_i - fração de fibras com determinado diâmetro.....	[-]
W- massa de pó depositada por unidade de área.....	[M/L ³]
w- constante determinada através do ajuste da equação à Milikan.....	[-]
α_r - coeficiente de resistência viscosa.....	[-]
β - volume ocupado pelas fibras.....	[L ³]
β_r - o coeficiente de resistência inercial.....	[-]
ε - porosidade do filtro.....	[-]
ε_0 - permissividade do vácuo.....	[t ² C ² /ML ³]
ε_c - constante dielétrica da partícula.....	[-]
ε_f - constante dielétrica do fluido.....	[-]
ε_i - porosidade de determinada fração de fibras.....	[-]
ε_L - energia característica para o potencial de Lennard-Jones 12-6.....	[L]
γ_c – coeficiente de polarização do coletor.....	[-]
η - eficiência total de coleta das partículas.....	[-]
η_d – eficiência de coleta difusional.....	[-]
η_e - eficiência de coleta eletroforética.....	[-]
η_g -eficiência de coleta gravitacional.....	[-]
η_i - eficiência de coleta inercial.....	[-]
η_{id} - eficiência de coleta por interceptação direta.....	[-]
η_T –soma das eficiências de cada mecanismo de coleta.....	[-]
μ - viscosidade do gás.....	[M/Lt]
ρ_p - densidade da partícula.....	[M/L ³]
σ - diâmetro característico para o potencial de Lennard-Jones 12-6	[L]
τ - tempo de relaxação das partículas.....	[t]
λ - caminho livre médio do gás.....	[L]

1 - INTRODUÇÃO

Pesquisas mostram que as partículas denominadas respiráveis são absorvidas pelo sistema respiratório podem ser causa de inúmeras doenças no organismo humano e, até mesmo, serem responsáveis pela diminuição da expectativa de vida em algumas regiões (DONALDSON et al., 1998).

Estas partículas têm grande impacto sobre a qualidade do ar, questão que tem sua importância cada vez mais ressaltada, em função da gigantesca proporção que alcançou a ação do homem sobre o meio ambiente.

Um grande número de recentes estudos vem demonstrando o risco da exposição às partículas nanométricas, como os de GUZMAN et al. (2006); KUEMPEL et al. (2006); TSUJI et al. (2006); MAYNARD & KUEMPEL (2005); EMERICH & THANOS (2005); BORM & KREYLING (2004), que ressaltam problemas respiratórios, de pulmão, dentre outros, às pessoas expostas a elas.

A remoção destas partículas se torna necessária por razões ocupacionais, qualidade do ar no local de trabalho, ou ecológicas e qualidade do ar atmosférico (HINDS, 1999). O controle da emissão de material particulado está inserido no conceito de desenvolvimento sustentável, definido pela World Commission on Environmental and Development (WCED) apud TURNER (1995), como aquele que supre as necessidades atuais, sem comprometer as das gerações futuras. Este conceito está sendo trabalhado no sentido de que os cidadãos e empresas, sem deixar de se preocuparem com seu desenvolvimento, se conscientizem acerca do problema ambiental e se posicionem quanto à conservação dos bens naturais, levando sempre em consideração que o controle do material particulado está relacionado à qualidade de vida tanto das atuais gerações quanto das futuras.

Nesse sentido, a legislação referente à qualidade do ar tem se tornado crescentemente rigorosa, à medida que vão se tornando claras as correlações entre poluição atmosférica e qualidade de vida animal e vegetal (WERNER et al., 2006; HUND-RINKE & SIMON, 2006; LOVERN & KLAPER, 2006; BURLESON et al., 2004). Nova regulamentação prevê controle das chamadas partículas respiráveis de alto risco ($PM_{2,5}$), que diz respeito a material particulado com diâmetro menor que $2,5 \mu m$, o que certamente levará à aceleração da tecnologia de medida de partículas ultra-finas (ALLEY, 1998).

Qualquer que seja a razão, o fato é que a remoção de partículas sólidas de efluentes gasosos tem-se tornado uma operação industrial indispensável. Dentre os vários equipamentos potencialmente capazes de operar eficientemente nessa remoção, destacam-se os filtros fibrosos. Estes se destacam pela simplicidade de uso, baixo custo e por atingirem altas eficiências de coleta. Suas aplicações incluem: a proteção respiratória, a amostragem do ar, limpeza de ambientes, a recuperação de produtos em processos industriais, sistemas de ventilação de edifícios etc.

Embora os filtros fibrosos tenham sido há muito tempo utilizados na remoção de materiais particulados de gases, o seu desempenho na faixa de tamanho de partículas nanométricas ainda é pouco conhecido. Existem na literatura muitos estudos que utilizaram estes para verificar seu comportamento na remoção de partículas acima de 0,1 micras de diâmetro, mas abaixo destes as pesquisas ainda são escassas.

Considerando-se a importância do melhor conhecimento do comportamento na remoção de nanopartículas de meios gasosos, o presente trabalho teve por objetivo estudar o desempenho de dois tipos de filtros fibrosos: celulose HEPA (High Efficiency Particulate Air) e poliéster na remoção de nanopartículas monodispersas com diâmetros entre 8,4 e 94,78 nm. Estes filtros foram escolhidos por possuírem características diferentes entre si, o que tornou o estudo mais abrangente. Foram também estudados os mecanismos de coleta que atuam nesta

faixa de tamanho de partículas, o que leva à proposta de novas correlações para a eficiência de coleta dos filtros estudados.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Nanopartículas

As nanopartículas estão sendo alvo de intensas pesquisas nos últimos anos. Porém a determinação da faixa de tamanho na qual estas estão compreendidas não é bem definida provocando contradição entre vários trabalhos presentes na literatura.

A International Standard Organization (ISO, 2004), define como nanopartículas aquelas abaixo de 40 nm.

FRIEDLANDER & PIU (2004), assim como DAVIES (2001) e AITKEN et al. (2004) definem as nanopartículas como aquelas que possuem diâmetro menor que 100 nm ou 0,1 μm .

ZHIQIANG et al. (2000) entendem que as nanopartículas são aquelas menores que 1 μm . Esta definição baseia-se nas características de que estas, diferentemente das micropartículas, não são visíveis, por não espalharem a luz e dificilmente serão removidas das correntes gasosas por impactação, uma vez que acompanham os movimentos do gás, quando escoando próximo a um obstáculo.

ENGLERT (2004), assim como PUI & CHEN (1997) denominam partículas ultrafinas ou aerossóis ultrafinos, aqueles que apresentam diâmetros menores que 100 nm. Esta denominação é a utilizada pela United States Environmental Protection Agency.

Em virtude das várias denominações presentes na literatura, o termo nanopartículas é aqui referido a partículas com diâmetro inferior a 100 nm.

2.1.1 - Aplicações das nanopartículas

KRUIS et al. (1998) efetuaram um levantamento bibliográfico de várias aplicações que estavam em estudo na época, como a melhoria da performance de LEDs (diodos emissores de luz), resistores e varistores, em memórias de acesso randômico dinâmico (DRAMs), atenuação de raios UV, supercondutores de altas temperaturas, etc.

DAVIES (2001), cita ainda, várias aplicações não descritas por que estavam em estudo ou seriam estudadas, e algumas, já em aplicação na época. Como exemplo o emprego destas na composição de filmes, impressão e fotografia. Segundo DAVIES (2001), já está em uso na indústria de papel uma solução coloidal contendo partículas micro e nanométricas, gerando um total de 22 milhões de toneladas por ano. Além de outras aplicações, como os biopolímeros DAVIES (2001) e a encapsulação de remédios que possam ser injetados no sistema circulatório, liberando a substância em pequenas doses.

As nanopartículas também podem ser aplicadas segundo CARROTA et al. (2001), na composição de sensores para determinação da concentração de gases poluentes como NO_x , CO e O_3 .

A Revista FAPESP de agosto de 2003 realizou um levantamento de estudos realizados no Brasil, como: a peneira molecular de carbono que pode ser empregada na limpeza de gases, recuperação de solventes, além da absorção de gás natural veicular; nanocatalizadores, utilizados nos processos de geração de hidrogênio e para diminuição da concentração de compostos aromáticos durante o refino de petróleo para obtenção de gasolina de melhor qualidade e menos poluente; etc. (RIUL et al. 2003).

Contudo, para que se obtenha sucesso nesta área de nanotecnologia, DAVIES (2001) aponta que, além das pesquisas com as partículas, avanços devem ocorrer como o

desenvolvimento de modelos e programas computacionais, evolução dos hardwares, bem como a capacitação de pessoas e o trabalho em equipes multidisciplinares.

As mais recentes aplicações de nanopartículas foram apresentadas em São Paulo, em novembro de 2006, na II feira & Congresso Internacional de Nanotecnologia, www.nanotecexpo.com.br, dentre as quais estão:

- Filme comestível usado na cobertura de alimentos, como frutas e legumes;
- Língua eletrônica que permite verificar a qualidade de água, pesticidas, metais pesados e bebidas possibilitando distinguir diferentes tipos de vinho, café, chá e água mineral;
- Nanocompostos em automóveis usados na cobertura do painel para evitar reflexos da luz externa, um retrovisor interno fotocrômico, que contém uma camada que escurece quando recebe energia elétrica evitando com isto que a distração ao volante causada pelos efeitos da luz nos olhos do condutor e um material que forma um filme capaz de evitar a adesão da água do pára-brisa;
- Gel, que protege superfícies contra processos de corrosão a abrasão especialmente a altas temperaturas e pode ser aplicado em superfícies de formas complexas, como metais, cerâmicas e plásticos;
- Sensores de gás, sensores óticos infravermelhos e células fotovoltaicas, podendo trabalhar a altas temperaturas e ambientes corrosivos que não apresentam vapores de ácido sulfúrico e KOH;
- Nanosistemas no tratamento do câncer são capazes de encapsular a cisplatina, de forma que o comportamento in vivo e as interações químicas com produtos associados serão agora regidas pelas propriedades físico-químicas e químicas desses mesmos sistemas, estabelecendo assim esquemas terapêuticos mais seguros;
- Sensor de nanopartículas, que utiliza propriedades de emissão de luz de algumas nanopartículas para analisar e identificar componentes individuais de filamentos de DNA e

RNA, estando em estudo pequenos sensores que detectam células cancerosas em seus estágios iniciais, que mira e destrói células e tecidos cancerosos;

- Nanocompósitos poliméricos de argila e látex de borracha natural, aplicado em adesivos, embalagens, calçados, artigos esportivos, elastômeros para saúde, adesivos para concreto, brinquedos e auto peças, Além de programas computacionais, nanotubos, etc.

2.1.2 - Efeitos Nocivos

Atualmente, tem se verificado que o efeito tóxico das partículas nanométrias à saúde humana, pode envolver doenças e até mesmo a diminuição da expectativa de vida, como observado por Seaton et al. apud PREINING (1998).

Segundo WATANABE et al. (1995), as partículas abaixo de 1 µm são nocivas ao meio ambiente e ao organismo humano, por se depositarem nos alvéolos pulmonares, por reduzirem a visibilidade, causarem problemas no coração. Os danos causados aos seres vivos podem, ainda, sere intensificados pela adesão de metais pesados à superfície das mesmas.

De acordo com D'AMATO (2000), um dos males do século XXI, é a alergia respiratória que está se tornando epidêmica nas regiões industrializadas. As manifestações mais freqüentes são as rinites e bronquites, causadas desde tempos remotos por pólen de flores. Seu efeito é potencializado pela ação de ozônio no organismo e materiais particulados finos, que carregam o agente causador da alergia até a zona mais profunda do sistema respiratório. Desse modo, a alergia atinge maior número de pessoas nas áreas urbanas do que nas rurais.

No processo de inalação das partículas presentes no ar pelo ser humano, segundo HINDS (1999), o ar é inalado pelo sistema respiratório (representado na Figura 2.1) e durante o seu percurso muda várias vezes de direção e velocidade, em função da geometria do organismo humano. As partículas suspensas no ar seguem esse escoamento e uma

significativa parcela das maiores é depositada, principalmente nas vias respiratórias superiores, sendo expelidas para o sistema gastrointestinal.

Já as partículas mais finas atingem as partes mais profundas do pulmão, os brônquios e alvéolos, de onde são removidas pela ação dos macrófagos. Estes fagocitam as partículas, limpando o pulmão, após o que são expelidos com o muco formado, minimizando a interação das mesmas com o organismo humano. Porém, quando as partículas entram em grandes concentrações, elas não são removidas efetivamente, entrando em contato com o epitélio e sendo absorvidas rapidamente, em função do seu pequeno diâmetro. Por possuírem elevada área superficial, facilitam a liberação de metais e radicais livres que estejam a elas adsorvidos, os quais possuem ação oxidante sobre os macrófagos e o epitélio, causando danos às células em questão (DONALDSON et al., 1998).

Nesta faixa, as partículas são depositadas no sistema respiratório pelo efeito do movimento Browniano. Assim, quanto maior o tempo entre uma captação de ar e outra, maior o tempo de residência das partículas, aumentando a sua coleta pelo organismo humano. O sistema respiratório possui 75 m^2 de área de troca e processa de 10 a 25 m^3 de ar/dia, tratando-se, portanto, de uma grande área de contato com as partículas, que são inspiradas em grande quantidade (HINDS, 1999).

As partículas inaladas causam um processo inflamatório das células, que pode levar a alterações fibrosas no pulmão, fazendo com que o mesmo enrijeça, causando uma perda da capacidade respiratória. Este fator é intensificado quando as partículas são muito pequenas, com diâmetros entre 20 e 30 nm, como as estudadas por OBERDORSTER et al. (1990), proporcionando o aumento da produção de colágeno e tecido fibroso na região pulmonar.

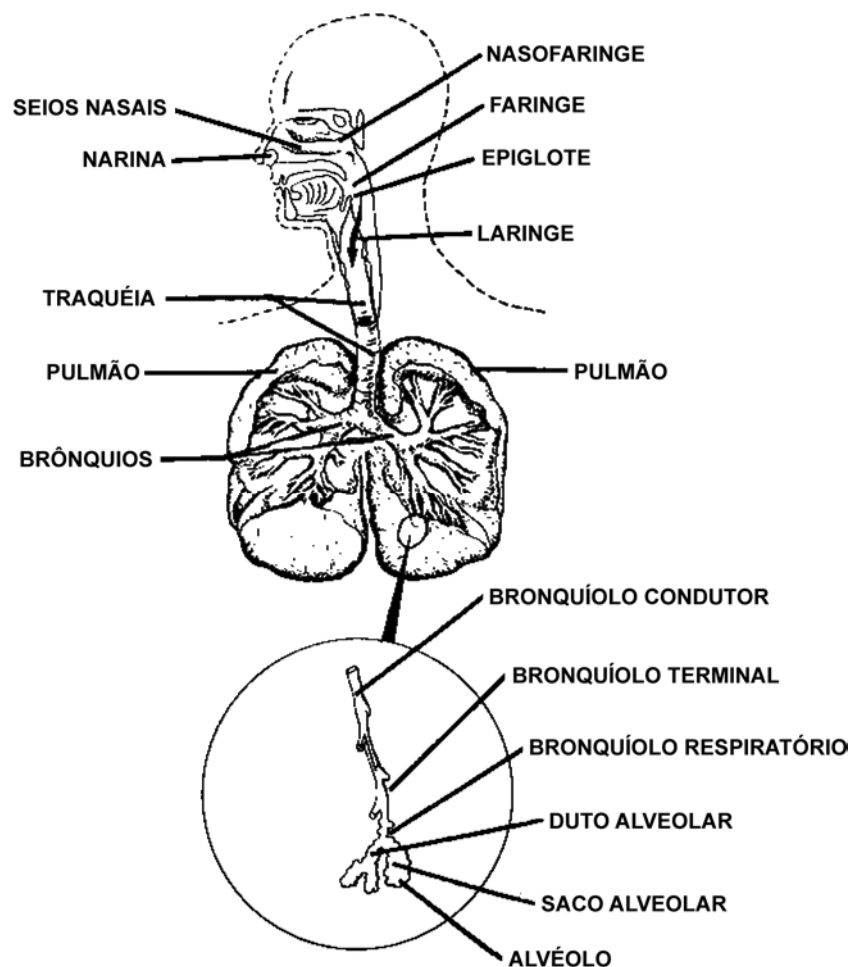


Figura 2. 1 – Esquema do Sistema Respiratório (HINDS, 1999).

Assim, as partículas finas podem ficar retidas no pulmão por longos períodos ou ainda penetrar na membrana celular, proporcionando, segundo PUI & CHEN (1997), que materiais relativamente insolúveis adsorvidos a elas, atravessem o sistema respiratório.

Portanto, de acordo com os fatos citados e estudos toxicológicos realizados, OBERDORSTER et al. (1990) concluíram que as partículas menores que 100 nm apresentam maiores danos à saúde humana do que a mesma quantidade do material, porém em tamanhos maiores. Isto também foi observado por Donaldson apud PUI & CHEN (1997), que mostrou que partículas ultrafinas, relativamente inertes e atóxicas no tamanho de microns, podem causar inflamações quando em tamanhos menores e por FERIN et al. (1990) que avaliaram o efeito do aumento da toxicidade do TiO_2 e Al_2O_3 em tamanhos menores, bem como sua maior

penetração no organismo em estudo. FERIN et al. (1990) afirmam que, mesmo quando estas partículas estão na forma de aglomerados, elas se dissociam quando depositadas, sendo rapidamente absorvidas.

Ferin et al. apud DONALDSON et al. (1998) chama atenção para inalação de partículas ultrafinas tóxicas. Eles mostraram o perfil dos alvéolos inflamados em ratos expostos aos aerossóis de dióxido de titânio, partículas finas de aproximadamente 250 nm de diâmetro e FERIN (1994) indicam que as partículas menores que 100 nm constituem a maioria da poluição do ar urbana.

Oberdorster apud SHI et al. (2001) realizou experimentos com politetrafluoretileno em ratos e observou que estas partículas danificam o pulmão, chegando a causar a morte de muitas cobaias.

NEAS (2000) apresenta que além das doenças pulmonares, a inalação de partículas pequenas provoca problemas de coração. Um dos meios de causar tais danos, segundo OBERDORSTER et al. (1995) é através da absorção das partículas pela corrente sanguínea e sua deposição nos tecidos do coração, o que pode causar arritmia e morte.

FERIN et al. (1990) expõem que já foi detectada a presença de carbono inorgânico em vários órgãos e que o mesmo tem grande facilidade de se acumular no sistema linfático. WILSON et al. (2002) observaram, que em estudos com cobaias o carbono com elevada concentração de ferro causa inflamação dos pulmões, quando os macrófagos não desempenham suas funções e também verificaram que partículas de carbono inorgânico em tamanho menor que 100 nm interagem com metais de transição, tornando-se potencialmente tóxicas.

SEATON et al. (1995) verificaram que há aumento da probabilidade de morte das pessoas com doenças cardiovasculares causada pela carga de partículas ultrafinas e conseqüentemente elevação da coagulação do sangue.

SHI et al. (2001) constataram que os maiores contribuintes para emissões de partículas nanométricas são as reações de combustão, com partículas de 3 a 7 nm, nas quais os veículos automotivos têm um importante papel, onde sua concentração aumenta nos horários de pico e nos períodos de ventos. O mesmo foi constatado também por PEKKANEN (2006), que ressaltam que estas emissões provocam sérios problemas respiratórios, principalmente partículas ultrafinas menores que 100 nm.

Segundo LUNDBORG et al. (2005), DICK et al. (2003), ocorre suscetibilidade muito grande de ocorrer asma e doenças pulmonares crônicas quando pessoas são expostas a partículas nanométricas tóxicas.

Recentemente a pesquisa sobre os problemas causados ao ser humano pelas nanopartículas tem chamado muita a atenção pelo intenso número delas publicado. Indicando ser realmente preocupante para a humanidade a emissão destas partículas à atmosfera, como o que ressalta o estudo de HUND-RINKE & SIMON (2006), que ressaltaram que a toxidez das nanopartículas depende da sua natureza, mas que sérios cuidados precisam ser tomados, pois a quantidade de materiais nanocompostos está aumentando, e isto leva a emissão dos mesmos à atmosfera colocando em risco às pessoas expostas a ela. DONALDSON (2006), mostrou que as doenças de pulmão, inflamação e câncer causado por nanopartículas derivadas de combustíveis. Segundo BRUNO (2005) e POZZA (2005), os veículos são uma grande fonte emissora de material particulado, além da queimada sazonal da cana-de-açúcar.

CASEE (2006), notaram que partículas menores que 100 nm são mais tóxicas que partículas maiores, pois são facilmente inaláveis, principalmente partículas oriundas do trânsito como: gasolina, óleo lubrificante, pneus, freios, etc.

KENNEDY (2007) também observaram que partículas como carbono orgânico, metais e compostos inorgânicos, quando inalados por pessoas podem ser levadas até o pulmão, penetrar no sistema circulatório e depositar nos órgãos como o fígado e coração.

Um grande número de estudos recentes vem mostrando claramente o risco de exposição às partículas nanométricas nos últimos anos, como por exemplo, os relatados por LINAK et al. (2007), GUZMAN et al. (2006); KARAKOTI et al. (2006), KUEMPEL et al. (2006); IONUE et al. (2006), TSUJI et al. (2006), MAYNARD & KUEMPEL(2005), que ressaltam os problemas de inflamação dos pulmões e problemas respiratórios causados às pessoas.

Com os resultados promissores de aplicação das nanopartículas em novas áreas, o que certamente provocará um aumento ainda maior de sua produção, justifica-se a preocupação com os efeitos que as mesmas causam à saúde humana e em métodos para a sua remoção do ar atmosférico, para minimizar seus danos à saúde humana.

2.2 - Continuidade do Meio

DAVIES (2001) aponta as dificuldades e desafios que deverão ser enfrentadas pelos pesquisadores, dentre eles estão as dificuldades em classificar as partículas e o baixo entendimento do seu escoamento e a tendência à aglomeração.

Um dos fatores importantes envolvendo a engenharia, relacionado ao estudo das nanopartículas, é a determinação dos processos de transferência de massa e movimento das mesmas. No entanto, nesta faixa, a teoria não está bem consolidada, devido à fragilidade de continuidade do meio gasoso, normalmente admitida. Assim como a faixa de diâmetro pode influenciar as propriedades das partículas, ela também tem efeito sobre o comportamento do aerossol (sua interação com o meio que as cerca) e as leis que governam as propriedades do mesmo (HINDS, 1999). Estas são também dificuldades ligadas a esta tecnologia e devem ser vencidas.

A perda da continuidade do meio está, portanto, relacionada à interação das nanopartículas com o meio gasoso que as cerca. Em virtude de seu reduzido tamanho, da mesma ordem de grandeza do caminho livre médio das moléculas, as partículas “enxergam” o meio gasoso não mais como uma massa contínua e sim como um aglomerado de moléculas.

A forma usual de definir esta relação de acordo com SEINFELD (1986), é através do número de Knudsen (Kn), um adimensional mostrado na Equação 2.1, que relaciona o caminho livre médio do gás, ou seja, a distância que uma molécula do gás percorre antes de se chocar com outra, com o diâmetro da partícula do aerossol.

$$Kn = \frac{2\lambda}{d_p} \quad (2.1)$$

no qual, λ é o caminho livre médio do gás, d_p é o diâmetro da partícula.

O caminho livre médio das moléculas de gás pode ser calculado através da Equação 2.2 (BEARD, 1976):

$$\lambda = \frac{2,15 \cdot 10^{-4} \cdot \mu \cdot T^{0,5}}{P'} \quad (2.2)$$

onde λ é o caminho livre médio do gás (m), P' é a pressão (bar), μ é a viscosidade (kg/ms) e T é a temperatura absoluta (K).

A caracterização do comportamento da partícula em relação ao gás ocorre através da análise do valor do número de Knudsen. Se $Kn \ll 1$, a partícula será muito maior que o caminho livre médio e enxergará o gás como um meio contínuo. Por outro lado, se $Kn \gg 1$, a partícula possui tamanho da mesma ordem de grandeza das moléculas do gás ou está num

meio muito rarefeito. Neste caso o regime é denominado de moléculas livres, seguindo a teoria cinética dos gases.

Quanto à condição de $Kn \cong 1$, denominada região de transição (LEE & LIU, 1980), ainda existem dificuldades para a caracterização do comportamento da partícula e os resultados obtidos não são tão confiáveis (PUI & CHEN 1997).

2.3 - Correção para escoamento em meio não contínuo

O transporte de partículas através de um fluido está intimamente ligado à interação entre as duas partes, que se altera com a diminuição do tamanho da partícula ou aumento do número de Knudsen. Conforme o Kn se distancia de zero, as equações válidas para o regime contínuo perdem a sua validade e seu emprego incorre em grande erro.

Com o intuito de corrigir o efeito de interações em nível molecular quando as partículas que escoam no fluido são pequenas, Cunningham propôs uma equação, modificada por Knudsen e Weber. Esta equação é amplamente usada para corrigir a equação de Stokes que define a força de arraste para baixos valores de Reynolds (Equação 2.3), na qual k_d é o coeficiente de arraste (FUCHS, 1964).

$$F_w = k_d \cdot U_0 \quad (2.3)$$

onde:

$$k_d = \frac{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot (d_p / 2)}{C_c} \quad (2.4)$$

na qual, U_0 é a velocidade do gás, d_p é o diâmetro da partícula, μ é a viscosidade do gás.

O termo C_c é conhecido como o fator de escorregamento de Cunningham, representado pela Equação 2.5 (FUCHS, 1964, CLIFT et al., 1978).

$$C_c = 1 + Kn \left[1,246 + 0,42 \cdot \exp\left(-\frac{0,87}{Kn}\right) \right] \quad (2.5)$$

De acordo com HIDY & BROCK (1970), esta equação apresenta um bom desempenho quando os valores de Kn são baixos, o que caracteriza o escoamento como do tipo “escorregamento”. Contudo, para valores mais altos de Kn, que caracterizam o regime de moléculas livres, a correção de Cunningham não é mais satisfatória.

Ao longo dos anos, algumas, equações foram propostas com o intuito de definir a interação fluido partícula para altos valores de Knudsen. A mais recente é a equação de LI & WANG (2003 a, b) que examinaram as correlações existentes e desenvolveram uma nova equação para o coeficiente de arraste baseada na teoria de Chapman-Eskog e nos modelos de espalhamento difuso e especular. O resultado obtido está apresentado nas Equações 2.6 a 2.16.

$$k_{d\infty} = \frac{8}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot m_r \cdot K_B \cdot T \cdot N'} \cdot (d_p / 2)^2 \cdot \Omega_{med}^{(1,1)*} \quad (2.6)$$

onde:

$$\Omega_{med}^{(1,1)*} = \varphi \cdot \Omega_d^{(1,1)*} + (1 - \varphi) \cdot \Omega_s^{(1,1)*} \quad (2.7)$$

$$\varphi = \frac{1 + 0,9 \cdot \text{Kn} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{d_p/2}{2,5} \right)^{15}} \right)}{1 + \text{Kn}} \quad (2.8)$$

$$\Omega_d^{(1,1)*} = 1 + \frac{\pi}{8} + \left[1,072 + \frac{2,078}{\Gamma^{*1/4}} + \frac{1,261}{\Gamma^{*1/2}} \right] \cdot \left(\frac{\sigma}{(d_p/2)} \right) + \left[3,285 - \frac{8,872}{\Gamma^{*1/4}} + \frac{5,225}{\Gamma^{*1/2}} \right] \cdot \left(\frac{\sigma}{(d_p/2)} \right)^2 \quad (2.9)$$

$$\Omega_s^{(1,1)*} = 1 + \frac{\pi}{8} + \left[0,316 + \frac{1,47}{\Gamma^{*1/4}} + \frac{0,476}{\Gamma^{*1/2}} \right] \cdot \left(\frac{\sigma}{(d_p/2)} \right) + \left[1,53 - \frac{5,013}{\Gamma^{*1/4}} + \frac{4,025}{\Gamma^{*1/2}} \right] \cdot \left(\frac{\sigma}{(d_p/2)} \right)^2 \quad (2.10)$$

$$\Gamma^* = \frac{K_B \cdot T}{\varepsilon'} \quad (2.11)$$

$$\varepsilon' = 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_L \cdot \frac{\sigma^3}{3 \cdot V} \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_L = \sqrt{\varepsilon_g \cdot \varepsilon_p} \quad (2.13)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_g + \sigma_p}{2} \quad (2.14)$$

$$V = \frac{\bar{M}}{\rho_p} \quad (2.15)$$

$$m_r = \frac{m_g \cdot m_p}{(m_g + m_p)} \quad (2.16)$$

nas quais, m_g é a massa do gás; m_p é a massa partícula; K_B é a constante de Boltzmann; σ é o diâmetro característico para o potencial de Lennard-Jones 12-6; r_p é o raio da partícula, ϵ_0 é a energia característica para o potencial de Lennard-Jones 12-6; \bar{M} é a massa atômica da partícula; T é a temperatura absoluta; N' é a densidade do gás em número.

O diâmetro característico da molécula (σ) (diâmetro de colisão) e a energia característica de interação entre as moléculas (ϵ_L) (energia máxima de atração entre um par de moléculas) pode ser obtido, de acordo com BIRD et al. (1960), a partir das Equações 2.17 a 2.18:

$$\sigma = 1,222 \cdot V_m^{\frac{1}{3}} \quad (2.17)$$

$$\epsilon_L = 1,92 \cdot T_m \quad (2.18)$$

nas quais, σ é dado em (Angström); ϵ_L é dado em (K); T_m é a temperatura de fusão(K); V_m é o volume específico do sólido no ponto de fusão (cm^3/mol).

A equação obtida por LI & WANG (2003a, b) é válida apenas para o regime de moléculas livres. Para a região de transição entre este regime e o contínuo ($0,25 \leq \text{Kn} \leq 10$), os autores propõem uma aproximação semi-empírica, inserindo uma função na equação anterior de modo que, para baixos valores de Knudsen (Equação 2.19 a 2.20) α' tende a zero e a equação se torna igual à de Stokes. Por outro lado, para altos valores de Kn, α' tende a

infinito e a equação de torna a equação original proposta pelos autores. Na determinação de α' foi empregada uma constante w igual a 1,143, determinada a partir de um ajuste da equação aos dados de Millikan (LI & WANG, 2003 a, b)

$$k_d = \frac{\alpha'}{(1 + \alpha'^w)^{1/w}} \cdot k_{d\infty} \quad (2.19)$$

$$\alpha' = \frac{9 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \mu}{8 \cdot \Omega_{med}^{(1,1)*} \cdot \sqrt{m_r \cdot K_B \cdot T \cdot N \cdot r_p}} \quad (2.20)$$

2.4 - Filtração

2.4.1 - Conceitos Gerais

A captura de partículas de uma corrente gasosa por filtração é um dos métodos mais comuns utilizados na limpeza de gases, por sua alta eficiência de coleta e por ser insensível às flutuações nas condições de operação (HINDS, 1999).

A filtração pode ser definida como o processo em que ocorre a passagem do aerossol através do meio filtrante e as partículas vão se depositando sobre a superfície do filtro. A coleta ocorre devido ao contato físico entre as partículas e o elemento coletor. Além do contato, é necessário que a partícula fique retida no coletor, isto é, que haja aderência (DONOVAN, 1985).

Os parâmetros de projeto mais importantes na filtração são: velocidade superficial do gás; queda de pressão no filtro; concentração de pó e eficiência de coleta.

Na realidade o processo de filtração é muito complexo. As partículas, uma vez depositadas, podem formar uma torta, devido à ação de diferentes forças que atuam durante a filtração. As partículas retidas também podem modificar a forma geométrica do coletor, desta

forma, produzindo modificações estruturais no filtro. Como consequência, eficiência e a queda de pressão no filtro tornam-se susceptíveis com o tempo, e o processo se torna transiente (Boulaud & Renoux apud SPURNY, 1998).

A filtração pode ser efetuada de duas maneiras: estacionária e não estacionária. Na primeira, a eficiência de colisão da partícula com a superfície coletora é única, isto é, uma vez que a partícula toca a fibra, ela permanece retida, e as novas partículas que se depositam não são influenciadas pelo processo anterior. Neste caso a eficiência de coleta e a queda de pressão do filtro independem do tempo e o processo é dito estacionário. Isto pode ocorrer nos estágios iniciais da filtração e a baixas concentrações de partículas que chegam no coletor. Na filtração não estacionária, as partículas, uma vez depositadas, formam uma torta a cerca do filtro. Assim as partículas que entram em contato com as fibras são capturadas sem modificação no mecanismo de filtração. Durante a fase estacionária a penetração “P” e a diferença de pressão ΔP do outro lado do filtro não mudam com o tempo (Boulaud & Renoux apud SPURNY, 1998).

2.5 - Filtros

Um aspecto característico da operação unitária da filtração é a variedade de equipamentos disponíveis para a separação das partículas sólidas do fluido. Esta variedade tem sido consequência da multiplicidade dos problemas de filtração, em que suspensões de alta ou baixa concentração de partículas devem ser separadas de gases, os quais podem ser corrosivos, viscosos e explosivos. Apesar desta complexidade, as informações sobre as partículas e o fluido podem ser usadas para racionalizar os métodos de separação. Deste modo, o tamanho das partículas, concentração de sólidos, e eficiência, poderiam levar a decisões sobre a adequação de uma forma particular de filtro e as condições ideais de operação (MATTESON & ORR, 1987).

A rigorosa necessidade de remoção de partículas de gases industriais e a proteção individual, principalmente quando o tamanho das partículas é reduzido, tem levado a uma maior atenção no desempenho de filtros fibrosos. Estes são relativamente baratos e de uso simples, podendo apresentar alta eficiência. Embora o desempenho destes tenha sido estudado por muitos anos, alguns comportamentos são pouco conhecidos (VAN OSDELL et al., 1990).

Em geral um filtro exige, para uma adequada remoção de partículas, ter: baixa resistência, vida longa, e pequeno volume, para ser competitivo, em custo inicial e durante seu uso, com outros métodos de remoção de aerossóis. Normalmente carregando um filtro com partículas submicrômicas de sólido causa uma diminuição na penetração antes da queda de pressão mudar muito (DORMAN, 1974).

Existem basicamente três tipos de arranjos de alvos coletores:

- a- fibras individuais emaranhadas frouxamente dentro de um enchimento;
- b- material granular em leito fixo ou fluidizado;
- c- fibras tecidas ou feltradas dentro de uma estrutura, sendo utilizada no formato cilíndrico (manga).

Todos eles são capazes de obter altos valores de eficiência de coleta com razoáveis valores de queda de pressão e tempo de limpeza. A principal limitação para a escolha do filtro está relacionada com a natureza de seu material constituinte. Para filtros fibrosos, uma variedade de fibras naturais ou sintéticas pode ser utilizada. É necessário selecionar um material que apresente baixo custo e que tenha uma vida longa sob as condições predominantes de um dado problema. Para um bom funcionamento do filtro, este deve ter as seguintes características (CAVASENO, 1980):

- Ser suficientemente poroso para permitir uma satisfatória vazão de ar a uma queda de pressão compatível com o processo;

- Resistir às forças de tensão causadas pela pressão diferencial por perturbações mecânicas e por pulsação durante o processo de limpeza;
- Resistir à abrasão com o material com que é preso a tubos metálicos;
- Resistir ao ataque e à ação química entre as fibras e o material filtrado, especialmente se houver umidade presente devido à condensação;
- Resistir às altas temperaturas da exaustão de gases, cada filtro tem uma temperatura limite definida, além da qual tenderá a uma deterioração acelerada;
- Apresentar uma textura de superfície que favoreça uma rápida liberação da torta durante a limpeza. Isto pode ser aparentemente contraditório, pois a superfície tem que reter a torta durante a filtração.

O tamanho das fibras pode ser de menos de 1 μm até mais de 100 μm . Geralmente a porosidade do filtro é relativamente alta entre 0,6 e 0,999. A faixa de diâmetro das fibras para um determinado filtro é usualmente muito diverso embora alguns tipos de filtros fibrosos podem consistir de fibras de tamanho uniforme (Lee & Ramamurthi apud WILLEKE & BARON, 1993). A forma das fibras pode ser diferente, mas usualmente é adotada cilíndrica ou circular.

A eficiência de coleta de filtros limpos depende do número de partículas e dos parâmetros do fluido. Quando resultados teóricos são comparados com resultados experimentais é importante saber como as variações no ar ambiente mudam a eficiência. Quando a partícula é capturada na fibra, esta permanece como resultado da combinação de diferentes forças de atração, isto é, forças de Vander Waals (Lastow & Podgórski apud SPURNY, 1998).

2.6 - Eficiência de coleta

Considere-se uma corrente de aerossol a uma velocidade U_0 e concentração C_0 escoando perpendicularmente a uma fina seção fibrosa de espessura dH e área A . A espessura dH deve ser muito maior que o diâmetro da fibra, porém fino o suficiente para se aproximar de uma simples camada de fibras no plano da seção, ou seja, é negligenciada a sobreposição das fibras (DULLIEN, 1989).

Seja L_f definido segundo a Equação (2.21):

$$L_f = \frac{\text{comprimento da fibra}}{\text{unidade de volume}} \quad (2.21)$$

Deste modo o comprimento da fibra nesta seção pode ser expresso por $L_f.A.dH$.

A área projetada pelas fibras cilíndricas desordenadas no plano da seção pode ser representada pela Equação (2.22):

$$A_p = D_f.L_f.A.dH \quad (2.22)$$

onde D_f é o diâmetro da fibra, A é a área do filtro e dH um elemento diferencial de espessura do filtro.

A eficiência total de coleta, para uma fibra única no seio de um filtro, pode ser representada pela Equação (2.23):

$$\eta_T = \frac{\text{número de partículas depositadas por unidade de tempo}}{\text{número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo}} = \frac{N_p}{N_c} \quad (2.23)$$

O número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo pode ser expresso por:

$$N_c = C \cdot v \cdot D_f \cdot L_f \cdot A \cdot dH \quad (2.24)$$

onde C é a concentração (número de partículas por unidade de volume do gás) e v é a velocidade intersticial do gás dada por:

$$v = \frac{U_0}{\varepsilon} \quad (2.25)$$

onde U_0 é a velocidade superficial do gás e ε a porosidade do filtro.

Um balanço de massa para o número de partículas depositadas na seção por unidade de tempo N_p , independente da Equação (2.23), pode ser expresso como:

$$N_p = -dC \cdot U_0 \cdot A \quad (2.26)$$

onde: $-dC$, representa a mudança nas concentrações das suspensões que entram e deixam a seção e $U_0 \cdot A$, a vazão volumétrica de gás.

Substituindo as Equações (2.24) e (2.26) na Equação (2.23), vem:

$$-\frac{dc}{C} = \eta_T \frac{D_f}{\varepsilon} L_f dH \quad (2.27)$$

Considerando $C = C_0$ para $H = 0$ e $C = C_E$ para $H = H$, e integrando-se a Equação (2.27), tem-se:

$$\ln \frac{C_E}{C_0} = -\frac{\eta_T L_f D_f H}{\varepsilon} \quad (2.28)$$

onde C_0 e C_E são a concentração de partículas na entrada do filtro e na saída do filtro, respectivamente.

A fração de volume ocupado pelas fibras, β , pode ser descrita por:

$$\beta = \frac{\pi D_f^2}{4} L_f \quad (2.29)$$

O volume total da seção é constituído pela soma do volume ocupado pelas fibras mais o volume de vazios, porosidade, ε . Portanto:

$$\varepsilon = (1 - \beta) \quad (2.30)$$

Substituindo as Equações (2.29) e (2.30) em (2.28) tem-se:

$$P = \frac{C_E}{C_0} = \exp \left[-\frac{4H(1-\varepsilon)\eta_T}{\pi\varepsilon D_f} \right] \quad (2.31)$$

onde P , é a penetração e representa a fração numérica de partículas que chegam e não são coletadas pelo filtro.

Complementar a esta grandeza define-se E , a eficiência do filtro como sendo a fração de partículas que é coletada pela seção filtrante. Portanto:

$$E = 1 - P = 1 - \exp\left[-\frac{4H(1-\varepsilon)\eta_T}{\pi\varepsilon D_f}\right] \quad (2.32)$$

onde H é a espessura do filtro e ε a sua porosidade, η_T é eficiência total de cada fibra individualmente, D_f é o diâmetro do filtro, ε é porosidade. De acordo com a Equação (2.31) a concentração de partículas na corrente gasosa que atravessa o filtro decai exponencialmente com o aumento de H e η_T e com a redução no D_f , desde que ε se mantenha constante.

Pode-se notar que para o cálculo da eficiência E , é necessário estimar a eficiência total de cada fibra, η_T . Este parâmetro é estimado em função dos mecanismos de coleta atuantes, conforme será apresentado a seguir, sendo função das características do aerossol a ser filtrado, das condições de escoamento e das características do meio filtrante (DUARTE FILHO, 1995).

2.7 - Mecanismos de coleta

Quando se pensa em um meio filtrante composto por fibras, imagina-se inicialmente que as partículas sejam retidas por possuírem um diâmetro maior do que o espaço entre as fibras. O filtro funcionaria de maneira semelhante a uma “peneira” microscópica formada pelas fibras, cuja distância entre elas definiria o menor tamanho de partícula por ela retida. Se isto for examinado em meios filtrantes reais, esta imagem do filtro é incorreta. Nele se encontra apenas uma pequena parte do volume do meio filtrante sendo ocupada pelas fibras, restando até 90% do espaço vazio. Por outro lado, a eficiência de retenção depende da velocidade do gás, o que não deveria acontecer se o espaço entre as fibras fosse o determinante da faixa de retenção. De fato, existem outros mecanismos que dominam a filtração do ar em meios fibrosos.

Num filtro, o gás carregado de partículas é forçado a passar através de um leito de coletores e a coleta se dá através de vários mecanismos (HINDS, 1982), BROWN, (1993), Lehtimäki & Willeke apud WILLEKE & BARON (1993). Os principais são: difusional, inercial, interceptação direta, gravitacional e eletroforético, ilustrados na Figura 2.2.

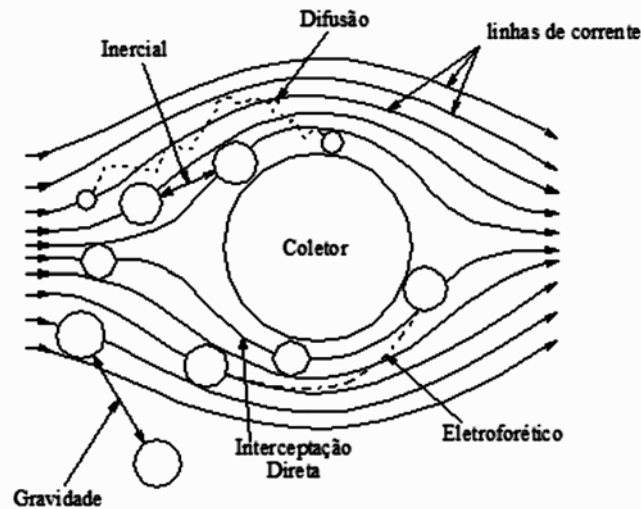


Figura 2. 2 -Mecanismos físicos de coleta (SPURNY, 1998).

2.7.1 - Mecanismo difusional

Este mecanismo resulta do movimento aleatório (Browniano) a que pequenas partículas estão sujeitas em um gás, conhecido como difusão browniana (COURY, 1983; OGAWA, 1984; TARDOS et al., 1978). Ocorre principalmente em partículas submicrônicas e em baixas velocidades de filtração. O mecanismo difusional representa a influência da agitação térmica das moléculas do ar na probabilidade de captura das partículas pelas fibras. Pela teoria cinética dos gases, as moléculas do ar estão em constante movimento, chocando-se entre si com grande frequência. Assim, pequenas partículas também são deslocadas por estas constantes colisões das moléculas, difundindo-se tão rapidamente quanto menor for sua massa. Devido a este fenômeno, a trajetória das partículas desvia-se das linhas de corrente de

ar podendo estas vir a chocar aleatoriamente com as fibras. Com a redução da velocidade do gás, a eficiência aumenta, pois o tempo de permanência no meio filtrante é maior.

KIRSH & FUCHS (1967) apontam que segundo os modelos de Kuwabara e Happel), a teoria da fibra individual, na qual a fibra individual não negligencia o efeito das fibras adjacentes, é o mais usado devido sua simplicidade. Isto foi demonstrado por KIRSH & FUCHS (1967), que sugere que entre os dois modelos, o de Kuwabara é mais representativo para o fluxo ao redor da fibra no caso de baixos valores de Reynolds.

STECHKINA & FUCHS (1966) foram os primeiros a usar uma aproximação levando em conta o problema de difusão Browniana. O modelo desenvolvido por eles para eficiência individual da fibra por difusão foi representado pela seguinte equação:

$$\eta_d = 2,9Ku^{1/3}Pe^{-2/3} \quad (2.33)$$

O coeficiente hidrodinâmico de Kuwabara e o Número de Peclet são representados respectivamente pelas Equações:

$$Ku = \frac{-\ln(1-\varepsilon)}{2} - \frac{3}{4} + (1-\varepsilon) - \frac{(1-\varepsilon)^2}{4} \quad (2.34)$$

$$Pe = \frac{U_0 \cdot D_f}{D} \quad (2.35)$$

onde U_0 é a velocidade do gás e D o coeficiente de difusividade.

O coeficiente de difusividade D , associado ao movimento Browniano, pode ser estimado a partir da equação de Stokes-Einstein. Para uma partícula esférica de diâmetro d_p , o mesmo vale:

$$D = \frac{K_B T C_c}{3\pi\mu d_p} \quad (2.36)$$

onde K_B é a constante de Boltzmann, T a temperatura absoluta, μ a viscosidade do gás, d_p é o diâmetro da partícula e C_c o fator de escorregamento de Cunningham, que corrige a força de arraste nas partículas cujo tamanho é da ordem de grandeza do livre caminho médio do gás mostrado na Equação 2.5.

O mecanismo difusional é significativo somente para partículas muito pequenas. Geralmente a deposição Browniana de partículas em um meio fibroso pode ser considerada como um processo de transferência de massa. Para condições de baixos números de Reynolds e $d_p < 1 \mu\text{m}$ existe uma boa aderência entre partícula e coletor (STENHOUSE, 1975), e o processo pode ser considerado análogo à difusão molecular de um gás para um sólido. Torna-se, portanto, possível aplicar as correlações de transferência de massa convencionais, utilizando-se D em vez da difusividade molecular.

LEE & LIU (1982a) utilizaram a seguinte equação para eficiência individual da fibra usando o fluxo de Kuwabara associado à teoria da aproximação da camada limite:

$$\eta_d = 2,6 \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} \quad (2.37)$$

Os autores em outro artigo (LEE & LIU 1982b) aplicaram esta equação a seus dados experimentais e chegaram a Equação 2.38:

$$\eta_d = 1,6 \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} \quad (2.38)$$

Esta equação foi utilizada no caso do fluido ser considerado contínuo, ou seja, no caso do diâmetro da fibra ser maior que o livre caminho médio, λ . Conseqüentemente, a descrição do fluxo ao redor da fibra precisa levar em conta os efeitos do escorregamento, os quais são maiores para fibras finas. O decréscimo do escorregamento é função do número de Knudsen da fibra.

$$\text{Kn}_f = 2\lambda / D_f \quad (2.39)$$

LIU & RUBOW (1990) acrescentaram à equação de LEE & LIU (1982b), um termo de correção, que leva em conta o efeito do escorregamento. Então chegaram à seguinte forma:

$$\eta_d = 1,6 \left(\frac{\varepsilon}{\text{Ku}} \right)^{1/3} \text{Pe}^{-2/3} C_d \quad (2.40)$$

onde:

$$C_d = 1 + 0,388 \text{Kn}_f \left(\frac{\varepsilon \cdot \text{Pe}}{\text{Ku}} \right)^{1/3} \quad (2.41)$$

Este termo de correção C_d foi derivado por Pich apud LIU & RUBOW (1990) e modificado por Rubow apud LIU & RUBOW (1990) para remover a restrição de baixos valores de ε .

No entanto, PAYET et al. (1992) notaram que a Equação 2.40 pode exceder a unidade a baixos valores de Peclet. Modificaram esta equação incluindo um fator de correção para $\eta_d < 1$ para partículas muito finas. Portanto a nova Equação proposta foi:

$$\eta_d = 1,6 \left(\frac{\varepsilon}{\text{Ku}} \right)^{1/3} \text{Pe}^{-2/3} C_d C_d' \quad (2.42)$$

onde:

$$C_d' = \frac{1}{1 + 1,6 \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} C_d} \quad (2.43)$$

2.7.2 - Mecanismo inercial

Este mecanismo resulta da inércia da partícula que está sendo carregada pela corrente gasosa. As linhas de fluxo do gás se curvam ao passar em torno do coletor e a capacidade da partícula acompanhar estas linhas decresce com o aumento de sua massa, devido à inércia. Este mecanismo é predominante para altas velocidades de gás (COURY, 1983; OGAWA, 1984; TARDOS et al., 1978; HINDS, 1999).

Contudo, em escoamento com elevados Re , a hipótese de perfeita aderência da partícula ao coletor torna-se bastante questionável, principalmente para aerossóis sólidos. Neste caso, existe grande possibilidade da partícula chocar-se com o coletor (havendo a coleta) e, em seguida retornar à corrente gasosa por choque elástico. Esta é, provavelmente, uma das razões que explicam os dados discrepantes encontrados na literatura para eficiência de coleta inercial.

A eficiência inercial é dada pela Equação (2.44) proposta por Friedlander & Pasceri apud SPURNY (1998).

$$\eta_i = \frac{St^3}{St^3 + 0,77St^2 + 0,22} \quad (2.44)$$

sendo ρ_p a densidade da partícula e St o número de Stokes dado por:

$$St = \frac{\rho_p d_p^2 C_c U_0}{18\mu D_f} \quad (2.45)$$

2.7.3 - Mecanismo de interceptação direta

A coleta por interceptação direta representa a influência do diâmetro das partículas na retenção (COURY, 1983; OGAWA, 1984; TARDOS et al., 1978). Se o seu centro de massa passar a uma distância menor que $d_p/2$ da superfície do coletor, ela será coletada. Este mecanismo é significativo somente para partículas muito grandes com d_p de ordem de grandeza pouco abaixo do diâmetro do coletor.

A interceptação direta resulta do tamanho relativo entre partícula e coletor no filtro. Uma partícula que segue as linhas de corrente do gás pode ser capturada quando seu centro passa pela superfície do coletor a uma distância menor ou igual ao seu raio. A coleta depende das propriedades de transporte no fluido e da razão entre diâmetro da partícula e diâmetro do coletor ($R = d_p/D_f$). Portanto, o mecanismo de interceptação direta, η_{id} , é função direta deste parâmetro $\eta_{id}=f(R)$. A determinação desta função é relativamente simples para dois casos extremos (MATTESON & ORR, 1987). No primeiro caso, altas velocidades de escoamento, a inércia das partículas faz com que estas se colidam diretamente com o coletor, isto é: $\eta_{id} = R$. No segundo caso, para baixas velocidades de escoamento, as partículas deslocam-se segundo as linhas de escoamento do fluido, tornando desprezível este mecanismo de coleta.

LEE & LIU (1982a) utilizaram a seguinte equação para o cálculo da eficiência por interceptação direta:

$$\eta_{id} = \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right)^{1/3} \frac{R^2}{(1 + R)} \quad (2.46)$$

sendo R dado por:

$$R = d_p / D_f \quad (2.47)$$

Correlacionando esta equação aos seus dados experimentais LEE e LIU (1982b) propuseram uma nova equação mostrada na Equação (2.48):

$$\eta_{id} = 0,6 \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right) \frac{R^2}{(1+R)} \quad (2.48)$$

Segundo LIU & RUBOW (1990) a descrição do fluxo ao redor da fibra precisa ser levada em conta no efeito de escorregamento o qual é grande para fibras finas, sendo que a eficiência por interceptação direta pode ser calculada pela Equação 2.49:

$$\eta_{id} = 0,6 \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right) \frac{R^2}{(1+R)} C_r \quad (2.48)$$

onde:

$$C_r = 1 + \frac{1,996Kn_f}{R} \quad (2.50)$$

O fator de correção C_r foi derivado baseado na aproximação da camada limite e não restrita a baixos valores de ε .

2.7.4 - Mecanismo gravitacional

A coleta gravitacional é resultado do efeito da gravidade sobre a partícula, causando um desvio na sua trajetória normal (COURY, 1983; OGAWA, 1984; TARDOS et al., 1978). É dominante para baixas velocidades do gás e grandes partículas ($St > 10$). A eficiência

depende da direção do fluxo. Em um fluxo de cima para baixo existe tendência das partículas se aproximarem do coletor e vice-versa no fluxo de baixo para cima.

A Eficiência de coleta deste mecanismo pode ser descrita por (TARDOS & PFEFFER, 1980):

$$\eta_g = Ga \cdot St \quad (2.51)$$

$$Ga = D_f g / U_0^2 \quad (2.52)$$

onde g é a aceleração da gravidade e Ga é o número de Galileu.

2.7.5 - Mecanismo eletroforético

O mecanismo eletroforético é importante quando as partículas são carregadas eletricamente, o que não é o caso do objeto em estudo. Mas é apresentado aqui para possíveis necessidades de estudos de outros trabalhos.

Forças eletrostáticas podem ser de grande importância no processo de filtração (COURY, 1983). Tais forças podem proporcionar aumento na eficiência de filtração e, no caso da existência da torta, causar a formação de tortas menos compactas, que oferecem menor resistência ao escoamento do gás.

A presença de forças elétricas num filtro pode ser devida a cargas eletrostáticas nas partículas e / ou coletores. Podem ser induzidas por um campo elétrico externo ou ocorrer espontaneamente por atrito inerente ao processo de escoamento, e uma vez presentes, estas cargas elétricas podem causar uma atração entre as partículas e os coletores, aumentando a eficiência de coleta (ZHOO et al., 1990).

Ranz & Wong apud COURY (1986), foram os primeiros autores que descreveram os mecanismos em que se dá a coleta eletrostática. Os principais são: atração entre partículas carregadas e coletor carregado, com carga oposta (coulômbico) e atração entre uma partícula carregada e o dipolo induzido no coletor globalmente neutro.

COURY (1983) calculou teoricamente a eficiência de coleta pelo mecanismo eletroforético a partir da partícula carregada com carga q . A expressão para $10^{-4} < K_M < 10^{-6}$ e $St < 5 \cdot 10^{-3}$ tem a seguinte forma:

$$\eta_e = 8,24 K_M^{0,5} \quad (2.53)$$

Onde:

$$K_M = \frac{\gamma_c C_c q^2}{3\pi\epsilon_0 d_p D_f^2 \mu U_0} \quad (2.54)$$

Sendo que o coeficiente de polarização do coletor é dado por:

$$\gamma_c = \frac{\epsilon_c - \epsilon_f}{\epsilon_c + 2\epsilon_f} \quad (2.55)$$

ϵ_c é constante dielétrica da partícula, ϵ_f a constante dielétrica do fluido, ϵ_0 a permissividade do vácuo = $8,855 \cdot 10^{-12}$ As/Vm e q a carga da partícula.

2.7.6 - Coleta simultânea por diversos mecanismos

Geralmente, admite-se eficiência total de coleta de um coletor como a soma das eficiências individuais. Isto não é inteiramente correto, uma vez que há influência de um mecanismo sobre o outro (COURY, 1983). Inevitavelmente, haverá regiões com predomínio de mais de um mecanismo de coleta. Conforme LEE (1981), nestas regiões ocorre maior penetração de partículas através do meio filtrante, ou seja, regiões de eficiência mínima. A Figura 2.3 ilustra a eficiência para cada mecanismo e a eficiência total, para um filtro de espessura igual a 1 mm, porosidade de 0,95, diâmetro do coletor igual a 2,0 μm e velocidade de 0,1m/s, conforme a teoria de captura por uma fibra individual.

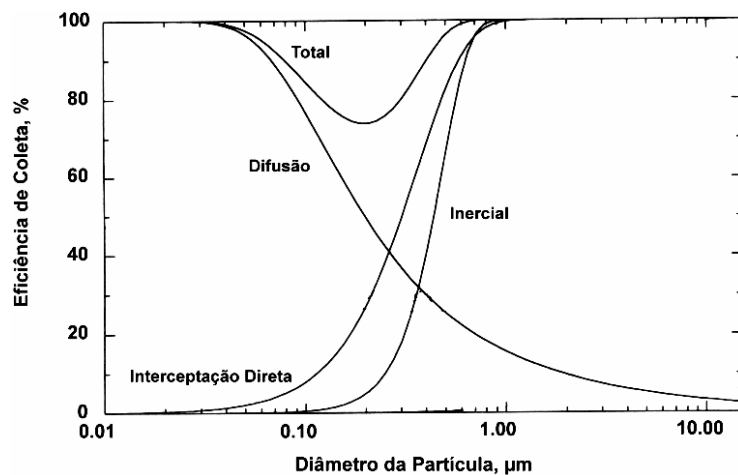


Figura 2. 3 - Interação dos mecanismos de coleta e eficiência resultante dos mesmos (HINDS, 1999).

De acordo com a Figura 2.3, observa-se que o mecanismo difusional é mais atuante em partículas menores que 0,2 μm , sendo que os mecanismos gravitacional, inercial e intercepção direta são mais atuantes nas partículas maiores que 2 μm . Deste modo, a eficiência total de coleta das partículas é admitida como sendo a soma de todos os mecanismos. Portanto:

$$\eta_T = \eta_d + \eta_i + \eta_{id} + \eta_g + \eta_e \quad (2.56)$$

A Figura 2.4 mostra a eficiência total do filtro com relação ao tamanho de partícula, verificando a capacidade de remover as partículas de um fluxo de gás é relacionando-as diretamente ao tamanho das partículas no fluxo. Para partículas com diâmetros menores que 0,1 μm , o mecanismo dominante da filtração é a difusão e o filtro é muito eficiente. Para partículas com diâmetros entre 0,1 e 0,4 μm o filtro é menos eficiente, sendo que para partículas maiores o efeito difusional é pequeno quanto ao efeito da interceptação. As partículas acima de 0,4 μm estão na região onde se tem interceptação direta junto com o inercial provocando um aumento da eficiência. (HINDS, 1999).

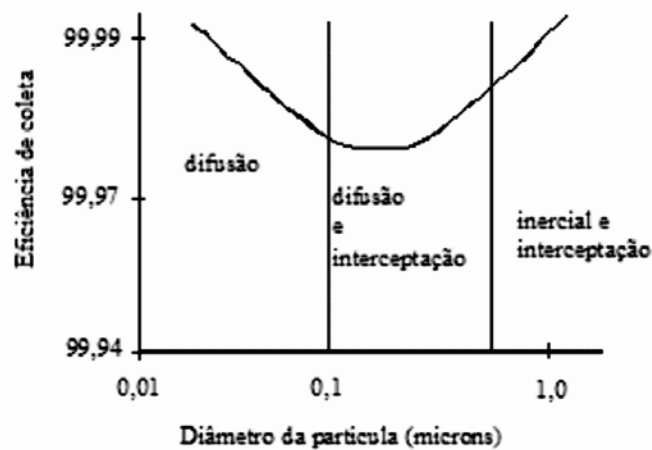


Figura 2. 4 - Eficiência do filtro com relação ao tamanho das partículas (HINDS, 1999).

Analisando a influência do diâmetro de partículas sobre a eficiência do sistema, e considerando-se a eficiência de uma fibra simples, verifica-se que a eficiência apresenta um valor de mínimo na região onde há a ação de mais de um mecanismo de coleta. Segundo HINDS, (1999) esta situação ocorre porque as partículas são muito grandes para serem coletadas por difusão e muito pequenas para serem coletadas por inércia e interceptação direta.

2.8 - Queda de pressão no filtro

A queda de pressão em um filtro é tão importante quanto a eficiência, e às vezes, até mesmo mais importante. Não é difícil obterem-se elevados valores de eficiências (acima de 99,9%) para a filtração com filtros de tecido, mas altos valores de queda de pressão inviabilizam o processo (MATTESON & ORR, 1987).

O escoamento através de meios porosos consolidados é semelhante ao escoamento através de leitos sólidos granulares (TARDOS et al., 1978). Conseqüentemente o comportamento geral da queda de pressão (ΔP) em função da velocidade (U_0) é de forma similar à função correspondente nos sólidos granulares, isto é, a transição do escoamento laminar para turbulento é gradual (AGUIAR, 1995). Por esta razão a função deve incluir um termo viscoso e um termo inercial, e sua forma para o escoamento de um fluido incompressível é mostrado na Equação (2.57):

$$\frac{\Delta P}{H} = \alpha_r \cdot \mu \cdot U_0 + \beta_r \cdot \alpha_r \cdot U_0^2 \quad (2.57)$$

onde, H é a espessura do filtro, μ é a viscosidade do fluido, α_r o coeficiente de resistência viscosa e β_r o coeficiente de resistência inercial.

Para o caso de escoamento puramente viscoso, o segundo termo da Equação (2.57) torna-se desprezível e a expressão resultante é conhecida como a equação de Darcy para escoamento em meios porosos:

$$\frac{\Delta P}{H} = \alpha_r \cdot \mu \cdot U_0 \quad (2.58)$$

2.9 - Movimento Browniano

O movimento browniano é o movimento aleatório de partículas pequenas num fluido como consequência dos choques das moléculas do fluido nas partículas. Este movimento aparece quase como uma vibração do conjunto de partículas, embora haja um deslocamento resultante da partícula com o tempo. A observação deste movimento num líquido foi feita pela primeira vez em 1828 por Robert Brown, e o fenômeno tem sido chamado de movimento browniano (REIST, 1993).

Quando uma partícula apresenta movimento browniano, a chance dela retornar na posição inicial é significativamente pequena. Ela será deslocada com o tempo, embora o deslocamento médio de todas as partículas seja zero. Assim, durante um curto intervalo de tempo uma partícula pode se mover a distância s_1 , outra a distância s_2 , e assim por diante. Alguns desses movimentos serão negativos, outros positivos, alguns para cima, outros para baixo, mas a soma resultante dos deslocamentos será zero. Este deslocamento é possível de ser estimado para todas as partículas em termos de raiz média quadrada do deslocamento.

De acordo com REIST (1993), é possível estimar a distância média, \bar{s} , percorrida por uma partícula de diâmetro d_p durante um tempo t devido ao movimento Browniano.

A equação de difusividade D , Equação 2.36, indica que o coeficiente de difusão da partícula é independente da densidade e , portanto da massa da partícula.

A molécula mostra uma brusca mudança de direção, isto ocorre quando as moléculas batem umas nas outras. A distância média entre elas é definida como o caminho livre médio das moléculas. Para a partícula, o choque com uma molécula individual não afeta apreciavelmente o movimento. Portanto, este caminho não é caracterizado pela brusca mudança na direção, mas por suaves curvas representando o efeito combinado por muitas moléculas. O problema pode ser tratado considerando o deslocamento médio da partícula sob

influência da força cuja magnitude e direções variam de maneira aleatória, mas a média da magnitude é igual a zero (REIST, 1993).

Na Figura 2.5 é apresentada a trajetória de uma molécula de gás comparada com uma partícula.

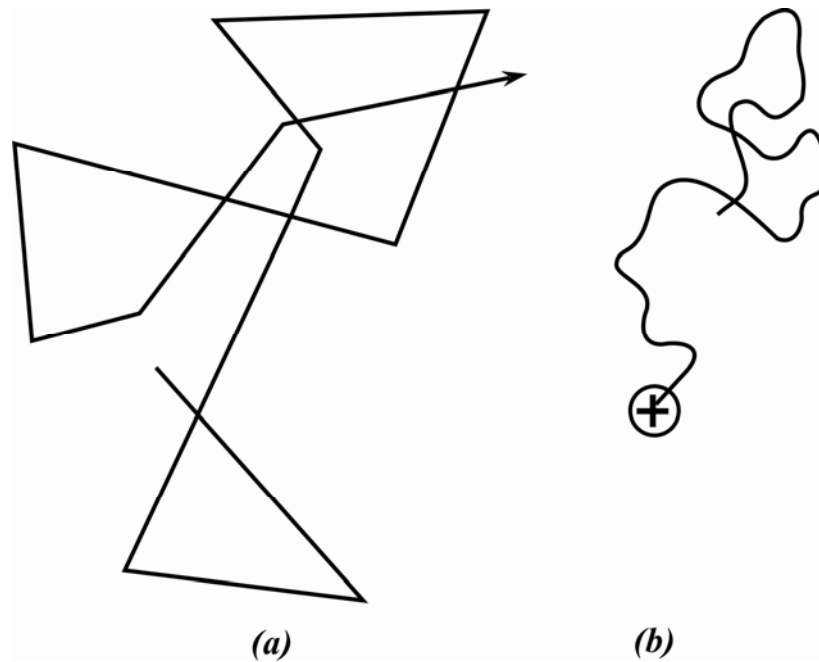


Figura 2. 5- (a)Trajetória da molécula de gás com $\lambda=0,066\mu\text{m}$ e tempo percorrido= $1,6\text{ ns}$;
(b) Trajetória do centro da partícula com $0,1\mu\text{m}$ com $\lambda=0,066\mu\text{m}$ e tempo percorrido= $1,7\mu\text{s}$ (b) (HINDS, 1999).

2.10 - Filtração de nanopartículas

O recente interesse com o comportamento de nanopartículas em gases tem resultado em trabalhos experimentais, cujas principais conclusões são listadas a seguir:

VAN OSDELL (1990) analisou a eficiência de partículas aerossol polidisperso de 4 a 420 nm com filtro HEPA, nas velocidades de 0,5 a 20cm/s. Correlacionou seus dados com a teoria de LEE e LIU (1982 b), e verificou que a teoria desviou de seus dados experimentais abaixo de 130 nm, propondo maiores estudos nesta faixa de tamanho.

STENHOUSE & TROTTIER (1991), estudaram experimentalmente as características de filtros fibrosos. Os filtros foram carregados com pequenas frações de partículas submicrômicas. A eficiência de coleta das partículas 10 a 600 nm de diâmetro foram medidas progressivamente onde a queda de pressão aumentava. Eles mostram que a queda de pressão aumentava, mas a eficiência também aumentava.

PAYET et al. (1992) observaram a eficiência de filtro HEPA na remoção de aerosol líquido de dioctilato com partículas de 20 e 500nm de e mostraram que a eficiência diminui em parte devido ao aumento da velocidade de filtração e em parte pelo decréscimo do número de fibras viáveis para captura das partículas.

Geugeon apud SPURNY (1998) estudou a eficiência da filtração com filtros fibrosos comerciais. Observou que a difusão e a interceptação direta são predominantes para a faixa de partículas entre 40 a 400 nm. De acordo com o autor a maior dificuldade na interpretação direta dos resultados relatados para o filtro HEPA está na dificuldade da estimativa do diâmetro real das fibras.

CHEN & PUI (2000) estudaram a eficiência de filtração de nanopartículas com tamanhos de 3 a 20nm. Os autores examinaram o efeito eletrostático, eficiência de partículas carregadas e não carregadas eletricamente. Verificaram que a eficiência experimental era maior que a predição teórica. A alta eficiência de coleta foi atribuída à carga das partículas, devido ao efeito eletrostático.

BALAZY et al. (2004) utilizaram filtros fibrosos comerciais para verificar a eficiência de coleta para partículas de 10 a 500 nm. Verificaram que a eficiência de remoção de partículas muito finas suspensas no ar foi muito grande, sendo que a eficiência diminui com o aumento do tamanho da partícula devido ao mecanismo difusional. Verificaram que para partículas com diâmetro em torno de 20 nm a eficiência foi máxima.

CLEMENT & DUNNETT (2004) afirmam em seu trabalho que a filtração de nanopartículas através de filtros fibrosos apresenta dois grandes problemas, necessitando grande atenção. O primeiro consiste na natureza geométrica do filtro e configuração das fibras. O segundo problema consiste na mudança da deposição e a eficiência da fibra no depósito acumulado e como isto combina com o efeito randômico na eficiência global.

HUANG et al. (2004) utilizaram filtros fibrosos com espessuras de 25 e 200 μm para determinar a eficiência de filtração para partículas de aerossol de NaCl polidisperso de 60 a 100 nm, na velocidade de 10 cm/s. Verificaram que a eficiência de filtração para o filtro com espessura menor apresentava eficiência reduzida comparada ao de espessura maior. A maior eficiência de filtração foi devido a maior espessura do filtro.

YANG & LEE (2005) estudaram a eficiência de partículas com 50 e 500 nm de NaCl e Al_2O_3 . Verificaram que a eficiência de coleta era alta dependendo do tamanho do aerossol e da concentração. A eficiência diminuiu com o aumento da velocidade, devido ao baixo tempo de retenção.

HEIM et al. (2005) estudaram o efeito de filtros carregados e não carregados eletricamente com nanopartículas de NaCl de 2,5 a 20 nm. Compararam medidas com um contador de partículas e metodologias experimentais. Verificaram que a eficiência com filtros carregados é maior que os não carregados.

BALAZY et al. (2005) estudaram a eficiência de remoção de partículas de NaCl utilizando filtros para fins de proteção respiratória humana. As partículas polidispersas eram de 10 a 600 nm, o filtro utilizado foi de polipropileno com 3 camadas. Analisaram a eficiência do filtro carregado com partículas carregadas e não carregadas eletricamente. Verificaram que a eficiência com as partículas neutralizadas decrescia de em torno de 0,92 para partículas de 10 nm, com mínimo de 0,5 para partículas com 40 nm, tornando a crescer a partir deste ponto. Com partículas carregadas a eficiência é acima de 0,85.

AHN et al. (2006) verificaram que a eficiência de nanofiltros de nylon com fibras de 80 a 200 nm, é superior a de um filtro HEPA comercial usando partículas de 300 nm e velocidade de filtração de 5 cm/s.

PODGÓRSKI et al. (2006), verificaram a eficiência de filtração de partículas de ácido cebácico com diâmetros entre 100 a 500 nm, utilizando filtros nanofibrosos, e concluíram que a heterogeneidade dos filtros torna-os altamente eficientes. Quando calculada a eficiência teórica a mesma superestima os dados experimentais, o que indica, segundo os autores, que o diâmetro das fibras precisa ser mais bem estudado, devido o valor médio não representar satisfatoriamente todas as fibras.

Os trabalhos de BALAZY et al. (2005), PODGÓRSKI et al. (2006), Geugeon (apud SPURNY, 1998), PAYET et al. (1992), utilizaram as Equações de PAYET et al. (1992) para o cálculo da eficiência difusional e de LIU & RUBOW (1990) para a eficiência difusional e interceptação direta. Devido à maioria destes trabalhos utilizarem as equações destes autores, elas foram também utilizadas no presente trabalho.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

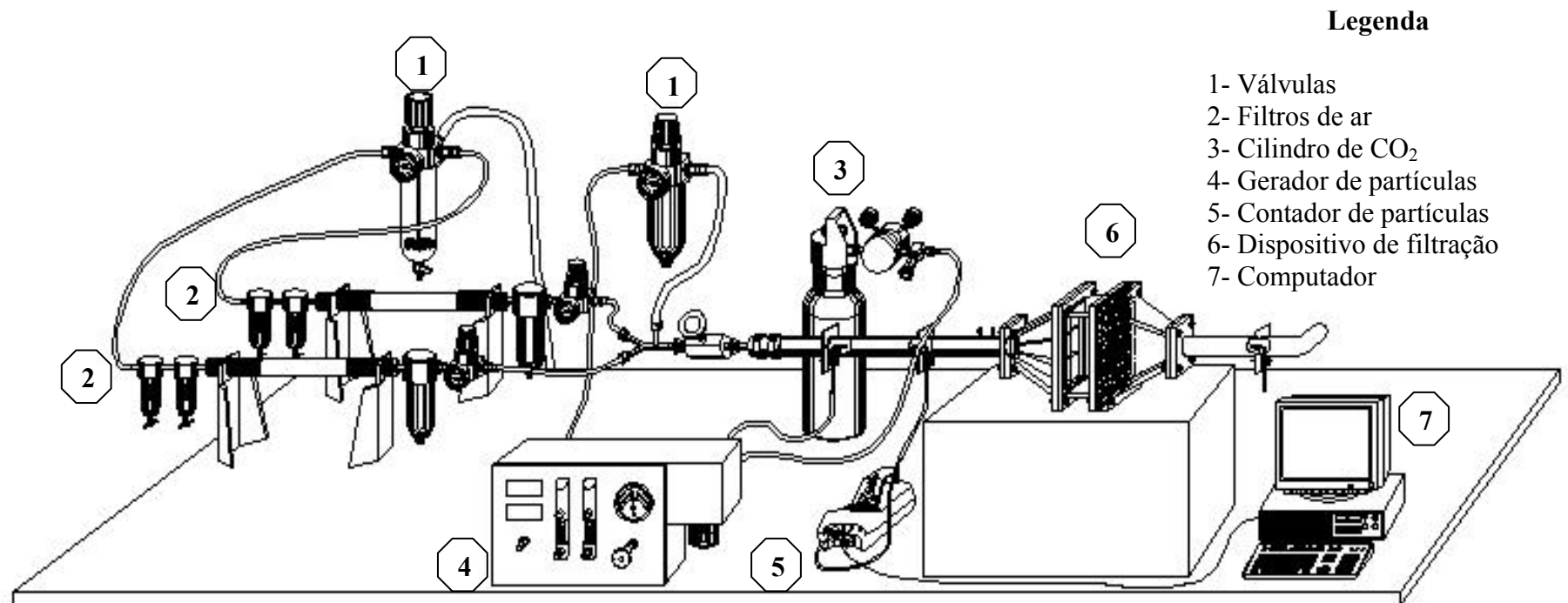
Para a determinação da eficiência de remoção de partículas nanométricas em suspensão no meio gasoso, foi construída uma unidade experimental que simulava uma contaminação, através da dispersão no ar de partículas nesta faixa e, com a inserção de um dispositivo com filtro para removê-las da corrente gasosa. A seguir serão descritos os componentes do aparato experimental, bem como a metodologia aplicada.

3.1 - Unidade Experimental

Na Figura 3.1 mostra-se a unidade experimental utilizada nos experimentos. Sendo que os equipamentos da unidade são detalhados nas seções posteriores assim como os materiais utilizados e o procedimento experimental.

Além dos equipamentos mostrados (Figura 3.1), a unidade possui um compressor de ar, que fica na parte externa do laboratório.

A unidade experimental estava localizada num laboratório onde não se obtinha muita contaminação externa de material particulado, pois era necessário ter este cuidado.



Legenda

- 1- Válvulas
- 2- Filtros de ar
- 3- Cilindro de CO₂
- 4- Gerador de partículas
- 5- Contador de partículas
- 6- Dispositivo de filtração
- 7- Computador

Figura 3. 1- Vista geral da unidade experimental.

3.1.1 - Detalhamento do equipamento de filtração

3.1.1.1 - Dispositivo de filtração

O dispositivo de filtração (Figura 3.2) foi o equipamento que comportava os filtros fibrosos utilizados neste trabalho. O mesmo foi construído em acrílico, em escala de laboratório, com faces desmontáveis, que facilitassem a troca dos filtros.

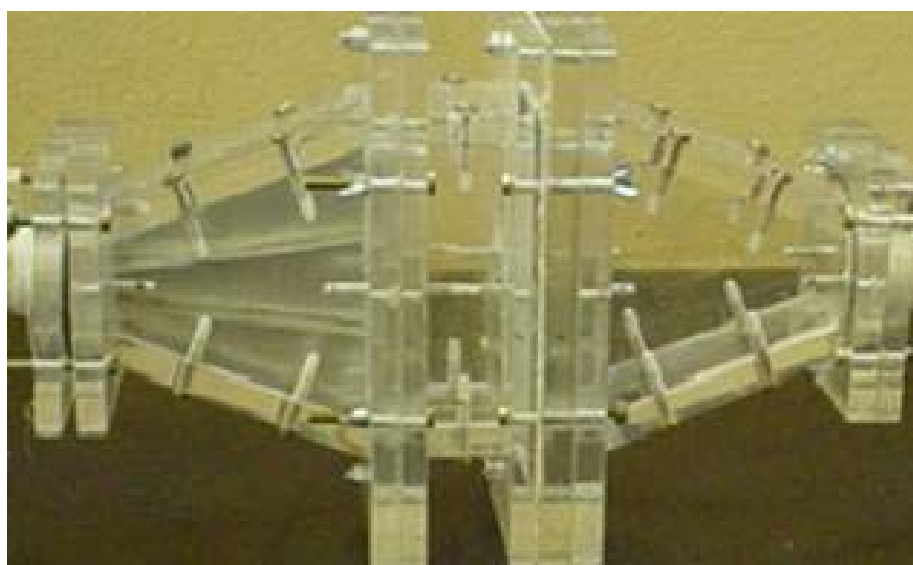


Figura 3. 2 – Foto do dispositivo de filtração

Na Figura 3.3 mostra-se o esquema do dispositivo de filtração com suporte do filtro com cotas e na Figura 3.4 detalhe do suporte. Foi colocada uma tela para suporte do filtro, visando evitar fraturas nos filtros durante a operação.

A tubulação construída em PVC, por onde as partículas passavam, possuía 2,54 cm de diâmetro. Também tinha 60 cm de comprimento antes e 40 cm depois do dispositivo de filtração.

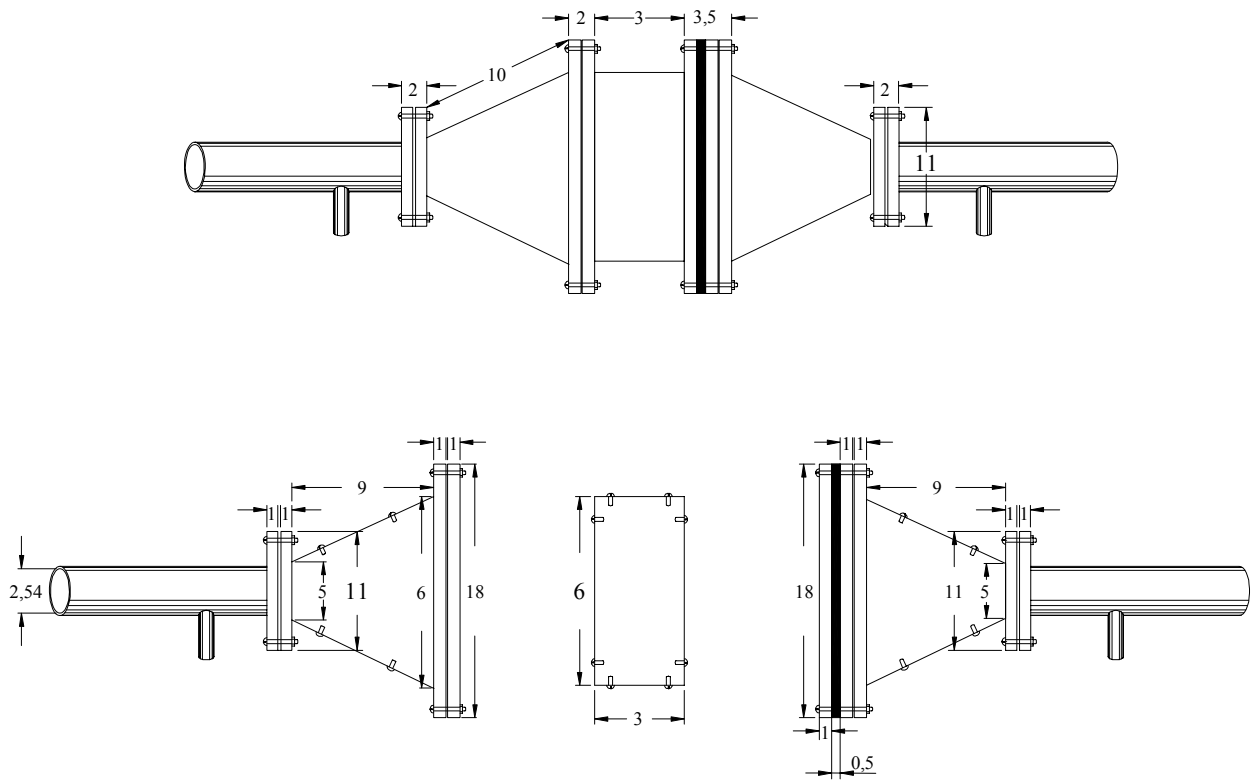


Figura 3. 3 - Dispositivo de filtração: Vista lateral com cotas (cm).

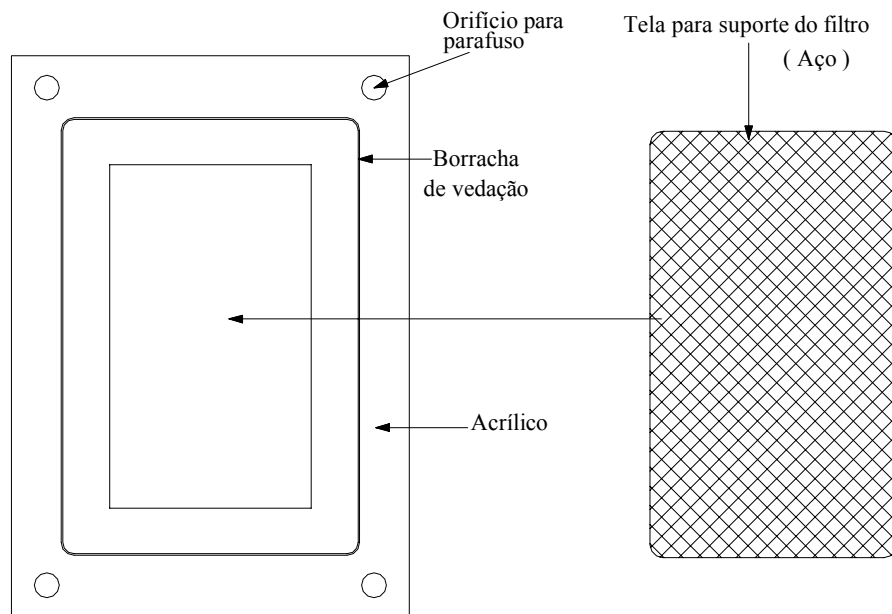


Figura 3. 4 - Detalhe do suporte do filtro

A região de entrada do dispositivo tinha a forma de um tronco de pirâmide com base retangular, conectada à caixa retangular do filtro minimizando os efeitos de entrada do gás, como visto na (Figura 3.5). Dentro dela foi fixada uma grade de metal, cuja função foi promover a distribuição de gás, para uma melhor uniformidade do escoamento dentro do equipamento.

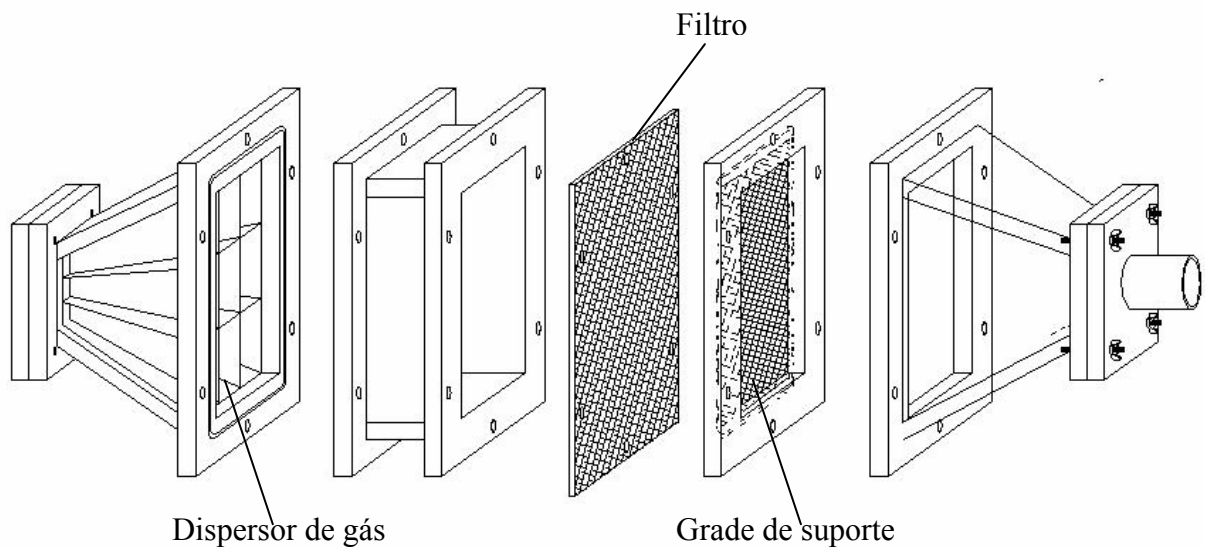


Figura 3. 5 - Esquema expandido do dispositivo de filtração.

3.1.1.2 - Medidor de vazão

A vazão de escoamento do ar no dispositivo de filtração foi controlada através de uma válvula agulha inserida no duto de entrada do dispositivo de filtração e medida com um rotâmetro, Gilmont Instruments, Inc. 31601-31700, número 3, de vidro e de aço. O rotâmetro ficava disposto na saída da tubulação, onde o ar passava por uma mangueira de silicone que se ajustava no tamanho da entrada do rotâmetro.

3.1.1.3 - Medidor de umidade

A umidade do ar foi medida na saída do dispositivo de filtração, utilizando-se uma sonda e medidor digital do jogo de equipamentos Tri-Sense, modelo 37000-90 da Cole-Parmer Instruments.

3.1.1.4 - Medidor de temperatura

A temperatura foi medida pela sonda na saída do dispositivo de filtração e utilizando o medidor digital do jogo de equipamentos Tri-Sense, modelo 37000-90 da Cole-Parmer Instruments.

3.1.1.5 - Medidor de queda de pressão

A queda de pressão no filtro foi medida através de um micromanômetro da marca Furness Controls Limited, modelo FCO14.

3.1.1.6 - Gerador de partículas

O gerador de partículas utilizado foi o ElectroSpray Aerosol Generator, modelo 3480, produzido pela TSI, apresentado na Figura 3.6. Ele gera partículas monodispersas, na faixa de 3 a 100 nm, numa concentração de 10^7 partículas/cm³ e vazão de 0,2 a 2,5 L/min.



Figura 3. 6 - Foto do gerador de partículas.

A geração das partículas iniciava-se com a preparação de uma solução, dependendo do material a ser utilizado. O líquido era introduzido ao gerador através de um porta-amostra e a solução se tornava ionizada devido a um fio de platina ligado a uma fonte de alta tensão, como apresentado na Figura 3.7, cuja finalidade era a ionização da amostra empregada.

O líquido escoava por um capilar, com 40 μm de diâmetro, devido à pressurização da câmara e na saída do mesmo, sofria a ação de um campo elétrico. Esse campo causava o seccionamento do líquido carregado eletricamente, na forma de gotículas de mesmo tamanho. Ar puro e CO_2 eram misturados a essas gotículas, causando a evaporação da fase líquida. Concomitantemente, as mesmas entravam em contato com uma fonte ionizante de Amerício 241, que promovia a neutralização das cargas presentes.

Maiores detalhes sobre o gerador encontram-se no Apêndice B.

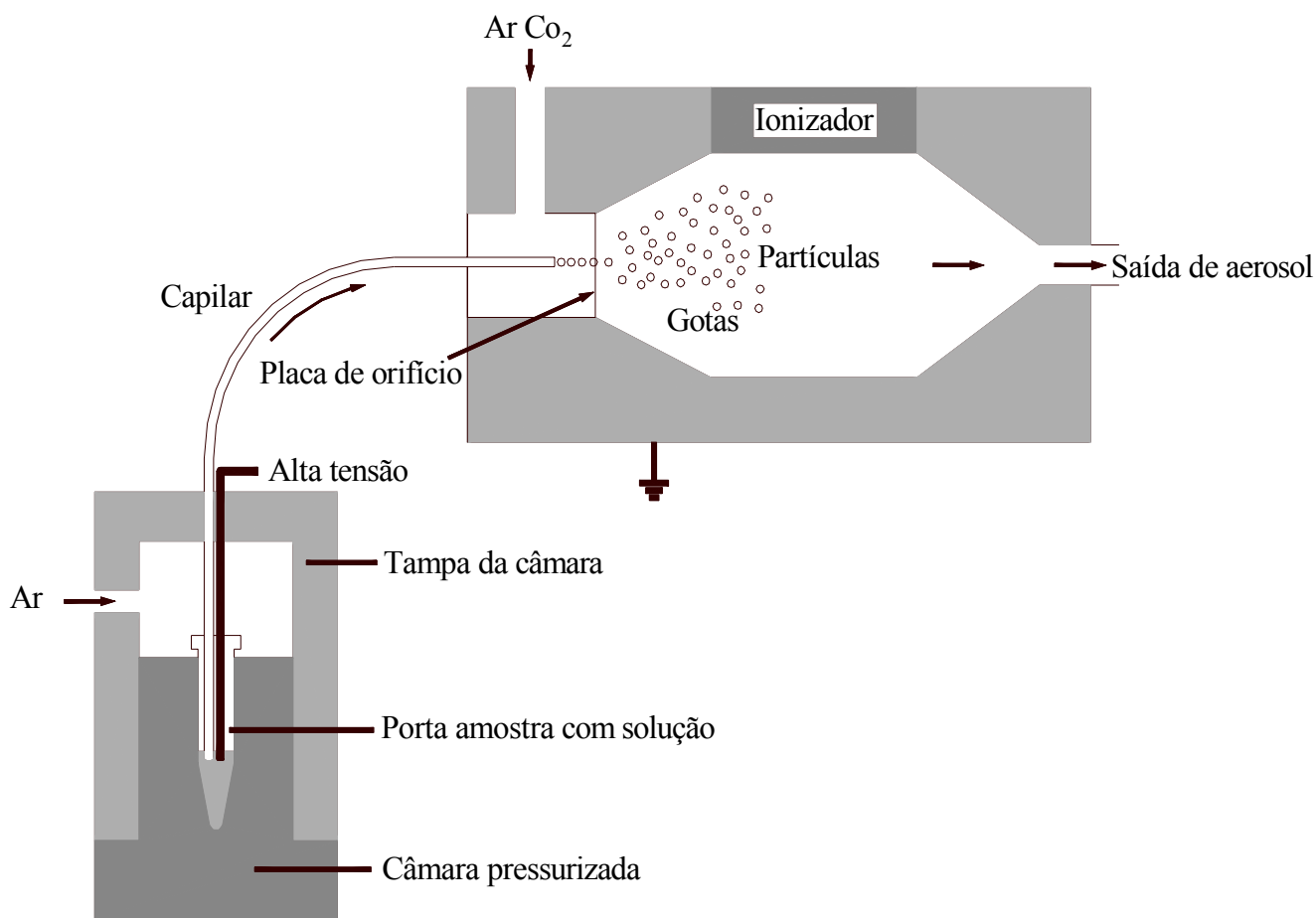


Figura 3. 7 - Esquema de funcionamento do gerador de partículas (manual de funcionamento do gerador modelo 3480, da TSI).

Na Figura 3.8 (a) mostra-se o detalhe da porta-amostra e 3.8 (b) a câmara de acrílico com o capilar e o fio de alta tensão, onde o líquido é succionado. Na geração de partículas era importante ainda o uso de uma solução para limpeza do capilar do gerador, de forma que não houvesse contaminação da amostra e nem incrustação de material no mesmo. Essa solução era alimentada ao gerador antes e depois de cada corrida. Para conservar a solução livre de contaminantes esta era mantida resfriada. Após a solução, era passado ar pelo capilar por 5 minutos, para promover a evaporação da solução, minimizando o fenômeno de incrustação.



(a)



(b)

Figura 3. 8 - Detalhe: a) Porta-amostra , b) Câmara de acrílico com o capilar e o fio de alta tensão.

As partículas geradas eram alimentadas ao equipamento através de uma sonda acoplada ao duto de entrada, de forma que estas fossem inseridas no centro do mesmo e possuíssem uma melhor dispersão pela corrente de gás que promovia a sua diluição. Maiores detalhes do gerador podem ser vistos no Apêndice B.

A Figura 3.9 mostra a fonte de Amerício 241, do gerador, que tem a função de neutralizar as cargas. A fonte emite raios alfa e possui intensidade de aproximadamente 0,5

mCu. A etapa de neutralização do gerador de partículas é necessária para que as cargas, na superfície das gotas, sejam reduzidas, evitando que as forças repulsivas entre as mesmas possam causar o efeito de desintegração Rayleigh, diminuindo a concentração de aerossol monodisperso.



Figura 3. 9 - Fonte de Amerício.

De acordo com RAYLEIGH (1945), as cargas têm dois efeitos sobre as gotas: quando em pequenas quantidades, elas causam não a repulsão, mas a coalescência das gotas, aumentando o tamanho das mesmas; o outro efeito é que as cargas elétricas tendem a diminuir a esfericidade das gotas, tornando-as instáveis. Com a evaporação do líquido, eleva-se a densidade de cargas na superfície das gotas, aumentando o efeito causado pelas cargas sobre as mesmas e, quando este se iguala à tensão superficial da gota, ocorre a desestabilização. A partir deste ponto, a gota pode ejetar parte de sua massa inicial em várias gotas menores, cujo número dependerá da massa inicial (DOYLE et al. 1964) e, assim, influenciar a distribuição granulométrica do material gerado.

O resultado de todo o processo que ocorre no gerador é um aerossol composto de partículas monodispersas, neutras e estáveis.

O gerador de partículas pode ser operado com capilares de diferentes diâmetros. FALAGUASTA (2005) mostrou que podem ser utilizados capilares de 20 e de 40 μm , sendo que o capilar de menor diâmetro apresenta grande facilidade de entupimento, o que se torna um processo inviável, por gastar muitos capilares. No entanto o capilar de 40 μm , apresenta menor dificuldade de entupimento se comparado ao capilar menor, por isso o mesmo foi escolhido para efetuar os ensaios.

3.1.1.7 - Contador de Partículas

A determinação da eficiência foi realizada com o emprego de um contador de partículas da marca TSI, modelo 3007 mostrado na Figura 3.10.



Figura 3. 10 - Contador de partículas.

O esquema de funcionamento do contador de partículas é mostrado na Figura 3.11.

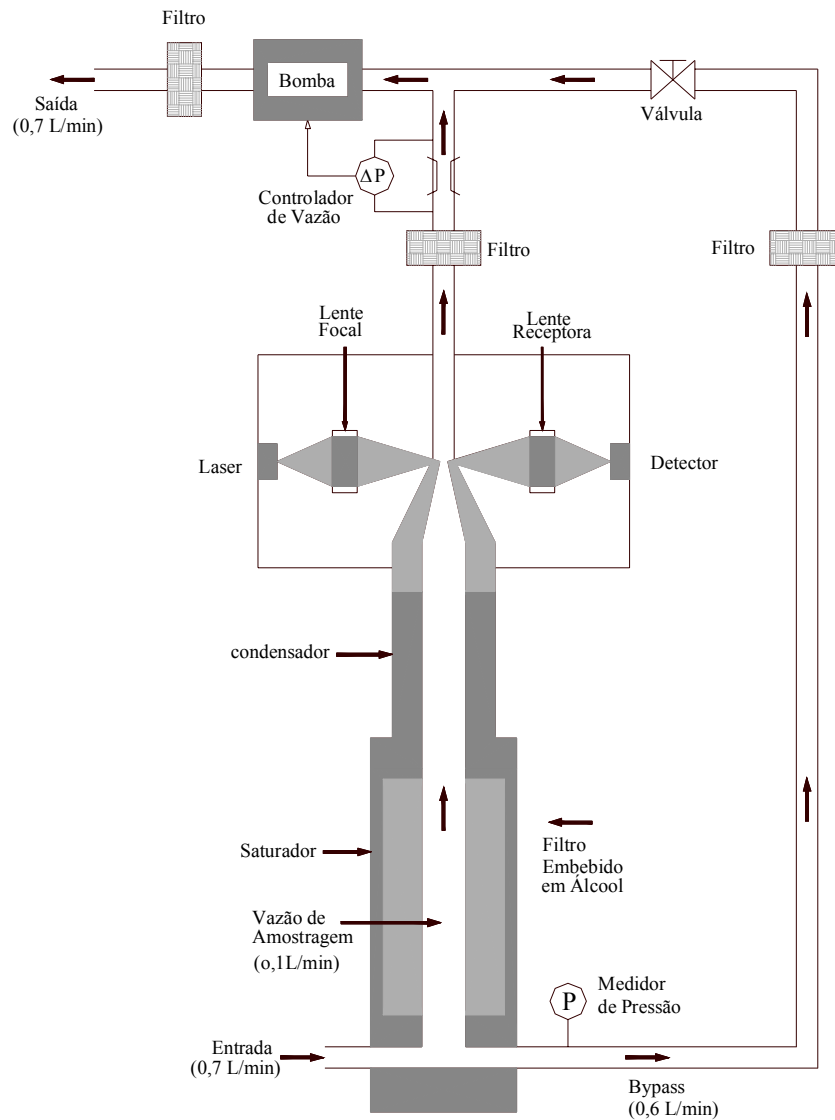


Figura 3. 11 - Esquema de funcionamento do contador de partículas.

Esse equipamento conta o número de partículas que possuem diâmetro igual ou maior que 10 nm, até um limite de 1000 nm. As partículas que entram no equipamento passam por uma coluna que contém álcool no estado gasoso. Onde a corrente passa através de um condensador que faz com que o álcool se condense sobre as partículas, de forma que as mesmas aumentem de tamanho e possam ser detectadas pelo equipamento. Um dispositivo gera um feixe de laser, que é emitido sobre as partículas provocando sua dispersão. Um sensor

detecta a luz dispersada pelas gotas, determinando o número de gotas que passam pelo equipamento.

3.1.1.8 - Compressor de ar

O ar utilizado para a geração das partículas, bem como aquele utilizado para a sua diluição, foi fornecido por um compressor de pistão da marca Schulz, modelo MSV12/175, com capacidade de 340 L/min. O modelo era isento de óleo, para evitar a presença deste composto e a contaminação da corrente gasosa. Após comprimido, o ar passava por um filtro de sílica gel, que reduzia grande parte do vapor de água condensado no processo anterior.

3.1.1.9 - Filtros de purificação do ar

Para que não houvesse contaminação do fluido, foram utilizados dois filtros de purificação de ar como apresentado na Figura 3.12. Estes foram adquiridos da empresa TSI, sendo o modelo dos mesmos 3074B. Cada filtro era formado por um conjunto de três filtros e uma membrana, através dos quais promovia-se a purificação do gás. O pré-filtro removia as partículas grandes e gotas de água ou outros líquidos presentes na corrente gasosa, com uma eficiência de 99,85% para partículas de 0,1 μm . Em seguida, a corrente gasosa passava por um filtro coalescente que removia partículas, água e gotas de óleo com uma eficiência maior que o filtro anterior (99,99995% para partículas de 0,1 μm). Após esta etapa, o ar escoava por uma membrana que removia a umidade existente na corrente gasosa através de uma série de membranas seletivas. Finalmente, a unidade possuía um último filtro composto por carvão ativado que removia eventuais gotas de óleo e partículas com uma eficiência de 99,99995%. A vazão máxima de operação era de 60 L/min e pressão máxima na entrada de 10,5 kg/cm².

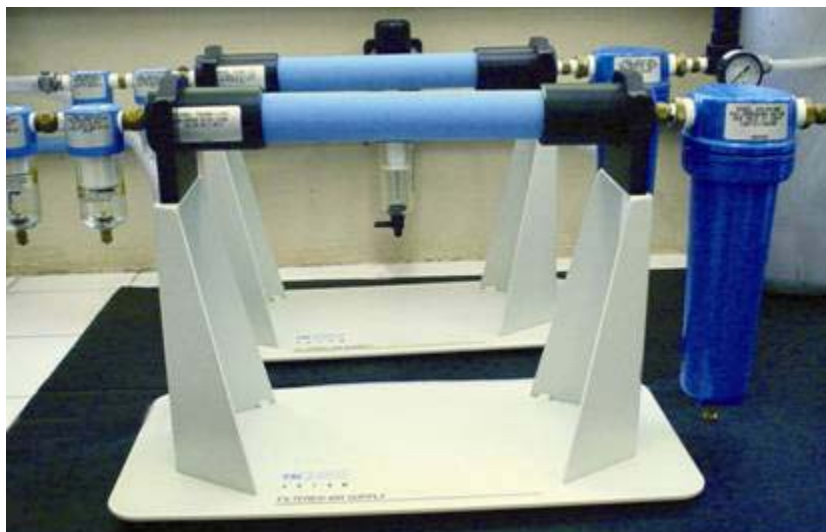


Figura 3. 12 - Filtros para purificação de ar.

Além do ar, nesta etapa foi necessário o emprego de CO_2 para a geração das partículas. Este gás foi fornecido pela AGA S.A. em cilindros de 6 kg. O gás adquirido foi o do tipo superseco, com pureza elevada.

3.2 - Material utilizado

3.2.1- Material particulado

Foi utilizado como material particulado o cloreto de sódio, cuja fórmula química é NaCl . O reagente adquirido foi da marca J.T. Baker, com 99,5% de pureza.

A densidade do NaCl foi medida com um picnômetro a Hélio, modelo AccuPyc 1330, da Micromeritics, obtendo-se o valor de $2,165 \text{ g/cm}^3$.

Na preparação da solução salina para a alimentação do gerador e posterior formação do aerossol, foi necessária o uso de água ultrapura para garantir uma maior pureza da amostra. Esta água foi obtida através da destilação da água de abastecimento e posterior purificação

desta utilizando o sistema Simplicity Ultrapure Water System, da Millipore, que remove os contaminantes remanescentes através de filtração por resinas de troca iônica.

As características da água obtida foram determinadas a partir dos parâmetros: condutividade, obtida através de um condutivímetro da Micronal, modelo B330, com célula de condutividade Digimed, modelo DMC-010 e constante $k=1 \text{ cm}^{-1}$; pH, medido com um pHmetro Digimed, modelo DM-20; e dureza e sólidos dissolvidos determinados pelo laboratório de Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, pertencente à Universidade de São Paulo. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Características da água utilizada.

Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	pH (-)	Dureza (mg/l)	Sólidos dissolvidos (mg/l)
1,33	7,59	1	0

As soluções de cloreto de sódio em água ultrapura foram preparadas dissolvendo-se a massa de soluto necessária, pesada utilizando-se uma balança Kern, modelo 410, com quatro casas decimais, para cada concentração desejada em uma porção de água e, posteriormente, diluindo-se a solução resultante para 100 mL em balão volumétrico de vidro. Em seguida, as amostras eram transferidas para frascos plásticos (polietileno) para melhor preservação, pois os utensílios de laboratório feitos em vidro podem ser fonte de contaminação devido à presença de Na em sua composição, como também, serem responsáveis pela perda de soluto, uma vez que poderia ocorrer troca iônica entre a sua superfície e a solução, devido à presença do grupo Si-OH, que substitui o H^+ por íons metálicos da solução (HOWARD & STATHAM, 1993). Utilizaram-se os frascos da preparação apenas para esta atividade, evitando que os

mesmos se contaminassem com outras substâncias. Outra medida para preservar as soluções foi a sua conservação em refrigerador a 5°C, para minimizar a contaminação de origem biológica.

A qualidade do ar gerado pelos filtros é alta como pode ser observada na Figura (3.13), que apresenta a concentração de partículas em número na corrente gasosa, obtida com o emprego do contador de partículas descrito previamente.

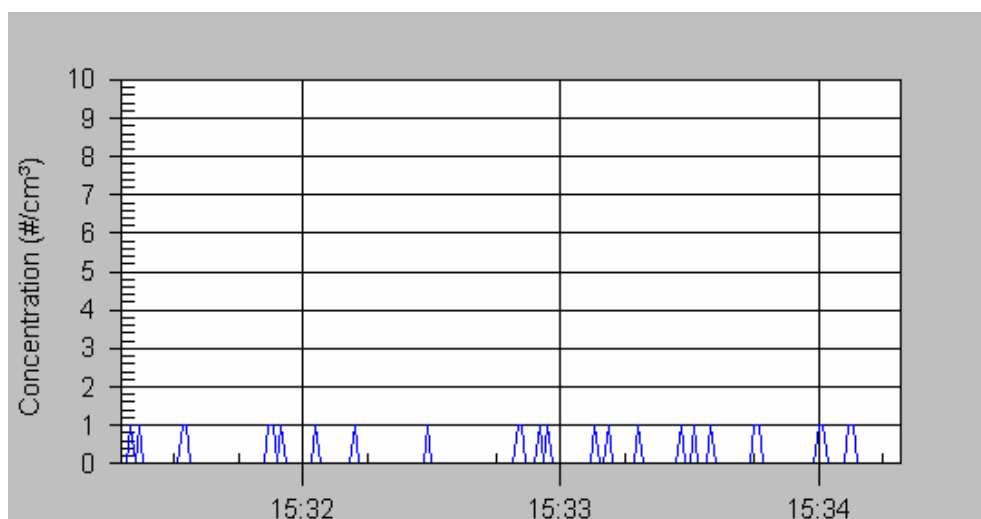


Figura 3. 13 - Concentração de partículas na corrente gasosa gerada pelo compressor com relação do tempo em minutos.

A solução de limpeza utilizada no gerador de partículas foi feita adicionando-se 0,77 g de acetato de amônio em 0,5 L de água ultrapura. Em seguida, acrescentava-se 0,75 ml de hidróxido de amônio. O pH e a condutividade da solução eram ajustados em 8,0 e 0,2 S/m, respectivamente, através da adição de mais reagente e, quando necessária a diminuição do pH, empregava-se o ácido acético. O local onde foram realizados os experimentos foi higienizado cuidadosamente que não houvesse uma poluição atmosférica com grande concentração de material particulado em suspensão no laboratório de nanopartículas, de forma a evitar possíveis contaminações.

3.2.2 - Filtros

Foram utilizados dois tipos de filtros, Poliéster e celulose (HEPA) e, sendo os mesmos descritos a seguir:

3.2.2.1 - Filtro de Poliéster

Este filtro foi fornecido pela empresa Gino Cacciari Indústria e Comércio de Filtros de Tecidos Ltda, com fibras 100% Poliéster, peso de 550g/m² e espessura de 4,5 mm.

Nas Figuras 3.14 e 3.15 mostram-se à vista lateral do filtro de poliéster obtido no MEV com diferentes ampliações.

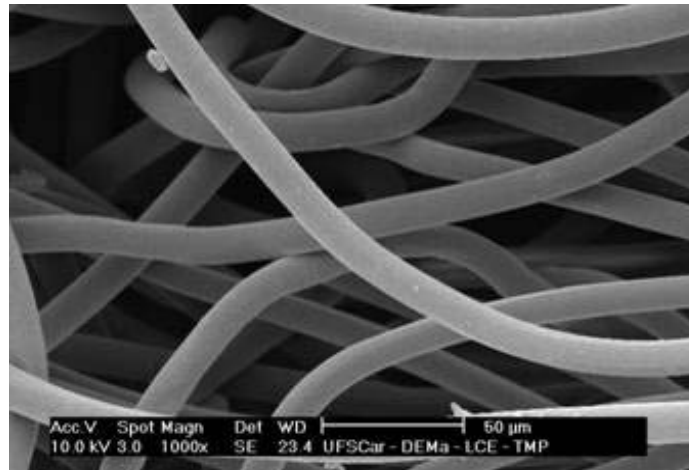


Figura 3. 14 - Vista do filtro de Poliéster

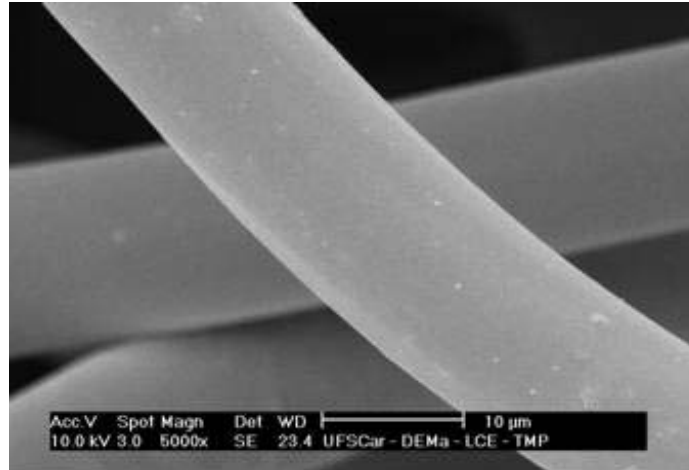


Figura 3. 15 - Vista do filtro de Poliéster

3.2.2.2 - Filtro HEPA

O filtro de celulose HEPA (High Efficiency Particulate Air filter), foi fornecido pela empresa VECO do Brasil Indústria e Comércio de Equipamentos LTDA, que segundo o fornecedor, apresenta eficiência mínima de 99,97% DOP para 0,3 microns, peso de 80g/m² e espessura de 0,4 mm. Nas Figuras 3.16 e 3.17 mostram-se as fotos do filtro obtidos no MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) com diferentes ampliações, onde se podem verificar o entrelaçamento das fibras e a heterogeneidade das mesmas. Este tipo de filtro (HEPA), é utilizado quando se desejam ambientes livres de contaminações (KLOCKE & WHYTE, 1999).

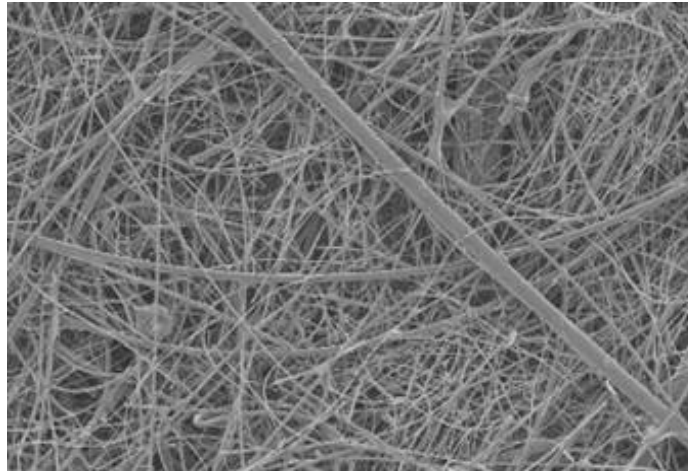


Figura 3. 16 - Vista lateral do filtro HEPA.

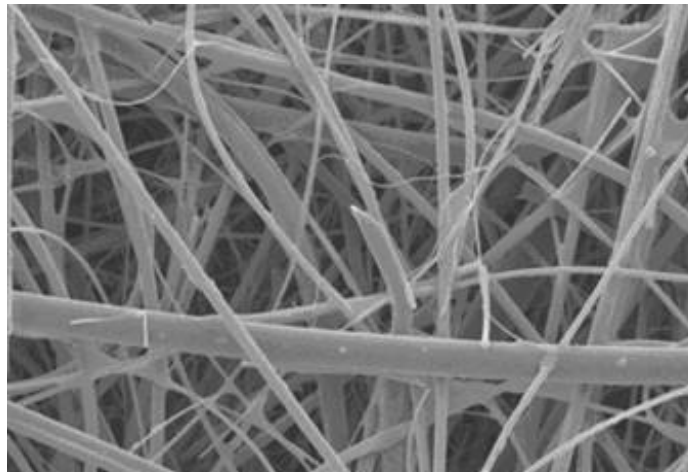


Figura 3. 17 - Vista lateral do filtro HEPA.

Além das características fornecidas pelo fabricante, foram realizados alguns ensaios de caracterização, a fim de se obter uma melhor avaliação dos resultados, uma vez que este trabalho se destina a um estudo comparativo. Para tal levantamento, foram determinados o diâmetro das fibras e a porosidade dos filtros, os quais são mostrados a seguir:

3.2.2.3 - Determinação do diâmetro das fibras

Os diâmetros das fibras dos filtros foram obtidos a partir das imagens transversais obtidas em MEV, com posterior análise no Programa Image Pro Plus 3.0. Ele possibilita tanto a captação quanto a análise de imagens provenientes de microscópios e câmeras fotográficas. Para a determinação do diâmetro das fibras, as mesmas eram selecionadas manualmente e obtidos os diâmetros das mesmas. A seleção das fibras necessitou de muita atenção, para não se obterem muitos erros de medidas as quais influenciarem no diâmetro das mesmas, pois este parâmetro é de grande importância nos cálculos da eficiência dos filtros.

O programa opera de forma interativa através de janelas, permitindo uma série de operações, como melhora do contraste da imagem, binarização (transformação da imagem em apenas dois níveis: preto e branco).

3.2.2.4 - Determinação da porosidade dos filtros

A porosidade (volumétrica) de um sistema sólido poroso é definida como sendo a razão do volume de vazios e o volume total. A mesma foi determinada por dois métodos. O primeiro consistiu em medir a porosidade dos filtros poliéster e HEPA através da metodologia desenvolvida por AGUIAR (1995) mostrada no Apêndice A, que consiste em preparar os filtros para que pudessem ser examinados em microscópio. O segundo consistiu em medir a porosidade dos filtros por meio do porosímetro de intrusão de mercúrio, POREMASTER, modelo 33. Mais detalhes sobre o porosímetro são mostrados no Apêndice F.

3.2.2.4.1 - Metodologia de determinação da porosidade dos filtros

Inicialmente efetuou-se o embutimento dos filtros através da imersão dos mesmos em resina PMS-10, da LOCTITE. Verificando-se a perfeita penetração da resina nos filtros, levaram-se os mesmos para estufa a 60°C por aproximadamente 4 dias para que ficassem bem secos. Posteriormente, os filtros foram cortados em pedaços quadrados de 1 cm² de área. Estes foram embutidos em moldes cilíndricos, com a resina, RESAPOL-208, de modo que os pedaços de filtro ficassem dispostos transversalmente. A Figura 3.18 (a) mostra o filtro de Poliéster e 3.18 (b) o filtro HEPA embutidos.



(a)



(b)

Figura 3. 18 - Fotografia das amostras dos filtros embutidos (a) poliéster e (b) HEPA.

As amostras ficaram 24 horas dispostas à temperatura ambiente, até que estivessem secas (duras). As amostras foram esmeriladas e polidas conforme metodologia de AGUIAR (1995).

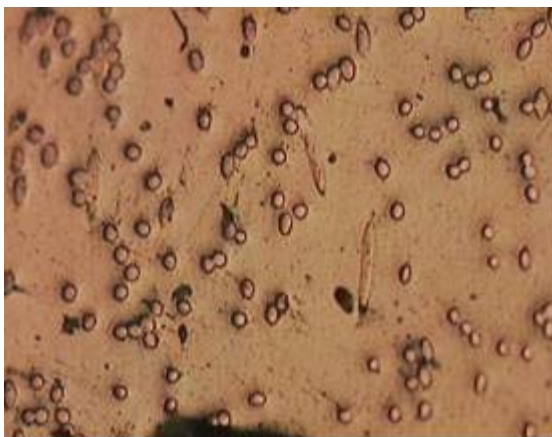
As amostras com os filtros de poliéster e HEPA foram levadas ao Microscópio Eletrônico de Varredura, MEV, e microscópio óptico, respectivamente.

As análises em MEV foram realizadas no laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Engenharia de Materiais, da UFSCar.

A visualização das fibras do filtro de poliéster era possível em microscópio óptico (Figura 3.19 (a)), onde eram obtidas imagens com ampliação de 20 vezes e também estas analisadas no Programa Image Pro Plus 3.0.

Devido ao tamanho reduzido das fibras do filtro HEPA, as mesmas só podiam ser visualizadas em MEV, onde eram obtidas imagens como mostra a Figura 3.19(c), estas eram analisadas no Programa Image Pro Plus 3.0.

As fibras foram selecionadas manualmente, como mostra a Figura 3.19 (b e d).



(a)



(b)

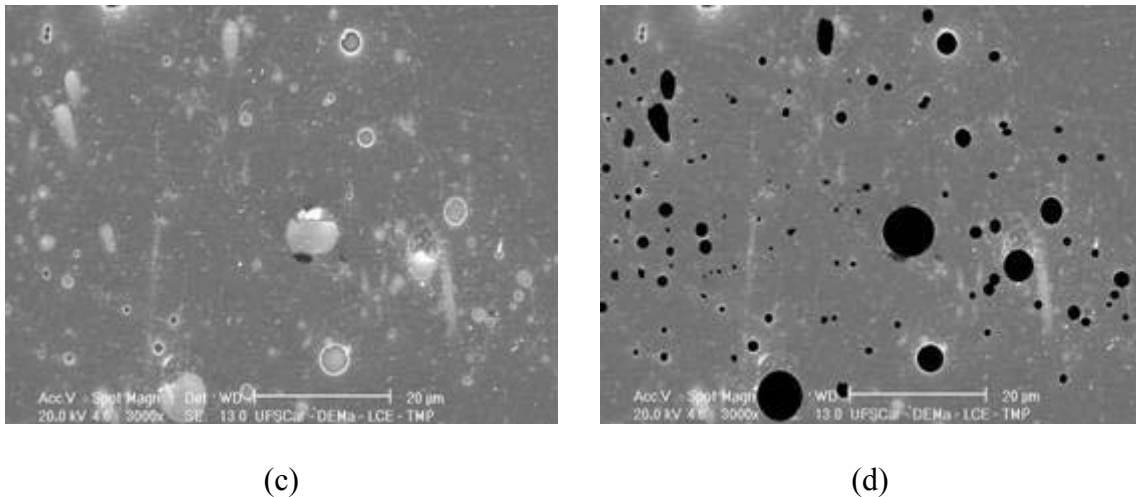


Figura 3. 19 - (a e b) Fotografias dos filtros HEPA e poliéster respectivamente (c e d) fotografias dos filtros HEPA e poliéster onde as fibras foram marcadas pelo software.

3.3 - Procedimentos Experimentais

A seguir serão apresentados os procedimentos experimentais para geração de partículas, coleta e determinação do diâmetro das partículas. Posteriormente a determinação da eficiência dos filtros, diâmetros das fibras e porosidade dos filtros.

3.3.1 - Determinação das curvas de corrente-tensão para o gerador

A construção das curvas de corrente-tensão foi iniciada com a passagem de ar comprimido pelo sistema e o ajuste da válvula reguladora de pressão, de modo que esta não fosse maior que 10 psi, limite máximo permitido pelo equipamento.

Em seguida, abria-se o cilindro de CO₂ e sua pressão na entrada do gerador era controlada de forma que não ultrapassasse 5 psi.

O passo seguinte era ligar o gerador e regular a sua pressão na câmara da amostra em 3,7 psi, a vazão de ar em 2 L/min e a vazão de CO₂ em 0,3 L/min. Ajustava-se também a tensão no valor de 1 kV e inseria-se na câmara a solução salina, preparada anteriormente.

Após 1 minuto de espera para estabilização do sistema, iniciava-se a coleta de dados, observando a forma do jato que saía do capilar, pela janela do equipamento. Anotava-se a corrente gerada, em seguida, a tensão era aumentada e a corrente registrada novamente, o formato da ponta do capilar observado, e assim sucessivamente, até que se obtivessem valores elevados de corrente.

O procedimento era repetido com todas as soluções de diferentes concentrações, de forma a determinar o ponto de operação em que a forma de geração das gotas estivesse no modo jato-cônico.

Após o término dos testes, o equipamento era limpo com o emprego da solução de limpeza, esta era alimentada por cinco minutos para remover os resquícios da solução salina, evitando que depósitos se formassem no capilar. Em seguida, ar limpo era passado pelo capilar para evaporar a solução de limpeza e preparar o capilar para o próximo ensaio.

Uma vez limpo o capilar, a câmara era despressurizada, as correntes gasosas e alta tensão removida, e o equipamento era desligado.

3.3.2 - Coleta das partículas geradas para cada concentração de solução

A coleta das partículas para a determinação do seu diâmetro iniciava-se da mesma maneira como descrita no procedimento 3.3.1, para a determinação do modo de operação na forma jato cônico, ou seja, o acionamento do gerador de partículas. A diferença consistia no valor ajustado para a tensão a ser fornecida, que correspondia ao valor determinado através do mencionado procedimento, maiores detalhes no Apêndice C.

Após verificar que o líquido estava passando pelo capilar e as partículas estavam sendo geradas, a vazão de saída era direcionada para a grade suporte própria para análises no MET, de forma que a mangueira de alimentação ficasse bem próxima à grade e aumentasse a

probabilidade das pequenas partículas serem coletadas e não desviadas com a corrente de ar. Este processo era realizado por aproximadamente 30 horas após o qual a vazão era desviada. A grade era acondicionada em recipiente vedado para posterior análise no MET e o equipamento era limpo e desligado.

Este procedimento era realizado para todas as concentrações preparadas, tendo o cuidado de desmontar o equipamento entre cada coleta e limpar a câmara de geração para que não ocorresse contaminação devido à troca de solução.

3.3.3 - Determinação do diâmetro das partículas geradas

Uma vez que o gerador em questão produzia as partículas de sal, NaCl, mas não informava o valor do diâmetro gerado, foram necessárias a utilização de técnicas que quantificassem o mesmo.

HINDS (1999) aponta alguns instrumentos aptos a visualizar partículas entre 100 e 10 nm, faixa na qual estão compreendidas as partículas geradas pelo equipamento utilizado. O autor sugere, por exemplo, o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), o Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET) e os equipamentos que utilizam a mobilidade elétrica das partículas para detectar seu diâmetro. Foram testadas as técnicas de microscopia de varredura e de transmissão proposta pelo autor e ainda a de força atômica. Porém, a escolhida para o desenvolvimento do trabalho foi a microscopia eletrônica de transmissão. Esta técnica foi empregada com sucesso por PROST et al. (1998) e BANG & MURR (2002) para a determinação do diâmetro de partículas nanométricas.

O Microscópio Eletrônico de Transmissão foi escolhido por apresentar uma resolução melhor que o Microscópio Eletrônico de Varredura, proporcionando imagens mais nítidas, e

possibilitando a visualização de partículas de pequenos diâmetros, que não são observadas com o emprego do MEV.

A determinação do diâmetro das partículas, geradas pelo electrospray, em função da concentração de sal na solução de alimentação, era necessária, pois o equipamento não determinava o diâmetro gerado, apenas garantia que o material particulado era monodisperso. Na ausência de equipamentos que determinassem o diâmetro das partículas em suspensão gasosa, optou-se pela coleta destas partículas e análise em microscópio.

As análises de MET foram realizadas no Departamento de Química da UNESP de Araquarara.

As fotografias obtidas foram analisadas com o emprego do analisador de imagens Image-Pro Plus versão 3.0. Através deste aplicativo é possível a determinação da quantidade de partículas presentes na imagem, bem como a determinação de seu diâmetro.

3.3.4 - Determinação da eficiência dos filtros

O procedimento experimental para a determinação da eficiência dos filtros consistia em montar o mesmo conforme Figura 3.1, de forma que o experimento pudesse ser realizado.

Posteriormente purgava-se o compressor para que possíveis depósitos de água fossem eliminados, minimizando a umidade e aumentando o tempo de vida útil do filtro de sílica. Em seguida, ligava-se o compressor e a válvula reguladora de pressão, que fornecia ar para os filtros. Depois, colocava-se o medidor de vazão logo após o dispositivo de filtração, para que a velocidade fosse determinada. Quando esta variável atingia o valor desejado, o sistema estava ajustado.

Media-se, então, a temperatura, umidade do sistema para verificar possíveis mudanças entre experimentos. A seguir, ligava-se o gerador de aerossol e ajustava-se a pressão dentro da câmara, assim como as vazões de ar comprimido e CO₂ e a tensão aplicada. Adicionava-se a solução de NaCl no porta-amostra e este era inserido na câmara do gerador.

Após alguns minutos para eventual estabilização da geração de partículas, era realizada a contagem de partículas na entrada do filtro e em seguida a contagem de partículas na saída com o emprego do contador de partículas, de forma que fosse possível a determinação da eficiência do equipamento.

Em seguida, a geração de partículas era desviada do equipamento e trocava-se a solução do gerador pela solução de limpeza, tendo o cuidado de inserir outra porta-amostra, para evitar contaminação do primeiro. Este processo ocorria por 5 minutos quando então a solução era removida e ar passado pelo capilar por mais 5 minutos, para que a solução de limpeza evaporasse e evitasse depósitos sobre a superfície do mesmo.

O gerador era, então, desligado, assim como a válvula de ar comprimido e a fonte de alta tensão. Encerrando-se assim o processo.

O desempenho do filtro é expresso freqüentemente em termos da percentagem de eficiência ou eficiência fracionária, definidos como a relação da concentração de partículas que ficaram retidas, comparada à concentração de partículas que passou completamente .

A eficiência de um filtro fibroso varia para tamanhos de partículas e taxas de fluxo diferentes <http://www.tsi.com>.

A eficiência global de remoção das partículas era calculada através da relação entre a diferença existente na concentração de partículas na entrada e na saída do filtro, relação esta apresentada na Equação 3.1.

$$E_e = \frac{C_0 - C_E}{C_0} \quad (3.1)$$

na qual C_E é a concentração de partículas na saída do filtro e C_0 é a concentração de partículas na entrada do filtro.

As concentrações C_E e C_0 eram obtidas através do contador de partículas. A contagem de partículas na tanto na entrada como na saída era efetuada 5 vezes e destas, calculava-se o valor médio.

3.3.5 - Condições de operação

Os experimentos foram realizados com velocidades de 3 a 25 cm/s. A área de filtração foi de 40 cm². O material utilizado na geração do material particulado foi o cloreto de sódio (NaCl), em soluções cujas concentrações foram variadas entre 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 4,5 e 5 g/L, para que o diâmetro da partícula variasse.

As partículas geradas eram alimentadas ao equipamento através de uma sonda acoplada ao duto de entrada, de forma que as mesmas fossem inseridas no centro do duto de entrada e possuíssem uma melhor dispersão pela corrente de gás que promovia a sua diluição.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Calibração do Gerador de Partículas

A geração de partículas foi a etapa mais trabalhosa deste trabalho, pois foi necessário estipular tempos de operação de geração e a limpeza do mesmo, de maneira que se perdesse o mínimo possível de capilares, que por ser muito finos, qualquer descuido acarretava em entupimento dos mesmos.

A determinação do diâmetro das partículas geradas pelo Electrospray, em função da concentração de NaCl na solução de alimentação, foi necessário, pois o gerador não determinava o diâmetro gerado, apenas garantia que o material particulado era monodisperso. O método empregado foi a coleta das partículas para que as mesmas pudessem ser fotografadas no Microscópio Eletrônico de Transmissão e, posteriormente, determinado o seu tamanho através do analisador de imagens Image Pro-Plus como mencionado no Capítulo Materiais e Métodos.

Após determinar as condições ótimas de operação, ou seja, a tensão na qual o gerador estava operando no modo jato-cônico apresentadas no Apêndice B, foram realizados os ensaios de geração de partículas para cada solução analisada. Para tanto, foram preparadas diversas soluções com concentrações diferentes de modo que fosse possível construir uma curva de calibração referente ao diâmetro de partículas produzido pelo gerador em função da concentração da solução base. As concentrações testadas foram 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,5 e 5,0 g/L. Este conjunto incluía desde a menor até a maior concentração utilizada nos testes de eficiência, de modo que fosse possível abranger o diâmetro máximo e o mínimo, aumentando a precisão da calibração. Os pontos intermediários não foram igualmente espaçados dentro da faixa estudada por razões técnicas, dado que quanto maior a concentração, maior a tendência ao entupimento dos capilares.

O entupimento levava ao seu descarte dos mesmos, assim, para prevenir os mesmos optou-se pelas concentrações citadas acima, de modo que se pudesse obter uma curva.

Devido ao tamanho das partículas, as mesmas não podiam ser vistas a olho nu, somente em microscópio. Várias tentativas foram efetuadas para tentar visualizar as partículas, tais como: (a) deposição sobre grade de Cu e analisada em MEV, (b) deposição sobre grade de Cu e analisada em MET, onde nas primeiras tentativas não se visualizava nenhuma partícula sobre a grade. A grade de Cu foi escolhida para deposição das partículas pois ela é específica para ser analisada em MET. Devido o MET ser um microscópio com possibilidade de reproduzir aumentos maiores frente ao MEV, foi então escolhido o mesmo para analisar as partículas. As partículas que saíam do gerador passavam por uma mangueira que era disposta sobre a grade, onde tomava-se o cuidado para não colocá-la muito perto, para não estrangular a saída das partículas e nem muito longe pois acarretava no risco de não depositar partículas. Portanto a distância entre a saída da mangueira e a grade era em torno de 0,5 cm. Devido à facilidade de dissolução do sal em contato com a umidade do ar, era necessário muito cuidado no armazenamento das grades de Cu para seu transporte até ao microscópio, pois as análises eram efetuadas na UNESP de Araraquara. As mesmas eram armazenadas em dessecador de sílica-gel. Cada amostra de sal era depositada em grade individual. A deposição era efetuada durante 30 horas, tempo este estipulado após vários testes preliminares. Neste tempo eram efetuadas diversas limpezas do capilar, para que o mesmo não entupisse.

As fotografias obtidas com o emprego do MET para cada uma das concentrações analisadas estão apresentadas no Apêndice E. A título de ilustração a fotografia obtida para a concentração 5,0 g/L, bem como a sua micro análise que comprovava a presença de partículas de NaCl estão apresentadas nas Figuras 4.1 e Figura 4.2, respectivamente.

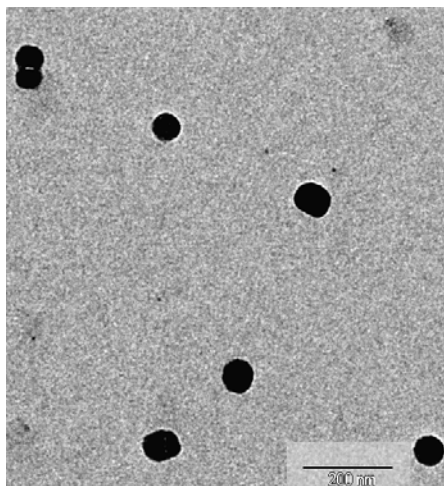


Figura 4. 1 - Imagem das partículas obtidas com a solução 5g/L.

Na Figura 4.1 observa-se a presença de diversas partículas. A Figura 4.2, obtida do MET, por meio de micro análise, mostra a análise dos materiais presentes no porta amostra, identificando cada um deles, assim os picos mais elevados mostram a presença de NaCl no porta amostra, o que indica que existem mesmo partículas de sal na amostra.

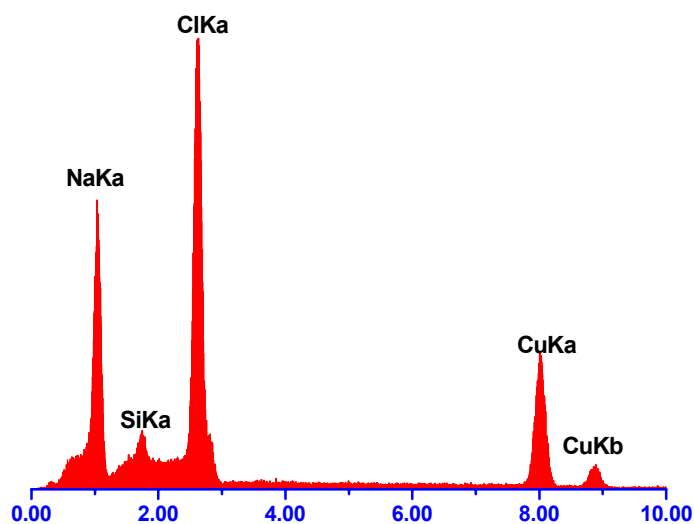


Figura 4. 2 - Micro análise para a amostra com concentração de NaCl de a 5,0 g/L.

O pico que apresenta Si certamente é proveniente do processo de desumidificação, e o aparecimento de Cu é devido ao material do porta amostra, pois o mesmo é composto de

cobre. Quando estão grafadas NaKa, ClKa e ClKb, estes representam o elemento químico e o tipo de raio X emitido, ou seja, o tipo K alfa ou beta. Maiores detalhes no Apêndice D.

A determinação do diâmetro das partículas foi realizada através da análise das imagens, utilizando-se o software Image Pro-Plus 3.0, que possibilitou a contagem manual do número de partículas e a medição do diâmetro médio de cada uma delas. Maiores detalhes desta técnica podem ser vistos no Apêndice D.

A partir dos diâmetros determinados para as concentrações analisadas, foi construído um gráfico relacionando o diâmetro da partícula com a concentração de cloreto de sódio na solução e ajustada uma curva, que serviu como calibração para as demais concentrações. A relação entre o diâmetro e a concentração foi linear. Este mesmo comportamento foi observado por CHEN et al. (1995) que desenvolveram o gerador empregado neste estudo e por YOO et al. (1997) utilizando um atomizador modelo 3076, da TSI.

Os diâmetros para todas as concentrações foram obtidos através da equação apresentada na Figura 4.3 e são apresentados na Tabela 4.1.

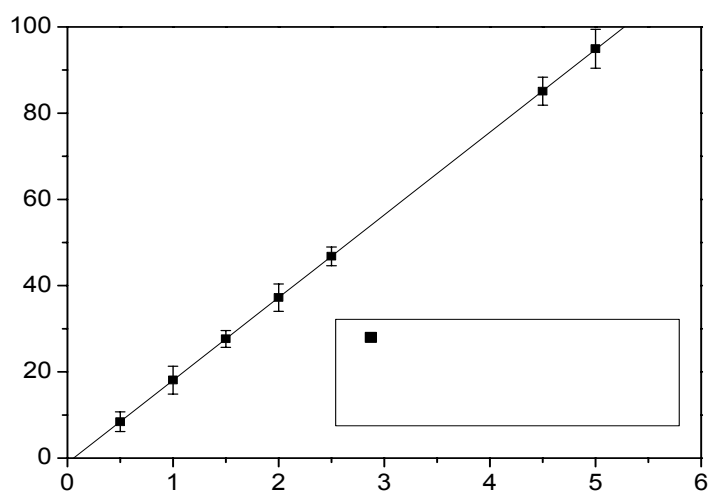


Figura 4. 3 - Determinação do diâmetro em função da concentração de NaCl na solução.

Tabela 4. 1 - Diâmetro das partículas para diferentes concentrações e seus respectivos números de Knudsen.

Concentração da Solução (g/L)	Diâmetro das partículas (nm)	Desvio padrão	Número de Knudsen (K_n)
0,5	8,4	2,3	16,16
1,0	18,0	3,14	7,56
1,5	27,6	1,93	4,94
2,0	37,2	3,15	3,66
2,5	46,8	2,17	2,91
4,5	85,2	3,23	1,60
5,0	94,8	4,52	1,44

Na Tabela 4.1 também consta número de Knudsen para cada um dos diâmetros obtidos. Para o cálculo deste adimensional, que representa a interação entre a partícula e o fluido que a cerca, é necessário, de acordo com a Equação 2.2, o valor do caminho livre médio do gás, que para as condições experimentais ($P = 1\text{atm}$ e $T = 298\text{ K}$), foi de $0,0682\ \mu\text{m}$.

Foram utilizadas somente estas concentrações de sal devido a escassez de grades de cobre para depositar as partículas, e com estas concentrações se conseguiu construir uma curva.

Na Tabela 4.2 comparam-se os diâmetro de partículas obtidos neste trabalho com os obtidos por FALAGUASTA (2005) utilizando o mesmo procedimento e algumas concentrações de sal que o presente estudo.

Pode-se observar que os diâmetros medidos neste trabalho estão muito próximos aos obtidos por Falaguasta, o que indica que os valores estão coerentes.

Outro método de determinação do diâmetro, através de um balanço de massa no gerador, foi empregado para validação independente. Para tanto foi obtida a massa de solução atomizada por tempo pelo gerador, para a concentração de $1,5\ \text{g/L}$, escolhida para a

verificação. O valor medido foi de $4,5155 \cdot 10^{-4}$ g/min. Nos cálculos foi utilizado o número nominal de partículas geradas por volume ($10^7 \#/\text{cm}^3$), fornecido pelo fabricante. A vazão de gás neste ensaio foi de 2,3 L/min, sendo o diâmetro calculado para estas condições igual a 29,9 nm, muito próximo ao obtido com a análise de imagens, validando os valores.

Tabela 4. 2 - Resultados comparativos dos diâmetros de partículas deste trabalho com FALAGUASTA (2005).

Concentração da Solução de NaCl (g/L)	Diâmetro das partículas (nm) (presente estudo)	Diâmetro das partículas (nm) Falaguasta, (2005)
0,5	8,4	8,6
1,0	18,0	17,9
1,5	27,6	27,3
2,0	37,2	-
2,5	46,8	-
4,5	85,2	-
5,0	94,8	92,7

4.2 - Determinação dos diâmetros das fibras dos filtros

A determinação do diâmetro das fibras para os cálculos de eficiência teórica do filtro era necessária. A metodologia citada no item 3.2.2.3 foi utilizada para obtenção dos diâmetros dos filtros de Poliéster e HEPA.

O diâmetro das fibras do filtro de poliéster para as 5 amostras analisadas é apresentado na Tabela 4.3.

A partir dos valores apresentados na Tabela 4.3, o diâmetro médio das fibras foi de 16 $\mu\text{m} \pm 0,06$.

Tabela 4. 3 - Dados de diâmetros de fibras do filtro de poliéster

Amostra	Diâmetro das fibras (μm)	Desvio padrão
1	16,05	$\pm 0,07$
2	15,98	$\pm 0,08$
3	16,04	$\pm 0,05$
4	15,91	$\pm 0,05$
5	16,02	$\pm 0,05$

Como visto no capítulo 3 deste trabalho, o filtro HEPA não possui fibras homogêneas, o que é característico deste tipo de filtro, o que o torna altamente eficiente. Mas devido à heterogeneidade das fibras, foi efetuada a medição da distribuição das mesmas como também citada na metodologia 3.2.2.3, e o resultado é mostrado na Figura 4.4.

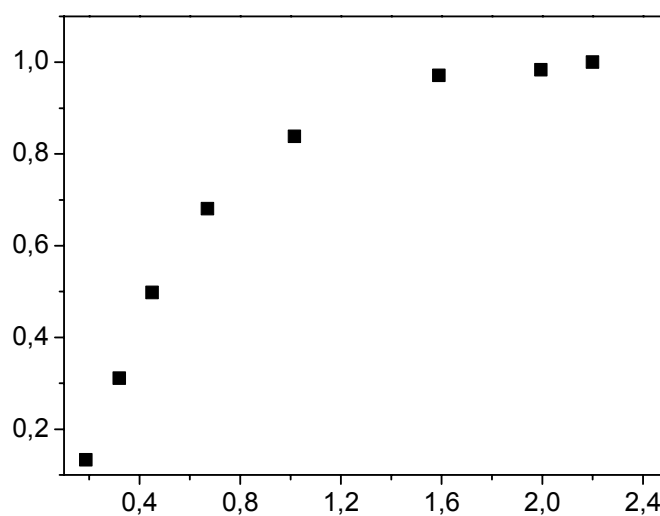


Figura 4. 4 - Distribuição do Diâmetro das fibras.

Os diâmetros das fibras medidos através do Programa Image Pro Plus 3.0 variaram de 0,075 a 2,35 μm . Para se obterem estes valores foram utilizadas 5 imagens em diferentes

posições do filtros, obtidas do MEV. Para determinação do diâmetro médio das fibras utilizou-se a seguinte Equação:

$$\overline{D_f} = \frac{\sum n_i D_{fi}}{N} \quad (4.1)$$

Onde n_i é o número de fibras de determinado diâmetro, D_{fi} é o diâmetro das fibras em determinada faixa e N é o número total de fibras. O valor médio de todas as fibras foi de 0,72 μm . Este método de determinação de diâmetro de filtro HEPA, também foi utilizado por VAN OSDELL et al. (1990) e PODGÓRSKI et al. (2006), onde os autores ressaltam a simplicidade do método, embora muito trabalhoso. Segundo os autores o diâmetro médio não consegue representar o real diâmetro das fibras. Os autores utilizaram para seus cálculos o diâmetro médio sugerido por Wheat apud VAN OSDEL et al. (1990), onde o mesmo é dado pela média do volume superficial das fibras. Eles correlacionaram este diâmetro e o d_{p50} com os dados de LEE & LIU (1982 a) e verificaram que utilizando ambos diâmetros, a teoria não representou os resultados experimentais para partículas pequenas.

A Tabela 4.4 apresenta o número de fibras com seus respectivos diâmetros e acumulados, para filtro HEPA estudado.

Pode-se verificar na Tabela 4.4 que o maior número de fibras do filtro HEPA possui diâmetro médio de 0,43 μm e que o filtro possui poucas fibras com tamanhos maiores que 1,99 μm , o que indica que o filtro possui fibras com diâmetros pequenos.

Tabela 4. 4 - Números de fibras com seus respectivos diâmetros e fração acumulada.

Δd_i	Diâmetro das fibras (μm)	Diâmetro médio das fibras (μm) (d_i)	Número de fibras (n_i)	Fração de diâmetro de fibras acumulado	$\Delta n_i/\Delta d_i$
0,225	0,075-0,30	0,19	32	0,13	142,2
0,04	0,30-0,34	0,32	43	0,31	1075
0,22	0,34-0,56	0,45	45	0,50	204,5
0,23	0,56-0,79	0,67	44	0,68	191,3
0,45	0,79-1,24	1,01	38	0,84	84,4
0,7	1,24-1,94	1,59	32	0,97	45,7
0,11	1,94-2,05	1,99	3	0,98	27,3
0,30	2,05-2,35	2,20	4	1,00	13,3

4.3 - Determinação da porosidade dos filtros

A determinação experimental da porosidade dos filtros foi mostrada na secção 3.2.2.4.1, onde foram utilizadas duas metodologias para determinação da porosidade: uma utilizando o método de Aguiar (1995) e outra utilizando o porosímetro de intrusão de mercúrio, POREMASTER, modelo 33, para verificar o resultado de ambas metodologias. As Tabelas 4.5 e 4.6 mostram os resultados obtidos para ambas metodologias para os filtros Poliéster e HEPA, respectivamente.

Os valores de porosidade encontrados tanto para o filtro de Poliéster quanto para o HEPA são muito próximos para ambas metodologias. RODRIGUES (2005) também utilizou estas técnicas para determinar a porosidade de filtros.

Tabela 4. 5 - Dados de porosidade para o filtro de Poliéster utilizando a metodologia de AGUIAR (1995) e a metodologia do Porosímetro.

Amostra	Porosidade do filtro			
	Aguiar (1995)	Desvio padrão	Porosímetro	Desvio padrão
1	0,878	0,006	0,880	0,008
2	0,886	0,007	0,878	0,006
3	0,889	0,004	0,889	0,004
4	0,876	0,005	0,879	0,004
5	0,883	0,003	0,889	0,003

A porosidade média para o filtro de poliéster pelo método de Aguiar foi de $0,882 \pm 0,005$ e pelo Porosímetro foi de $0,883 \pm 0,005$.

Tabela 4. 6 - Dados de porosidade para o filtro HEPA utilizando a metodologia de AGUIAR (1995) e a metodologia do Porosímetro.

Amostra	Porosidade do filtro			
	Aguiar (1995)	Desvio padrão	Porosímetro	Desvio padrão
1	0,917	0,003	0,923	0,007
2	0,928	0,004	0,917	0,007
3	0,916	0,006	0,918	0,005
4	0,919	0,008	0,909	0,005
5	0,921	0,004	0,911	0,006

A partir dos valores apresentados na Tabela 4.6, a porosidade média para o filtro HEPA pelo método de Aguiar foi de $0,920 \pm 0,005$ e pelo Porosímetro foi de $0,916 \pm 0,006$.

Como os resultados em ambas as técnicas foram muito próximos, utilizou-se para os cálculos de eficiência, que serão mostrados posteriormente, o valor obtido pela técnica de Aguiar, por considerá-la com menor potencial de modificação do meio original.

4.4 - Desempenho dos filtros de celulose (HEPA) e poliéster na remoção de nanopartículas

4.4.1 - Determinação experimental da eficiência dos filtros

Com a finalidade de avaliar o comportamento dos filtros em remover diferentes diâmetros de partículas abaixo de 100 nm, foi obtida a eficiência de remoção dos mesmos. Para tanto foram realizados testes com diferentes concentrações de NaCl para geração das partículas e, como o material gerado é monodisperso, as eficiências calculadas foram compostas para avaliar a variação da remoção das partículas com o diâmetro das mesmas.

As condições experimentais utilizadas neste estudo foram determinadas a partir de testes preliminares. Nesta etapa, a variável velocidade de escoamento do ar foi igual a 3,0; 4,0; 5,0; 6,4; 7,0; 7,7; 9,0; 10,2; 11,5; 12,8; 19,2 e 25,0 cm/s. Os trabalhos de VAN OSDELL et al. (1990), LIU et al. (1990), DHANIYALA & LIU (2001), BALAZY & PODGÓRSKI (2004), HEIM et al. (2006) estudaram filtração de partículas dentro desta faixa de velocidades.

Os ensaios foram realizados em uma temperatura média de 25° C e umidade relativa próxima a 0%.

Os filtros eram trocados em cada ensaio para se garantir que o filtro estava limpo a cada ensaio.

Para se obter a eficiência do filtro, utilizou-se o contador de partículas para verificar a quantidade de partículas que chegava ao filtro e que passava por ele. Como o contador estava acoplado a um microcomputador, os dados eram passados simultaneamente, podendo ser visualizada a contagem na tela. Para cada ensaio de filtração efetuavam-se 5 ensaios de 3 minutos cada, na entrada e na saída do filtro. Com os 5 ensaios determinava-se o valor da média tanto na entrada quanto na saída. E para se obter a eficiência subtraía-se o valor de

concentração da saída do valor da entrada e dividia-se este valor novamente pela entrada. Assim foram efetuados os cálculos para todas as velocidades estudadas e para todos os diâmetros de partículas (Equação 3.1).

Foram realizados alguns testes de queda de pressão dos filtros de Poliéster e HEPA e verificou-se a mesma não mudava com tempo. Os resultados são apresentados no Apêndice N.

4.4.2 - Eficiência do filtro de Poliéster

4.4.2.1 - Eficiência experimental

Antes de iniciar os ensaios de determinação de eficiência, testes foram efetuados com o objetivo de avaliar o desempenho do gerador e o comportamento das partículas ao longo do equipamento de forma a evitar erros nas medidas e compreender melhor o funcionamento dos equipamentos. Estes resultados são mostrados no Apêndice E.

Foram realizadas também contagens das partículas mudando a posição da sonda de coleta, a qual succionava as partículas para o contador, e verificou-se que a contagem era a mesma em qualquer posição. Por convenção optou-se em deixar a sonda na posição central da região de escoamento do gás.

Os resultados da contagem das partículas antes e depois do filtro são mostradas no Apêndice M, na Tabela M.1. Nas Figura 4.5 a 4.7 mostra-se os valores das eficiências experimentais do filtro de Poliéster obtidas através da Equação 3.1 para todas as velocidades.

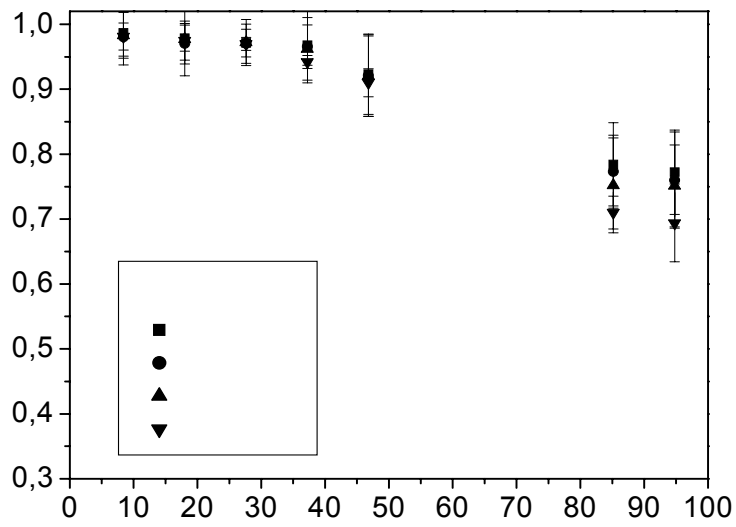


Figura 4. 5 - Eficiência experimental do filtro de poliéster em relação a d_p para U_0 de 3,0 a 6,4 cm/s.

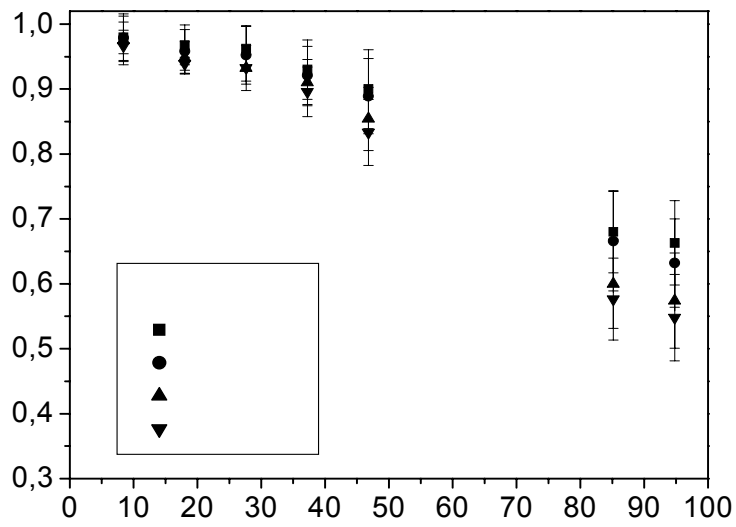


Figura 4. 6 - Eficiência experimental do filtro de poliéster em relação a d_p para U_0 de 7,0 a 10,2 cm/s.

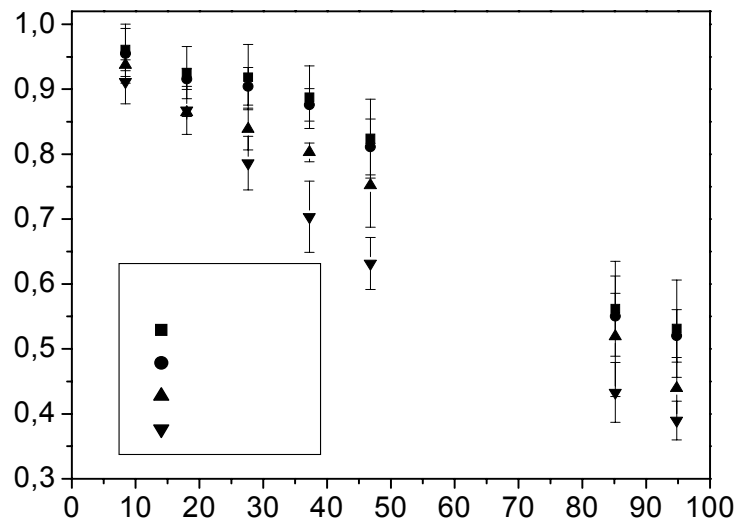


Figura 4. 7 - Eficiência experimental do filtro de poliéster em relação a d_p para U_0 de 11,5 a 25 cm/s.

O filtro apresenta eficiência máxima de 0,99 para $U_0 = 3,0$ cm/s e $d_p = 8,4$ nm. A mínima eficiência foi de 0,39 para $U_0 = 25,0$ cm/s e $d_p = 94$ nm. Pode-se verificar que a eficiência de filtração diminui com o aumento do diâmetro das partículas. Verifica-se que a eficiência diminui com o aumento de U_0 , que também é característico da filtração de predominância difusional. Este comportamento evidencia que é qualitativamente consistente com o já descrito por outros autores (vide Figura 2.3 e 2.4).

Na Figura 4.8 apresenta-se a eficiência do filtro de poliéster em relação às velocidades de filtração de 3,0; 9,0; 12,8; 19,2 e 25 cm/s para $d_p = 8,4$ a 94,8 nm. Foram mostradas somente estas velocidades para melhor visualização.

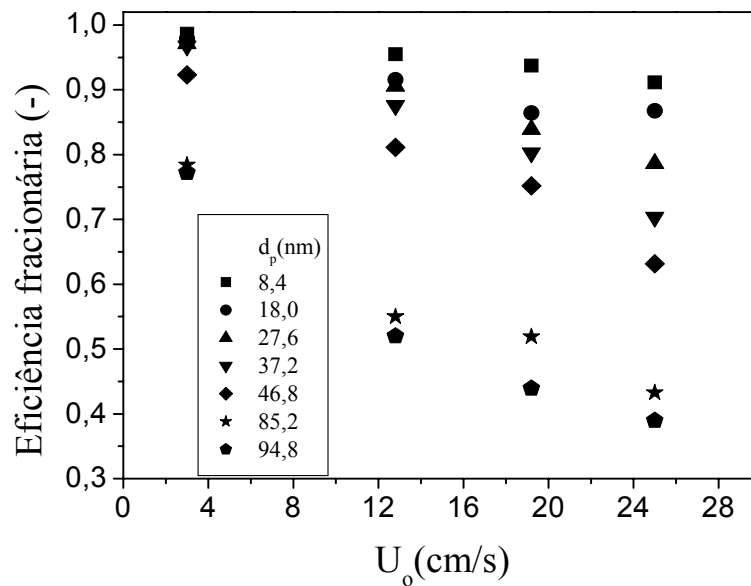


Figura 4. 8 - Eficiência experimental do filtro de poliéster em função U_0 para $d_p=8,4$ a $94,8$ nm.

Os resultados mostram, portanto, que o filtro de poliéster tem uma variação bastante grande na eficiência. Eficiências mais baixas acontecem em altas velocidades, com conseqüentes altas quedas de pressão no filtro. Analiticamente, as características da filtração evidenciam a predominância difusional no processo de coleta.

4.4.2.2 - Experimental vs teoria

A eficiência de coleta teórica foi calculada utilizando a Equação 2.32 apresentada no Capítulo 2. Pelo fato do filtro de poliéster apresentar fibras homogêneas, como mostrado na Tabela 4.3, utilizou-se o diâmetro médio que era de $16\mu\text{m}$. As Equações 2.40 e 2.48 de LIU & RUBOW (1990), foram utilizadas para calcular os mecanismos difusional e interceptação direta. É normalmente admitido, por exemplo, (LEE & LIU (1982a) e LIU & RUBOW

(1990), que somente estes dois mecanismos são significantes para partículas menores que 500 nm.

Os mecanismos de coleta inercial e gravitacional foram considerados nos cálculos, mas, como esperado, não influenciaram na coleta das partículas. O mecanismo eletroforético foi desprezado, pois as partículas geradas eram neutralizadas na saída do gerador pela fonte de Amerício e, portanto não havia carregamento das mesmas.

No Apêndice G, na Tabela G.1, mostram-se dados comprovando a baixa influência dos mecanismos inercial e gravitacional para o filtro de poliéster.

Apresenta-se na Figura 4.9 os resultados da comparação da eficiência experimental com a teórica de LIU & RUBOW (1990), para o filtro de poliéster para as velocidades de 3,0; 6,4; 9,0; 12,8; 19,2 e 25,0 cm/s. Para não sobrecarregar as Figuras, os resultados das velocidades de 4,0; 5,0; 7,0; 7,7; 10,0; 11,5 cm/s são apresentados no Apêndice J.

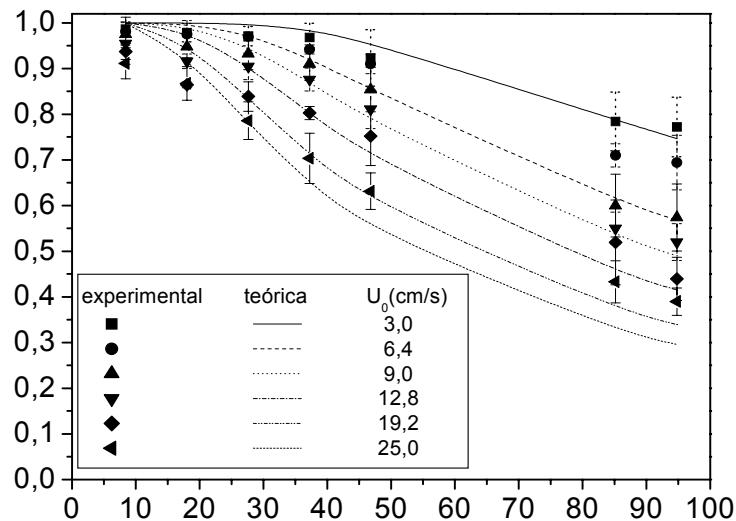


Figura 4. 9 - Eficiência experimental e teórica (Equação de LIU & RUBOW (1990)) em relação a d_p do filtro de poliéster para $U_0 = 3,0$ a 25 cm/s.

Verifica-se que a eficiência teórica superestima a eficiência experimental para partículas menores que 25 nm e subestima acima deste diâmetro. Isto se deve certamente a simplificações das Equações de LIU & RUBOW (1990) e ajustes das mesmas a partículas com diâmetros maiores. Isso pode ser melhor visualizado na Figura 4.10, onde tem-se a comparação da eficiência teórica em relação a experimental, para todas as velocidades estudadas.

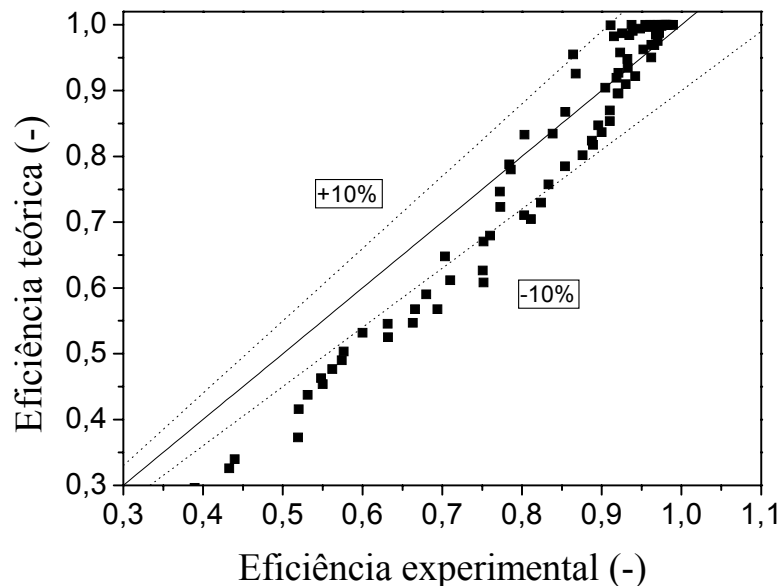


Figura 4. 10 - Comparação entre as eficiências de coleta experimental e teórica do filtro de poliéster, utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990).

As eficiências de coleta individual (mecanismos difusional e interceptação direta) foram calculadas utilizando-se a Equação de LIU & RUBOW (1990), para o filtro de poliéster, e são apresentadas respectivamente nas Figuras 4.11 a 4.13 para $U_0 = 3,0$; 12,8 e 25,0 cm/s. Os resultados para as velocidades restantes são apresentados no Apêndice L, pois apresentam comportamento e resultados semelhantes.

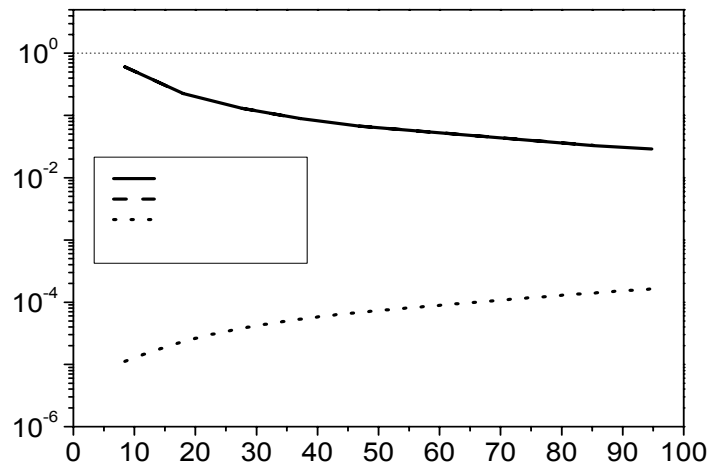


Figura 4. 11 - Eficiências individuais de coleta do filtro de poliéster em relação a d_p com $U_0=3,0$ cm/s (Equação de LIU & RUBOW (1990)).

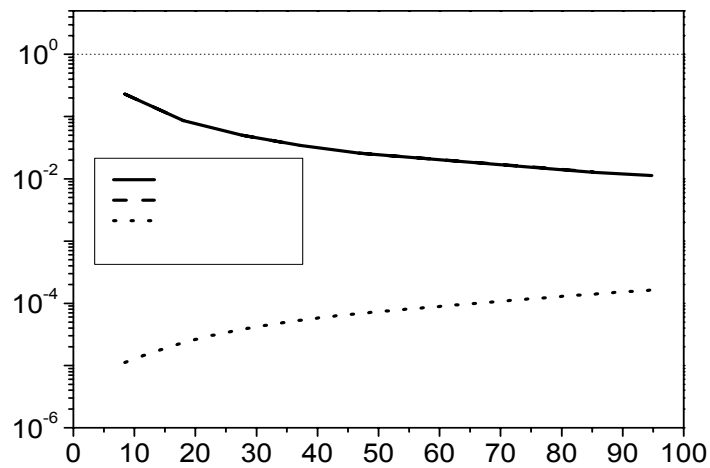


Figura 4. 12 - Eficiências individuais de coleta do filtro de poliéster em relação a d_p com $U_0=12,8$ cm/s (Equação de LIU & RUBOW (1990)).

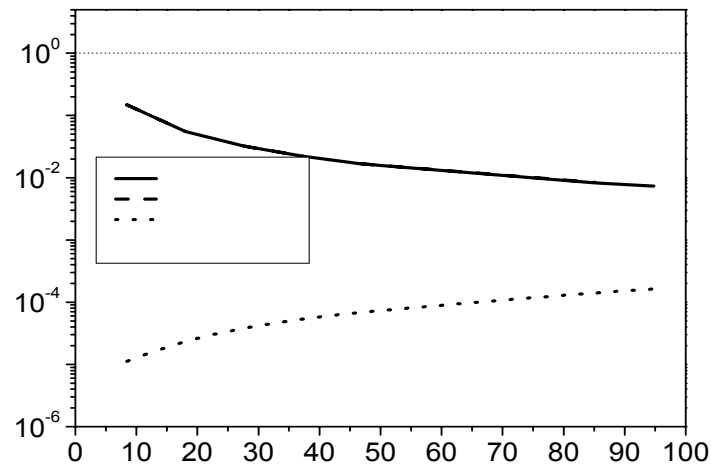


Figura 4. 13- Eficiências individuais de coleta do filtro de poliéster em relação a d_p com $U_0=25,0$ cm/s (Equação de LIU & RUBOW (1990)).

Verifica-se nas Figuras 4.11 a 4.13 que o mecanismo difusional predomina na coleta, sendo praticamente igual ao total, apresentando comportamento decrescente na eficiência em relação a d_p . O mecanismo de interceptação direta tem influência desprezível na eficiência total. O aumento da velocidade provoca uma diminuição na coleta difusional e a coleta por interceptação direta permanece constante e independente da velocidade. A Figura 4.14 apresenta as eficiências de coleta experimental e teórica em relação ao diâmetro das partículas para as velocidades de 3,0; 6,4; 9,0; 12,8; 19,2 e 25,0 cm/s de acordo com a Equação 2.42 de PAYET et al. (1992). Esses autores verificaram que η_T excedia a unidade a baixos Pe . Propuseram então uma correção na Equação de LIU & RUBOW (1990), conforme mostrado na Equação 2.42. Segundo ela, com este fator de correção $\eta_T < 1$. Pode-se verificar que houve pouca diferença na eficiência teórica calculada por PAYET et al. (1992), (Figura 4.14) e por LIU & RUBOW (1990) (Figura 4. 6). Isso pode ser verificado na Figura 4.15, onde se utilizando a modificação no mecanismo difusional proposta por PAYET et al. (1992),

para todas as velocidades estudadas a eficiência teórica não representa satisfatoriamente a eficiência experimental.

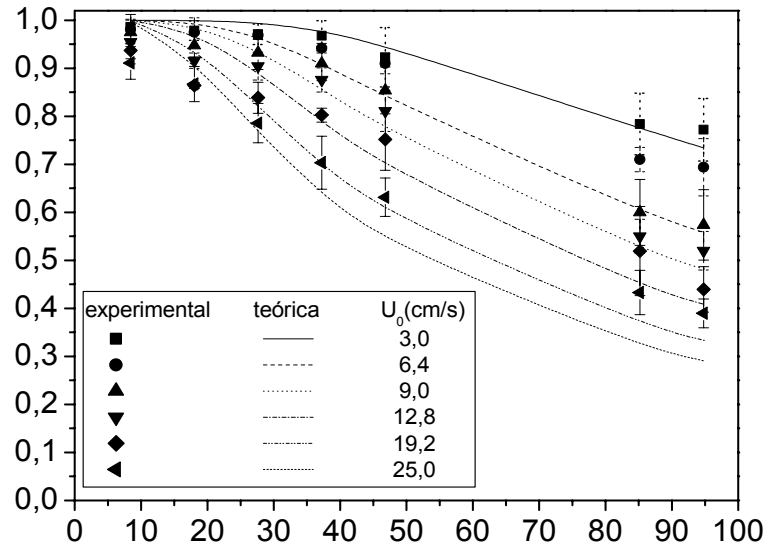


Figura 4. 14 - Eficiências de coleta experimental e teórica em relação a d_p (Equação de PAYET et al. (1992)) para o filtro de poliéster.

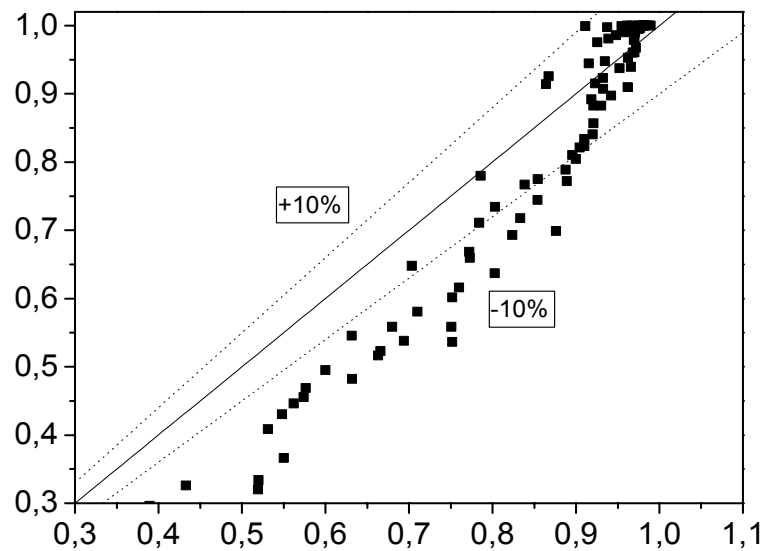


Figura 4. 15 - Comparação entre eficiências de coleta experimental e teórica do filtro de poliéster, utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).

Nas Figuras 4.16 a 4.18 apresentam-se os valores de eficiência de coleta individual calculada através da Equação de PAYET et al. (1992), para as velocidades de 3,0; 12,8 e 25,0 cm/s, as velocidades restantes são apresentadas no Apêndice L.

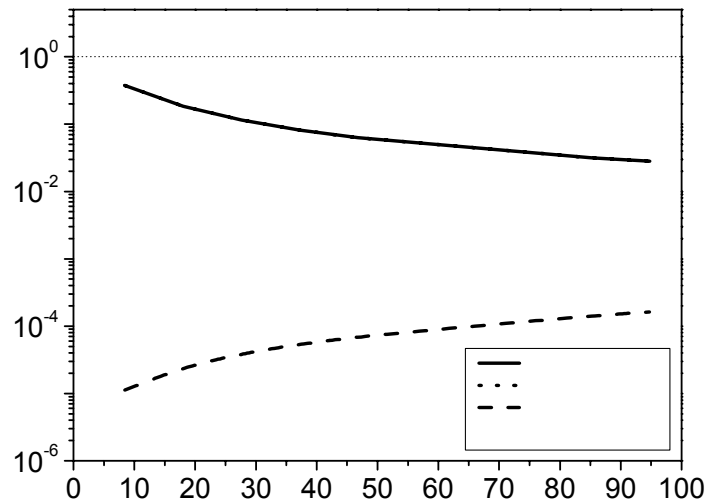


Figura 4. 16 - Eficiência de coleta individual em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=3,0$ cm/s (Equação de PAYET et al. (1992)) do filtro de poliéster .

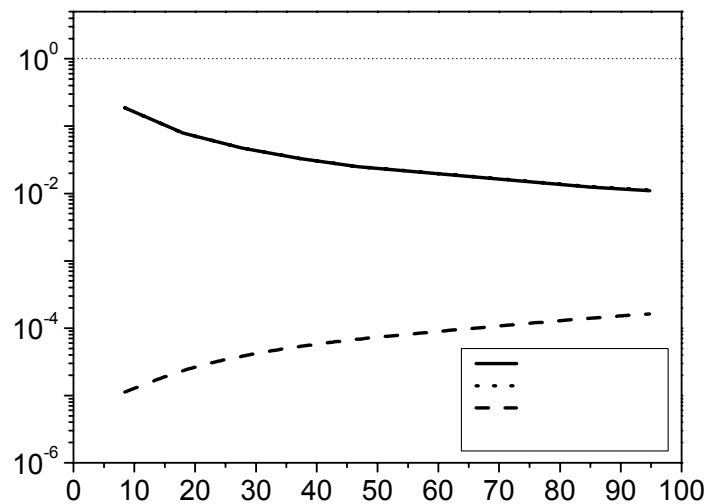


Figura 4. 17 - Eficiência de coleta individual em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=12,8$ cm/s (Equação de PAYET et al. (1992)) do filtro de poliéster.

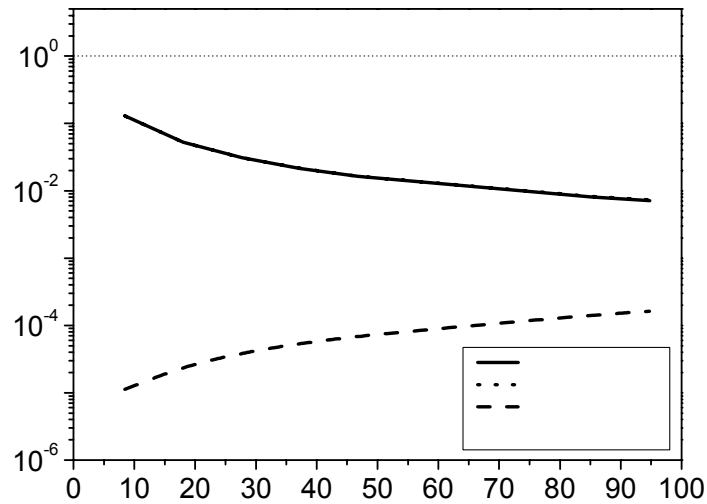


Figura 4. 18 - Eficiência de coleta individual em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=25,0$ cm/s (Equação de PAYET et al. (1992)) do filtro de poliéster.

Os resultados da eficiência de coleta individual pela Equação de PAYET et al. (1992), (Figuras 4.16 a 4.18) são muito próximos aos das Figuras 4.11 a 4.13.

4.4.2.3 - Proposta deste trabalho

Pode-se verificar que não houve uma boa predição da eficiência experimental tanto utilizando as Equações de LIU & RUBOW (1990) quanto a Equação de PAYET et al. (1992), onde a última apresenta maior diferença entre elas. O que se verifica é que o parâmetro de interceptação direta, da forma proposta por estes autores, não influencia na eficiência total de coleta do filtro, e somente o mecanismo difusional é importante como pôde ser visualizado. No entanto, como o mecanismo de interceptação direta é dependente do parâmetro R , Equação 2.47, conseqüentemente de d_p . Por outro lado, como estas partículas são extremamente pequenas e estão suspensas em um gás, elas estão sujeitas a movimentos

randômicos devido a colisões moleculares com o gás, resultando no conhecido movimento browniano. Este fenômeno é conhecido como o coração do mecanismo difusional e é levado em conta na Equação 2.38. O conceito físico pelo qual esta equação foi derivada é baseada no mecanismo difusional clássico (DAVIES, 1973; BROWN, 1993). É assumido que a diferença de concentração entre o fluido cria uma força de arraste de uma região de alta para uma região de baixa concentração. Como a superfície da fibra coleta as partículas, esta concentração na vizinhança da superfície da fibra se aproxima de zero e portanto o gradiente de concentração entre o volume do fluido e a superfície é estabelecido.

No entanto, é geralmente aceito que o movimento browniano também influencia no mecanismo de interceptação direta (HINDS, 1999; BROWN, 1993). As partículas são constantemente bombardeadas por moléculas de gás, que sempre provocam um movimento caótico. Este movimento acontece em gás estacionário, com concentração de partículas constante. O princípio físico aqui então, difere do mecanismo difusional no qual ocorre gradiente de concentração. Este movimento caótico pode ser associado a partículas com diâmetro *efetivo*, uma vez que a partícula ocupa atualmente um volume que é maior que ela mesma (vide Figura 4.19 a). Por isso, quando ela atinge a vizinhança da superfície da fibra a partícula será coletada devido este diâmetro *efetivo*, antes que o diâmetro atual, isto é levado em conta no parâmetro de interceptação direta. Este diâmetro efetivo pode ser estimado pela distância média, \bar{s} , percorrida por uma partícula de diâmetro d_p , durante um tempo t , devido ao movimento Browniano, dada por:

$$\bar{s} = \{2D[t - \tau(1 - e^{-t/\tau})]\}^{1/2} \quad (4.2)$$

onde τ é o tempo de relaxação da partícula dado por:

$$\tau = \frac{d_p^2 \rho_p}{18\mu} \quad (4.3)$$

Se t é o tempo aproximado que a partícula leva para percorrer a distância equivalente ao semi-perímetro da fibra como se pode verificar na Figura 4.19 b, então:

$$t = \frac{L}{U_0} \text{ onde } L = \frac{\pi D_f}{2} \text{ (semi-perímetro)} \quad (4.4)$$

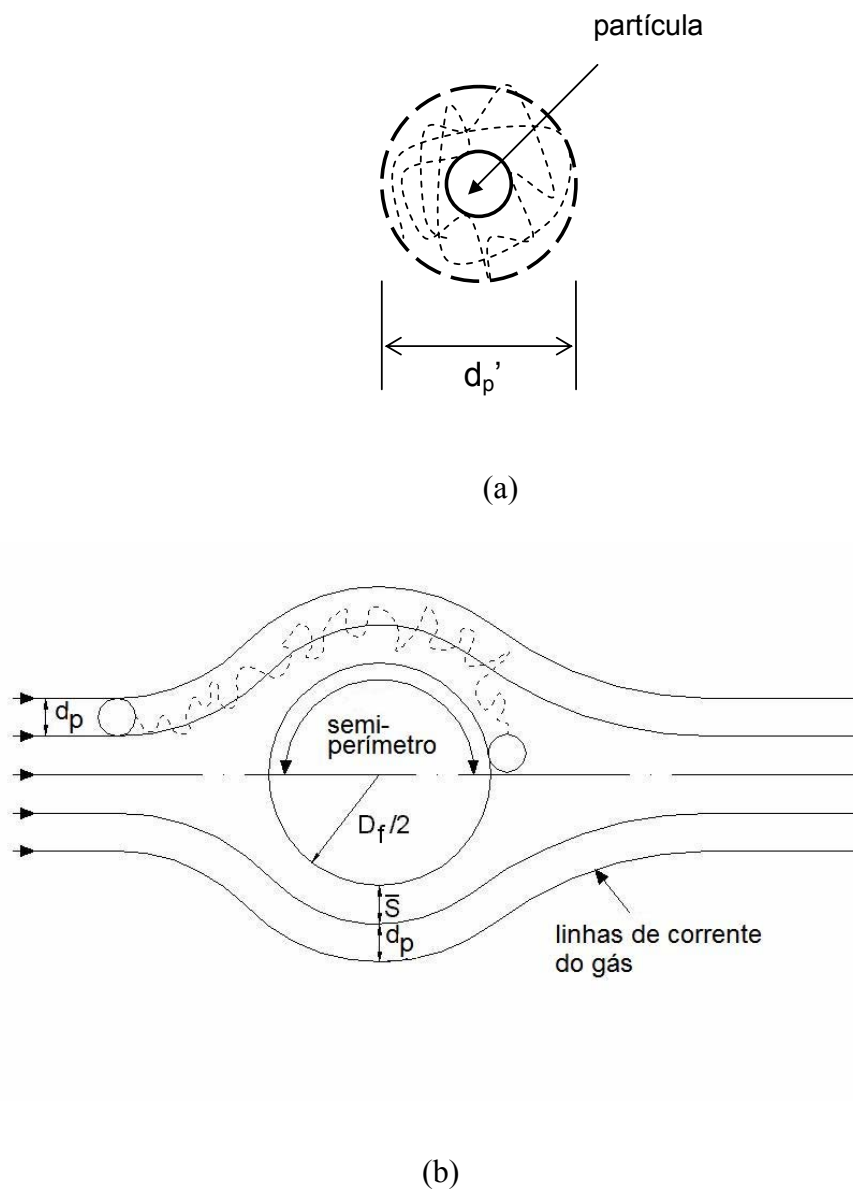


Figura 4. 19 – Diâmetro efetivo da partícula (a) e semi-perímetro de uma fibra (b).

Daí, vem:

$$t = \frac{\pi D_f}{2 U_0} \quad (4.5)$$

Substituindo a Equação (4.5) na Equação (4.2), tem-se:

$$\bar{s} = \left\{ 2D \left[\frac{\pi D_f}{2 U_0} - \tau (1 - e^{-\pi D_f / 2 U_0 \tau}) \right] \right\}^{1/2} \quad (4.6)$$

Portanto, se a partícula move-se a distância \bar{s} enquanto estava próxima à superfície do coletor, tudo se passa como se o diâmetro efetivo da mesma pudesse ser expresso por:

$$d_p' = \bar{s} + d_p \quad (4.7)$$

No cálculo do mecanismo difusional já está incluída a difusividade da partícula e seria sem sentido utilizar o d_p' . No entanto, o d_p' pode ser utilizado no mecanismo de interceptação direta, no parâmetro $R=d_p/D_f$, pois assim estaríamos incluindo o diâmetro efetivo da partícula ao redor da fibra. Os resultados da eficiência total quando inserido d_p' no mecanismo de interceptação direta onde $R= d_p'/D_f$, são mostrados nas Figuras 4.20 e 4.21, respectivamente com o uso da Equação de LIU & RUBOW (1990) e PAYET et al. (1992).

Como as partículas são muito pequenas, elas não são coletadas pela simples colisão com o coletor, o que acontece quando as partículas possuem d_p de ordem de grandeza pouco a baixo do diâmetro da fibra. Aqui elas se deslocam devido ao movimento browniano e percorrem uma determinada distância perto da superfície do coletor até serem coletadas.

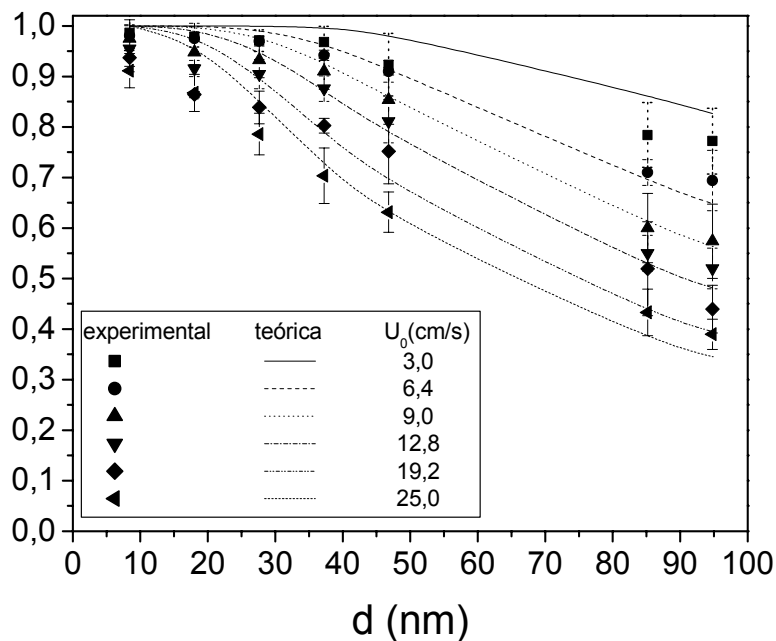


Figura 4. 20 - Eficiência experimental e teórica do filtro de poliéster com dp' em R (Equação de LIU & RUBOW (1990)).

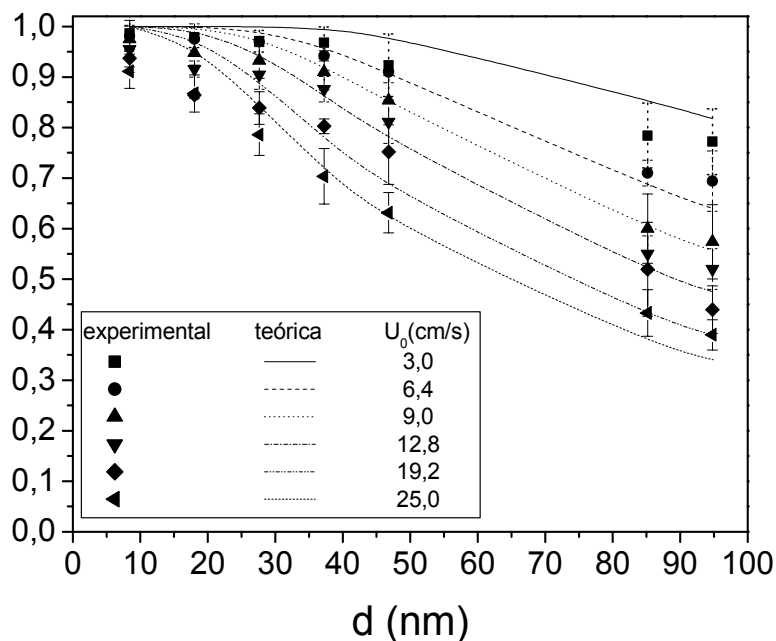


Figura 4. 21 - Eficiência experimental e teórica do poliéster com dp' em R (Equação de PAYET et al. (1992)).

Utilizando d_p' em R verifica-se que a predição teórica se ajusta bem melhor aos dados do que quando o mesmo não é levado em conta. Na Figura 4.22 e 4.23 mostra-se a eficiência teórica com relação a todos os dados experimentais, utilizando as Equações de LIU & RUBOW (1990) e de PAYET et al. (1992), respectivamente.

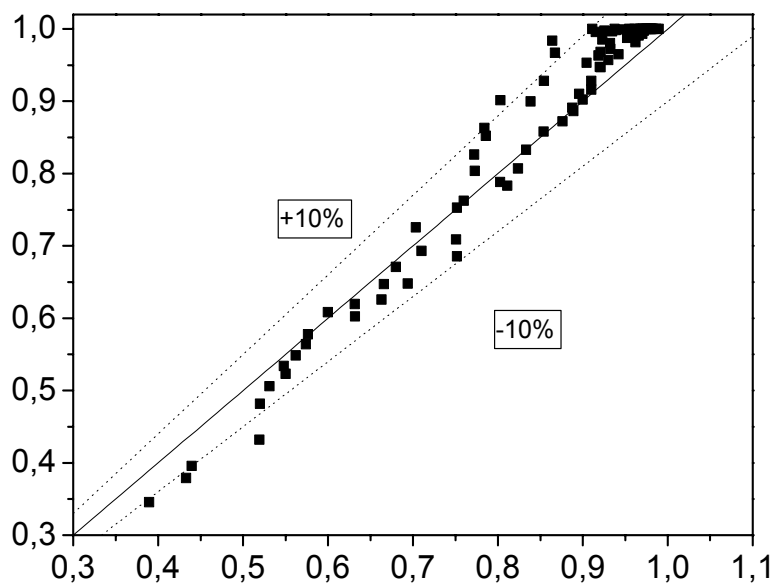


Figura 4. 22 - Comparação entre as eficiências de coleta experimental e teórica (LIU & RUBOW (1990)) com d_p' em R.

Pode-se verificar nas Figuras 4.23 e 4.24 que utilizando d_p' em R na Equação de LIU & RUBOW (1990), a predição teórica se ajustou melhor aos dados experimentais.

Utilizando d_p' em R na eficiência individual, calculadas por LIU & RUBOW (1990) (Figuras 4.24 a 4.26) mostra-se os resultados para $U_0=3,0; 12,8$ e 25 cm/s. No Apêndice L, mostra-se os resultados de $U_0=4,0; 5,0; 6,4; 7,0; 7,7; 9,0; 10,2; 11,5$ e $19,2$ cm/s.

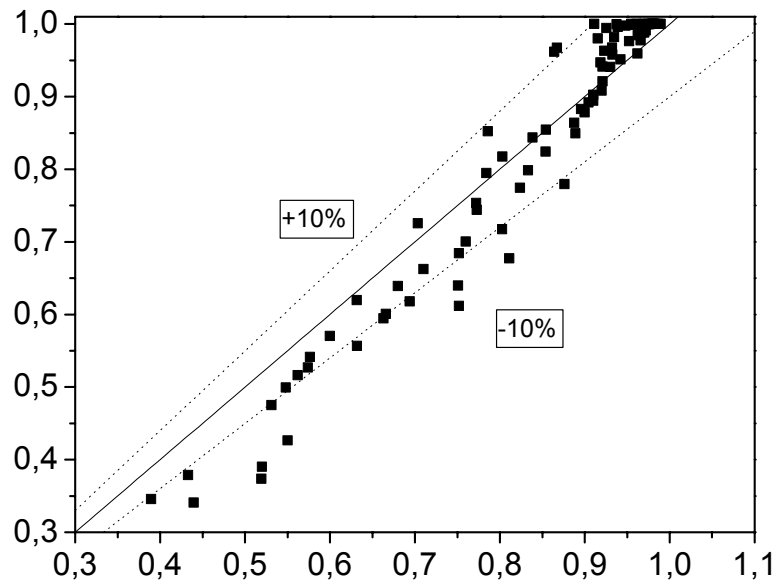


Figura 4. 23 - Comparação entre as eficiências de coleta experimental e teórica (PAYET et al. (1992)) com d_p em R para o filtro de poliéster.

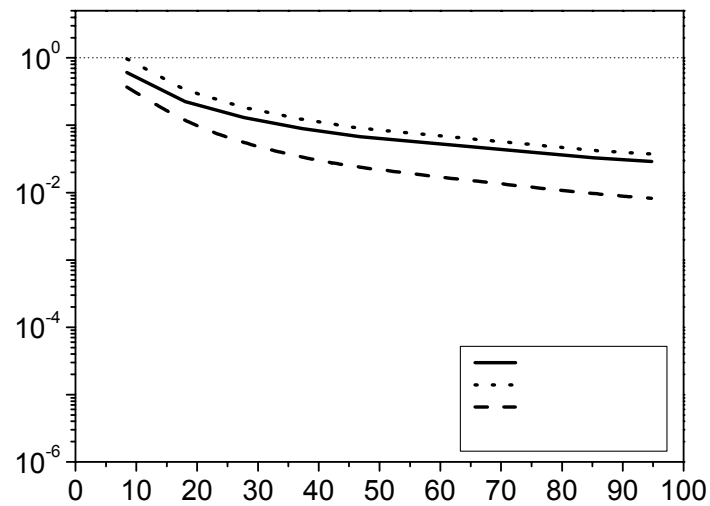


Figura 4. 24 - Eficiência de coleta individual (Equação de LIU & RUBOW (1990)) com d_p em R, em relação a d_p para velocidade de 3,0 cm/s para o filtro de poliéster.

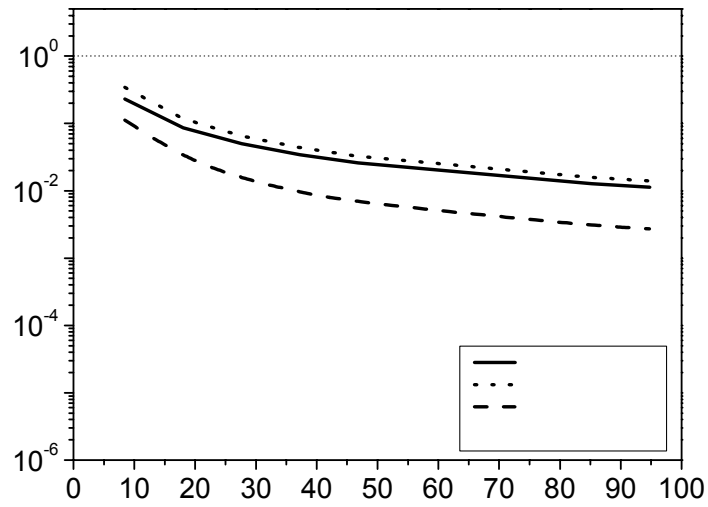


Figura 4. 25 - Eficiência de coleta individual (Equação de LIU & RUBOW (1990)) com d_p' em R, em relação a d_p para velocidade de 12,8 cm/s para o filtro de poliéster.

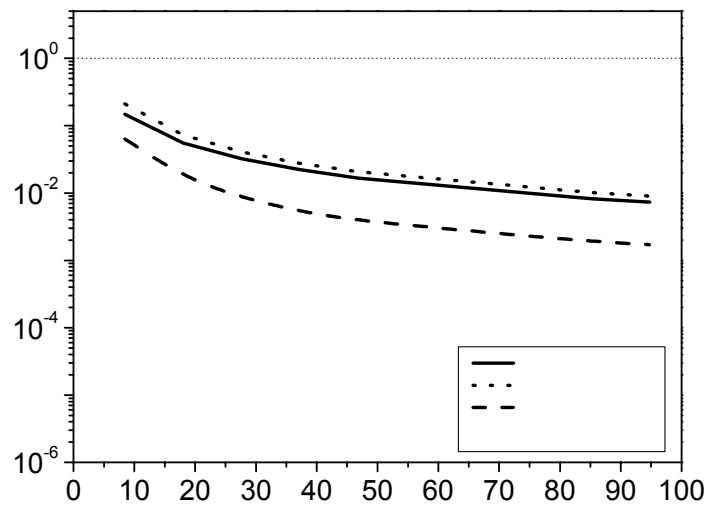


Figura 4. 26 - Eficiência de coleta individual (Equação de LIU & RUBOW (1990)) com d_p' em R, em relação a d_p para velocidade de 25,0 cm/s para o filtro de poliéster.

Pode-se verificar que utilizando d_p' em R torna o mecanismo de interceptação mais atuante na eficiência de coleta individual, apresentando a mesma tendência do mecanismo difusional. Quando não utilizado o d_p' , (Figuras 4.11, 4.12 e 4.113), o mecanismo de interceptação direta apresenta comportamento crescente, onde o difusional mostra-se decrescente com d_p .

Nas Figuras 4.27 a 4.29 mostra-se as eficiências individuais de coleta utilizando a Equação de PAYET et al (1992) incluindo d_p' em R. No Apêndice L, mostra-se os resultados de $U_0=4,0; 5,0; 6,4; 7,0; 7,7; 9,0; 10,2; 11,5$ e $19,2$ cm/s.

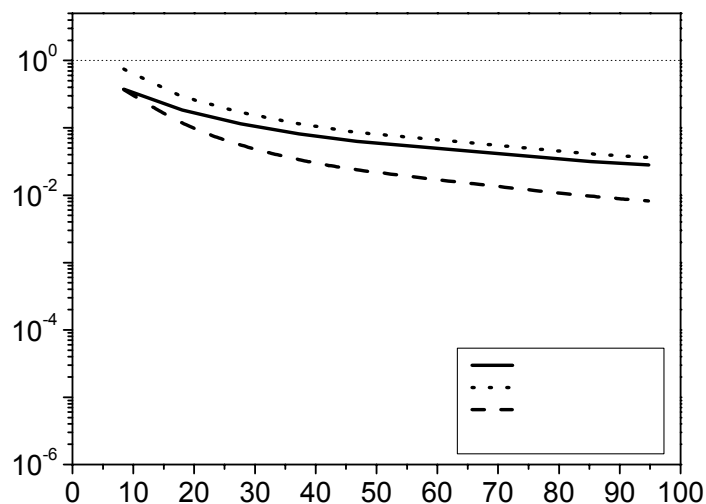


Figura 4. 27 - Eficiência de coleta individual (Equação de PAYET et al. (1992)) com d_p' em R, em relação a d_p para velocidade de $3,0$ cm/s para o filtro de poliéster.

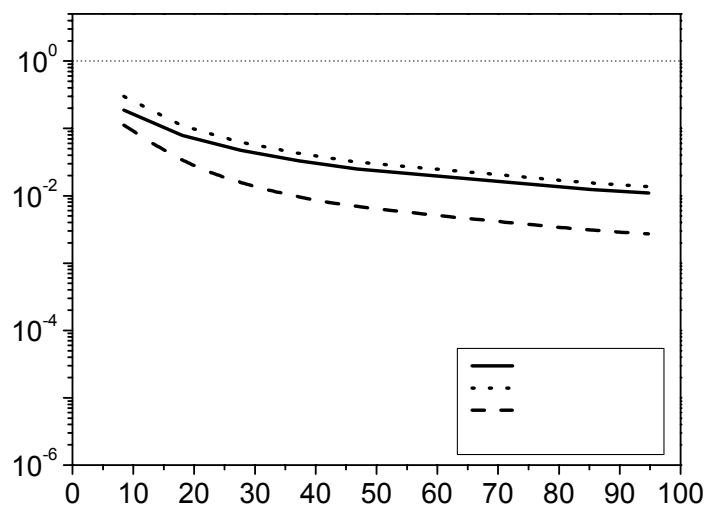


Figura 4. 28 - Eficiência de coleta individual (Equação de PAYET et al. (1992)) com d_p em R, em relação a d_p para velocidade de 12,8 cm/s para o filtro de poliéster.

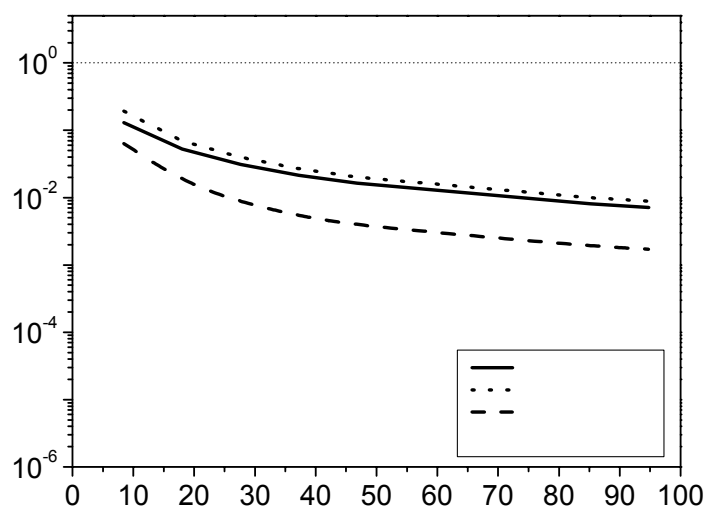


Figura 4. 29 - Eficiência de coleta individual (Equação de PAYET et al. (1992)) com d_p em R, em relação a d_p para velocidade de 25,0 cm/s para o filtro de poliéster.

Apresenta-se nas Figuras 4.30 e 4.31 a eficiência individual de coleta em relação ao diâmetro de partícula numa faixa maior de diâmetro para velocidade de 6,4 cm/s, tomada como exemplo, utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) e Equação proposta neste

trabalho, respectivamente, com objetivo de mostrar que o ajuste efetuado neste trabalho pode ser utilizado em ampla faixa de diâmetros de partículas, e não somente na faixa estudada.

Pode-se verificar que a nova proposta aumenta o efeito da interceptação direta na faixa nanométrica e não altera a atuação na faixa micrométrica, onde as equações de LIU & RUBOW têm funcionado bem (Figura 4.31).

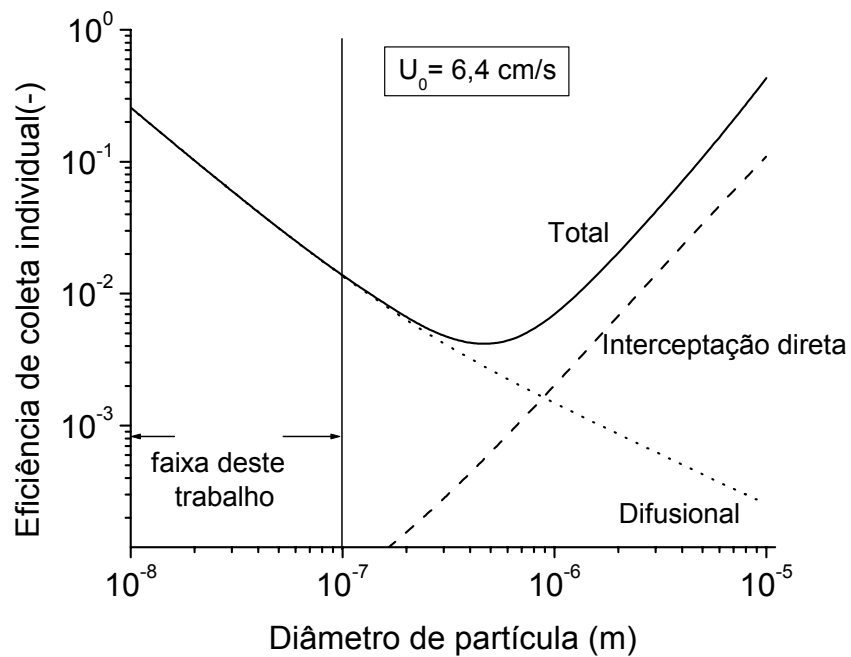


Figura 4. 30 - Eficiência de coleta individual em relação ao diâmetro de partícula com ampla faixa de diâmetro para $U_0=6,4 \text{ cm/s}$ calculada com as Equações LIU & RUBOW (1990).

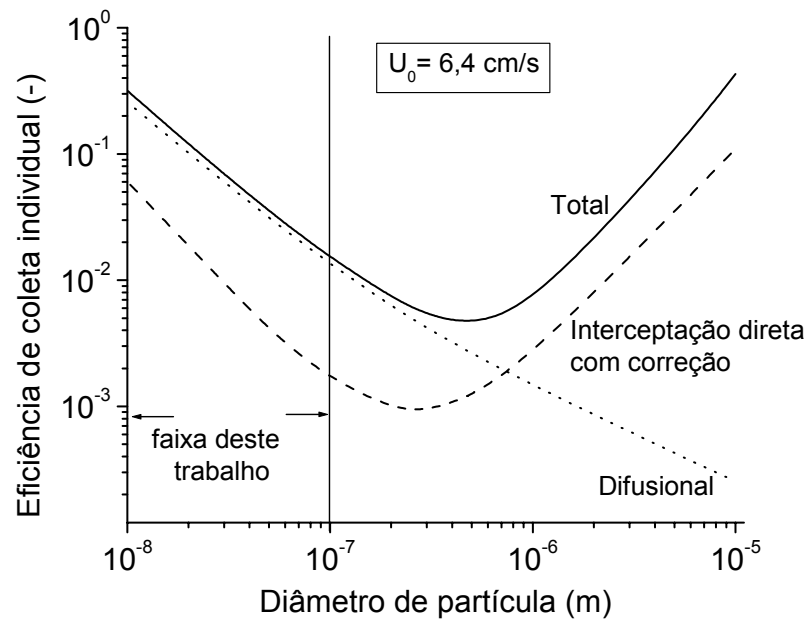


Figura 4. 31 - Eficiência de coleta individual em relação ao diâmetro de partícula com ampla faixa de diâmetro para $U_0=6,4 \text{ cm/s}$ calculada com as Equações LIU & RUBOW (1990) com ajuste.

4.4.3 - Eficiência do filtro HEPA

4.4.3.1 - Eficiência experimental

Os resultados de eficiência obtidos pela contagem de partículas na entrada e saída do filtro são apresentados nas Figuras 4.32 a 4.34.

Verifica-se que as eficiências neste caso são muito altas, acima de 0,99994. A eficiência diminui com o aumento de d_p e que o aumento da velocidade de filtração proporciona uma diminuição da eficiência de coleta.

No Apêndice M, na Tabela M.2 mostra-se a concentração de entrada e saída de partículas no filtro HEPA.

Nota-se nas Figuras 4.32 a 4.34 que as eficiências do filtro HEPA foram iguais a 1, até $U_0 = 10,2$ cm/s. Altas eficiências são realmente reportadas para este tipo de filtro na remoção de partículas micrométricas, devido ao pequeno diâmetro das fibras. No entanto nota-se a extensão desta eficiência para a faixa nanométrica. Acima de $10,2$ cm/s a eficiência do filtro diminui com o aumento da velocidade a partir do diâmetro de partícula de 47 nm. A mínima eficiência obtida foi de $0,99994$ para $U_0 = 25,0$ cm/s e $d_p = 94,78$ nm. Isto comprova que este filtro pode ser utilizado na limpeza de gases, uma vez que mostra ser possível uma coleta eficiente de partículas nanométricas, sendo de grande interesse ao setor industrial. Os valores de eficiência mostram-se sobrepostos, pois os valores são iguais.

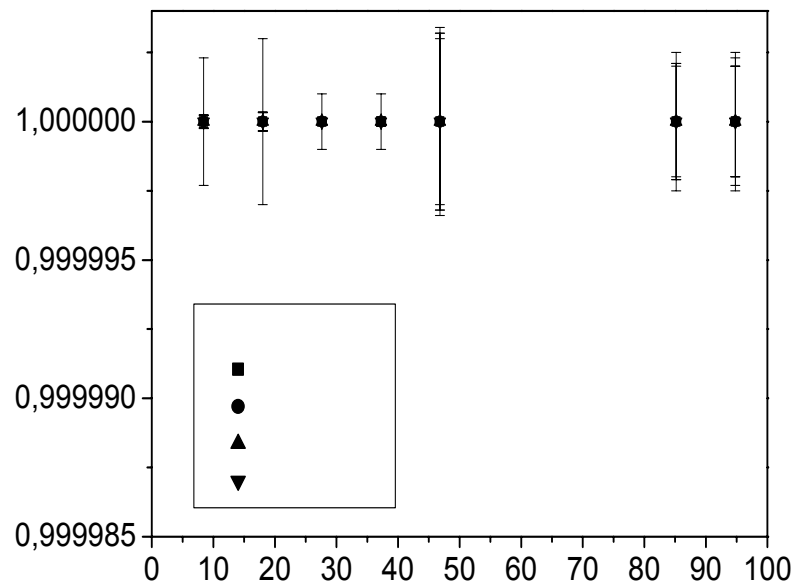


Figura 4. 32 - Eficiência experimental do filtro HEPA em relação ao diâmetro das partículas para as velocidades de $3,0$ a $6,4$ cm/s.

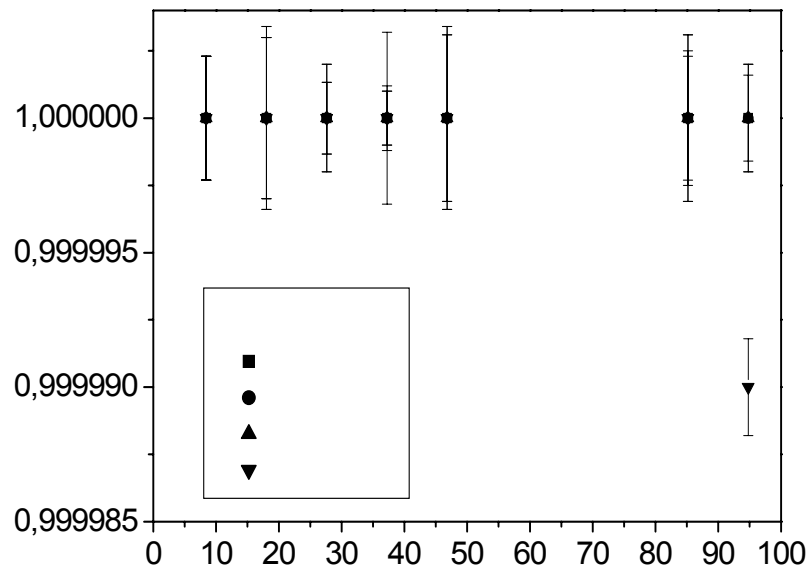


Figura 4. 33 - Eficiência experimental do filtro HEPA em relação ao diâmetro das partículas para as velocidades de 7,0 a 10,2 cm/s.

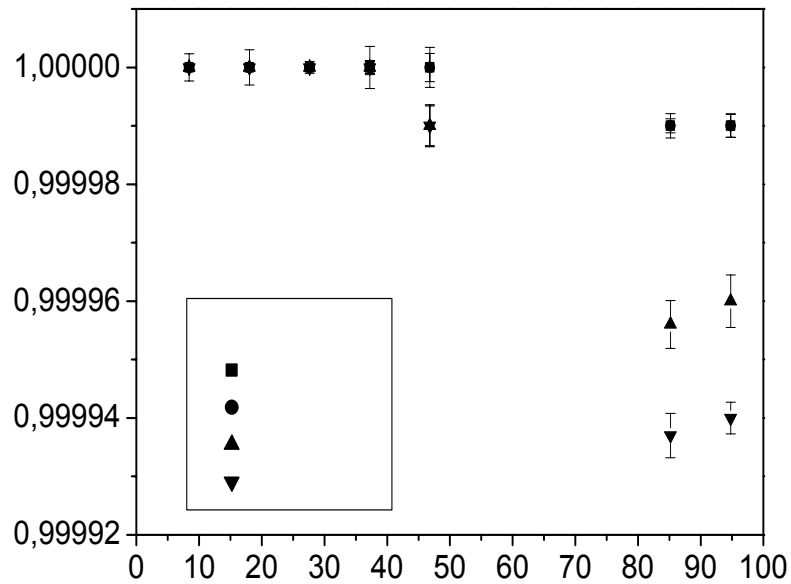


Figura 4. 34 - Eficiência experimental do filtro HEPA em relação ao diâmetro das partículas para as velocidades de 11,5 a 25,0 cm/s.

Na Figura 4.35 mostra-se a eficiência de coleta do filtro HEPA em relação às velocidades de filtração de 3,0; 9,0; 12,8; 19,2 e 25 cm/s para $d_p = 8,4$ a 94,8 nm. Foram mostradas somente estas velocidades para melhor visualização.

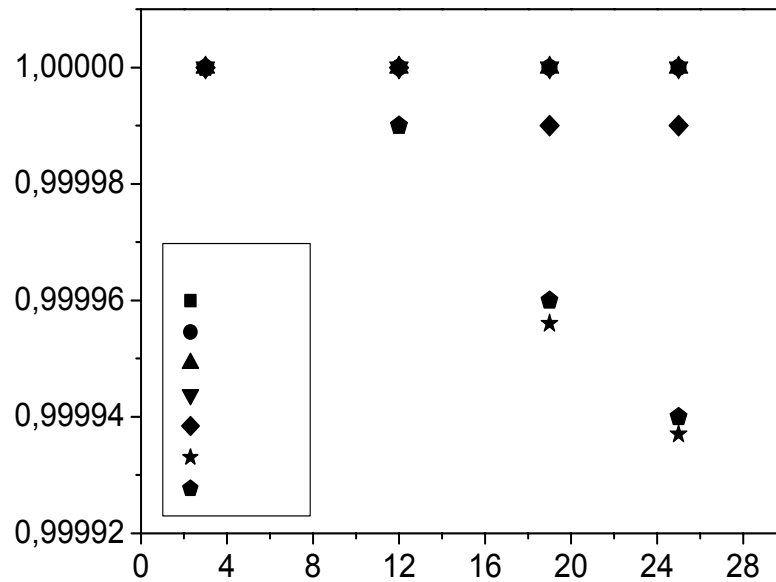


Figura 4. 35 - Eficiência experimental do filtro HEPA em relação a U_0 para $d_p = 8,4$ a 94,8 nm.

O que se verifica na Figura 4.35 é que a eficiência é igual a 1 para partículas até 27,6 nm e diminui com o aumento da velocidade, conforme o aumento do diâmetro.

Conclui-se que o filtro HEPA tem alta eficiência de coleta mesmo na faixa nanométrica e como no caso do filtro de poliéster, os dados experimentais evidenciam a predominância do fenômeno difusional.

4.4.3.2 - Experimental vs teoria

A comparação das eficiências experimental e teórica do filtro HEPA, para as velocidades de 3,0; 6,4; 9,0; 12,8; 19,2 e 25,0 cm/s é mostrada na Figura 4.36. Para não

sobrecarregar o gráfico e para facilitar a visualização dos dados optou-se por mostrar aqui somente estas velocidades. A melhor visualização dos resultados para estas velocidades e as restantes estudadas: 4,0; 5,0; 7,0; 7,7; 10,0; 11,5 cm/s, são apresentados no Apêndice H. Os resultados teóricos foram obtidos da Equação de LIU & RUBOW (1990), considerando o mecanismo de interceptação de acordo com a Equação 4.7, utilizando valor médio do diâmetro das fibras, $\overline{D_f}$, de 0,72 μm .

Como se pode verificar na Figura 4.36, a eficiência teórica subestima os dados experimentais para d_p acima de 46,8 nm. Como pode ser verificado na Tabela 4.4 e Figura 4.4, os diâmetros das fibras do filtro HEPA têm uma distribuição de tamanho bastante larga. Considerando a grande sensibilidade das correlações de eficiência em relação a esse parâmetro, é bastante improvável que o meio possa ser representado apenas pelo diâmetro médio $\overline{D_f}$.

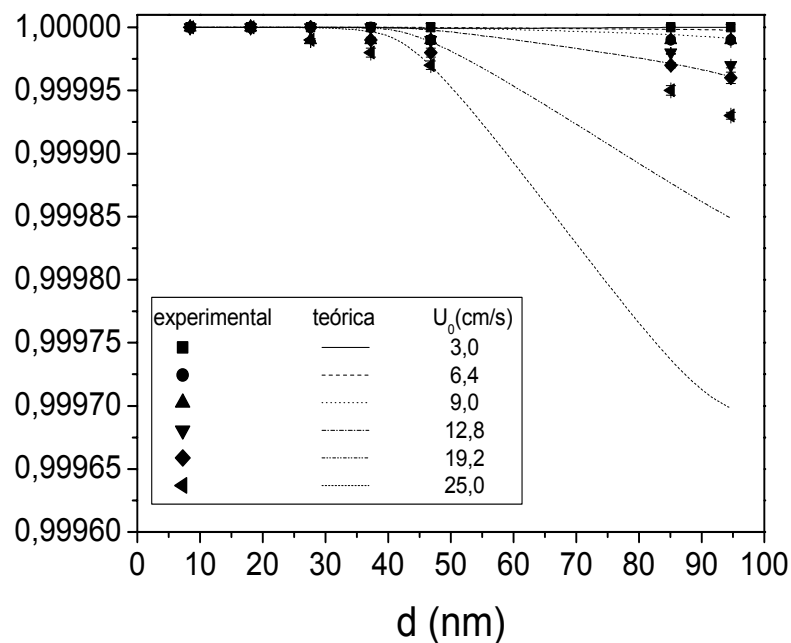


Figura 4. 36 - Eficiência experimental e teórica do filtro HEPA em relação ao diâmetro das partículas para $\overline{D_f}=0,72 \mu\text{m}$ (Equação de LIU & RUBOW(1990)).

Apresenta-se na Figura 4.37 comparação da eficiência teórica em relação à experimental do filtro HEPA, para todas as velocidades estudadas, e verifica-se que a eficiência teórica subestima os dados experimentais para baixas eficiências.

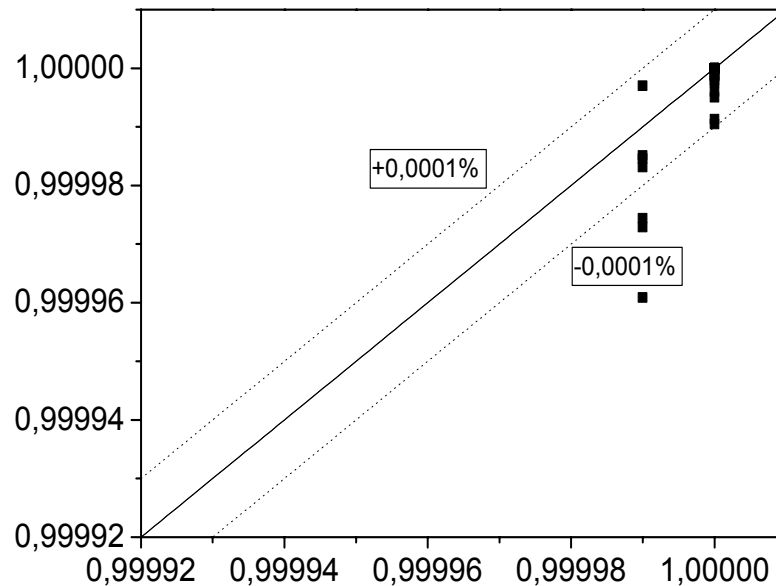


Figura 4. 37 - Comparação entre as eficiências de coleta experimental e teórica do filtro HEPA, utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990).

As Figuras 4.38 e 4.39 mostram a eficiência de coleta calculada por PAYET et al. (1992), com $\overline{D_f} = 0,72 \mu\text{m}$, para as velocidades de 3,0; 6,4; 9,0; 12,8; 19,2 e 25,0 cm/s em relação a d_p e teórico vs experimental para todas as velocidades estudadas, respectivamente.

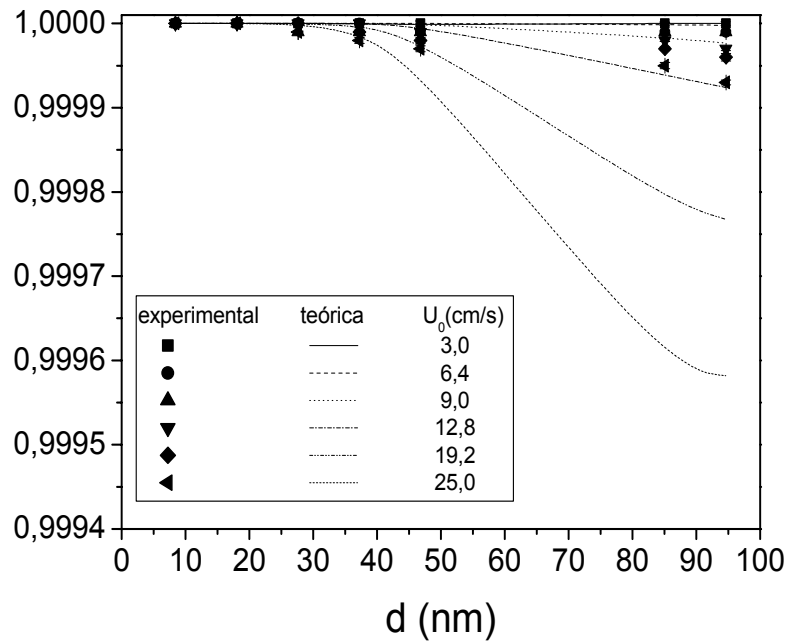


Figura 4. 38 - Eficiências de coleta experimental e teórica em relação a d_p (Equação de PAYET et al. (1992)) para o filtro HEPA.

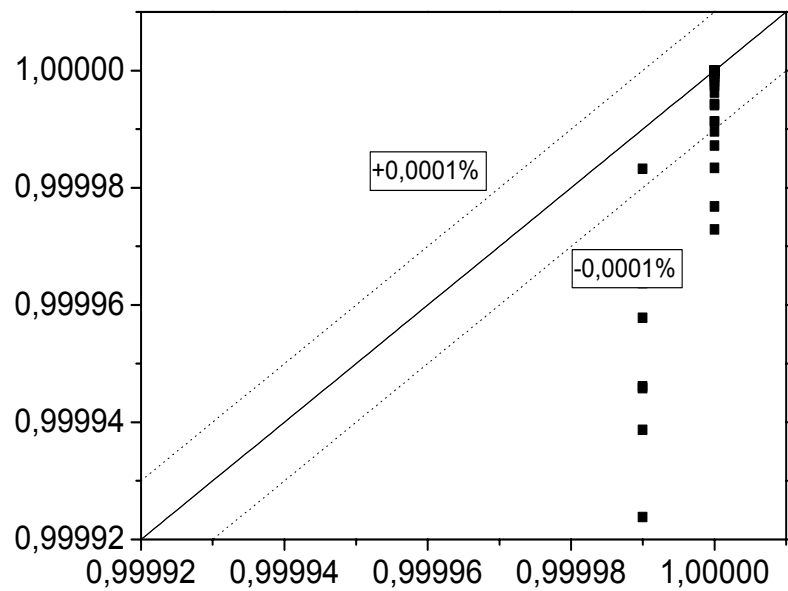


Figura 4. 39 - Comparação entre eficiências de coleta experimental e teórica do filtro HEPA, utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).

4.4.3.3 - Proposta deste trabalho

O que se pode observar é que ambas as Equações utilizadas não representam satisfatoriamente os dados experimentais mesmo quando modificadas no seu mecanismo de interceptação direta. Isso certamente se deve ao uso de um único valor para o diâmetro médio das fibras. O que se propõe neste trabalho é subdividir o filtro, podendo se visualizar o leito de fibras como sendo composto de vários leitos em sequência, cada um com fibras D_{fi} e porosidade ε_i , conforme esquematizado na Figura 4.40. A porosidade ε_i pode ser facilmente correlacionada à porosidade do filtro, ε , pela seguinte equação:

$$\varepsilon_i = 1 - (1 - \varepsilon)x_i \quad (4.8)$$

onde x_i é a fração das fibras com determinado diâmetro, dado por:

$$x_i = \frac{n_i D_{fi}}{\sum n_i D_{fi}} \quad (4.9)$$

sendo que n_i é o número de fibras com determinado diâmetro e D_{fi} é o diâmetro das fibras, e cada subscrito i , representa uma faixa de tamanho de fibras.

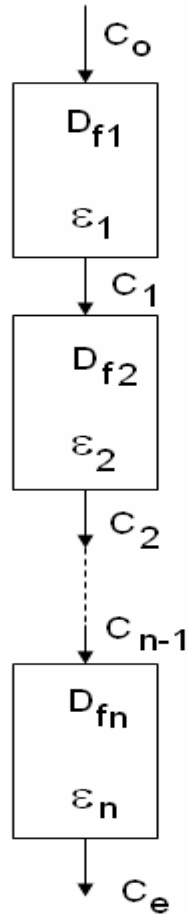


Figura 4. 40 – Seqüência de filtros.

Pode-se definir para cada um desses leitos, analogamente à Equação 2.31, a penetração, P, como sendo:

$$P_1 = \frac{C_1}{C_0} = \exp\left[-\frac{4H(1-\epsilon_1)\eta_{T1}}{\pi\epsilon_1 D_{f1}}\right] \tag{4.10}$$

$$P_2 = \frac{C_2}{C_1} = \exp\left[-\frac{4H(1-\epsilon_2)\eta_{T2}}{\pi\epsilon_2 D_{f2}}\right] \tag{4.11}$$

· · · ·
 · · · ·
 · · · ·

$$P_n = \frac{C_e}{C_{n-1}} = \exp\left[-\frac{4H(1-\epsilon_n)\eta_{Tn}}{\pi\epsilon_n D_{fn}}\right] \tag{4.12}$$

Por definição, a penetração total vale:

$$P = \frac{C_e}{C_0} \quad (4.13)$$

Portanto:

$$P = P_1 \times P_2 \times P_3 \dots \times P_n \quad (4.14)$$

Substituindo as Equações 4.10 a 4.12 na Equação 4.14, vem:

$$P = \exp \left[\frac{-4H}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{(1 - \varepsilon_i) \eta_{T_i}}{\varepsilon_i D_{fi}} \right] \quad (4.15)$$

Portanto, a eficiência total do filtro pode ser escrita como:

$$E = 1 - P = 1 - \exp \left[\frac{-4H}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{(1 - \varepsilon_i) \eta_{T_i}}{\varepsilon_i D_{fi}} \right] \quad (4.16)$$

Utilizando a Equação 4.7 onde se usa d_p em R, e a Equação 4.16, na Equação LIU & RUBOW (1990), os resultados referentes às curvas teóricas e experimentais para as velocidades de 3,0; 6,4; 9,0; 12,8; 19,2 e 25,0 cm/s com relação á d_p são mostrados na Figura 4.41, as outras velocidades são apresentadas no apêndice I.

Os resultados de todas as velocidades estudadas comparando eficiência experimental e teórica são apresentados na Figura 4.42.

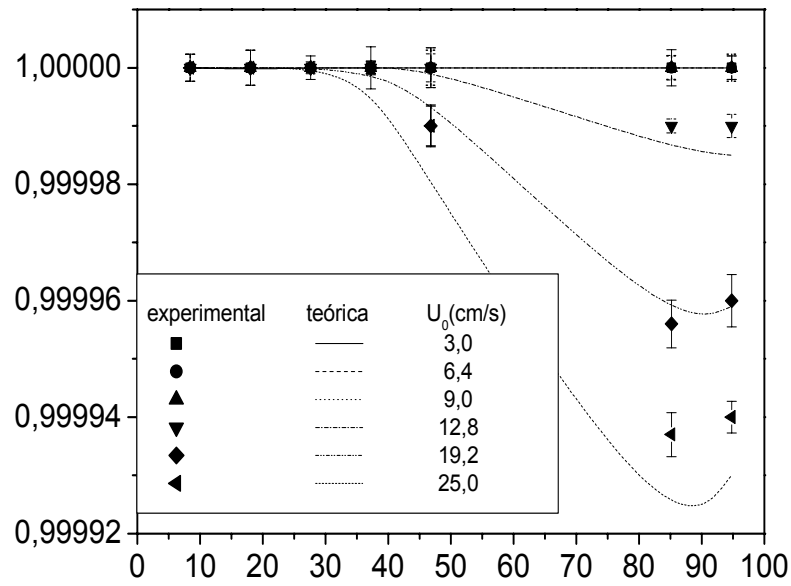


Figura 4. 41 - Eficiência experimental e teórica (Equação 4.16) e dp' em R, em relação à d_p para $U_0 = 3,0; 6,4; 9,0; 12,8; 19,2$ e $25,0$ cm/s (Equação de LIU & RUBOW (1990)) para o filtro HEPA.

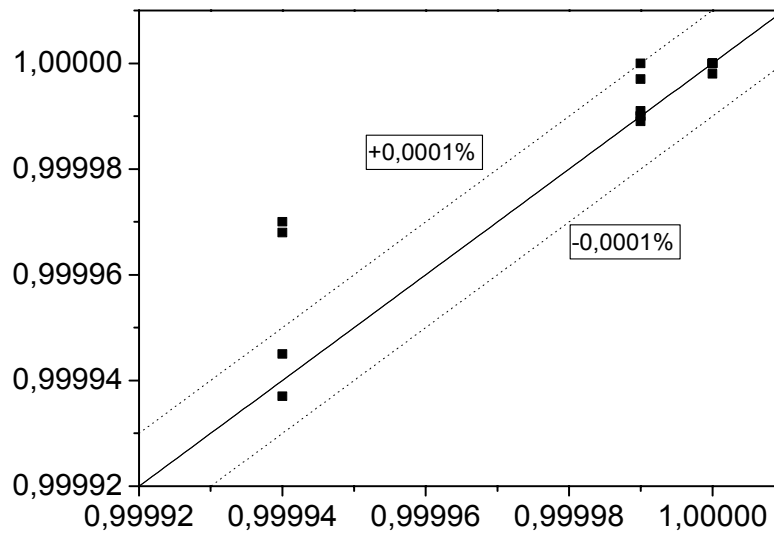


Figura 4. 42 - Comparação entre eficiências de coleta experimental e teórica (Equação 4.16) e dp' em R, do filtro HEPA, utilizando as Equações de LIU & RUBOW (1990).

Verifica-se nas Figuras 4.41 e 4.42 que a eficiência teórica consegue representar bem a eficiência experimental, o que indica que a Equação 4.16 pode ser utilizada.

Na Figura 4.43 mostram-se os resultados referentes às curvas teóricas e experimentais para as velocidades de 3,0; 6,4; 9,0; 12,8; 19,2 e 25,0 cm/s em relação a d_p , utilizando a Equação 4.7 empregando d_p' em R, e a Equação 4.16, na Equação PAYET et al. (1992). Os resultados de todas as velocidades estudadas comparando eficiência experimental e teórica são apresentados na Figura 4.44.

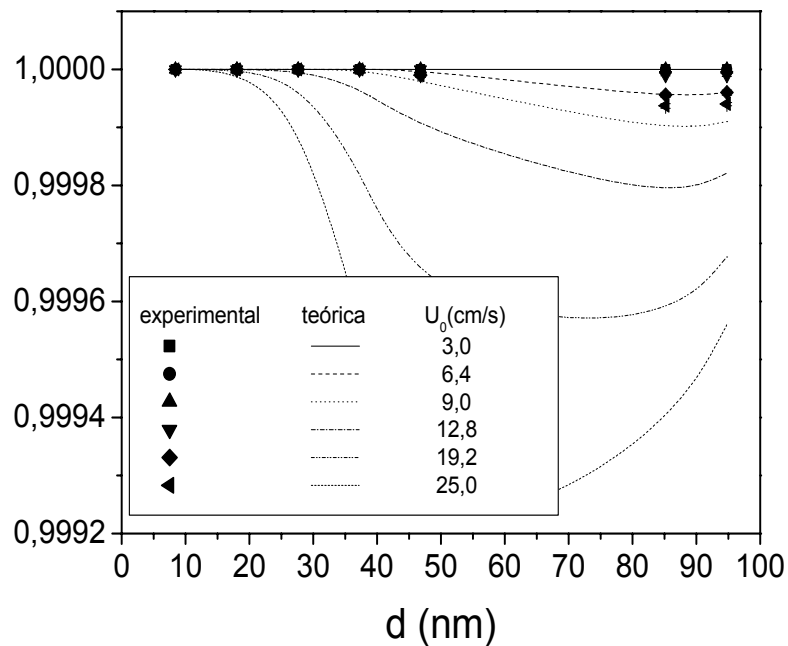


Figura 4. 43 - Eficiência experimental e teórica (Equação 4.16) e d_p' em R, em relação a d_p para $U_0= 3,0; 6,4; 9,0; 12,8; 19,2$ e $25,0$ cm/s (Equação de PAYET et al. (1992)) para o filtro HEPA.

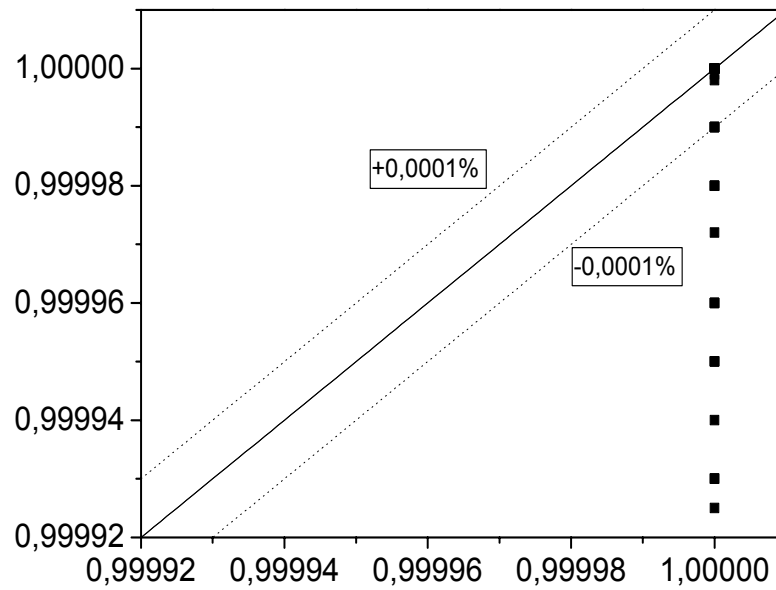


Figura 4. 44 - Comparação entre eficiências de coleta experimental e teórica (Equação 4.16) e dp' em R, do filtro HEPA, utilizando as Equações de PAYET et al. (1992).

Pode-se observar que a teoria subestima os dados experimentais no caso das Figuras 4.43 e 4.44, não os representando satisfatoriamente. A Equação de PAYET et al. (1992) por forçar um fator de correção C_d' para fazer com que $\eta_T < 1$, subestima o mecanismo difusional para partículas muito finas. Isso provavelmente causou o grande desvio observado.

5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A partir do estudo realizado foi possível obter as conclusões listadas a seguir:

Quanto ao filtro de poliéster

A eficiência de coleta do filtro variou de 0,39 a 0,99 mostrando a grande variação de eficiência.

A eficiência diminui com o aumento do diâmetro das partículas e da velocidade do gás, o que é característico da filtração de predominância difusional.

Utilizando as Equações de LIU & RUBOW (1990) e PAYET et al. (1992) para o cálculo da eficiência de filtração não se conseguiu representar satisfatoriamente os dados experimentais.

O mecanismo difusional predomina na coleta das partículas na faixa de tamanho estudada, sendo que o mecanismo de interceptação direta tem influência desprezível na eficiência total.

Quando proposta a inserção de d_p' , calculada a partir do movimento browniano de partículas incluída ao parâmetro de interceptação direta, na Equação de LIU & RUBOW (1990), a predição teórica representou os dados experimentais satisfatoriamente. No entanto, quando utilizado na Equação de PAYET et al. (1992), os resultados não foram satisfatórios.

Utilizando d_p' no parâmetro de interceptação direta, este parâmetro se torna atuante na eficiência de coleta total.

Quanto ao filtro HEPA:

A eficiência de coleta do filtro variou de 0,99994 até 1, mostrando que este filtro é altamente eficiente na remoção de partículas na faixa estudada.

A eficiência diminui com o aumento do diâmetro das partículas e da velocidade.

Com a utilização do diâmetro médio das fibras para o cálculo da eficiência de filtração através das Equações de LIU & RUBOW (1990) e PAYET et al. (1992), não se conseguiu representar satisfatoriamente os dados experimentais.

Quando utilizada a proposta de considerar o leito de fibras como sendo composto de vários leitos em série, calculada através da Equação de LIU & RUBOW (1990) conseguiu-se representar bem os dados experimentais, enquanto que a Equação de PAYET et al. (1992) não foi satisfatória.

Portanto conclui-se que o filtro de celulose HEPA por apresentar alta eficiência de coleta pode ser utilizado para remover partículas nanométricas, enquanto que o filtro de poliéster não é apto para este tamanho de partículas.

Propõe-se como continuidade deste trabalho:

- Empregar filtros com características diferentes das utilizadas neste trabalho para verificar a influência dos mesmos na coleta de partículas nanométricas;
- Utilizar um contador de partículas que efetua a contagem e faz a medida dos diâmetros das partículas simultaneamente;
- Trabalhar com uma faixa de partículas de diâmetros mais ampla;
- Testes de filtração com filtro de poliéster com adição de carga ao mesmo;

- Estudar a geração de partículas com outros materiais.
- Verificar a possibilidade do uso de capilar com diâmetro maior;

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, M. L., (1995), Filtração de gases em filtros de tecido: deposição e remoção da camada de pó formada, São Carlos, Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, 123p.
- AHN, Y.C.; PARK, S.K.; KIM, G.T.; HWANG, Y.J.; LEE, C. G.; SHIN, H.S.; LEE, J.K., (2006), “Development of high efficiency nanofilters made of nanofibers”, *Current Applied Physics*, Vol. 6, n. 6, p. 1030-1035.
- AITKEN, R. J.; CREELY, K. S.; TRAN, C.L., (2004), “Nanoparticles: an occupational hygiene review”, Research Report 274. Institute of Occupational Medicine.
- ALLEN, T., (1990), Particle Size Measurement; Chapman and Hall; 4th edition; London, 456p.
- ALLEY, E.R., (1998), Air Quality Control Handbook, McGraw-Hill, New York.
- BANG, J. J.; MURR, L. E., (2002), “Collecting and Characterizing Atmospheric Nanoparticles”, *JOM Journal of the Mineral Metals & Materials Society*, Vol. 54, n. 12, p. 28-30.
- BALAZY, A.; PODGÓRSKI, A.; GRADÓN, L., (2004), “Filtration of nanoized aerosol particles in fibrous filters. I – Experimental results”, *Abstracts of the European Aerosol Conference*, p. 967-968.
- BALAZY, A.; PODGÓRSKI, A., (2004), “The influence of the filtration conditions on the optimization of aerosol filtration in fibrous filters”, *Abstracts of the European Aerosol Conference*, p. 969-970.
- BALAZY, A.; TOYVOLA, M.; REPONEN, T.; PODGÓRSKI, A.; ZIMMER, A.; GRINSHPUN, S.A., (2005), “Manikin-Based performance evaluation of N95 filtering-facepiece respirators challenged with nanoparticles”, *Annals of Occupational Hygiene*, Vol. 50, n. 3, p. 259-269.
- BEARD, K. V., (1976), “Terminal velocity and shape of cloud and precipitation drops aloft”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 33, p.851-864.
- BERMINGHAM, S.; BRUINSMA, D.; KRAMER, H.; ROSMALEN, G.V.; WITKAMP, G.; DERENZO, S.; GIULIETTI, M.; SECKLER, M. M.; RÉ, M. I.; CEKINSKI, E., (2002), *Industrial Crystallization and Precipitation*, Apostila de Curso do IPT – TU DELFT.
- BORM, P. J. A.; KREYLING, W., (2004), “Toxicological hazards of inhaled nanoparticles - Potential implications for drug delivery” *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 4, n. 5. p. 521-531.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N., (1960), *Transport phenomena*, John Wiley & Sons, New York.

- BROWN, R. C., (1993), *Air Filtration: An integrated approach to the theory and applications of fibrous filters*, Pergamon Press, UK, 272p.
- BRUNO, R. L., (2005), *Material particulado atmosférico na cidade de São Carlos, - SP. Quantificação e identificação de fontes*, Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 178p.
- BURLESON, D. J.; DRIESSEN, M. D.; PENN, R. L., (2004), "On the characterization of environmental nanoparticles" *Journal of Environmental Science and Health Part A - Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, Vol. 39, n. 10, p. 2707-2753.
- CARROTA, M. C.; MARTINELLI, G.; CREMA, L.; MALAGÚ, C.; MERLI, M.; GHIOTTI, G.; TRAVERSA, E., (2001), "Nanostructured thick-film gas sensors for atmospheric pollutant monitoring: quantitative analysis on field tests", *Sensors and Actuators B*, n. 76, p. 336-342.
- CASSEE, F. R., (2006), "Toxicology of automotive fine and ultrafine particles", *Abstracts Toxicology Letters*, p. S1-S324.
- CAVASENO, V. (1980), *Industrial Air Pollution Engineering*, McGraw-Hill, USA.
- CHEN, D.; PUI, D, Y.H., (2000), "Generation of high concentration nanoparticles for filtration studies", *Journal of aerosol Science*, p. 202-211.
- CHEN, D.; PUI, D. Y. H.; KAUFMAN, S. L., (1995), "Electrospraying of conducting liquids for monodisperse aerosol generation in the 4 nm to 1,8 µm diameter range", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 26, n. 6, p. 963-977.
- CHEREMESINOFF, P.N. & YOUNG, R. A., (1977), *Air pollution control and design handbook*, part I. New York, Marcel Dekker Inc, 607p.
- CHIRUTA, M.; SLANINA, M.; DUCA, M., (1997), "On the filtration of fine aerosol particles by a dual-wire fibre filter", *Journal of eletrostatics*, Vol. 39, p. 145-153.
- CLEMENT, C. F.; DUNNETT, S. J., (2004), "A study of the effect of deposition on fibrous filter efficiency" *Abstract of European Aerosol Conference*, p. 771-772.
- CLIFT, R.; GRACE, J. R.; WEBER, M.E., (1978), *Bubbles, Drops, and Particles*, Academic Press, New York, 380 p.
- COURY, J. R., (1986), *Filtração de gases em filtros granulares*. In: FREIRE, J.T.; GUBULIN, J.C. *Tópicos especiais de sistemas particulados*. São Carlos, Vol. 2, Cap 2, p. 65-121.
- COURY, J. R., (1983), *Electrostatic effects in granular bed filtration of gases*, Tese de Ph.D. University of Cambridge, UK, 234p.
- DAVIES, C. N., (1973), *Air filtration*, Academic Press, London.

- DAVIS, W. T.; KIM, G. D., (1999), "Effect of prefilters on the performance of HEPA filters". *Filtration & Separation*, April, p. 51-56.
- DAVIS, R., (2001), "Particle science and technology-a view at the millennium", *Powder Technology*, Vol. 119, p. 45-57.
- D'AMATO, G., (2000), "Urban air pollution and plant-derived respiratory allergy", *Clinical and Experimental Allergy*, Vol. 30, p. 628-636.
- DHANIYALA, S.; LIU, Y. H., (2001), "Experimental investigation of local efficiency variation in fibrous filters", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 34, p. 161-169.
- DICK, C. A.; BROWN, D. M.; DONALDSON, K.; STONE, K., (2003), "The role of free radicals in the toxic and inflammatory effects of four different ultrafine particle types", *Inhalation Toxicology*, Vol. 15, p. 39-52.
- DONALDSON, K., (2006), "Inflammatory effects and oxidative stress caused by ultrafine particles in experimental systems", *Abstracts, Toxicology Letters*, p. S1-S324.
- DONALDSON, K.; LI, X.Y.; MACNEE, W., (1998), "Ultrafine (nanometre) particle mediated lung injury", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 29, n.5, p 553-560.
- DONOVAN, R. P., (1985), *Fabric filtration for combustion sources*. New York, Marcel Dekker Inc., 426p.
- DORMAN, R., (1974), *Dust control and air cleaning*, New York, Pergamon Press, 615p.
- DOYLE, A.; MOFFETT, D. R.; VONNEGUT, B., (1964), "Behavior of evaporating electrically charged droplets", *Journal of Colloid Science*, Vol. 19, p. 136-143.
- DUARTE FILHO, D. B., (1995), *Filtração de gases em leito fixo granular: efeitos da variação do nível de carga eletrostática na partícula*, São Paulo, Escola Politécnica da USP (Tese de doutorado), 144p.
- DULLIEN, F. A. L., (1989), *Introduction to industrial gas cleaning*, San Diego, Academic Press, 285p.
- EMERICH, D. F.; THANOS, C. G., (2005), "Nanomedicine", *Current Nanoscience*, Vol. 1, n. 3, p. 177-188.
- ENGLERT, N., (2004), "Fine particles and human health – a review of epidemiological studies", *Toxicology Letters*, Vol. 149, p. 235-242.
- FALAGUASTA, M. C. R., (2005), *Estudo do desempenho de um precipitador eletrostático operando na captura de partículas submicrométricas e nanométricas*, Sao Carlos, Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, 305p.
- FERIN, J.; OBERDÖRSTER, G.; PENNEY, D. P.; SODERHOLM, S. C.; GELEIN, R.; PIPIER, H. C., (1990), "Increased pulmonary toxicity of ultrafine particles, I. particle

- clearance translocation, morphology”, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 21, n. 3, p. 381-384.
- FERIN, J., (1994), “Pulmonary retention and clearance of particles”, *Toxicological Letters*, Vol. 72, p.121-125.
- FRIEDLANDER, S. K., (2000), *Smoke, Dust, and Haze Fundamentals of Aerosol Dynamics*, 2° ed., Oxford University Press, 407 p.
- FRIEDLANDER, S. K.; PUI, D. Y. H., (2004), “Emerging issues in nanoparticle aerosol science and technology” *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 6, p. 313-320.
- FUCHS, N. A., (1964), *The mechanics of aerosol*, Dover Publications Inc., Toronto, 408p.
- GUZMAN, K. A. D., TAYLOR, M. R., BANFIELD, J. F., (2006), “Environmental risks of nanotechnology: National nanotechnology initiative funding”, *Environmental Science & Technology* Vol. 40, n. 5, p.1401-1407.
- HEIM, M.; MULLINS, B. J.; WILD, M.; MEYER, J.; KASPER, G., (2005), “Filtration efficiency of aerosol particles below 20 nanometers”, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 29, p. 782-789.
- HIDY, W.M.; BROCK, J. R., (1970), *The dynamics of aerocolloidal systems*, Pergamon Press, 1st Edition, Great Britain, 379p.
- HINDS, W. C., (1982), *Aerosol Technology Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles*, John Willey & Sons, New York, 422 p.
- HINDS, W. C., (1999), *Aerosol Technology Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles*, 2^a ed., John Willey & Sons, New York, 483 p.
- HUANG, H. L.; HUANG, Y.C.; WANG, D. M., (2004), “Aerosol filtration efficiency nonwoven filter improved by polysulfone membrane”, *Abstracts of the European Aerosol Conference*, p. S 779-S780.
- HUND-RINKE, K.; SIMON, M., (2006), “Ecotoxic effect of photocatalytic active nanoparticles TiO₂ on algae and daphnids”, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol.13, n. 4, p. 225-232.
- HOWARD, A. G.; STATHAM, P. J., (1993), *Inorganic Trace Analysis: Philosophy and Practice*, John Wiley and Sons, England, 182 p.
- IONUE, K. I.; TAKANO, H.; YANAGISAWA, R.; HIRANO, S.; SAKURAI, M.; SHIMADA, A.; YOSHIKAWA, T., (2006), “Effects of airway exposure to nanoparticles on lung inflammation induced by bacterial endotoxin in mice”, *Environmental Health Perspectives*, Vol. 114 , n.9, p. 1325-1330.
- INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION (ISO), (2004), *Occupational ultrafine aerosol exposure characterization and assessment. Draft technical report number 6.*

Particle size selective sampling and analysis (workplace air quality).
ISO/TC146/SC2WG1.

- KARAKOTI, A. S.; HENCH, L. L.; SEAL, S., (2006), “The potential toxicity of nanomaterials – The role of surfaces”, *JOM*, Vol. 58, n. 7, p. 77-82.
- KENNEDY, I.A., (2007), “The health effects of combustion-generated aerosols”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, p. 1-14.
- KIRSH, A. A. & FUCHS, N.A., (1967), “Studies on fibrous aerosol filters-11. Pressure drops in systems of parallel cylinders”, *Annals of Occupational hygiene*, Vol. 10, p. 23-30.
- KLOCKE, S. & WHYTE, W., (1999), “High efficiency air filtration”, *Cleanroom Design*, p. 157-182.
- KRUIS, F. E.; FISSAN, H., PELED, A., (1998), “Synthesis of Nanoparticles in the Gas Phase for Electronic, Optical and Magnetic Applications – a Review”, *Journal of Aerosol Science*, Vol .29, n.5/6, p. 511 - 535.
- KUEMPEL, E. D., TRAN, C. L., CASTRANOVA, V., BAILER, A. J., (2006), “Lung dosimetry and risk assessment of nanoparticles: Evaluating and extending current models in rats and humans”, *Inhalation Toxicology*, Vo. 18, n.10, p. 717-724.
- LIDE, D. R., (1997), “CRC Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press, 18 ed., New York.
- LEE, K.W., (1981), “Maximum penetration of aerosol particles in granular bed filters”, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 12, p. 79-87.
- LEE, K. W.; LIU, B. Y. H., (1980), “On the minimum efficiency and the most penetrating particle size for fibrous filters”, *Journal of the Air Pollution Control Association*, Vol. 30, n.4, p.377-381.
- LEE, K. W.; LIU, B. Y. H., (1982 a), “Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters”, *Aerosol Science and Technology*, Vol.1, p.147-166.
- LEE, K. W.; LIU, B. Y. H., (1982 b), “Experimental study of aerosol filtration by fibrous filters”, *Aerosol Science and Technology*, Vol.1, p.35-46.
- LI, Z.; WANG, H. (2003a), “Drag force, diffusion coefficient, and electric mobility of small particles. I. Theory applicable to the free-molecule regime”, *Physical Review E*, The American Physical Society, v. 68, p.061206-1-11.
- LI, Z.; WANG, H. (2003b), “Drag force, diffusion coefficient, and electric mobility of small particles. II. Application”, *Physical Review E*, v. 68, p.061207-1- 13.
- LINAK, W.P.; YOO, J.I.; WASSON, S.J.; ZHU, W.; WHENT, J. O.L.; HUGGINS, F. E.; CHEN, Y.; SHAH, N.; HUFFMAN, G. P.; GILMOUR, M. I., (2007), “Ultrafine ash aerosols from coal combustion: characterization and health effects”, *Proceedings of the Combustion Institute*, doi: .10.1016/j.proci.2006.08.086.

- LIU, B. Y.H.; RUBOW, K.L.; PUI, D. Y.H., (1990), "Performance of HEPA and ULPA filters", Proceedings of Institute of Environmental Sciences, p.25-29.
- LIU, L.; GUO, J.; LI, J.; SHENG, L., (2000), "The effect of wire heating and configuration on ozone emission in a negative ion generator", Journal of Electrostatics, Vol. 48, p. 81-91.
- LIU, B. Y. H; RUBOW, K. L., (1990), "Efficiency, pressure drop and figure of merit of high efficiency fibrous and membrane filter media", Proceedings of the 5th World Filtration Congress, Nice, 5-8 Jun., p.112.
- LOVERN, S. B.; KLAPER, R., (2006), "Daphnia magna mortality when exposed to titanium dioxide and fullerene (C-60) nanoparticles", Environmental Toxicology and Chemistry Vol. 25, n. 4, p. 1132-1137.
- LUNDBORG, M.; DAHLÉN, S.E.; JOHARD, U.; GERDE, P. JARSTRAND,C.; CAMMER, P.; LASTBOM, L., (2005), "Aggregates of ultrafine particles impair phagocytosis of microorganisms by human alveolar macrophages", Environmental Research, Vol. 15, p.1-8.
- MAYNARD,A.D., KUEMPEL,E.D., (2005), "Airborne nanostructured particles and occupational health",Journal of Nanoparticle Research, Vol. 7, n. 6, p. 587-614.
- MATTESON, M. J ; ORR, C., (1987), Filtration: principles and practices, New York, 2 Ed, 736p.
- NEAS, L. M., (2000), "Fine particulate matter and cardiovascular disease", Fuel Processing Technology, Vol. 65, p. 55- 67.
- OBERDORSTER, G.; FERIN, J.; FINKELSTEIN, G.; WABE, P.; CORSON, N., (1990), "Increased pulmonary toxicity of ultrafine particles,II Lung lavage studies", Journal of Aerosol Science, Vol. 21, n. 3, p. 384-387.
- OBERDORSTER, G.; GELEIN, R.; FERIN, J.; WEISS, B., (1995), "Association of particulate air pollution and acute mortality: involvement of ultrafine particles", Inhalation Toxicology, Vol. 71, p. 111-124.
- OGAWA, A., (1984), Separation particles from air and gases, Vol. 2, CRC Press, Boca Roton, Florida, 342p.
- OGLESBY, S. Jr.; NICHOLS, G. B., (1978), Electrostatic Precipitation, New York, Marcel Dekker INC., 367 p.
- PAYET, S.; BOULAUD, D., MADELAINE,G.; RENOUX,A., (1992), "Penetration and pressure-drop of a Hepa filter during loading with submicron liquid particles", Journal of Aerosol Science, Vol. 23, p. 723-735.
- PEKKANEN, J., (2006), "Exposure to ultrafine particles and respiratory health effects", Abstracts Toxicology Letters, S33.

- PEUKERT, W.; WANDENPOHL, C., (2001), "Industrial separation of line particles with difficult dust properties". Powder Technology, Vol. 118, p 136-148.
- PUI, D. Y. H.; CHEN, D. R., (1997), "Nanometer particles: a new frontier for multidisciplinary research", Journal of Aerosol Science, Vol. 28, n. 4, p. 539-544.
- PODGÓRSKI, A.; BALAZY, A.; GRADÓN, L., (2006), "Applications of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters", Chemical Engineering Science, Vol. 61, p. 6804-6815.
- POZZA, S. A., (2005), Identificação das fontes de poluição na cidade de São Carlos, - SP, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 104p.
- PREINING, O., (1998), "The physical nature of very, very small particles and its impact on their behavior", Journal Aerosol Science, Vol. 29, n.5/6, p. 481-495.
- PROST, W.; KRUIS, F.E.; OTTEN, F.; NIELSCH, K.; RELLINGHAUS, B.; AUER, U.; PELED, A.; WASSERMANN, E.F.; FISSAN, H., (1998), "Monodisperse aerosol particle deposition: prospects for nanoelectronics", Microelectronic Engineering, Vol. 41/42, p. 535-538.
- RAYLEIGH, LORD, (1945), Theory of sound, Vol. 2, First American Edition, Dover Publication, 504 p.
- REIST, P.C., (1993), Aerosol science and technology, 2Ed., McGraw-Hill, New York, 379p.
- RIUL, Jr., A., GALLARDO SOTO, A.M.; MELLO, S.V.; BONE, S., TAYLOR, D.M.; MATTOSO, L.H. C., (2003), "An electronic tongue using polypyrrole and polyaniline", Synthetic Metals, n. 132, p. 109-116.
- RODRIGUES, M. V., (2005), Determinação da carga eletrostática em aerossóis e seu efeito na filtração de gases, Tese de doutorado, 163p.
- RUBOW, K. L., (1981), Submicron aerosol filtration characteristics of membrane filters, PhD, Thesis, Mechanical Engineering Department, University of Minnesota, Minneapolis, Minesota.
- SEATON, A.; MACNEE, W.; DONALDSON, K.; GODDEN, D., (1995), "Particulate air pollution and accurate health effects", Lancet, Vol. 345, p. 176-178.
- SEINFELD, J. H., (1986), Atmospheric chemistry and physics of air pollution, John Willey & Sons, New York.
- SHI, J. P.; EVANS, D. E.; KHAN, A. A; HARRISON, R. M., (2001), "Sources and concentration of nanoparticles (< 10 nm diameter) in urban atmosphere", Atmospheric Environmental, Vol. 35, p. 1193-1202.
- SPURNY, K.R., (1998), Advances in aerosol filtration, CRC Press LLC, Florida, 533p.

- STECKHINA, I.B. & FUCHS, N.S., (1966), “Studies on fibrous aerosol – I Calculation of difusional deposition of aerosols in fibrous filters”, *Annals of Occupational Hygiene*, Vol. 9, p. 59-64.
- STEFFENS, J.; FALAGUASTA, M. C. R.; COURY, J. R., (2005), “Collection efficiency of a micro-fiber cellulose filter, operating on the removal of nano-sized aerosol particles”, In: *Proceedings of the Filtech 2005*, Wiesbaden, Alemanha, outubro de 2005, Vol. 2, p.306-313.
- STEFFENS, J ; POZZA, S. A.; COURY, J. R., (2006), “Removal efficiency of nanoparticles with the use of cellulose and polyester filters”, In: *Proceedings of the CHISA 2006*, CD-ROM, 11p., Praga, República Tcheca, agosto de 2006.
- STENHOUSE, J. I. T.; TROTTIER, R., (1991), “The loading of fibrous filters with submicron particles”, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 22, n. 1, p. S777- S780.
- STENHOUSE, J. I. T., (1975), “Filtration of air by fibrous filters”, *Filtration & Separation*, May/Jun, p. 269-274.
- STRAUSS,W., (1975), *Industrial gas cleaning: an principles and practice of the control gaseus and particulate emissions*, 2 Ed. Pergamon Press, New York, 354p.
- TARDOS, G.I., ABUAF, N. e GUTFINGER, C., (1978), “Dust deposition in granular bed filters: theories and experiments”, *Journal Air Pollution Assoc.*, Vol. 28, p354.
- TARDOS, G. I; PFEFFER, R., (1980), “Interceptional and gravitational deposition of inertialess particles on a single sphere in a granular bed”, *AIChE Journal*, Vol. 26, n. 4, p.698-701.
- TSI, “Manual de Operação do Electrospray Aerosol Generator, Modelo 3480”, disponível em: <<http://www.tsi.com>>.
- TSUJI, J. S., MAYNARD, A. D., HOWARD, P. C., JAMES, J. T., LAM, C. W.; WARHEIT, D. B., SANTAMARIA, A. B., (2006), “Research strategies for safety evaluation of nanomaterials, part IV: Risk assessment of nanoparticles”, *Toxicological Sciences*, Vol.89, n. 1, p. 42-50.
- TURNER, R. K, (1995), *Sustainable Environmental Economics and Management*, John Wiley & Sons, England, 395 p.
- VAN OSDELL, D. W.; LIU, B. Y. H.; RUBOW, K. L.; PUI, D. Y. H., (1990), “Experimental study of submicrometer and ultrafine particle penetration and pressure drop for high efficiency filters”, *Aerosol Science and Tecnology*, Vol. 12, p. 911-925.
- WALSH, D. C.; STENHOUSE, J. I. T., (1997), “The effect of particle size, charge, and composition on the loading characteristics of an electrically active fibrous filter material”, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 28, n. 2, p. 307-321.

- WATANABE, T.; TOCHIKUBO, F.; KOIZUMI, Y.; TSUCHIDA, T.; HAUTANEN, J.; KAUPPINEN, E. I., (1995), "Submicron particle agglomeration by an electrostatic agglomerator", *Journal of Electrostatics*, Vol. 34, p. 367-383.
- WEBB, P. A.; ORR, C., (1997), *Analytical methods in fine particle technology; micromeritics instruments Corp.*; Norcross, 24p.
- WERNER, M.; NICO, P.; GUO, B.; KENNEDY, I.; ANASTASIO, C., (2006), "Laboratory study of simulated atmospheric transformations of chromium in ultrafine combustion aerosol particles" *Aerosol Science and Technology*, Vol. 40, n. 7, p.545-556.
- WILLEKE, K.; BARON, P.A., (1993), *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications*, Van Nostrand Reinhold, New York, 876 p.
- WILLIAMS, D. B.; CARTER, C. B., (1996), *Transmission Electron Microscopy*, Plenum Press, New York, 729 p.
- WILSON, M. R.; LIGHTBODY, J. H.; DONALDSON, K.; SALES, J.; STONE, V., (2002), "Interactions between ultrafine particles and transition metals in vivo and in vitro", *Toxicology and Applied Pharmacology*, Vol. 184, p. 172-179.
- YANG, S.; LEE, G. W. M., (2005), "Filtration characteristics of a fibrous filter pretreated with anionic surfactants for monodisperse solid aerosols", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 36, p. 419-437.
- YOO, K. H.; LEE, J. S.; OH, M. D., (1997), "Charging and collection of submicron particles in two-stage parallel-plate electrostatic precipitator", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 27, p. 308-323.
- ZHIQIANG, Q.; SIEGMANN, K.; KELLER, A.; MATTER, U.; SCHERRER, L.; SIEGMANN, H. C., (2000), "Nanoparticle Air pollution in Major Cities and its Origin", *Atmospheric Environment*, Vol. 34, p. 443-451.
- ZHOO, Z. M.; TARDOS, G. I.; PFEFFER, R., (1990), "Separation of aerosols in electrostatically enhanced fibrous filter", *Processing of the Second World Congress on Particle Technology*, Kyoto, September 19-22.

APENDICE A

Determinação do diâmetro das fibras

A metodologia de determinação do diâmetro das fibras está apresentado no Capítulo 3. Aqui se mostra mais uma Figura do filtro HEPA obtida pelo MEV A.1 com aumento de 10000 vezes e analisada no Programa Image Pró Plus.

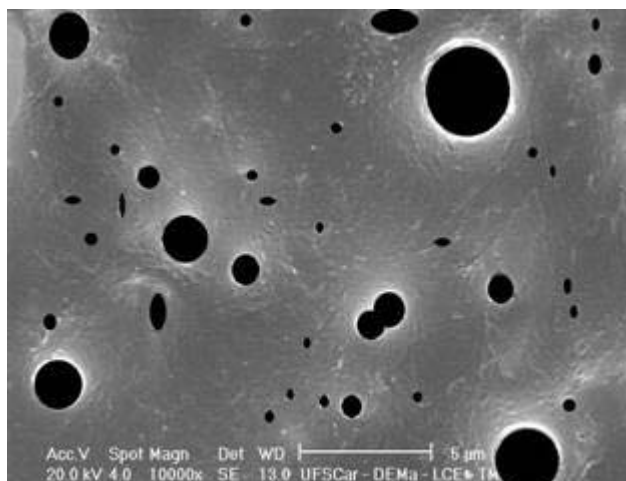


Figura A. 1 - Foto do filtro HEPA obtida pelo MEV com aumento de 10000 vezes, analisada com o Programa Image Pró Plus.

Pode-se verificar que com o aumento da foto tem-se maior facilidade em visualizar as fibras, mas tem-se a desvantagem de ter-se um número pequeno de fibras.

No Programa Image Pró Plus, existe uma opção onde se pode selecionar o que se deseja. No caso o que se desejava era o diâmetro das fibras. Então se selecionou toda a Figura, após já estarem pintadas manualmente as fibras, e o próprio programa fornece todos os diâmetros das mesmas.

APENDICE B

Detalhes do Gerador de Partículas

O funcionamento do gerador possui vários estágios, que estão diretamente ligados à tensão aplicada, e podem ser determinados a partir da forma geométrica da ponta do capilar, vista por uma janela, presente no equipamento. Quando a tensão é muito baixa, o estágio é chamado de modo gotejante, e é caracterizado pelo formato arredondado da ponta do capilar, devido à baixa frequência com que as gotas saem do capilar. Com o aumento da tensão, há uma elevação da corrente medida, que era praticamente zero no estágio anterior, e um aumento da frequência com que as gotas deixam o capilar. Este estágio, denominado modo pulsante, é muito instável. O próximo estágio, obtido com o aumento da tensão, é o modo jato cônico (Figura B.1). Durante este estágio, a corrente se mantém praticamente constante com o aumento da tensão, e a forma de saída do capilar é cônica. Um novo aumento da tensão não é aconselhável, devido à formação de um alto campo elétrico, que caracteriza o modo corona, deixando a geração de aerossol muito instável. De acordo com CHEN et al. (1995) o modo jato cônico é o que apresenta melhores resultados, quando se estuda o caráter monodisperso do aerossol gerado.

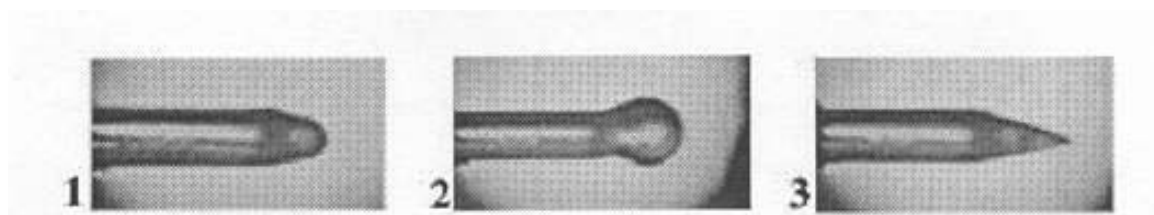


Figura B. 1 - Representação dos modos de operação do gerador: 1) sem escoamento de líquido, 2) modo gotejante e 3) modo jato cônico (Manual da TSI).

O gerador possui uma fonte de Amerício 241 para neutralizar as cargas, que emite raios alfa e possui energia igual a 5 millicurie. A etapa de neutralização do gerador de partículas é necessária para que as cargas, na superfície das gotas, sejam reduzidas, evitando que as forças repulsivas entre as mesmas possam causar o efeito de desintegração Rayleigh, diminuindo a concentração de aerossol monodisperso (TSI). De acordo com RAYLEIGH (1945), as cargas têm dois efeitos sobre as gotas: quando em pequenas quantidades, elas causam não a repulsão, mas a coalescência das gotas, aumentando o tamanho das mesmas; o outro efeito é que as cargas elétricas tendem a diminuir a esfericidade das gotas, tornando-as instáveis. Com a evaporação do líquido, eleva-se a densidade de cargas na superfície das gotas, aumentando o efeito causado pelas cargas sobre as mesmas e, quando este se iguala à tensão superficial da gota, ocorre a desestabilização. A partir deste ponto, a gota pode ejetar parte de sua massa inicial em várias gotas menores, cujo número dependerá da massa inicial (DOYLE et al. 1964) e, assim, influenciar a distribuição granulométrica do material gerado. Uma vista mais detalhada do gerador com ampliação do capilar de 40 μm é mostrado na Figura B.2.

O resultado de todo o processo que ocorre no gerador é um aerossol composto de partículas monodispersas, neutras e estáveis.

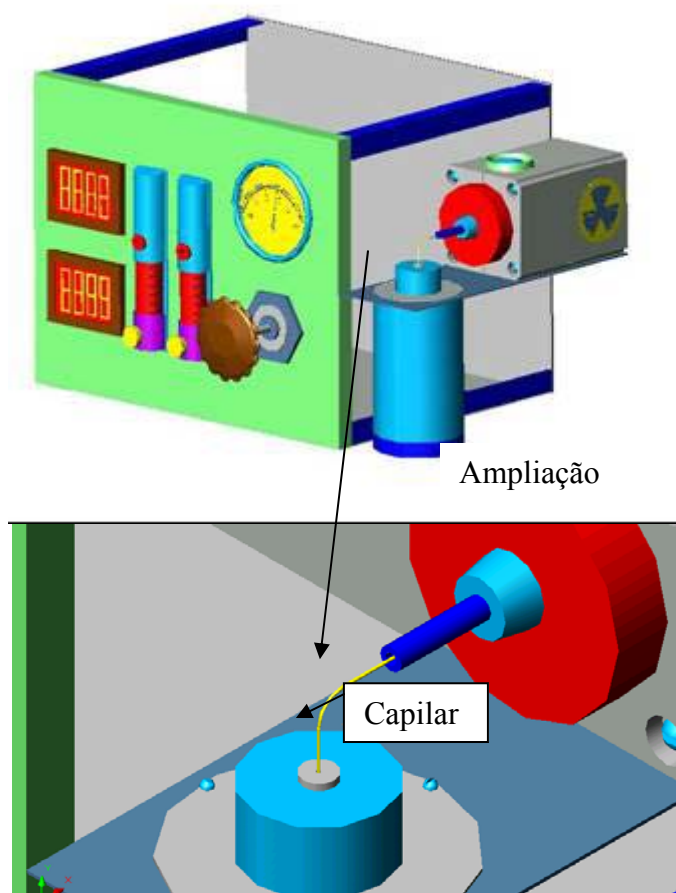


Figura B. 2 - Vista do gerador de partículas com ampliação do capilar.

APÊNDICE C

Determinação das condições de operação do gerador

Com o intuito de determinar qual a melhor tensão aplicada de modo que a geração de partícula transcorresse somente no modo jato-cônico, curvas de corrente-tensão foram construídas para todas as condições analisadas. Para tanto, foram preparadas diversas soluções com concentrações diferentes e variando entre 0,5 e 5,0 g/L. Concentrações menores que 0,5 g/L não foram apresentadas dada a possibilidade de gerar partículas fora do limite de detecção do contador. Esta hipótese foi assumida a partir dos ensaios realizados com o capilar de 25 μm de acordo com FALAGUASTA (2005). As soluções preparadas não possuíam condutividades similares, devido ao emprego de diferentes massas de cloreto de sódio, o eletrólito utilizado. Valores de condutividade para diversas concentrações de cloreto de sódio estão apresentados na Tabela C.1. Este parâmetro influi na formação e diâmetro das partículas de acordo com CHEN et al. (1995). Para altos valores de condutividade, acima de 5 g/L, a saída do capilar torna-se instável e inviabiliza uma boa geração de partículas.

Para cada uma das soluções preparadas, foi determinada a curva de corrente por tensão do gerador, de modo que fosse possível avaliar qual a tensão em que o gerador estaria trabalhando no modo jato-cônico. Uma vez que as soluções possuíam condutividades diferentes, o ponto em que o equipamento operava com melhores resultados, quanto a monodispersão das partículas, não era o mesmo.

Tabela C. 1 - Condutividade das soluções de diversas concentrações de NaCl.

Concentrações (g/L)	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)
0,1	190
0,5	968
1,0	1.866
1,5	2844
2,5	4.540
5,0	7.660
10,0	14.300

Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras C.1 a C.10, os resultados são similares aos obtidos por FALAGUASTA (2005), por serem trabalhadas nas mesmas condições. As Figuras não possuem a mesma escala para facilitar a visualização.

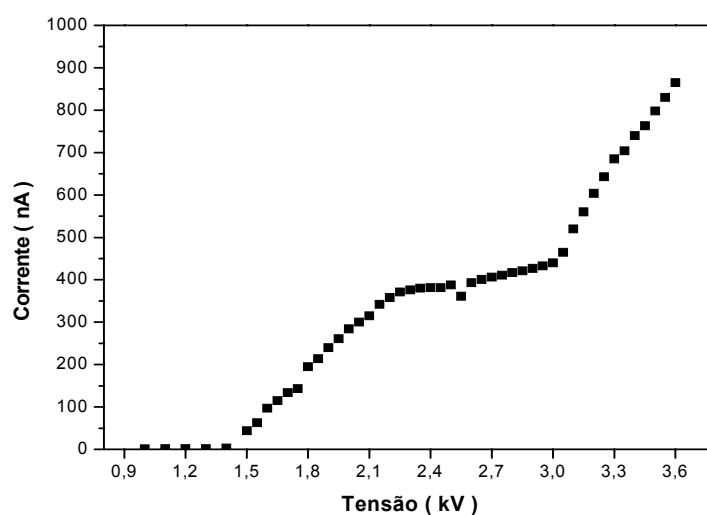


Figura C. 1 - Curva corrente-tensão para a solução de NaCl com concentração de 0,5g/L.

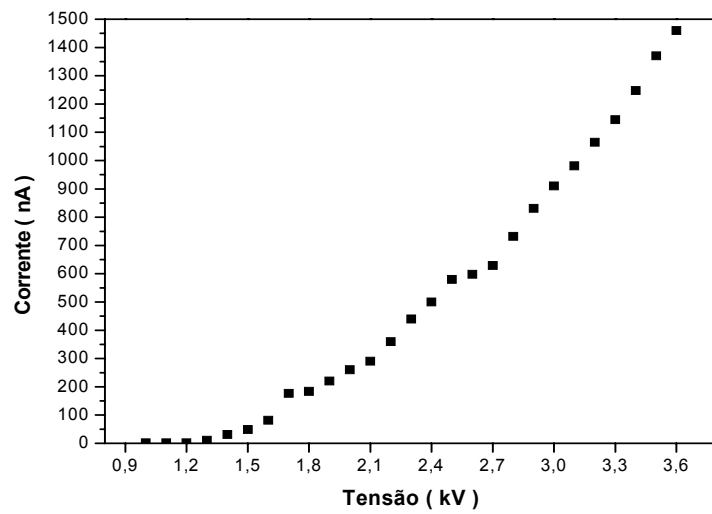


Figura C. 2 - Curva corrente-tensão para a solução NaCl com concentração 1,0 g/L.

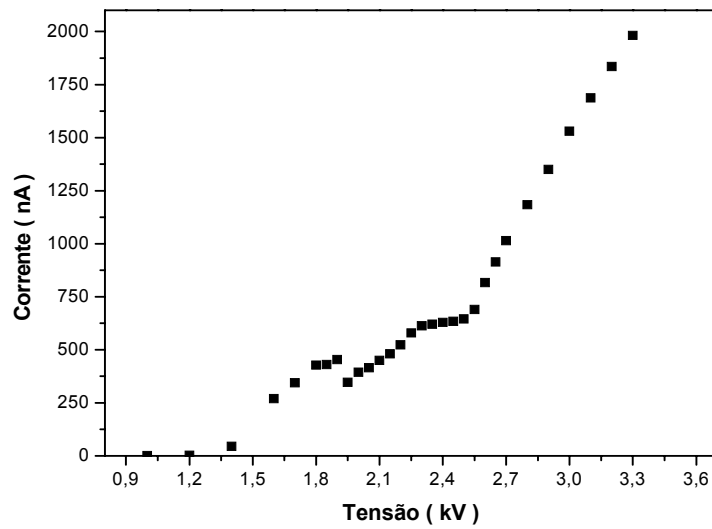


Figura C. 3- Curva corrente-tensão para a solução de NaCl com concentração de 1,5 g/L.

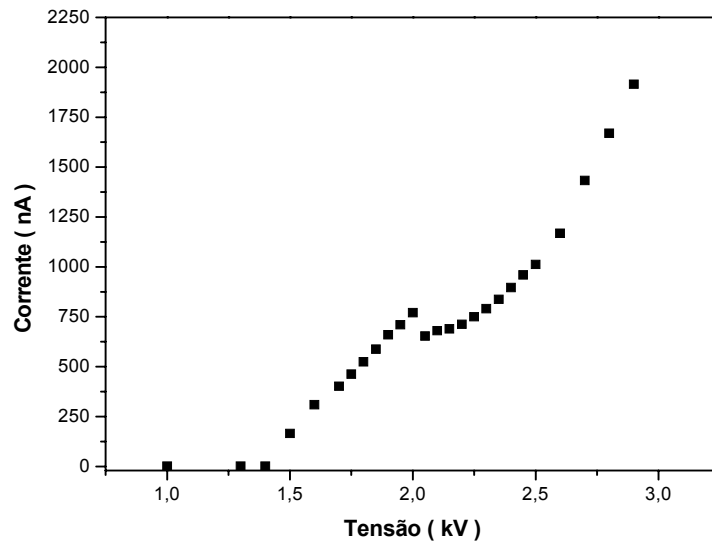


Figura C. 4 - Curva corrente-tensão para a solução de NaCl com concentração de 2,0 g/L.

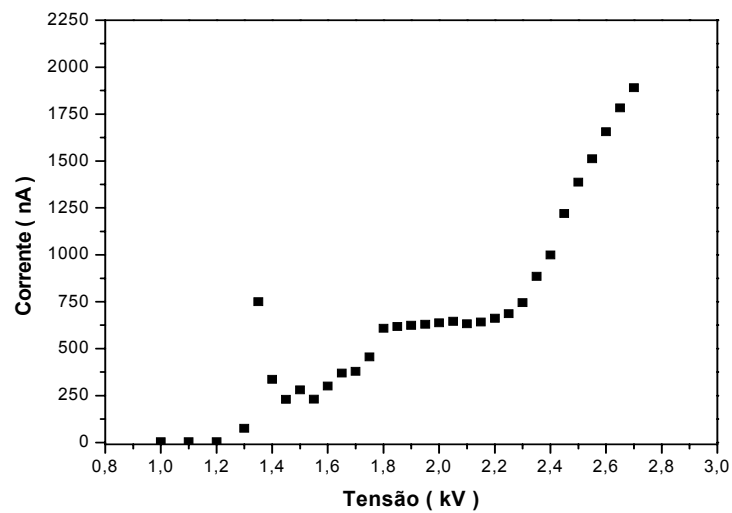


Figura C. 5 - Curva corrente-tensão para a solução de NaCl com concentração de 2,5 g/L.

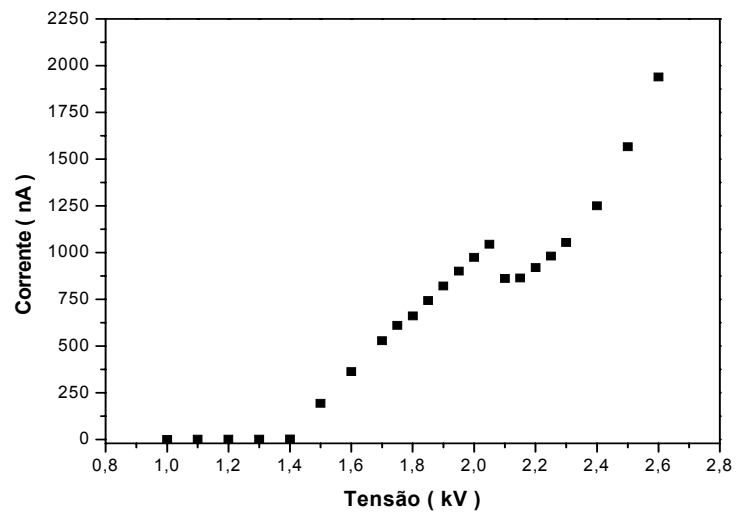


Figura C. 6 - Curva corrente-tensão para a solução de NaCl com concentração de 3,0 g/L.

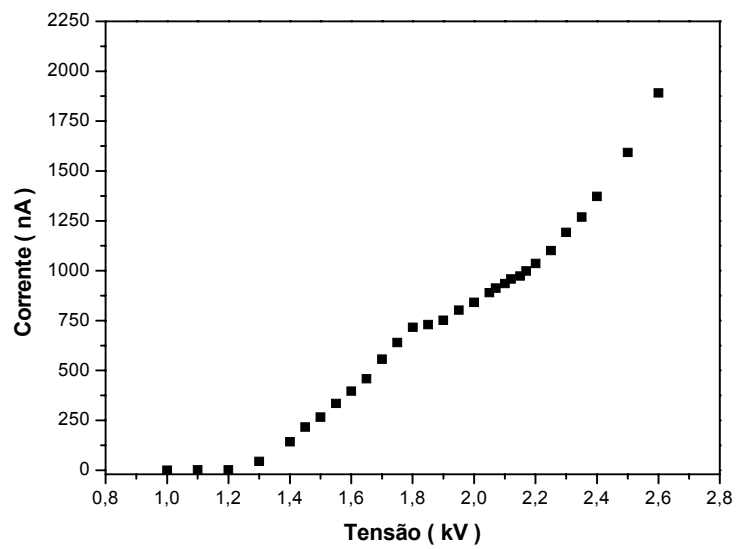


Figura C. 7 - Curva corrente-tensão para a solução de NaCl com concentração de 3,5 g/L.

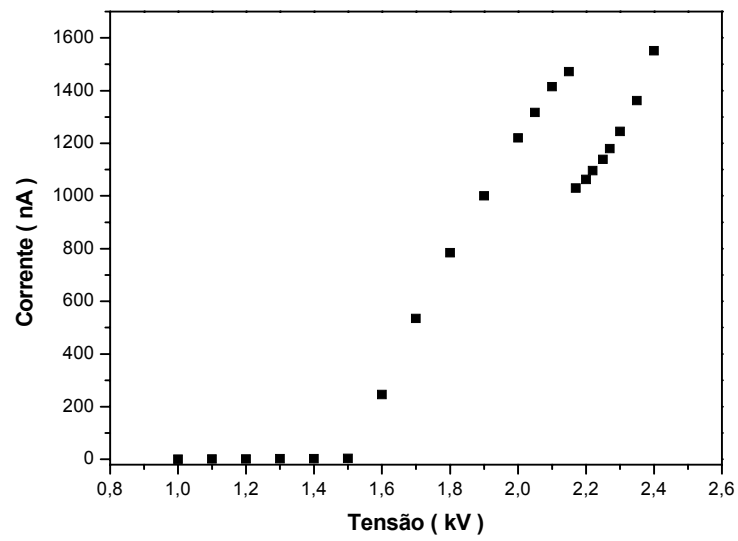


Figura C. 8 - Curva corrente-tensão para a solução de NaCl com concentração de 4,0 g/L.

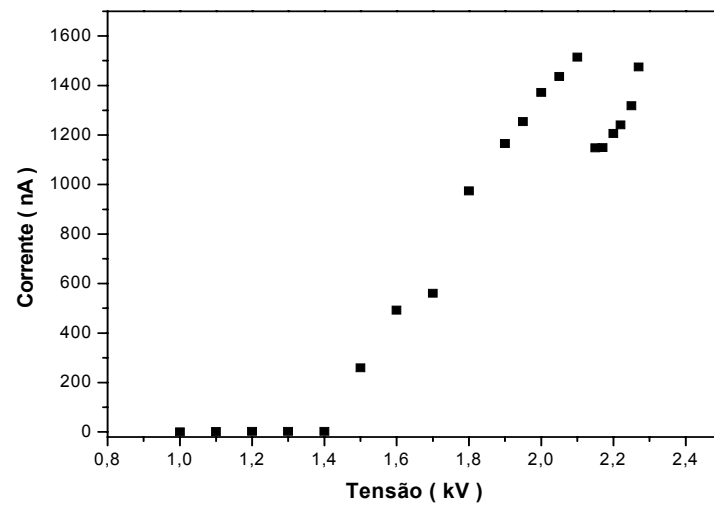


Figura C. 9 - Curva corrente-tensão para a solução de NaCl com concentração de 4,5 g/L.

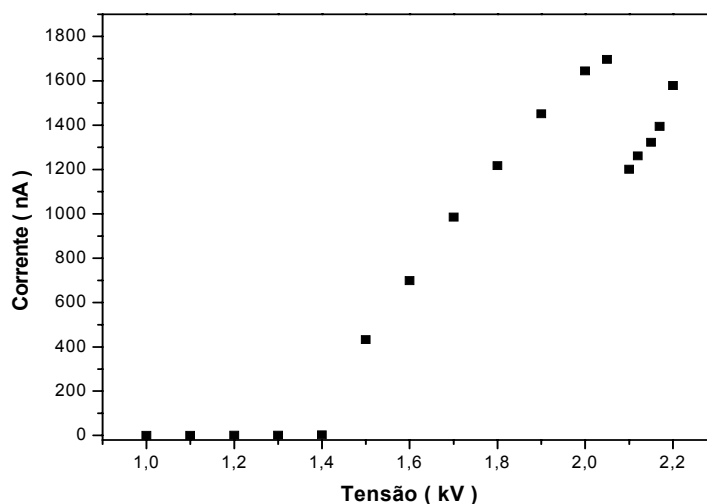


Figura C. 10 - Curva corrente-tensão para a solução de NaCl com concentração de 5,0 g/L.

Pode-se observar que todos os gráficos de corrente em função da tensão apresentaram um comportamento ascendente, uma vez que havia um aumento da tensão aplicada, era esperado um aumento da corrente gerada. Contudo, a sensibilidade ao aumento da tensão não foi a mesma para todas as concentrações analisadas. As soluções mais concentradas e, por consequência, as que possuíam maior condutividade, apresentaram maior incremento de corrente.

A tendência observada foi o aumento da corrente, até um ponto em que ocorria uma pequena queda, mais pronunciada para alguns gráficos, seguida em alguns casos por um período de constância. Este último comportamento, a região constante, é o resultado da operação no modo jato-cônico, aquele que mantém a distribuição mais uniforme, descrito no Apêndice B. Para as concentrações acima de 3,5 g/L, não houve a constância, logo após um pico, houve uma queda brusca seguida de aumento da corrente. Nestes casos o modo jato-cônico foi determinado apenas visualmente, e sempre esteve compreendido no ponto logo após o pico. Para a concentração igual a 3,5 g/L, o modo jato-cônico também não apresentou o comportamento padrão, ou seja, o pico, mas o aumento com a elevação da tensão foi menor,

quase constante para uma certa região. A curva obtida para a condição 0,5 g/L também foi um pouco diferente do retratado. A região invariável perdurou por um grande período, sendo perturbada apenas por um ponto após o qual começou a demonstrar as características do modo de interesse. É provável que as concentrações mais altas tenham apresentado um comportamento diferente em virtude da alta condutividade das mesmas, sendo talvez necessário incremento de tensão muito menor para observar o fenômeno como um todo.

O comportamento geral obtido foi próximo ao encontrado por CHEN et al. (1995), no qual se destaca a região em que a corrente se torna constante com o aumento da tensão e que caracteriza o modo de jato-cônico. Determinou-se assim, a melhor condição para a operação do equipamento. A diferença na curva, encontrada por CHEN et al. (1995) e a deste estudo, é que os referidos autores observaram uma separação pronunciada entre o modo pulsante e o modo jato-cônico, o que não ocorreu de uma forma geral neste trabalho, havendo um aumento da corrente até atingir o modo jato-cônico. Os autores apontam que o modo pulsante também apresenta uma certa estabilidade com o incremento da tensão, o que não foi tão pronunciado neste estudo. Descrevem, ainda, um pico na curva, que pode ocorrer quando o incremento de tensão é bem pequeno, chamado de modo bala de prata, devido ao formato da ponta do capilar apresentar um formato alongado, porém sua duração é curta. Contudo, o resultado obtido neste trabalho está de acordo com o manual do fabricante, que caracteriza o modo gotejante por grandes bolhas e corrente quase nulas, e o pulsante pelo incremento da corrente com a elevação da tensão, até atingir um pico.

Ademais dos resultados da corrente elétrica produzida para cada tensão aplicada, também foi visualizado, através da janela do equipamento, a aparência do jato que deixava o capilar. A partir destas observações, era possível visualizar a mudança de forma da ponta do capilar com o aumento da tensão, passando de grandes bolhas, para um formato mais fino e deste para um mais curto e arredondado nas pontas, até atingir a forma cônica e próxima a

forma do próprio capilar. A visualização foi muito próxima da descrita pelo fabricante do equipamento e mencionada previamente. Estas avaliações visuais da uniformidade, constância e aparência do jato foram comparadas com a Figura B.1, apresentada no Apêndice B, e com a descrição dos modos de geração, para que houvesse uma escolha da tensão, ou faixa de tensão, que melhor representasse a operação do gerador no modo jato-cônico.

A partir destas observações concluiu-se que a faixa de constância da curva, após a pequena queda da corrente na concentração de 0,5 g/L, era a que representava o modo jato-cônico, pois somente nesta fase era possível a visualização da forma cônica do capilar.

As condições de operação utilizadas foram determinadas a partir dos gráficos e observações descritas e estão apresentadas na Tabela C.2.

Tabela C. 2 - Tensões aplicadas para as diversas concentrações de NaCl.

Concentrações (g/L)	Tensão (kV)
0,5	2,8
1,0	2,6
1,5	2,4
2,0	2,14
2,5	2,15
3,0	2,14
3,5	2,15
4,0	2,16
4,5	2,15
5,0	2,09

APENDICE D

Determinação do diâmetro das partículas de NaCl geradas

Para o capilar de 40 μm , utilizando soluções de cloreto de sódios com concentrações iguais a 0,5, 1,0, 1,5, 2,5; 4,5 e 5,0 g/L, os resultados podem ser observados na Figura D.1 a D.5, com exceção da maior concentração apresentada previamente no capítulo Resultados e Discussões, na Figura 4.1.

As fotografias mostradas apresentaram baixa quantidade de partículas e pouca resolução. Isto pode ter ocorrido devido ao fato de não haver grande quantidade de partículas depositadas nas grades e ao MET apresentar certa dificuldade em ajustar o foco. Também não se mostrou nas Figuras a mesma unidade de ampliação devido às fotografias apresentarem poucas partículas depositadas, principalmente nas concentrações até 1,5.

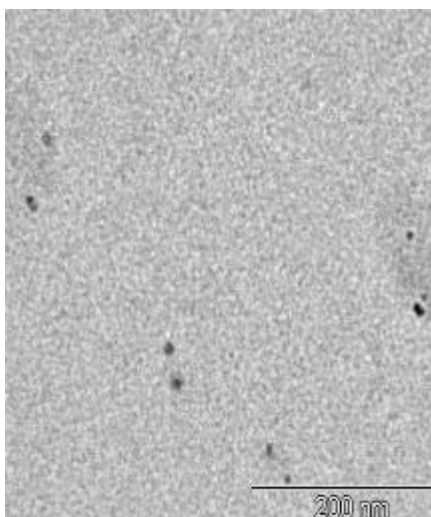


Figura D. 1 - Partículas obtidas com a solução de NaCl de concentração de 0,5 g/L.

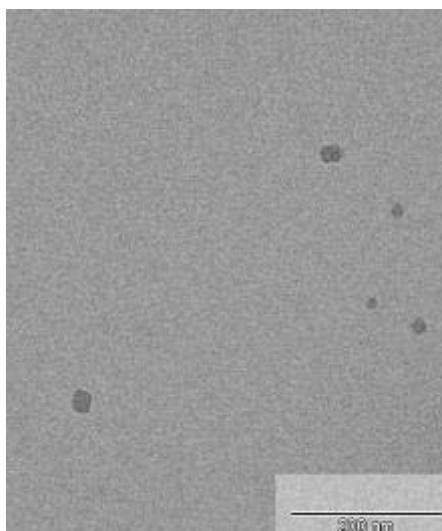


Figura D. 2 - Partículas obtidas com a solução de NaCl de concentração 1,0 g/L.

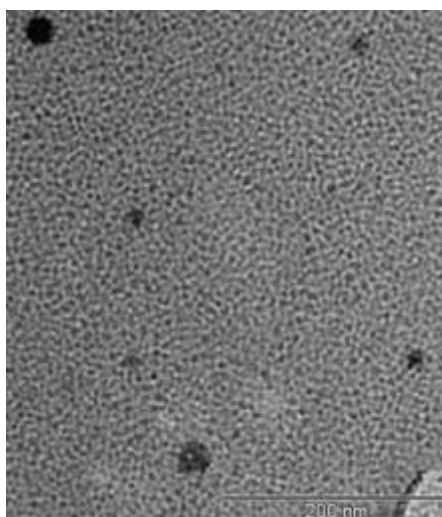


Figura D. 3 - Partículas obtidas com a solução de NaCl de concentração de 1,5 g/L.

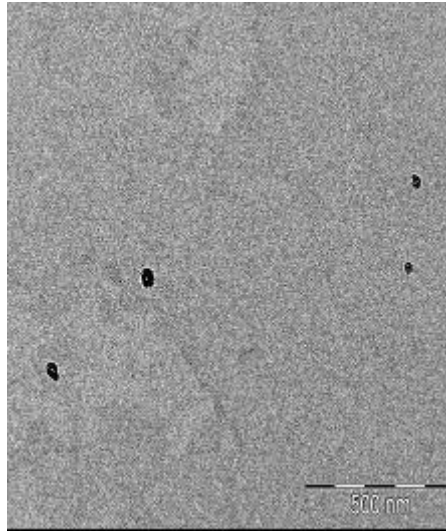


Figura D. 4 - Partículas obtidas com a solução de NaCl de concentração de 2,5 g/L.

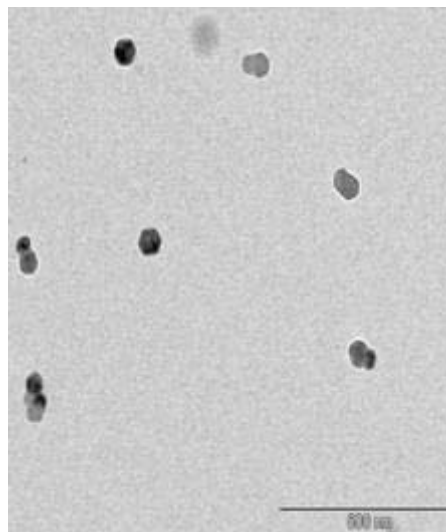


Figura D. 5 - Partículas obtidas com a solução de NaCl de concentração de 4,5 g/L.

A quantidade de partículas obtidas foi razoavelmente próxima a depositada por BANG & MURR (2002) em um porta-amostra de MET. A comparação foi feita visualmente e para um pequeno aumento, pois os autores citados focaram apenas um pequeno aglomerado para cada foto com maior diâmetro.

Para comprovar que as partículas coletadas eram especificamente as geradas e não outros contaminantes presentes no ar foram realizadas micro análises através do MET. Elas foram realizadas para as concentrações de 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 e 4,5g/L. Os resultados estão apresentados nas Figura D.6 a D.10.

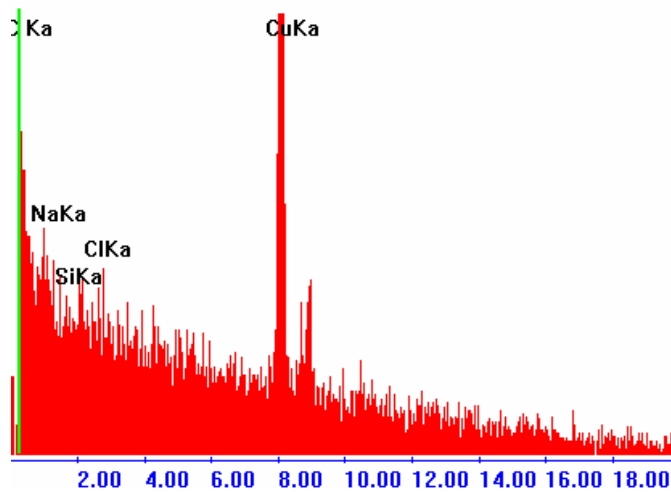


Figura D. 6 – Micro análise para a amostra com concentração de NaCl 0,5 g/L.

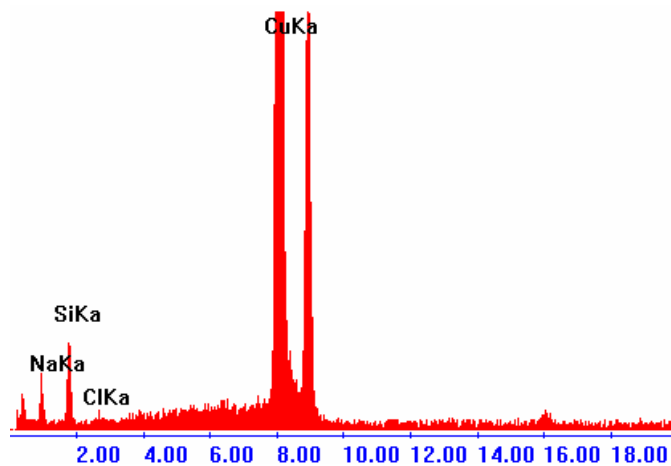


Figura D. 7 – Micro análise para a amostra com concentração de NaCl de 1,0 g/L.

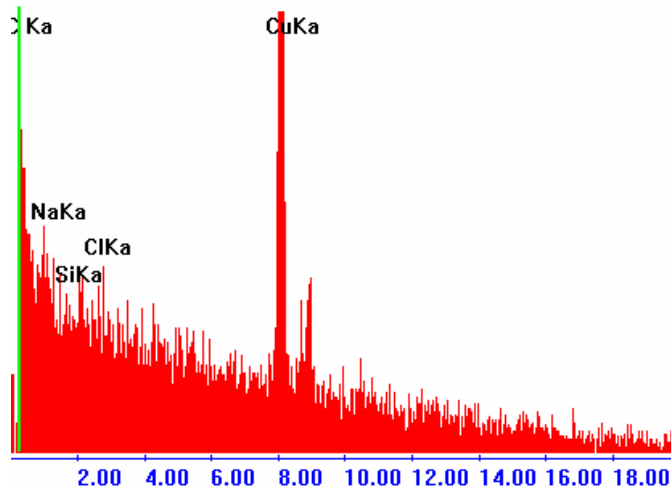


Figura D. 8 – Micro análise para a amostra com concentração de NaCl de 1,5 g/L.

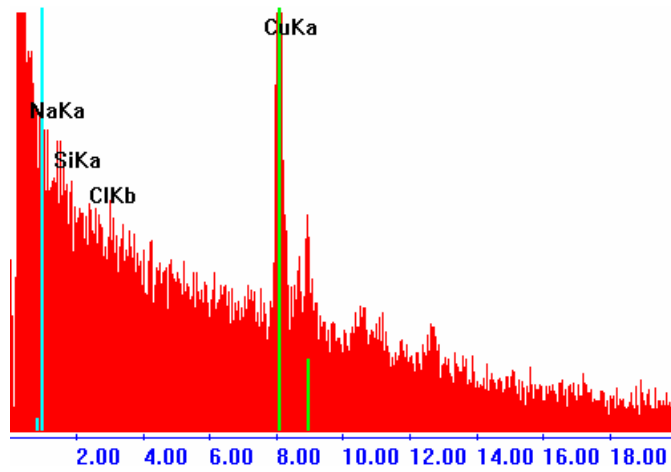


Figura D. 9 – Micro análise para a amostra com concentração de NaCl de 2,5 g/L.

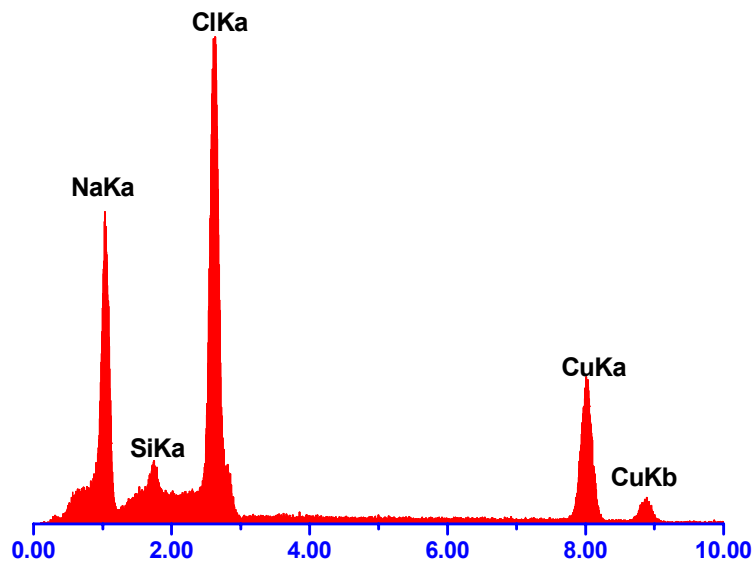


Figura D. 10 – Micro análise para a amostra com concentração de NaCl de 4,5 g/L.

Pode ser observado nas figuras que alguns picos contém Na e Cl que são visualizados pelas demarcações nas figuras relacionadas. Nestas, eles são grafados como NaKa, ClKa e ClKb, que representam o elemento químico e o tipo de raio X emitido, ou seja, o tipo K alfa ou beta.

Quando a quantidade de material depositado na grade é pouca, WILLIAMS & CARTER (1996) afirmam que deve ser feita a análise na escala dos ruídos, ou seja, diminuir a escala para que se possa visualizar melhor os picos com baixa concentração. Segundo os autores, os picos não são confundidos com o ruído porque eles aumentam com o tempo, enquanto os últimos permanecem constantes. Esta sugestão foi aceita neste trabalho, mas não foi possível realizar a análise até que os picos se destacassem mais, porque o material se degrada com a exposição aos feixes de elétrons.

Os picos com maior intensidade que os de Na e Cl, são os picos de emissão de cobre referentes aos raios K alfa e beta, de carbono e de silício. O primeiro aparece em grande quantidade, devido a ser este o material que compõe a grade de coleta. O pico de carbono, localizado na extremidade esquerda da figura D.4, próximo ao sódio, ocorreu devido à tentativa de fixar a grade no suporte de amostragem com uma resina à base de carbono, material que pode ser inserido no MET sem danificá-lo. O último pico mencionado, o de silício, ocorre, provavelmente, devido à contaminação da grade com impurezas do ar, que podem ser depositadas durante a coleta das partículas, durante o manuseio das amostras ou talvez até por uma ineficiência dos filtros de ar que precedem o equipamento. A concentração igual a 5,0 g/L favoreceu a formação de partículas maiores que possibilitaram melhores condições para a realização da microanálise. Nesta figura os picos são nítidos e bem maiores que os outros, pois foi possível focar diretamente na partícula evitando os efeitos externos.

Uma vez que as fotos das partículas apresentavam formatos próximos ao esférico Figuras D.1, D.2 e D.3, para as menores concentrações, e formato quadrado, para a maior

concentração Figura 4.1, optou-se por quantificar a esfericidade das mesmas. De acordo com Wadell apud CLIFT et al. (1978), a esfericidade da partícula é determinada a partir da área superficial de uma esfera de mesmo volume. Uma vez que as imagens obtidas com o MET são bidimensionais, não é possível saber o volume das partículas. Nestes casos, o autor sugere o uso do grau de circunfericidade, definido como a razão entre o perímetro de uma esfera com a mesma área projetada da partícula e o perímetro da partícula propriamente dita. Este parâmetro foi calculado para as partículas analisadas, através do analisador de imagens Image Pro-Plus, sendo seu valor igual a 1, para as concentrações iguais a 0,5, 1,0 e 1,5 g/L, ou seja, partículas esféricas, enquanto, para a concentração de 5,0 g/L, ele resultou, em um número um pouco inferior, igual a 0,95. Os valores do parâmetro de circunfericidade para a esfera e para o cubo são respectivamente, 1 e 0,89, sendo o desvio máximo entre estes valores e os experimentais de 6,7%, para a maior concentração. Visualmente, as partículas para as concentrações mais baixas são aparentemente esféricas e, para a concentração maior, cúbicas. Concluiu-se, então, que as partículas são esféricas para as concentrações menores e, com o aumento da concentração, vão perdendo esta forma e adquirindo a cúbica, que é a forma dos cristais de cloreto de sódio comumente encontrada na natureza.

A formação de um cristal, segundo BERMINGHAM et al. (2002), está associada à supersaturação da solução, pois, nesta condição, é possível transpor a resistência da tensão do líquido e formar a primeira partícula insolúvel. A supersaturação pode ocorrer pela variação da concentração do soluto, temperatura ou pressão. Uma das formas de alterar a concentração da solução é através da evaporação do solvente, método empregado no gerador utilizado. Este gerador também adota a técnica de atomização da solução, a que produz cristais menores.

A forma do cristal, de acordo com os autores BERMINGHAM et al. (2002), está associada à fase de nucleação do mesmo, ou seja, formação da primeira partícula insolúvel e à sua fase de crescimento, podem ser alteradas, em função das condições de supersaturação, de

interação entre o solvente e o cristal, do solvente utilizado, entre outras. O cristal será mais isométrico quanto menor a saturação e formatos menores, ou em fase inicial de crescimento, tendem a adquirir formas que minimizem a energia na superfície do mesmo.

Com base nestes relatos, concluiu-se que é possível que os cristais de NaCl gerados possuam formas diferentes provocado pela diferença de concentração da solução inicial, criando condições diferentes de supersaturação, com a evaporação da água contida na gota de solução de NaCl. Outro fator interessante é que os cristais, em fase inicial de crescimento, tendem a adquirir formas mais isométricas e de menor energia, o que pode ter levado os cristais menores a não crescerem, em função da pequena quantidade de massa contida na gota, e adotarem a forma esférica. A Figura D.11 apresenta cristais de NaCl, com formas diferentes, obtidas em diferentes processos, e, entre elas, pode ser observada a forma esférica e a quadrada, próximas às encontradas nas análises com MET.



Figura D. 11 -Várias formas do cristal de NaCl (BERMINGHAM et al., 2002).

CHEN et al. (1995) também determinaram o tamanho das partículas gerados com o emprego do Electro spray Aerosol Generator, utilizando um sistema composto por um

analisador, cujo princípio é a mobilidade elétrica da partícula (DMA, TSI, modelo 3071) e contador do tipo condensador como o empregado neste estudo (UCPC, TSI, modelo 3025). As condições, porém foram diferentes. Os autores trabalharam com uma solução de sacarose em 0,1% em massa e condutividade de 299 e 1077 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e com um capilar com diâmetro muito maior que o utilizado neste estudo, igual a 81 μm . Os autores obtiveram um diâmetro de partícula igual a 28 e 16 nm para as respectivas condições, quando operando no modo jato-cônico, mostrando a influência da condutividade da solução no tamanho do diâmetro obtido. Observaram, ainda, que os diâmetros tenderam a uma elevação com a alteração do tipo de jato com que a solução deixava o capilar.

APÊNDICE E

Avaliação do desempenho do gerador

Para a geração de partículas monodispersas, empregando o Electro Spray Generator, era importante que se mantenha o formato do jato que deixava o capilar, na forma cônica. Para isso observou-se, que a vazão de ar e CO₂ utilizadas, deveriam ser, respectivamente, 2,0 e 0,3 L/min. Como a vazão de CO₂ variava ligeiramente com o tempo, avaliou-se a sua interferência na geração de partículas e foi observado que a quantidade gerada cai pela metade quando a vazão dobra, como pode ser visualizado nas Figuras E.1 e E.2.

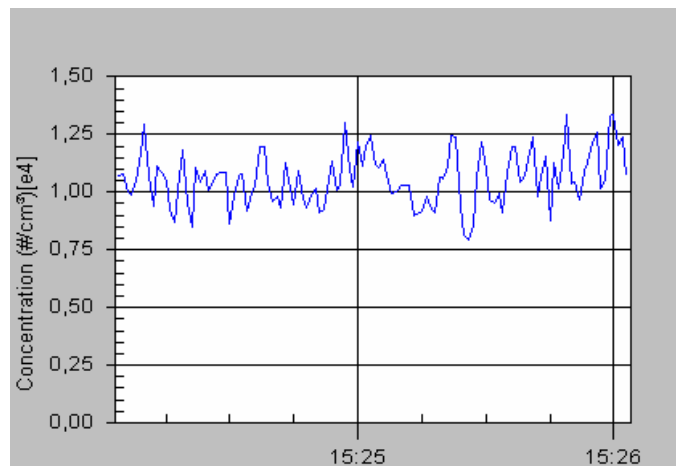


Figura E. 1 - Vazão de 0,1 L/min com concentração média de Na Cl de $1,06 \cdot 10^4 \text{ #/cm}^3$.

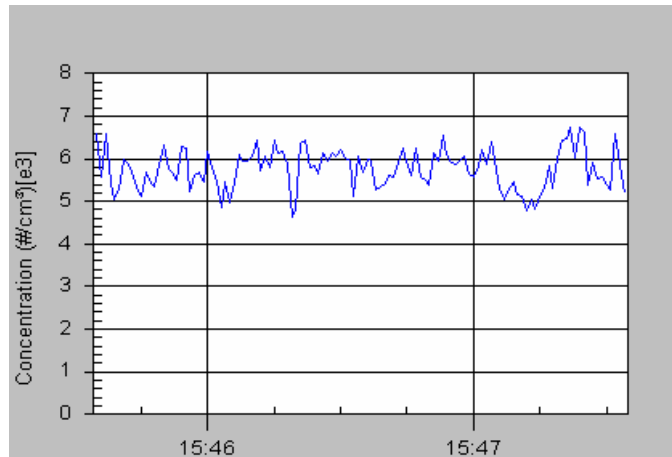


Figura E. 2 -Vazão de 0,2 L/min com concentração média de NaCl de $5,76 \cdot 10^3 \text{ #/cm}^3$.

Durante estes ensaios, constatou-se que, com o tempo, havia formação de acúmulos nas laterais do capilar, o que causava alterações na concentração de partículas, diminuindo o número das mesmas até que os aglomerados eram arrastados e dispersos na corrente, aumentando novamente a concentração. A formação era mais freqüente para a vazão de CO_2 mais alta e para a solução de cloreto de sódio mais concentrada. Contudo, este fenômeno não acontecia em todos os capilares, apenas alguns apresentavam acúmulo de partículas, provavelmente, por imperfeições na ponta que favoreciam o depósito de material. As Figuras E.3 a E.5 apresentam o efeito do acúmulo para a vazão de gás carbônico igual a 0,3 L/min, através da qual pode ser notado que o efeito era rápido e ocorria, em alguns casos, com freqüência.

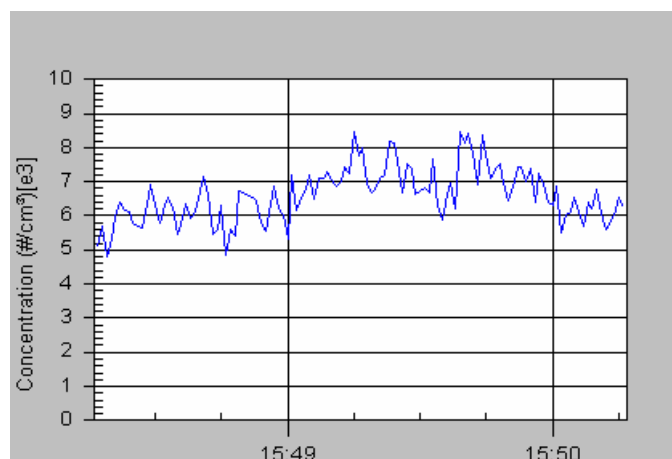


Figura E. 3 - Efeito do acúmulo de NaCl para os primeiros 2 min.

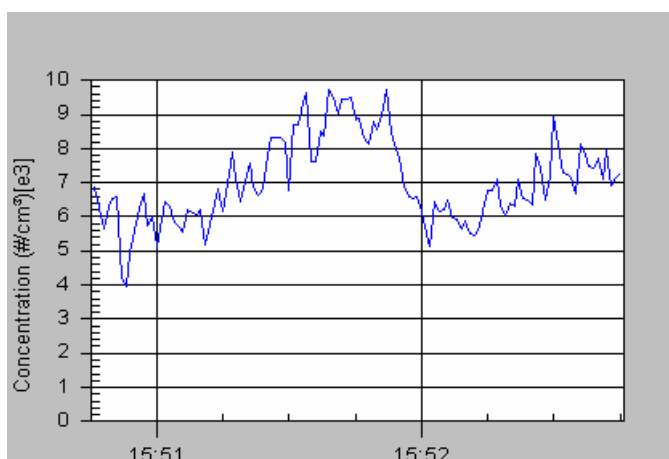


Figura E. 4 - Efeito do acúmulo de NaCl após 2 min.

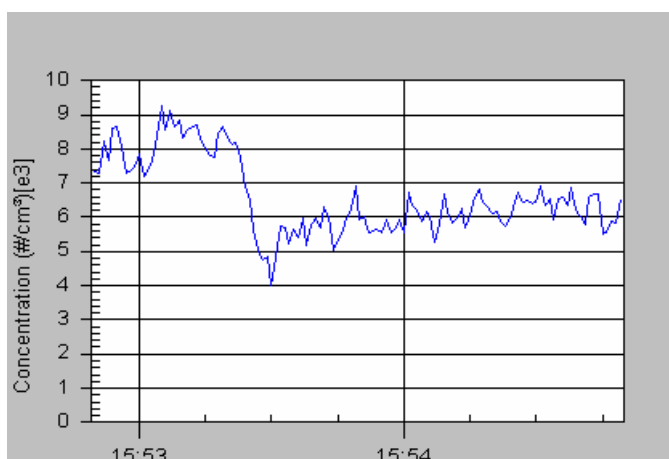


Figura E. 5- Efeito do acúmulo de NaCl após 4 min.

Quando não havia a formação de acúmulo de sal no capilar, a concentração se mantinha praticamente constante entre uma amostragem e outra, como pode ser notado na Figura E.6 a E.8. Este resultado é extremamente importante, pois aumenta a confiabilidade nos dados obtidos, uma vez que havia apenas um contador e não era possível fazer a amostragem simultaneamente na entrada e na saída.

A determinação do número de partículas geradas para cada uma das concentrações da solução salina está apresentada na Figura E.9 a E.11.

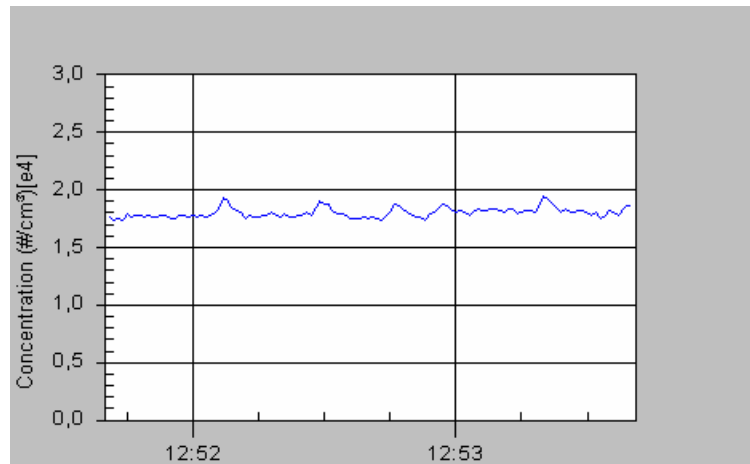


Figura E. 6 - Ensaio sem acúmulo de NaCl (concentração de $1,80 \times 10^4 \text{#/cm}^3$).

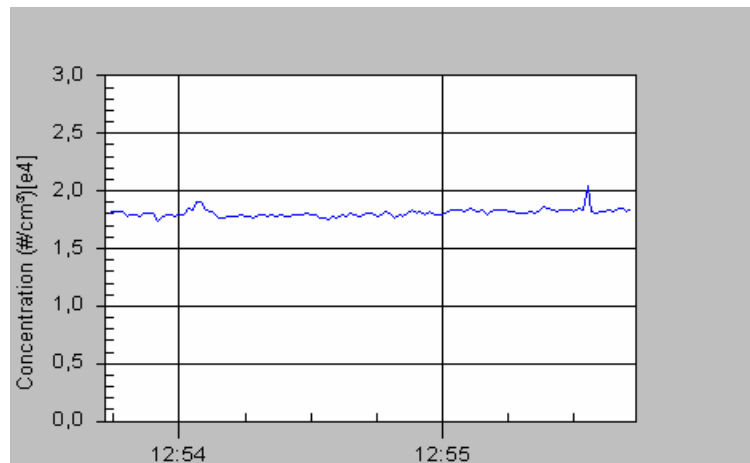


Figura E. 7 - Ensaio sem acúmulo de NaCl (concentração de $1,81 \times 10^4 \text{#/cm}^3$).

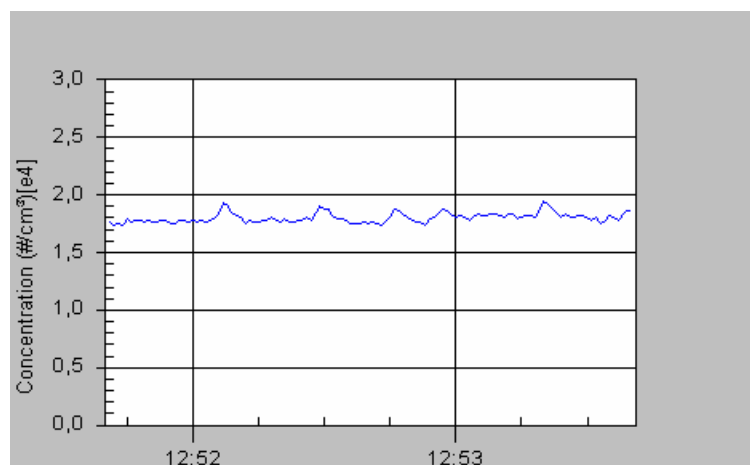


Figura E. 8 - Ensaio sem acúmulo de NaCl (concentração de $1,81 \times 10^4 \text{#/cm}^3$).

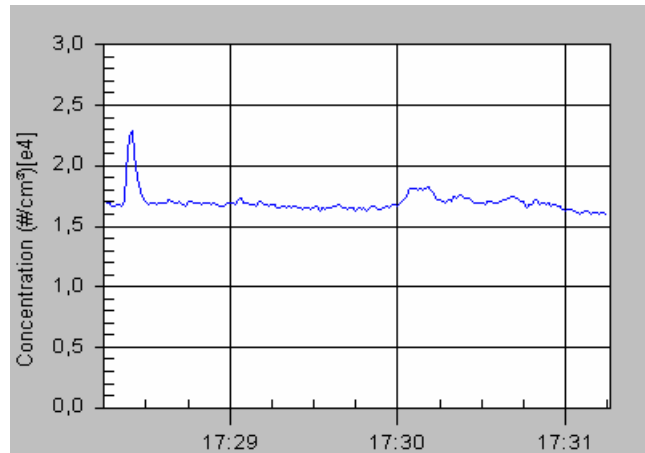


Figura E. 9- Concentração de NaCl igual 0,5 g/L e concentração de partículas de $1,70 \cdot 10^4 \text{ #/cm}^3$.

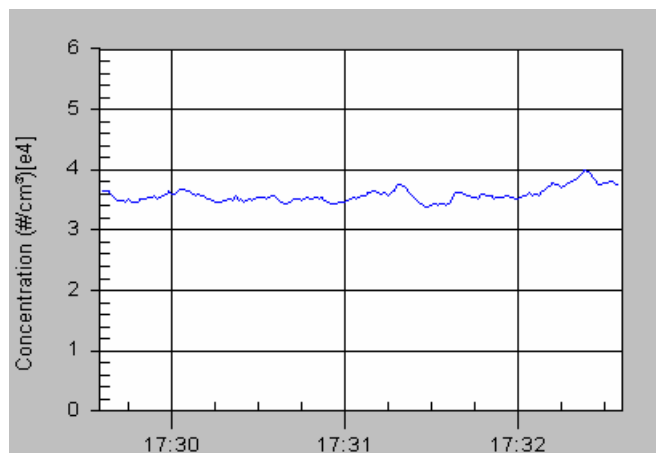


Figura E 10 -Concentração de NaCl igual 1,0 g/L e concentração de partículas de $3,58 \cdot 10^4 \text{ #/cm}^3$.

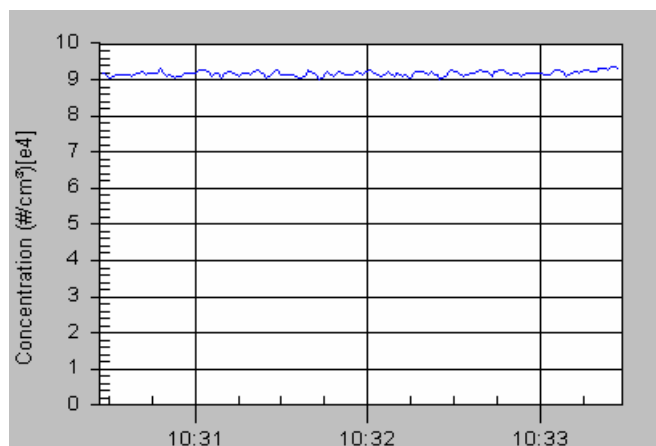


Figura E. 11 - Concentração de NaCl igual 1,5 g/L e concentração de partículas de $9,17 \cdot 10^4 \text{ #/cm}^3$.

Assim, foi possível a avaliação do efeito da intensidade da fonte de alta tensão na geração de partículas.

Outro ponto importante, na perda de material gerado, intensificado quando o gerador é operado com concentrações mais elevadas, é o acúmulo de material dentro do equipamento, em um orifício localizado logo após a geração das gotas, antes da neutralização e evaporação da água. Este acúmulo é significativo pois pode ser observado a olho nu, podendo influenciar na redução da concentração na saída do equipamento.

APENDICE F

Determinação da porosidade dos filtros

Para determinar a porosidade dos filtros utilizou-se a técnica do embutimento do filtro por imersão em resina, desenvolvida por AGUIAR (1995), conforme descrito no Apêndice A. Sendo que foram utilizadas as mesmas fotos obtidas do MEV e analisadas no Programa Image Pro Plus, para determinação do diâmetro, para determinar a porosidade dos filtros HEPA e de poliéster.

Também foi utilizado o PORE MASTER, da QUANTACROME Instruments, Modelo 33 para determinar a porosidade dos filtros. O princípio fundamental de funcionamento do equipamento, consiste na intrusão de mercúrio na forma líquida sob pressão controlada em materiais sólidos ou particulados. O mercúrio se comporta como um fluido não-molhante em relação á maior parte das substâncias. Por conseqüência, não penetra espontaneamente em pequenos furos ou fissuras destes materiais a menos que se aplique uma pressão sobre ele.

Não sendo capaz de molhar a maioria dos sólidos conhecidos, o mercúrio só penetra nos poros dos materiais com aplicação de pressão, que será tão mais alta quanto menor for o tamanho do poro. A tensão superficial do mercúrio é alta, cerca de 485 dina/cm^3 . Esse valor alto mostra a tendência do líquido em se contrair para uma forma de área específica mínima, como resultado de forças intermoleculares em sua superfície. Por essa razão, o mercúrio apresenta ângulos de contato muito altos com a maioria dos sólidos (em torno de 130°). Todas essas características fazem com que o mercúrio seja o único líquido utilizado na porosimetria por intrusão (WEBB & ORR).

Observam-se ainda desvios devido à compressão tanto do mercúrio quanto da amostra nas pressões utilizadas. Alguns artifícios são empregados com o objetivo de diminuir tais

distorções. O ensaio em branco pode ser usado para eliminar o efeito de compressão do mercúrio, enquanto que tratamentos matemáticos que levam em consideração o módulo de compressão da amostra melhoram os resultados distorcidos por esse fator. A distribuição de tamanhos de poro pode ser obtida pela porosimetria por intrusão de mercúrio por meio da medida do volume de mercúrio penetrado a uma dada pressão. O volume da distribuição de tamanhos de poro deve ser baseada no tipo de porosidade apresentado pelo material. Se uma amostra de um sólido poroso é encerrada num recipiente dotado de um capilar, sendo feito o vácuo sobre a mesma e sendo preenchido o recipiente e o capilar com mercúrio, ao se aumentar a pressão sobre o líquido este penetrará nos poros da amostra reduzindo seu nível no capilar. A Figura F.1 mostra a vista do POREMASTER.



Figura F. 1 - Vista do POREMASTER, da QUANTACROME Instruments, Modelo 33.

A porosidade do filtro de poliéster não foi possível ser obtida neste equipamento, certamente devido a estrutura poder se modificar no momento em que for submetido á pressão.

Já com o filtro HEPA pode-se determinar a porosidade por este método, onde se obteve três valores de porosidade: 0,88; 0,91 e 0,95, apresentando portanto uma media de 0,91. Este valor é muito próximo ao obtido pelo método apresentado anteriormente, de acordo com AGUIAR (1995), que foi de 0,920.

APÊNDICE G

Eficiências de coleta pelo mecanismo inercial e gravitacional para os filtros de Poliéster e HEPA

Na Tabela G.1 mostram-se os valores calculados da eficiência de coleta pelo mecanismo inercial e gravitacional para todas as velocidades estudadas, para o filtro de poliéster.

Tabela G. 1 - Resultados das eficiências inercial e gravitacional calculadas pelas Equações 2.44 e 2.51, para todas as velocidades e d_p estudados, para o filtro de poliéster

d_p (nm)	Vel 3,0 cm/s		Vel 4,0 cm/s	
	η_i	η_g	η_i	η_g
8,44	$6,37.10^{-14}$	$4,20.10^{-6}$	$1,51.10^{-13}$	$3,15.10^{-6}$
18,04	$6,74.10^{-13}$	$9,24.10^{-6}$	$1,60.10^{-12}$	$6,93.10^{-6}$
27,63	$2,63.10^{-12}$	$1,45.10^{-5}$	$6,23.10^{-12}$	$1,09.10^{-5}$
37,22	$6,97.10^{-12}$	$2,01.10^{-5}$	$1,65.10^{-11}$	$1,51.10^{-5}$
46,82	$1,50.10^{-11}$	$2,60.10^{-5}$	$3,57.10^{-11}$	$1,95.10^{-5}$
85,19	$1,25.10^{-10}$	$5,25.10^{-5}$	$2,96.10^{-10}$	$3,94.10^{-5}$
94,78	$1,86.10^{-10}$	$5,99.10^{-5}$	$4,40.10^{-10}$	$4,49.10^{-5}$

Continuação da Tabela G.1

d_p (nm)	Vel 5,0 cm/s		Vel 6,4 cm/s	
	η_i	η_g	η_i	η_g
8,44	$2,95 \cdot 10^{-13}$	$2,52 \cdot 10^{-6}$	$6,18 \cdot 10^{-13}$	$1,97 \cdot 10^{-6}$
18,04	$3,12 \cdot 10^{-12}$	$5,54 \cdot 10^{-6}$	$6,55 \cdot 10^{-12}$	$4,33 \cdot 10^{-6}$
27,63	$1,22 \cdot 10^{-11}$	$8,72 \cdot 10^{-6}$	$2,55 \cdot 10^{-11}$	$6,81 \cdot 10^{-6}$
37,22	$3,23 \cdot 10^{-11}$	$1,21 \cdot 10^{-5}$	$6,76 \cdot 10^{-11}$	$9,42 \cdot 10^{-6}$
46,82	$6,96 \cdot 10^{-11}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$	$1,46 \cdot 10^{-10}$	$1,22 \cdot 10^{-5}$
85,19	$5,77 \cdot 10^{-10}$	$3,15 \cdot 10^{-5}$	$1,21 \cdot 10^{-9}$	$2,46 \cdot 10^{-5}$
94,78	$8,60 \cdot 10^{-10}$	$3,60 \cdot 10^{-5}$	$1,80 \cdot 10^{-9}$	$2,81 \cdot 10^{-5}$

d_p (nm)	Vel 7,0 cm/s		Vel 7,7 cm/s	
	η_i	η_g	η_i	η_g
8,44	$8,09 \cdot 10^{-13}$	$1,80 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{-12}$	$1,60 \cdot 10^{-6}$
18,04	$8,57 \cdot 10^{-12}$	$3,96 \cdot 10^{-6}$	$1,14 \cdot 10^{-11}$	$3,60 \cdot 10^{-6}$
27,63	$3,34 \cdot 10^{-11}$	$6,23 \cdot 10^{-6}$	$4,44 \cdot 10^{-11}$	$5,66 \cdot 10^{-6}$
37,22	$8,85 \cdot 10^{-11}$	$8,61 \cdot 10^{-6}$	$1,18 \cdot 10^{-10}$	$7,83 \cdot 10^{-6}$
46,82	$1,91 \cdot 10^{-10}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$	$2,54 \cdot 10^{-10}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$
85,19	$1,58 \cdot 10^{-9}$	$2,25 \cdot 10^{-5}$	$2,11 \cdot 10^{-9}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$
94,78	$2,36 \cdot 10^{-9}$	$2,57 \cdot 10^{-5}$	$3,14 \cdot 10^{-9}$	$2,33 \cdot 10^{-5}$

d_p (nm)	Vel 9,0 cm/s		Vel 10,2 cm/s	
	η_i	η_g	η_i	η_g
8,44	$1,72 \cdot 10^{-12}$	$1,40 \cdot 10^{-6}$	$2,50 \cdot 10^{-12}$	$1,23 \cdot 10^{-6}$
18,04	$1,82 \cdot 10^{-11}$	$3,08 \cdot 10^{-6}$	$2,65 \cdot 10^{-11}$	$2,72 \cdot 10^{-6}$
27,63	$7,10 \cdot 10^{-11}$	$4,84 \cdot 10^{-6}$	$1,03 \cdot 10^{-10}$	$4,27 \cdot 10^{-6}$
37,22	$1,88 \cdot 10^{-10}$	$6,70 \cdot 10^{-6}$	$2,74 \cdot 10^{-10}$	$5,91 \cdot 10^{-6}$
46,82	$4,06 \cdot 10^{-10}$	$8,65 \cdot 10^{-6}$	$5,91 \cdot 10^{-10}$	$7,63 \cdot 10^{-6}$
85,19	$3,37 \cdot 10^{-9}$	$1,75 \cdot 10^{-6}$	$4,90 \cdot 10^{-9}$	$1,54 \cdot 10^{-5}$
94,78	$5,01 \cdot 10^{-9}$	$2,00 \cdot 10^{-5}$	$7,30 \cdot 10^{-9}$	$1,76 \cdot 10^{-5}$

Continuação da Tabela G.1

d_p (nm)	Vel 11,5 cm/s		Vel 12,8 cm/s	
	η_i	η_g	η_i	η_g
8,44	$3,59 \cdot 10^{-12}$	$1,09 \cdot 10^{-6}$	$4,95 \cdot 10^{-12}$	$9,83 \cdot 10^{-7}$
18,04	$3,80 \cdot 10^{-11}$	$2,41 \cdot 10^{-6}$	$5,24 \cdot 10^{-11}$	$2,17 \cdot 10^{-6}$
27,63	$1,48 \cdot 10^{-10}$	$3,79 \cdot 10^{-6}$	$2,04 \cdot 10^{-10}$	$3,40 \cdot 10^{-6}$
37,22	$3,92 \cdot 10^{-10}$	$5,24 \cdot 10^{-6}$	$5,41 \cdot 10^{-10}$	$4,71 \cdot 10^{-6}$
46,82	$8,47 \cdot 10^{-10}$	$6,77 \cdot 10^{-6}$	$1,17 \cdot 10^{-9}$	$6,08 \cdot 10^{-6}$
85,19	$7,02 \cdot 10^{-9}$	$1,37 \cdot 10^{-5}$	$9,69 \cdot 10^{-9}$	$1,23 \cdot 10^{-5}$
94,78	$1,05 \cdot 10^{-8}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$	$1,44 \cdot 10^{-8}$	$1,40 \cdot 10^{-5}$

d_p (nm)	Vel 19,2 cm/s		Vel 25,0 cm/s	
	η_i	η_g	η_i	η_g
8,44	$1,67 \cdot 10^{-11}$	$6,55 \cdot 10^{-7}$	$3,69 \cdot 10^{-11}$	$5,03 \cdot 10^{-7}$
18,04	$1,77 \cdot 10^{-10}$	$1,44 \cdot 10^{-6}$	$3,90 \cdot 10^{-10}$	$1,11 \cdot 10^{-6}$
27,63	$6,89 \cdot 10^{-10}$	$2,27 \cdot 10^{-6}$	$1,52 \cdot 10^{-9}$	$1,74 \cdot 10^{-6}$
37,22	$1,83 \cdot 10^{-9}$	$3,14 \cdot 10^{-6}$	$4,03 \cdot 10^{-9}$	$2,41 \cdot 10^{-6}$
46,82	$3,94 \cdot 10^{-9}$	$4,05 \cdot 10^{-6}$	$8,70 \cdot 10^{-9}$	$3,11 \cdot 10^{-6}$
85,19	$3,27 \cdot 10^{-8}$	$8,20 \cdot 10^{-6}$	$7,22 \cdot 10^{-8}$	$6,30 \cdot 10^{-6}$
94,78	$4,87 \cdot 10^{-8}$	$9,36 \cdot 10^{-6}$	$1,07 \cdot 10^{-7}$	$7,19 \cdot 10^{-6}$

Na Tabela G.2 mostram-se os valores calculados da eficiência de coleta pelo mecanismo inercial e gravitacional para todas as velocidades estudadas, para o filtro HEPA utilizando o $\overline{D_f} = 0,72 \mu\text{m}$.

Tabela G. 2 - Resultados das eficiências inercial e gravitacional calculadas pelas Equações 2.44 e 2.51, para todas as velocidades e d_p estudados, para o filtro HEPA com .

d_p (nm)	Vel 3,0 cm/s		Vel 4,0 cm/s	
	η_i	η_g	η_i	η_g
8,44	$2,25 \cdot 10^{-10}$	$4,20 \cdot 10^{-6}$	$5,32 \cdot 10^{-10}$	$3,15 \cdot 10^{-6}$
18,04	$2,40 \cdot 10^{-9}$	$9,24 \cdot 10^{-6}$	$5,69 \cdot 10^{-9}$	$6,93 \cdot 10^{-6}$
27,63	$9,32 \cdot 10^{-9}$	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$2,21 \cdot 10^{-8}$	$1,09 \cdot 10^{-5}$
37,22	$2,47 \cdot 10^{-8}$	$2,01 \cdot 10^{-5}$	$5,84 \cdot 10^{-8}$	$1,51 \cdot 10^{-5}$
46,82	$5,31 \cdot 10^{-8}$	$2,60 \cdot 10^{-5}$	$1,26 \cdot 10^{-7}$	$1,95 \cdot 10^{-5}$
85,19	$4,39 \cdot 10^{-7}$	$5,25 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-7}$	$3,94 \cdot 10^{-5}$
94,78	$6,54 \cdot 10^{-7}$	$5,99 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-6}$	$4,49 \cdot 10^{-5}$

d_p (nm)	Vel 5,0 cm/s		Vel 6,4 cm/s	
	η_i	η_g	η_i	η_g
8,44	$1,04 \cdot 10^{-9}$	$2,52 \cdot 10^{-6}$	$2,18 \cdot 10^{-9}$	$1,97 \cdot 10^{-6}$
18,04	$1,11 \cdot 10^{-8}$	$5,54 \cdot 10^{-6}$	$2,33 \cdot 10^{-8}$	$4,33 \cdot 10^{-6}$
27,63	$4,32 \cdot 10^{-8}$	$8,72 \cdot 10^{-6}$	$9,05 \cdot 10^{-8}$	$6,81 \cdot 10^{-6}$
37,22	$1,14 \cdot 10^{-7}$	$1,21 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^{-7}$	$9,42 \cdot 10^{-6}$
46,82	$2,46 \cdot 10^{-7}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$	$5,16 \cdot 10^{-7}$	$1,22 \cdot 10^{-5}$
85,19	$2,03 \cdot 10^{-6}$	$3,15 \cdot 10^{-5}$	$4,27 \cdot 10^{-6}$	$2,46 \cdot 10^{-5}$
94,78	$3,03 \cdot 10^{-6}$	$3,60 \cdot 10^{-5}$	$6,35 \cdot 10^{-6}$	$2,81 \cdot 10^{-5}$

d_p (nm)	Vel 7,0 cm/s		Vel 7,7 cm/s	
	η_i	η_g	η_i	η_g
8,44	$2,85 \cdot 10^{-9}$	$1,80 \cdot 10^{-6}$	$3,80 \cdot 10^{-9}$	$1,60 \cdot 10^{-6}$
18,04	$3,05 \cdot 10^{-8}$	$3,96 \cdot 10^{-6}$	$4,06 \cdot 10^{-8}$	$3,60 \cdot 10^{-6}$
27,63	$1,18 \cdot 10^{-7}$	$6,23 \cdot 10^{-6}$	$1,58 \cdot 10^{-7}$	$5,66 \cdot 10^{-6}$
37,22	$3,13 \cdot 10^{-7}$	$8,61 \cdot 10^{-6}$	$4,17 \cdot 10^{-7}$	$7,83 \cdot 10^{-6}$
46,82	$6,75 \cdot 10^{-7}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$	$8,99 \cdot 10^{-7}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$
85,19	$5,58 \cdot 10^{-6}$	$2,25 \cdot 10^{-5}$	$7,43 \cdot 10^{-6}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$
94,78	$8,31 \cdot 10^{-6}$	$2,57 \cdot 10^{-5}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$	$2,33 \cdot 10^{-5}$

Continuação da Tabela G.2

D _p (nm)	Vel 9,0 cm/s		Vel 10,2 cm/s	
	η _i	η _g	η _i	η _g
8,44	6,06.10 ⁻⁹	1,40.10 ⁻⁶	8,82.10 ⁻⁹	1,23.10 ⁻⁶
18,04	6,48.10 ⁻⁸	3,08.10 ⁻⁶	9,43.10 ⁻⁸	2,72.10 ⁻⁶
27,63	2,52.10 ⁻⁷	4,84.10 ⁻⁶	3,66.10 ⁻⁷	4,27.10 ⁻⁶
37,22	6,66.10 ⁻⁷	6,70.10 ⁻⁶	9,69.10 ⁻⁷	5,91.10 ⁻⁶
46,82	1,43.10 ⁻⁶	8,65.10 ⁻⁶	2,09.10 ⁻⁶	7,63.10 ⁻⁶
85,19	1,19.10 ⁻⁵	1,75.10 ⁻⁶	1,73.10 ⁻⁵	1,54.10 ⁻⁵
94,78	1,77.10 ⁻⁵	2,00.10 ⁻⁵	2,57.10 ⁻⁵	1,76.10 ⁻⁵

d _p (nm)	Vel 11,5 cm/s		Vel 12,8 cm/s	
	η _i	η _g	η _i	η _g
8,44	1,26.10 ⁻⁸	1,09.10 ⁻⁶	1,74.10 ⁻⁸	9,83.10 ⁻⁷
18,04	1,35.10 ⁻⁷	2,41.10 ⁻⁶	1,86.10 ⁻⁷	2,17.10 ⁻⁶
27,63	5,25.10 ⁻⁷	3,79.10 ⁻⁶	7,24.10 ⁻⁷	3,40.10 ⁻⁶
37,22	1,39.10 ⁻⁶	5,24.10 ⁻⁶	1,91.10 ⁻⁶	4,71.10 ⁻⁶
46,82	2,99.10 ⁻⁶	6,77.10 ⁻⁶	4,13.10 ⁻⁶	6,08.10 ⁻⁶
85,19	2,47.10 ⁻⁵	1,37.10 ⁻⁵	3,41.10 ⁻⁵	1,23.10 ⁻⁵
94,78	3,68.10 ⁻⁵	1,56.10 ⁻⁵	5,07.10 ⁻⁵	1,40.10 ⁻⁵

d _p (nm)	Vel 19,2 cm/s		Vel 25,0 cm/s	
	η _i	η _g	η _i	η _g
8,44	5,89.10 ⁻⁸	6,55.10 ⁻⁷	1,30.10 ⁻⁷	5,03.10 ⁻⁷
18,04	6,29.10 ⁻⁷	1,44.10 ⁻⁶	1,39.10 ⁻⁶	1,11.10 ⁻⁶
27,63	2,44.10 ⁻⁶	2,27.10 ⁻⁶	5,39.10 ⁻⁶	1,74.10 ⁻⁶
37,22	6,46.10 ⁻⁶	3,14.10 ⁻⁶	1,43.10 ⁻⁵	2,41.10 ⁻⁶
46,82	1,39.10 ⁻⁵	4,05.10 ⁻⁶	3,07.10 ⁻⁵	3,11.10 ⁻⁶
85,19	1,15.10 ⁻⁴	8,20.10 ⁻⁶	2,53.10 ⁻⁴	6,30.10 ⁻⁶
94,78	1,71.10 ⁻⁴	9,36.10 ⁻⁶	3,76.10 ⁻⁴	7,19.10 ⁻⁶

APÊNDICE H

Resultados das eficiências experimental e teórica do filtro HEPA

Os resultados apresentados nas Figuras H.2, H.3, H.5, H.6, H.8 e H.9 não foram mostrados no Capítulo 4 de modo a não o sobrecarregar. Os resultados das demais Figuras (H.1, H.4, H.7, H.10, H.11, H.12) já foram apresentados no Capítulo 4, mas para melhor visualização, serão agora mostradas separadamente.

Comparação de eficiência experimental e teórica do filtro HEPA com \overline{D}_f .

Nas Figuras H.1 a H.12 apresentam os resultados referentes a eficiência experimental e teórica (LIU & RUBOW, 1990) referente ao filtro HEPA para todas as velocidades estudadas respectivamente.

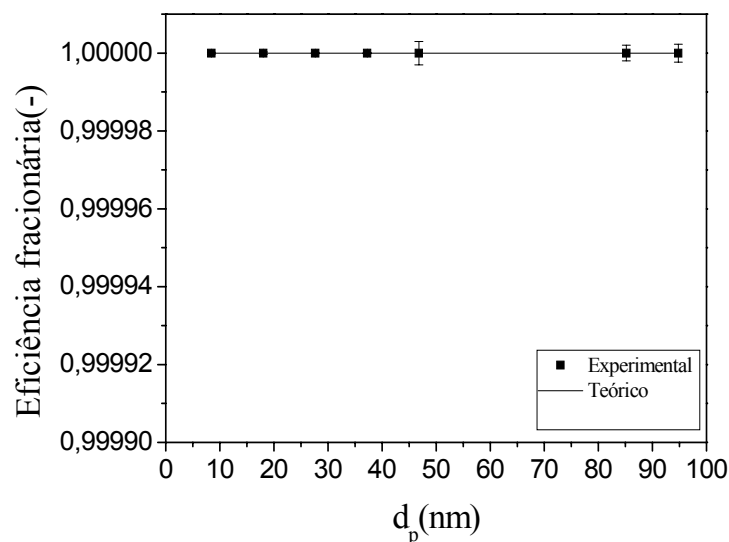


Figura H. 1 - Eficiência experimental e teórica em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=3,0$ cm/s e $\overline{D}_f=0,72$ μm .

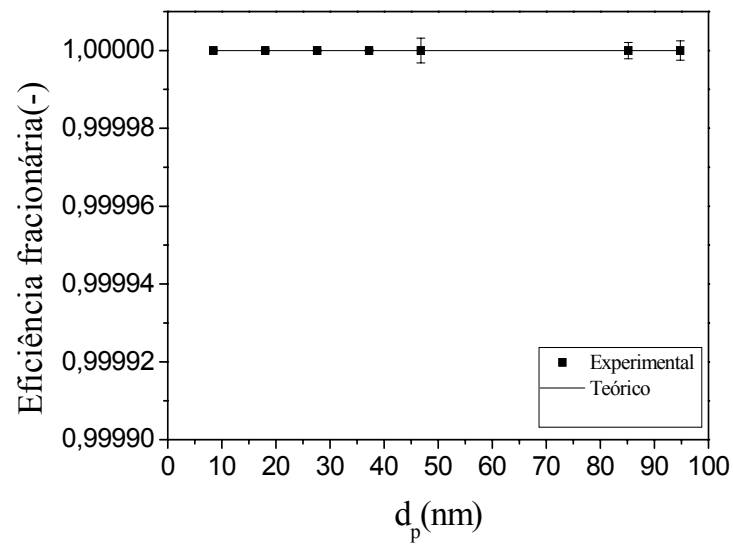


Figura H. 2 - Eficiência experimental e teórica em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=4,0$ cm/s e $\overline{D}_f=0,72$ μm .

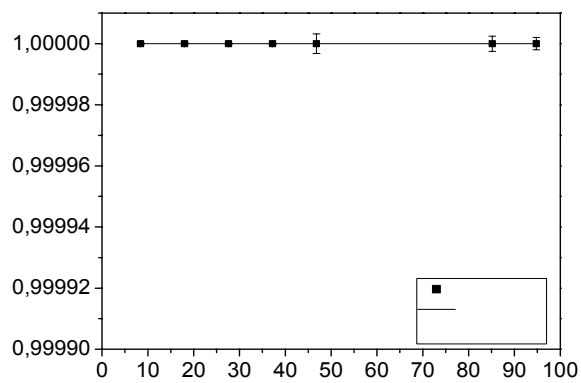


Figura H. 3 - Eficiência experimental e teórica em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=5,0$ cm/s e $\overline{D}_f=0,72$ μm .

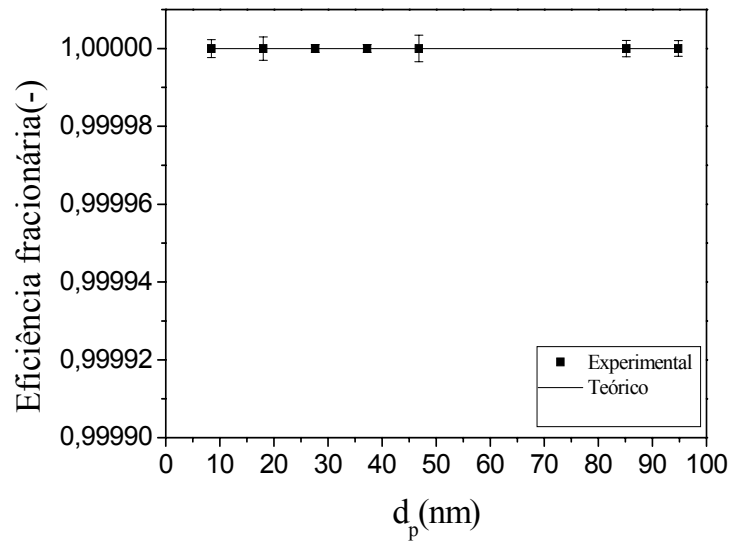


Figura H. 4 - Eficiência experimental e teórica em relação ao diâmetro das partículas para $U_0 = 6,4$ cm/s e $\overline{D_f} = 0,72$ μm .

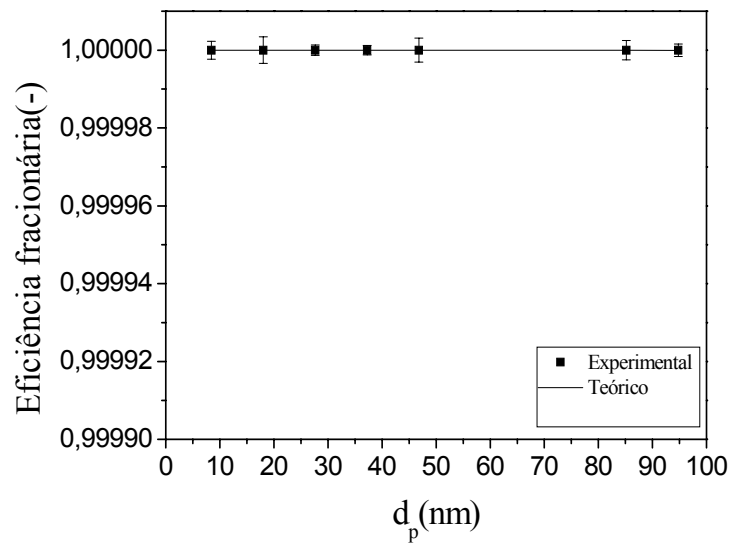


Figura H. 5 - Eficiência experimental e teórica em relação ao diâmetro das partículas para $U_0 = 7,0$ cm/s e $\overline{D_f} = 0,72$ μm .

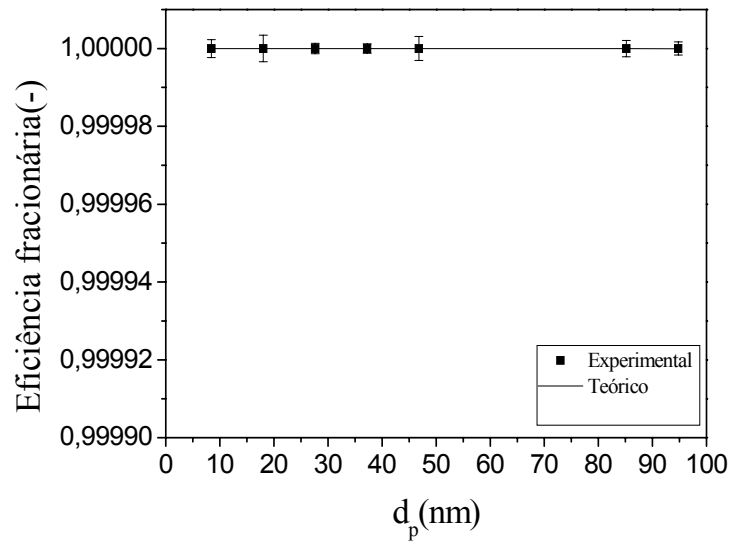


Figura H. 6 - Eficiência experimental e teórica em relação ao diâmetro das partículas para $U_0 = 7,7$ cm/s e $\overline{D}_f = 0,72$ μm .

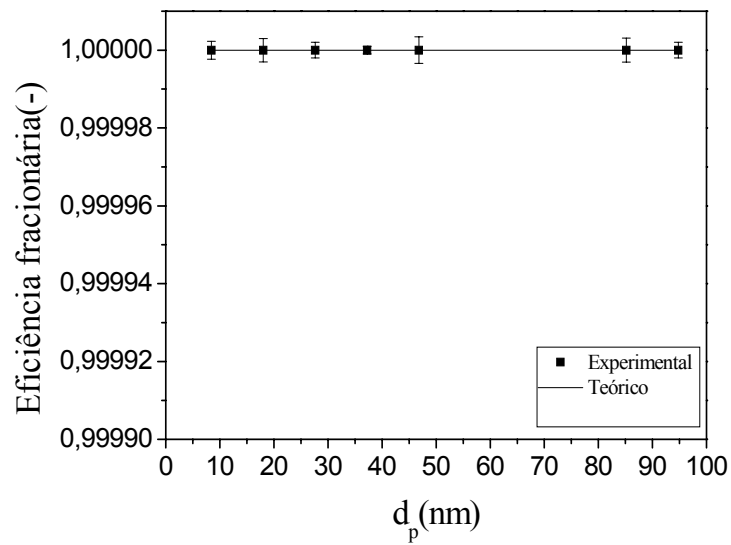


Figura H. 7 - Eficiência experimental e teórica em relação ao diâmetro das partículas para $U_0 = 9,0$ cm/s e $\overline{D}_f = 0,72$ μm .

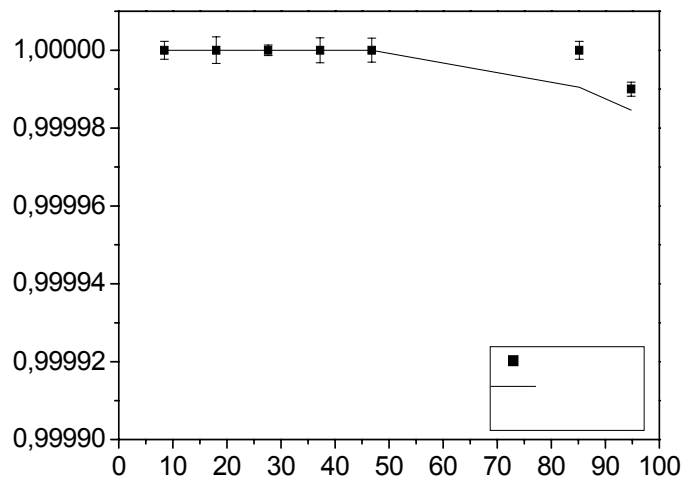


Figura H. 8 - Eficiência experimental e teórica em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=10,2$ cm/s e $\overline{D_f}=0,72$ μm.

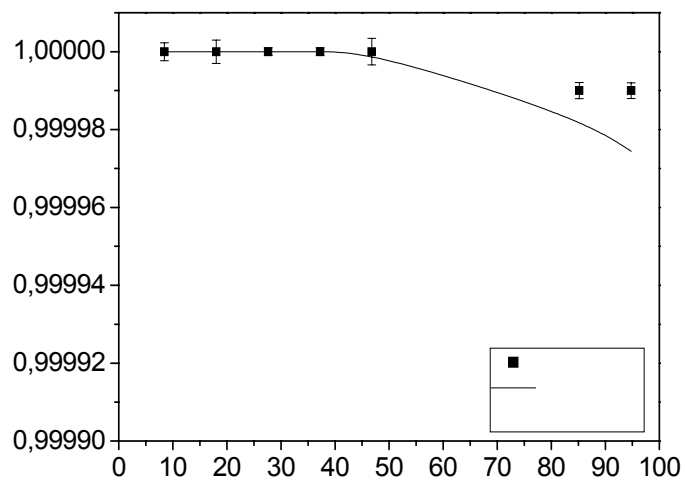


Figura H. 9 - Eficiência experimental e teórica em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=11,5$ cm/s e $\overline{D_f}=0,72$ μm.

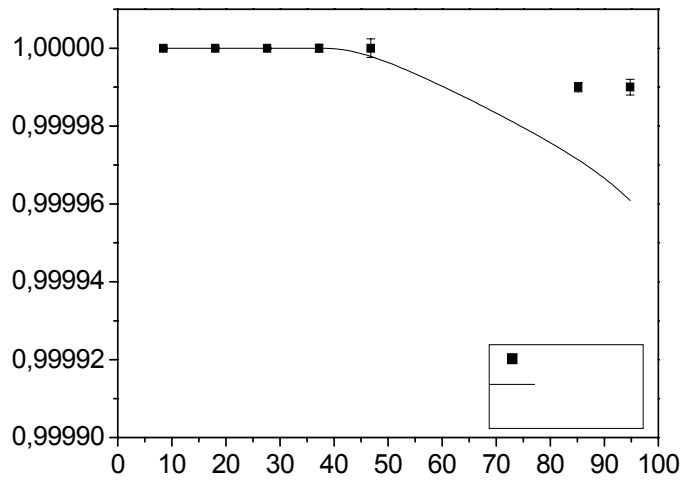


Figura H. 10 - Eficiência experimental e teórica em relação ao diâmetro das partículas para $U_0 = 12,8 \text{ cm/s}$ e $\overline{D_f} = 0,72 \text{ }\mu\text{m}$.

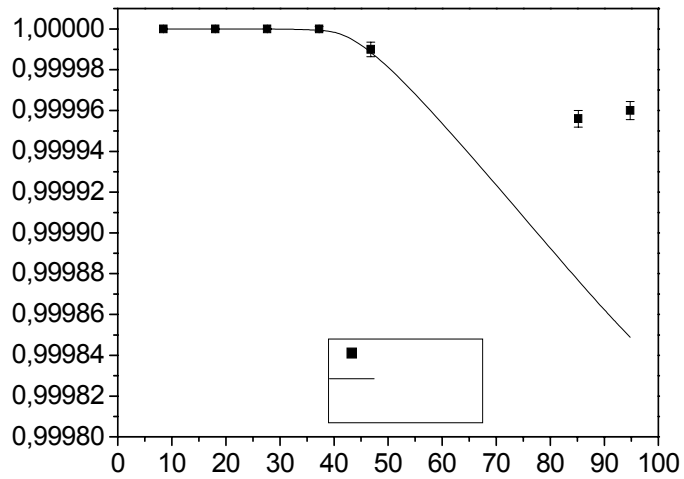


Figura H. 11 - Eficiência experimental e teórica em relação ao diâmetro das partículas para $U_0 = 19,2 \text{ cm/s}$ e $\overline{D_f} = 0,72 \text{ }\mu\text{m}$.

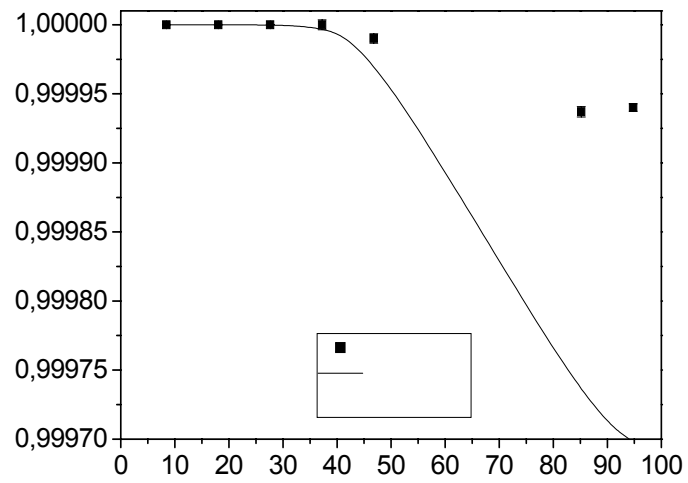


Figura H. 12 - Eficiência experimental e teórica em relação ao diâmetro das partículas para $U_0 = 25,0 \text{ cm/s}$ e $\overline{D_f} = 0,72 \text{ }\mu\text{m}$.

APÊNDICE I

Eficiência experimental e teórica do filtro HEPA

Nas Figuras I.1 a I.6 são apresentados os resultados da eficiência teórica calculada com a distribuição das fibras do filtro HEPA e Equação 4.5, utilizando as Equações de LIU & RUBOW (1990) para as velocidades de 4,0; 5,0; 7,0; 7,7; 10,2 e 11,5 cm/s que não foram apresentados no Capítulo 4.

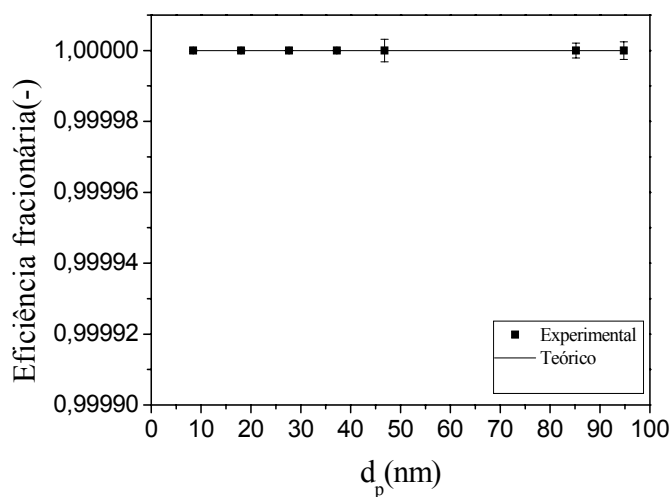


Figura I. 1 - Eficiência experimental e teórica em relação a d_p para $U_0 = 4,0$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990).

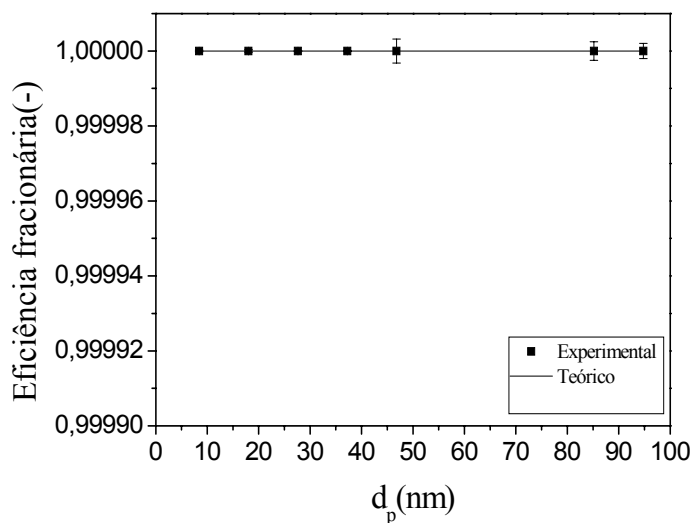


Figura I. 2 - Eficiência experimental e teórica em relação a d_p para $U_0 = 5,0$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990)..

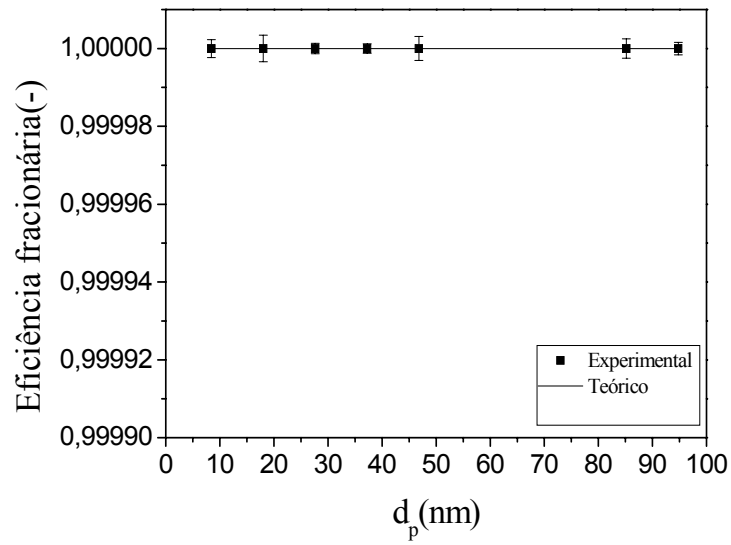


Figura I. 3 - Eficiência experimental e teórica em relação a d_p para $U_0 = 7,0$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990).

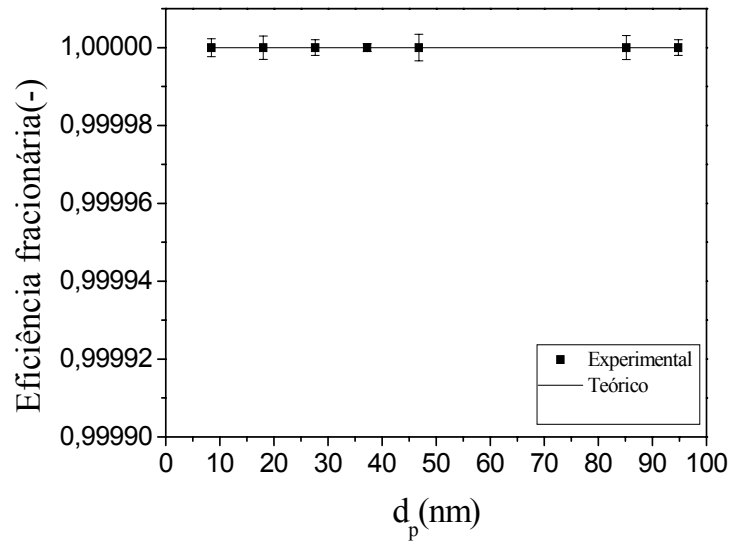


Figura I. 4 - Eficiência experimental e teórica em relação a d_p para $U_0 = 7,7$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990).

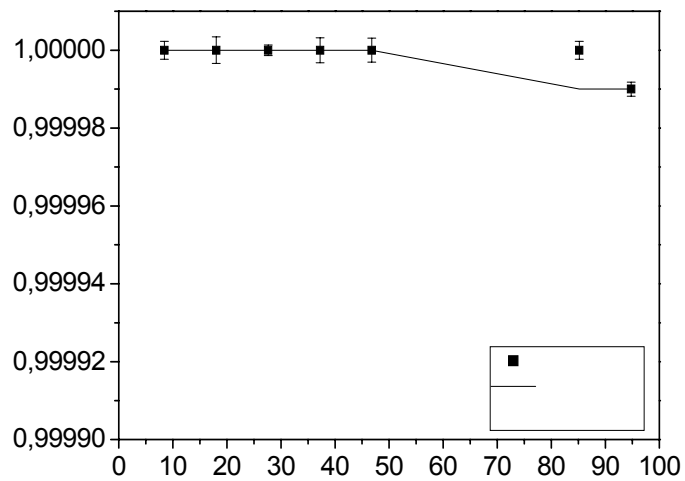


Figura I. 5- Eficiência experimental e teórica em relação a d_p para $U_0= 10,2$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990).

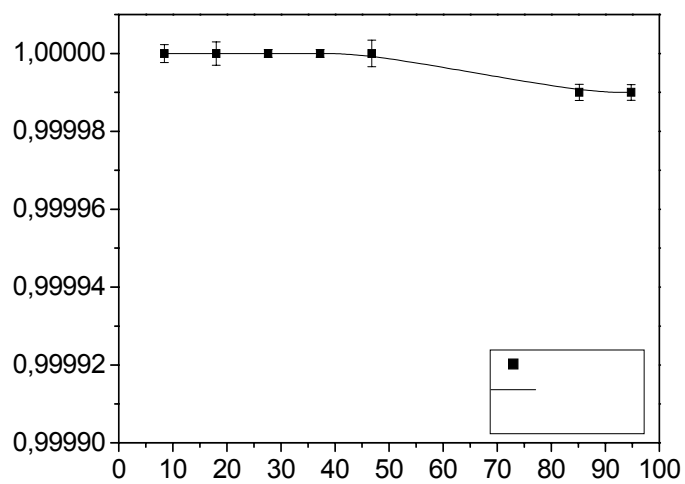


Figura I. 6 - Eficiência experimental e teórica em relação a d_p para $U_0= 11,5$ cm/s utilizando Equação de LIU & RUBOW (1990).

APÊNDICE J

Resultados das eficiências experimental e teórica do filtro de poliéster

Nas Figuras J.1 a J.12 são mostrados os resultados das eficiências experimental e teórica do filtro de poliéster para as velocidades de 3,0 a 25,0 cm/s respectivamente. Os resultados das velocidades de 3,0; 6,4; 9,0; 12,8; 19,2 e 25,0 já foram apresentados no Capítulo 4, no entanto para uma melhor visualização são mostrados aqui.

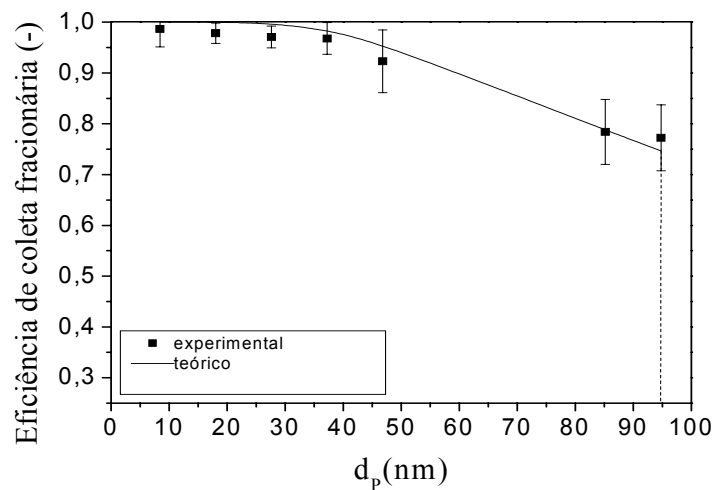


Figura J. 1– Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=3,0$ cm/s.

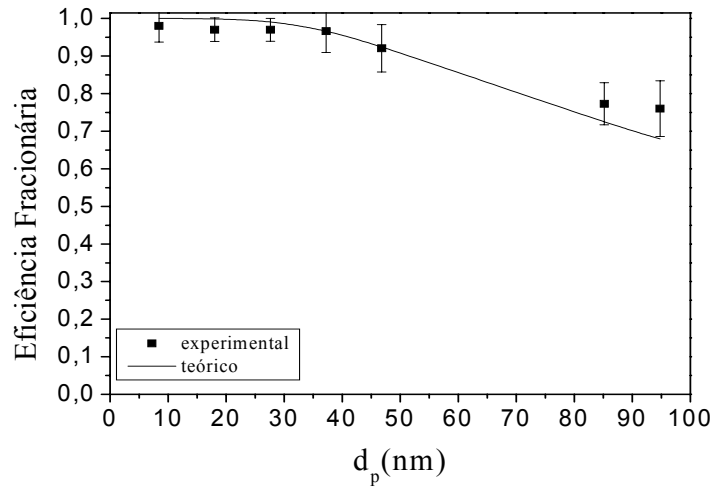


Figura J. 2 – Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=4,0$ cm/s.

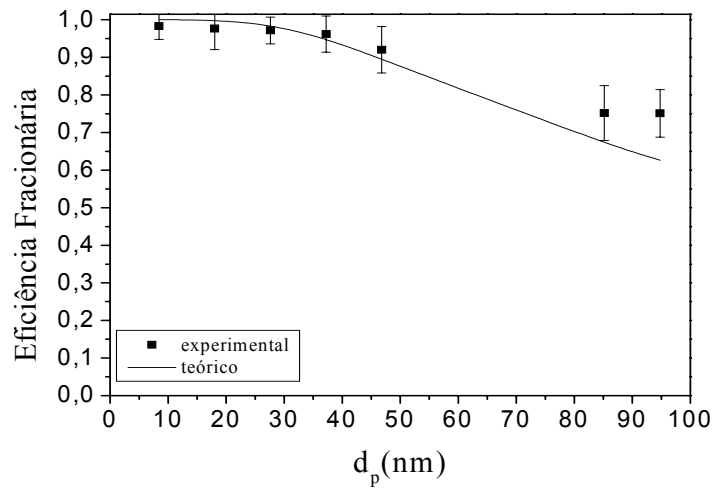


Figura J. 3 – Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=5,0$ cm/s.

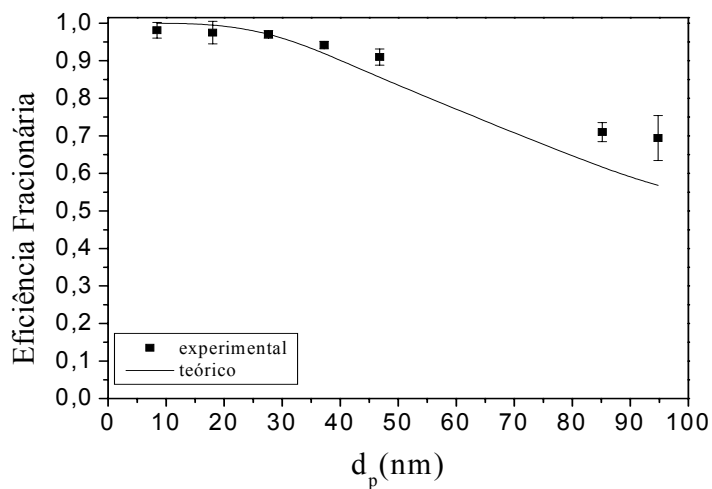


Figura J. 4 – Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=6,4$ cm/s.

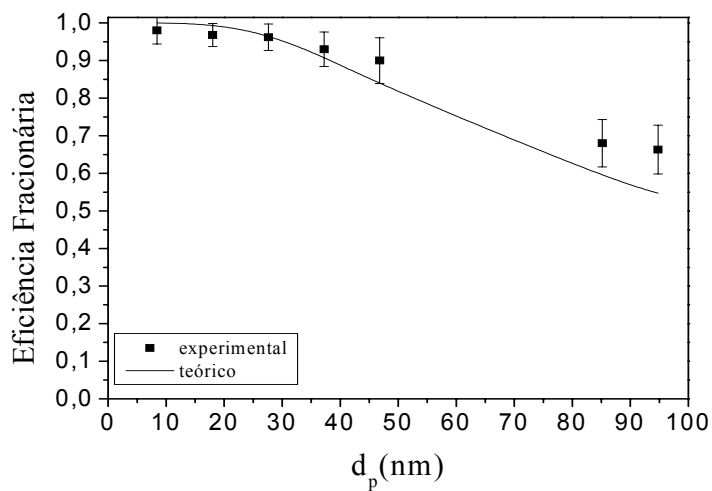


Figura J. 5– Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=7,0$ cm/s.

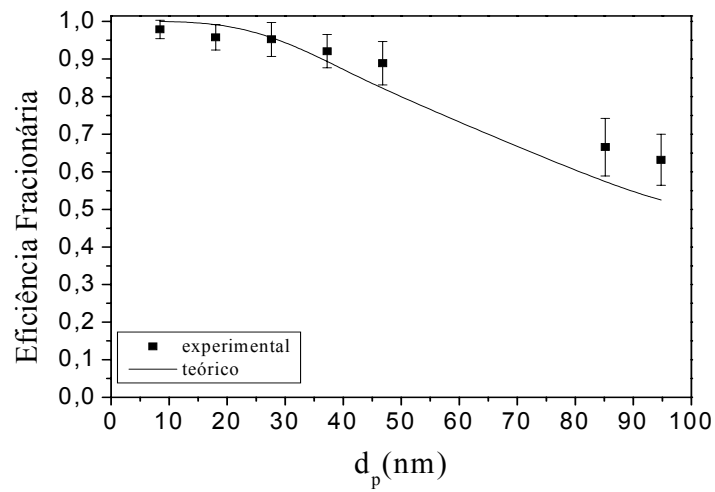


Figura J. 6– Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=7,7$ cm/s.

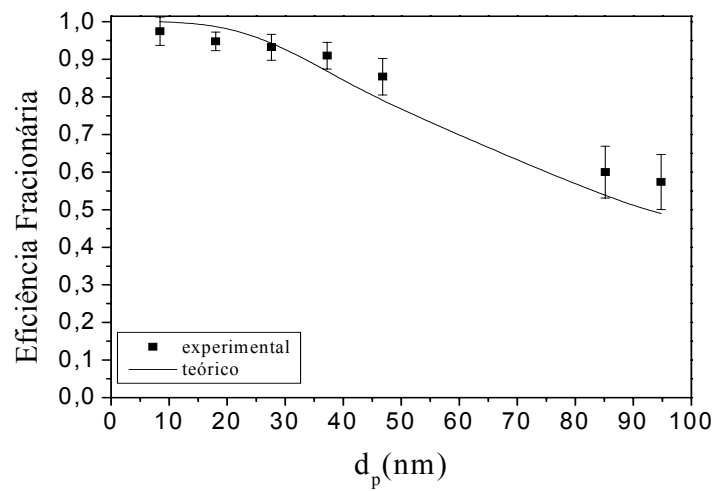


Figura J. 7 – Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=9,0$ cm/s.

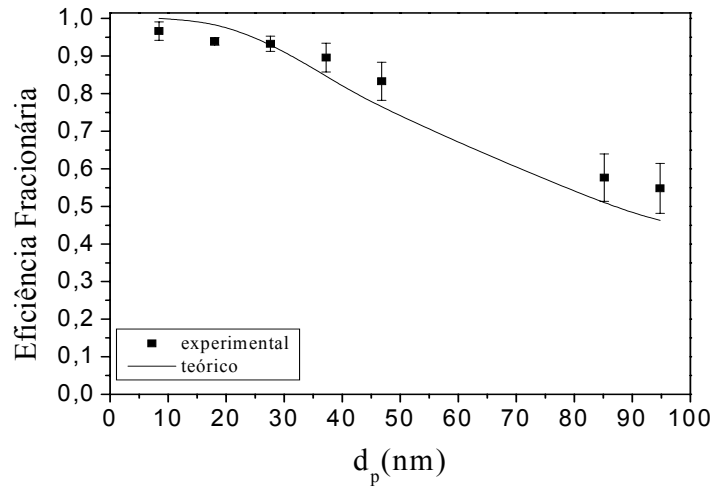


Figura J. 8 – Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=10,2$ cm/s.

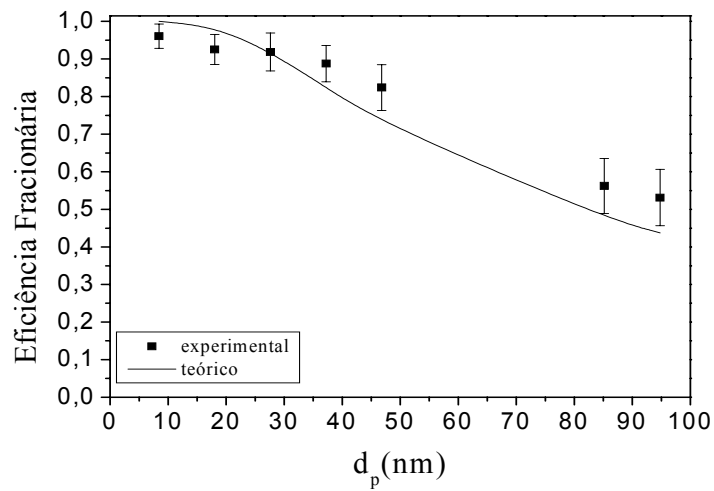


Figura J. 9 – Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=11,5$ cm/s.

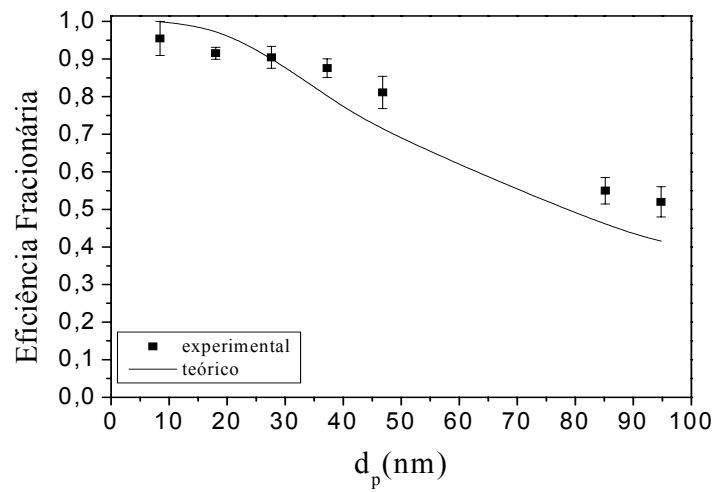


Figura J. 10– Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=12,8$ cm/s.

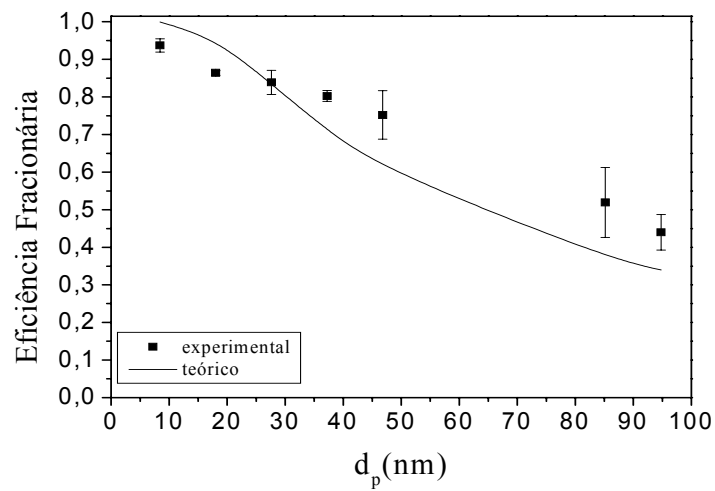


Figura J. 11 – Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=19,2$ cm/s.

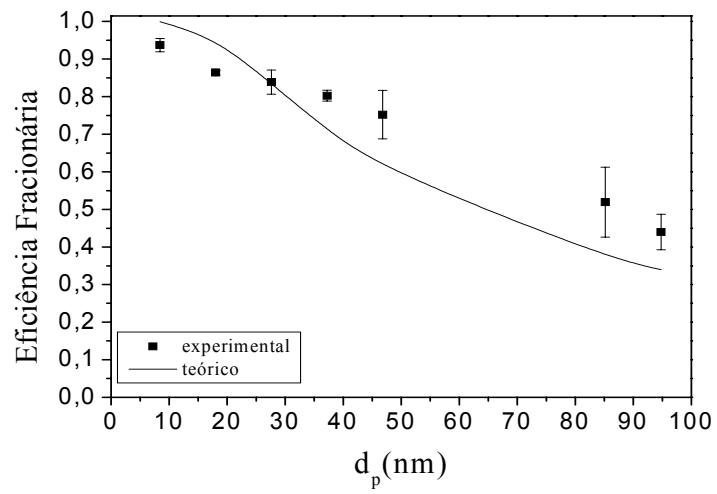


Figura J. 12 – Eficiência experimental e teórica do poliéster em relação ao diâmetro das partículas para $U_0=25,0$ cm/s.

APÊNDICE L

Eficiência individual do filtro de poliéster e HEPA

As Figuras L.1 a L.9 mostram o resultado das eficiências individuais de coleta para o filtro de Poliéster calculadas através da Equação de LIU & RUBOW (1990), que não foram mostradas no Capítulo 4, para as velocidades de 4,0; 5,0; 6,4; 7,0; 7,7; 9,0; 10,2; 11,5 e 19,2.

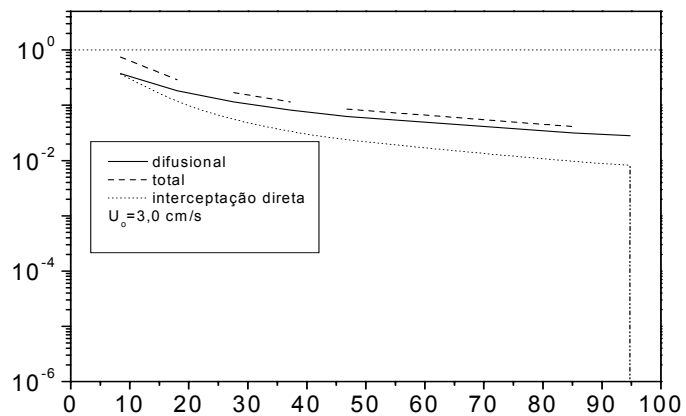


Figura L. 1 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0 = 4,0$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).

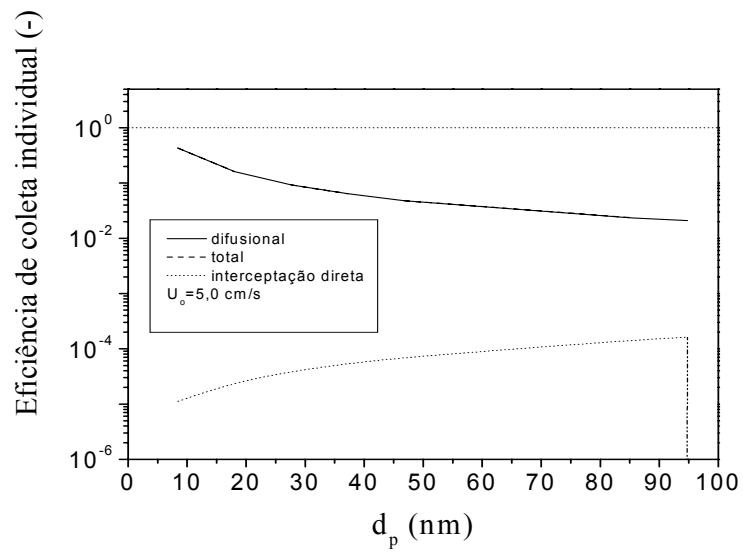


Figura L. 2- Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 5,0$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).

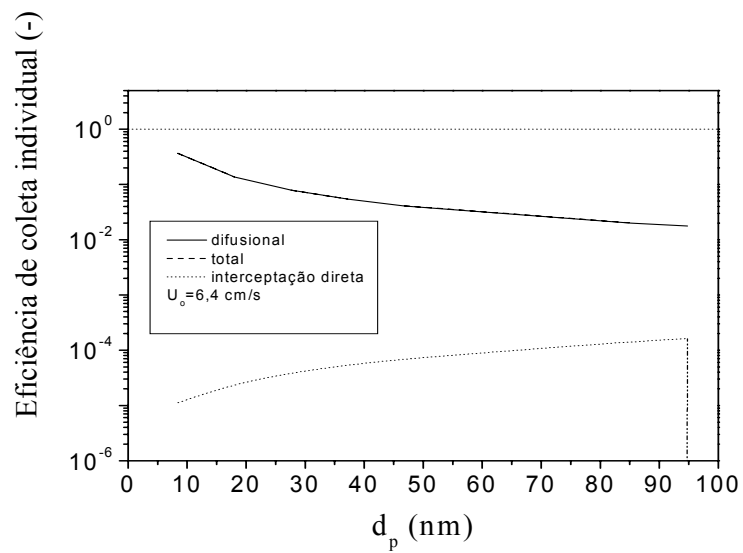


Figura L. 3 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 6,4$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).

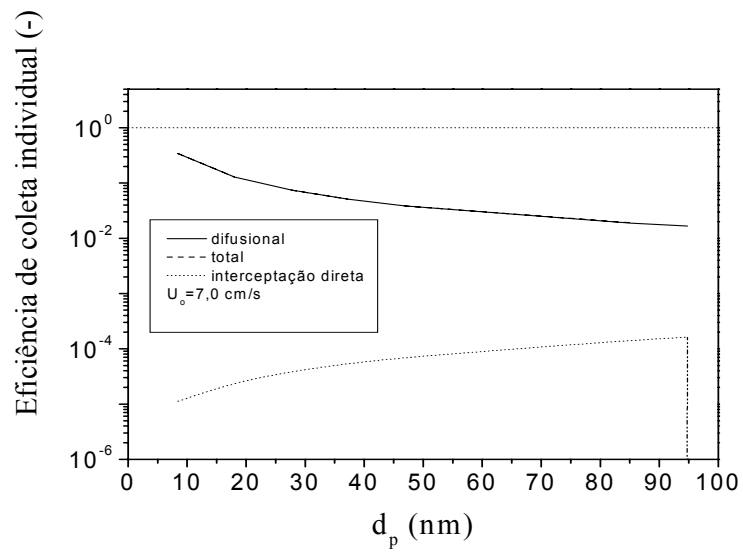


Figura L. 4 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0 = 7,0$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).

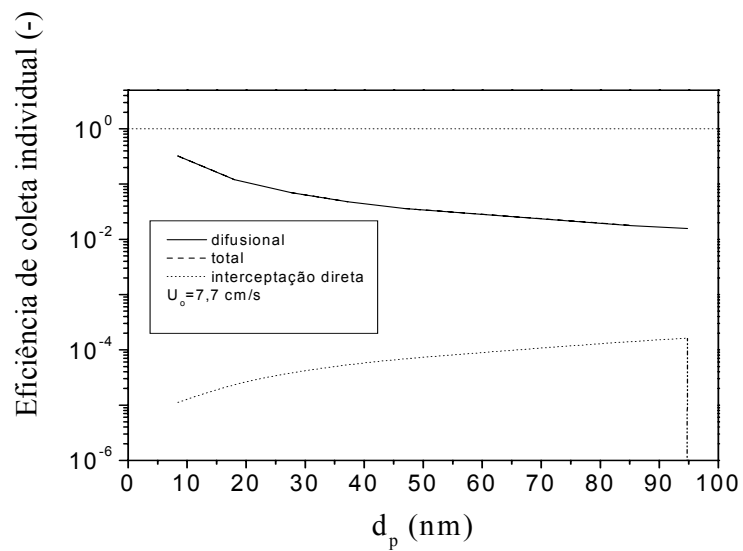


Figura L. 5- Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0 = 7,7$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).

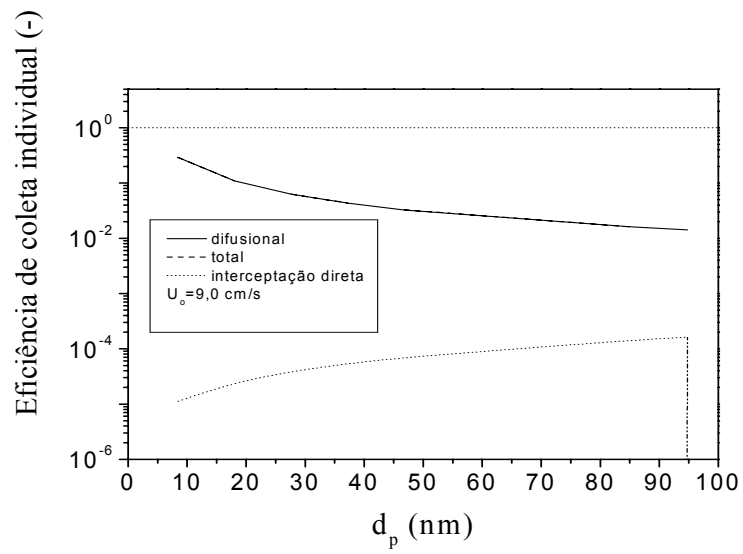


Figura L. 6- Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0 = 9,0$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).

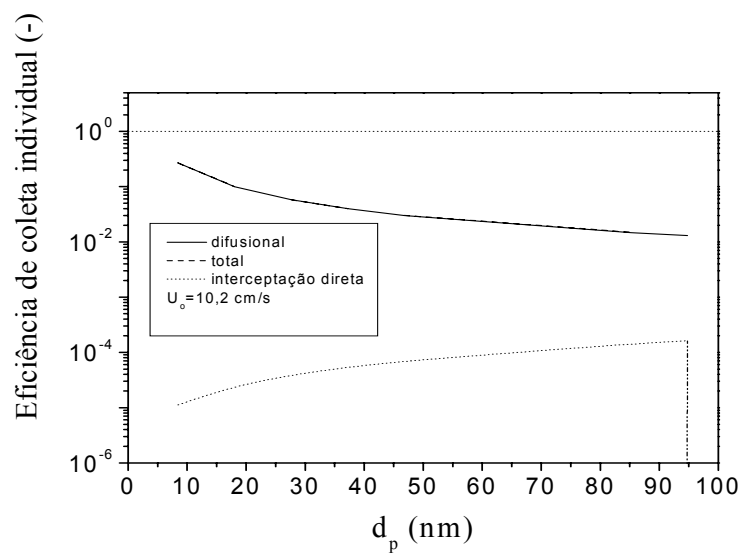


Figura L. 7- Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0 = 10,2$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).

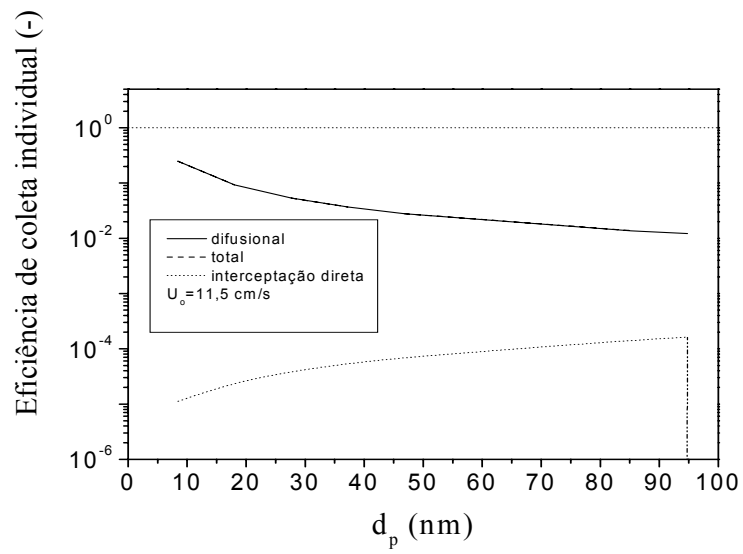


Figura L. 8 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0 = 11,5$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).

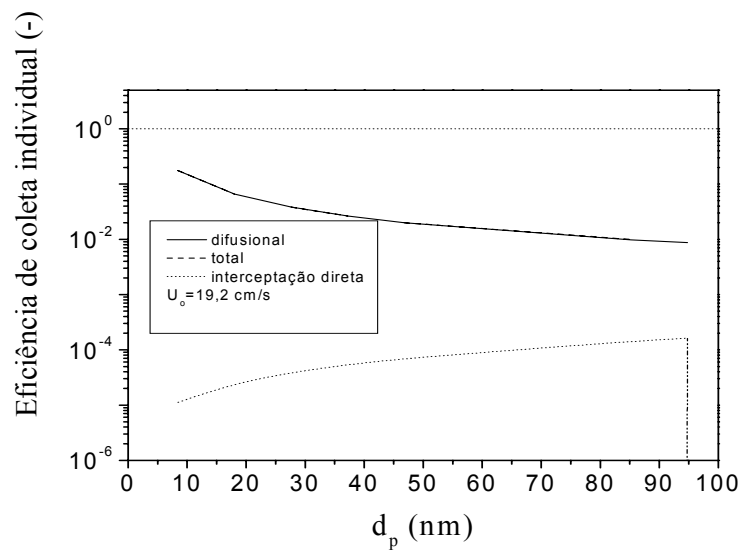


Figura L. 9 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0 = 19,2$ cm/s para Equação de LIU & RUBOW (1990).

Eficiência individual do filtro de Poliéster utilizando Equação de PAYET et al (1992)

As Figuras L.10 a L.18 mostram a eficiência do filtro de Poliéster utilizando a Equação de PAYET et al (1992).

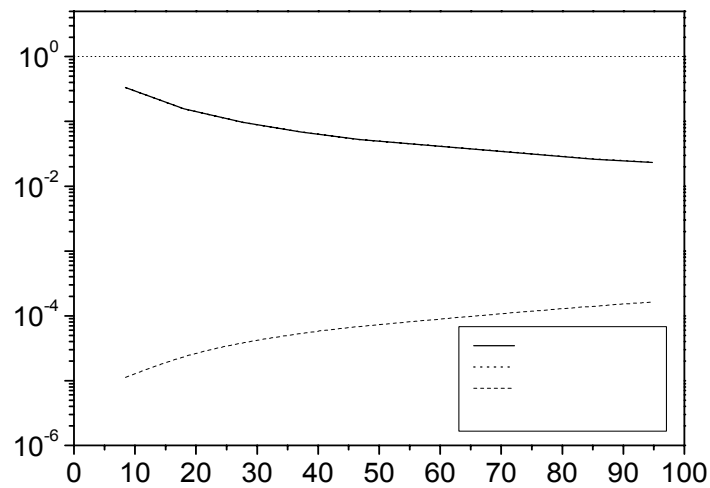


Figura L. 10 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0 = 4,0$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).

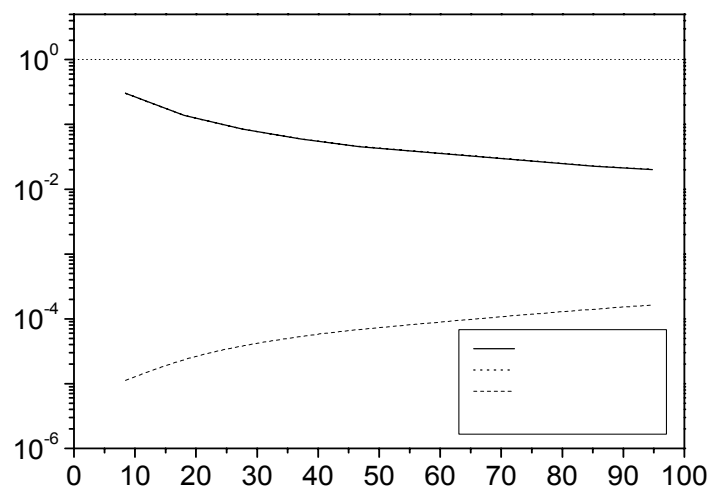


Figura L. 11 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0 = 5,0$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).

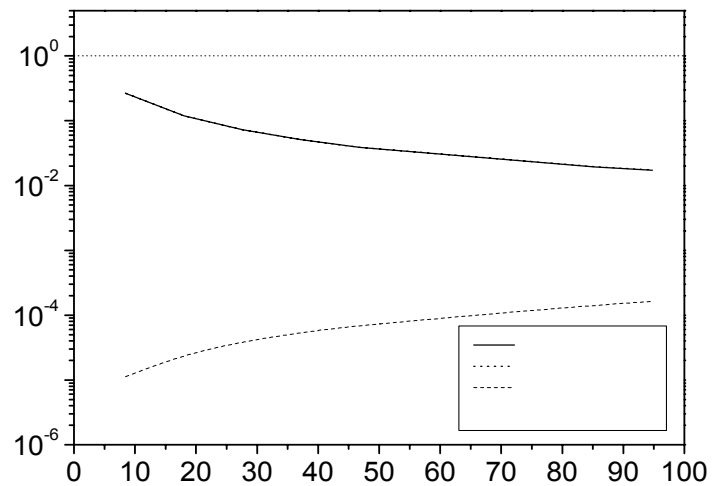


Figura L. 12 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0 = 6,4$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).

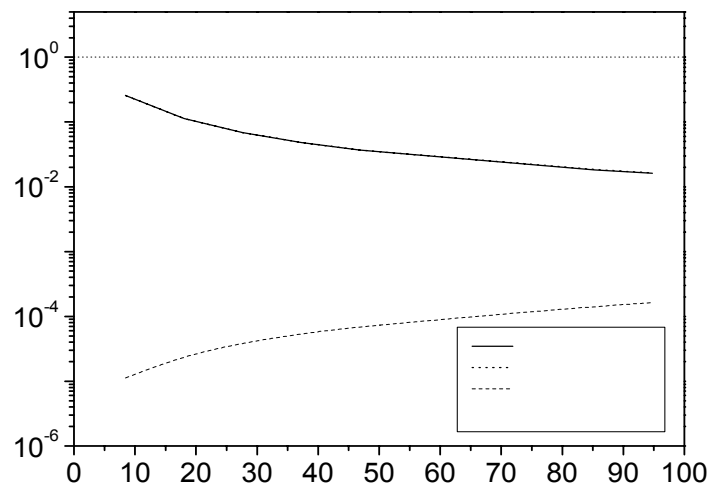


Figura L. 13 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0 = 7,0$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).

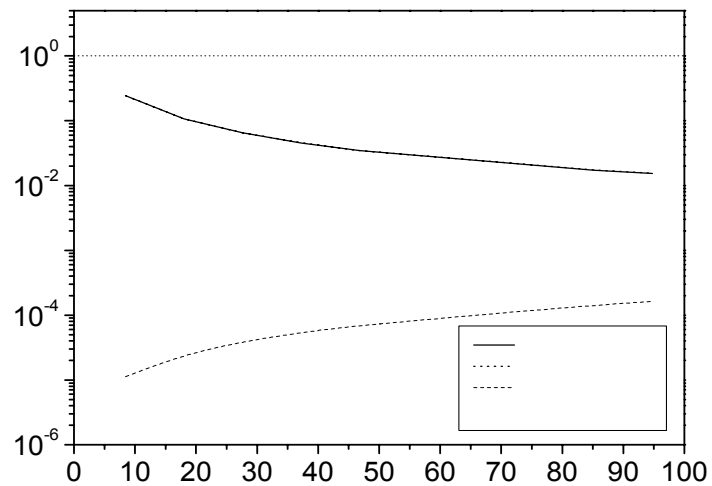


Figura L. 14- Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0 = 7,7$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).

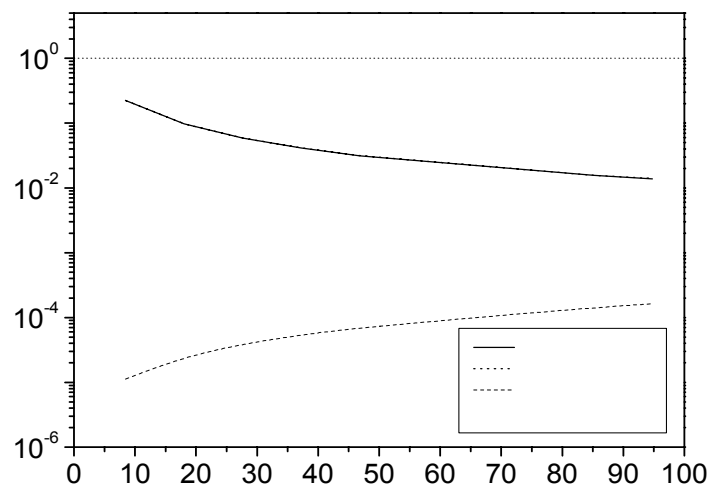


Figura L. 15 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0 = 9,0$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).

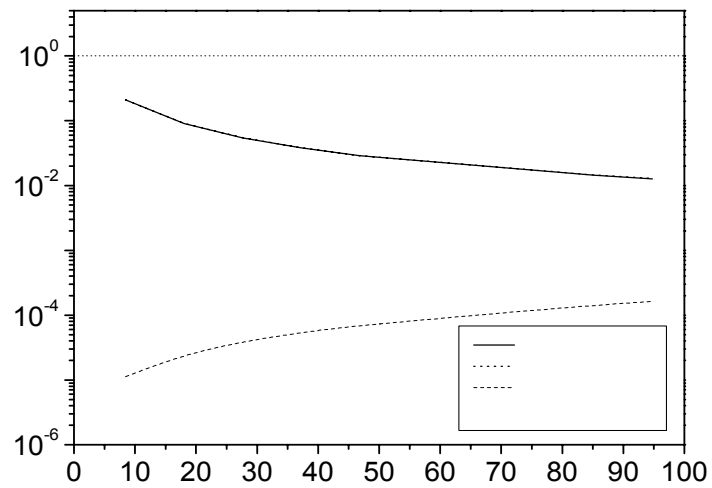


Figura L. 16 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 10,2$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).

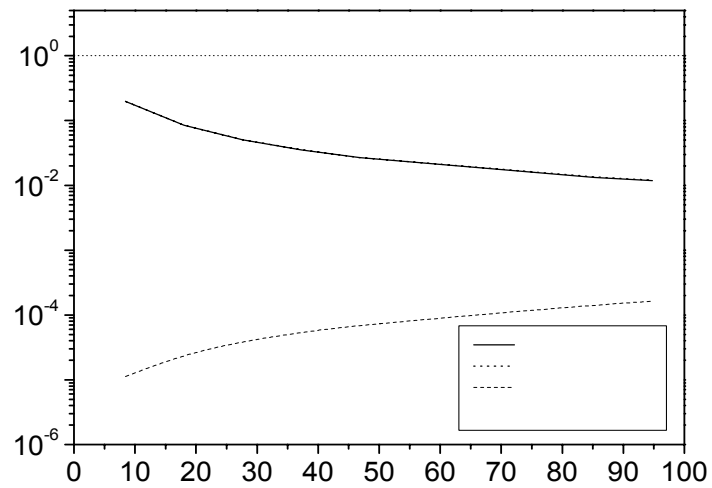


Figura L. 17 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 11,5$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).

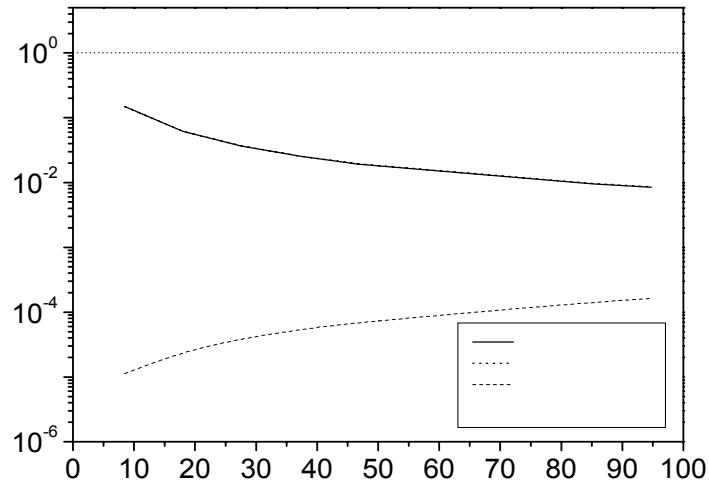


Figura L. 18 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p com $U_0= 19,2$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992).

Eficiência individual de coleta utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p em R.

As Figuras L.19 a L.27 mostram a eficiência do filtro de Poliéster utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p em R.

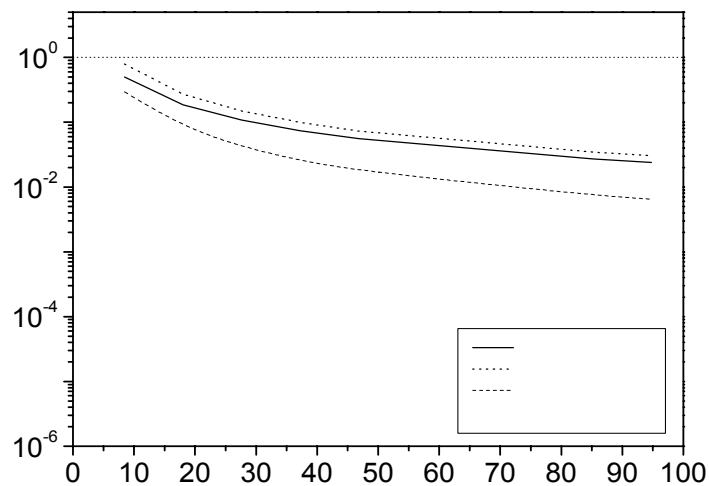


Figura L. 19 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 4,0$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p em R.

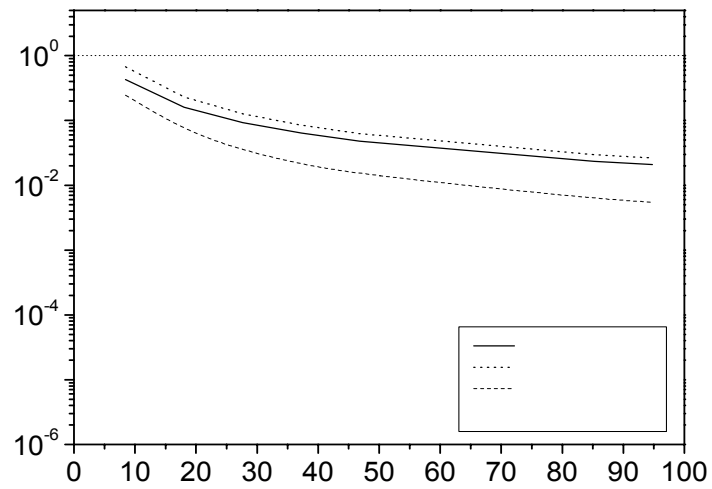


Figura L. 20 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0 = 5,0$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p em μm .

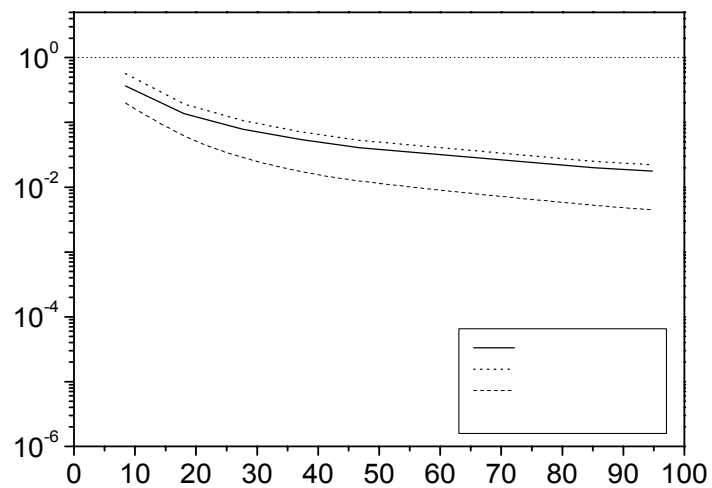


Figura L. 21- Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0 = 6,4$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p em μm .

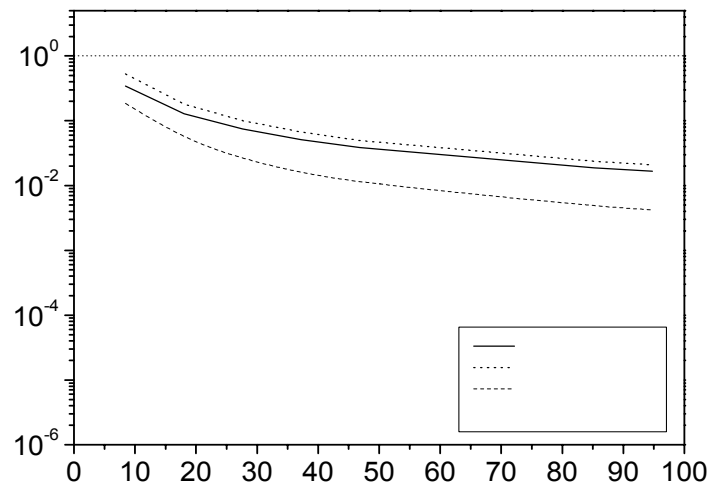


Figura L. 22 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0 = 7,0$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p em R.

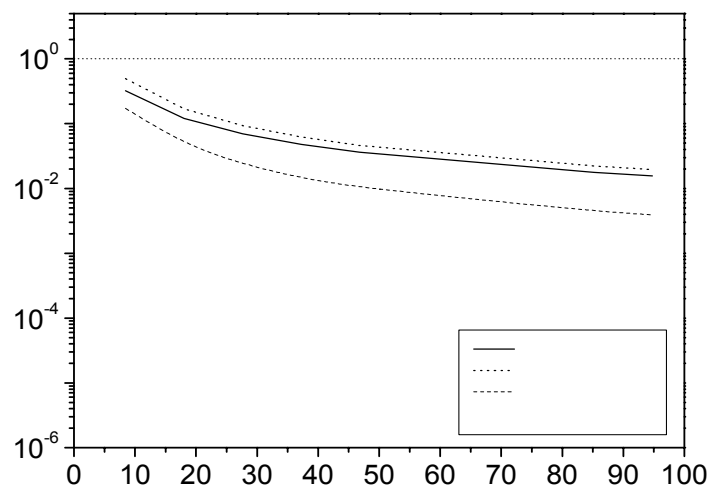


Figura L. 23 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0 = 7,7$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p em R.

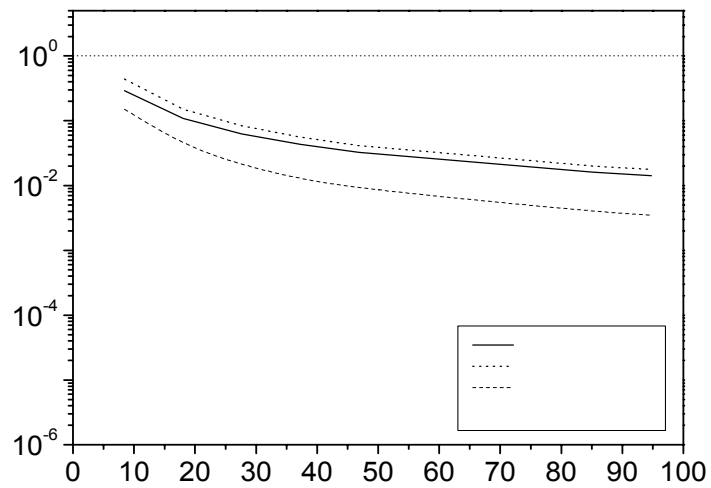


Figura L. 24 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0 = 9,0$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p' em R.

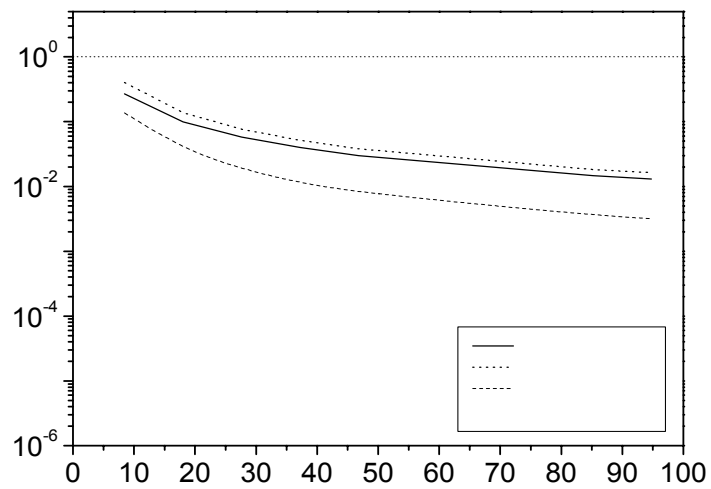


Figura L. 25 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0 = 10,2$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p' em R.

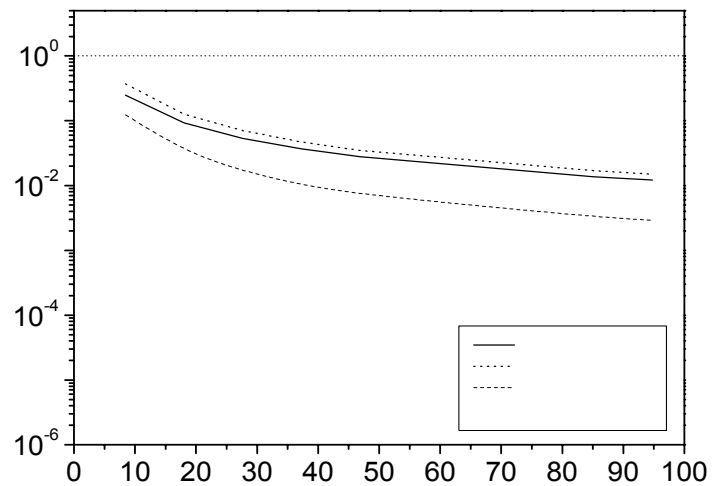


Figura L. 26-Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 11,5$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p' em R.

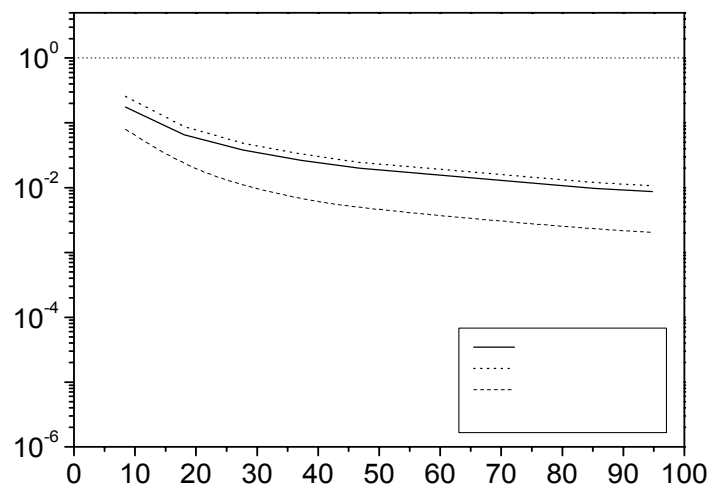


Figura L. 27 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 19,2$ cm/s utilizando a Equação de LIU & RUBOW (1990) com d_p' em R.

Eficiência individual do filtro de Poliéster utilizando Equação de PAYET et al (1992) com d_p em R.

As Figuras L.28 a L.36 mostram a eficiência do filtro de Poliéster utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p em R.

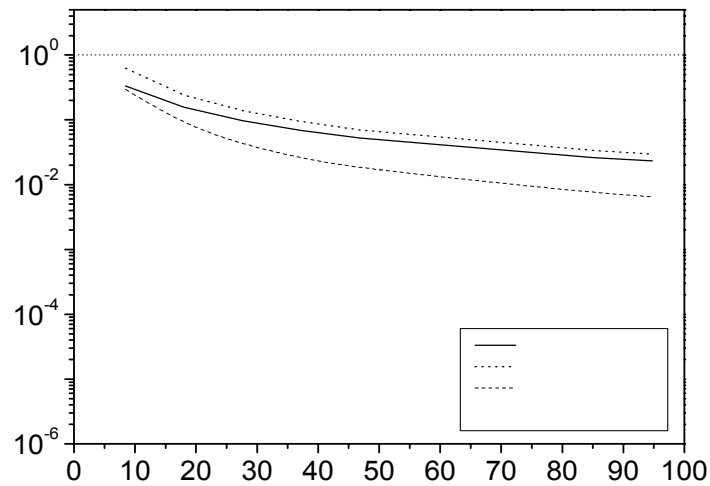


Figura L. 28 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 4,0$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p em R.

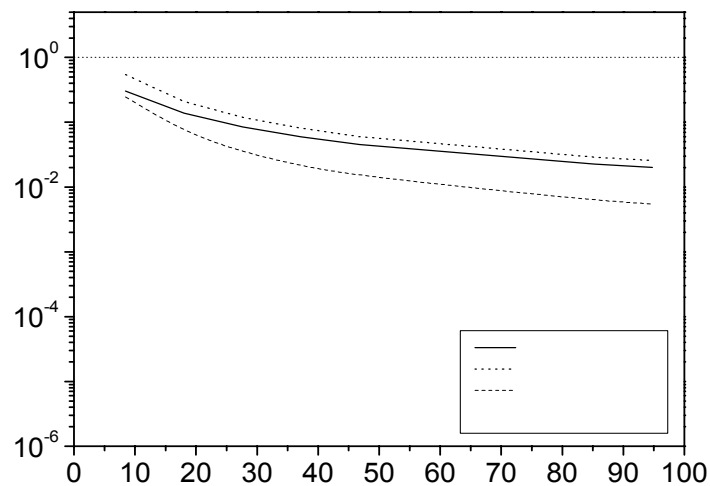


Figura L. 29 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0= 5,0$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p em R.

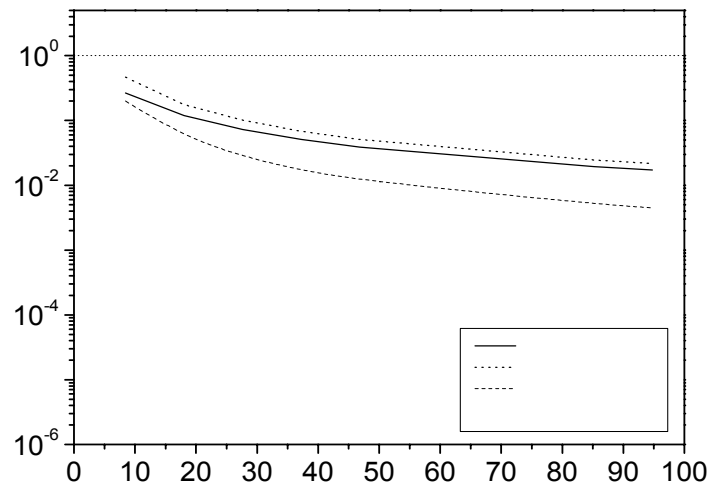


Figura L. 30 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0 = 6,4$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p em R.

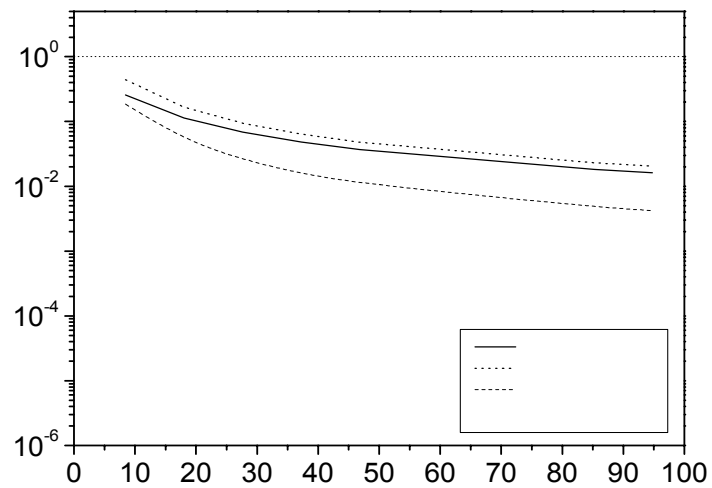


Figura L. 31 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0 = 7,0$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p em R.

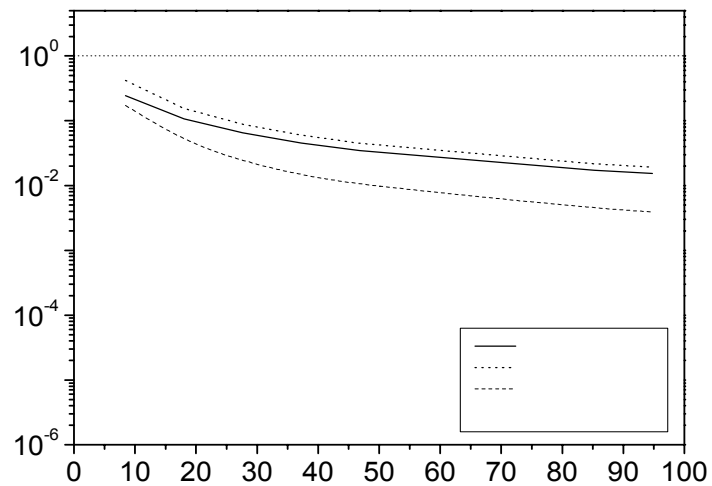


Figura L. 32-Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0 = 7,7$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p em R.

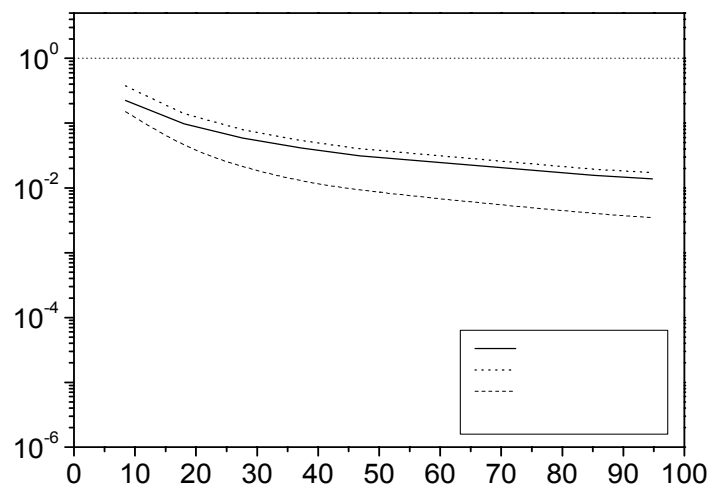


Figura L. 33 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0 = 9,0$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p em R.

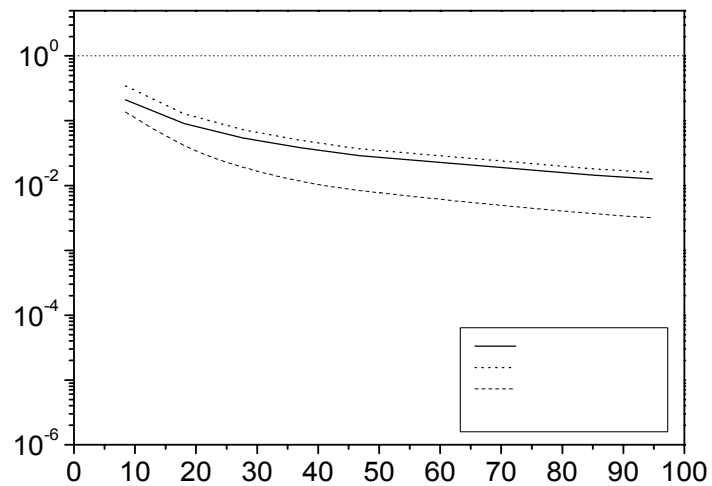


Figura L. 34 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0 = 10,2$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p em R.

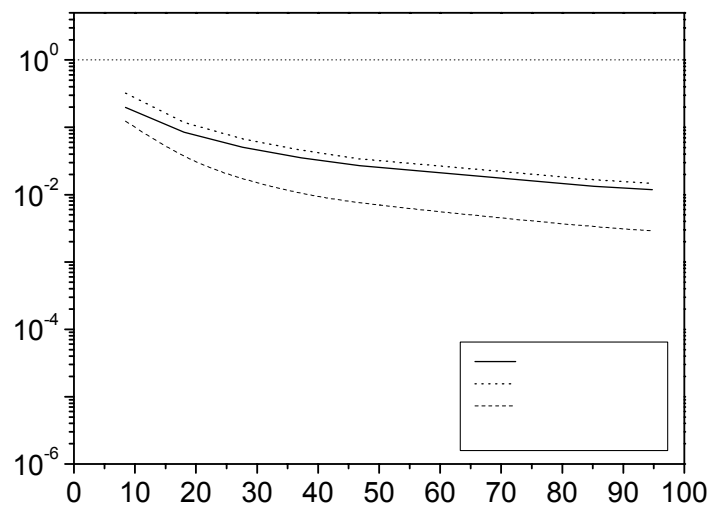


Figura L. 35 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0 = 11,5$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p em R.

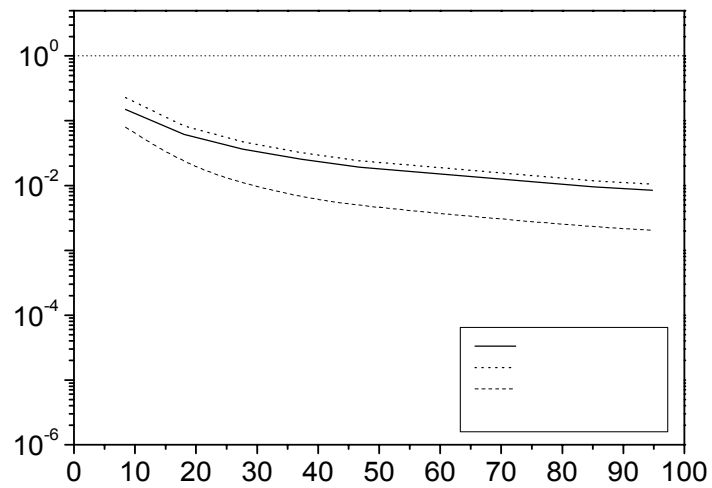


Figura L. 36 - Eficiências individuais de coleta em relação a d_p para $U_0 = 19,2$ cm/s utilizando a Equação de PAYET et al. (1992) com d_p em R.

APÊNDICE M

Concentração de partículas na entrada e saída dos filtros.

Na Tabela M.1 mostra-se a concentração de partículas na entrada e na saída do filtro de poliéster para todas as velocidades estudadas.

Tabela M. 1 - Concentração de partículas na entrada e saída do filtro de poliéster para todas as velocidades estudadas.

Diâmetro das partículas (nm)	U ₀ =3,0 cm/s		U ₀ =4,0 cm/s		U ₀ =5,0 cm/s	
	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)
8,44	4,13.10 ³	56	4,05.10 ³	79	4,00.10 ³	68
18,04	4,23.10 ³	91	4,19.10 ³	125	4,15.10 ³	95
27,63	4,65.10 ³	135	4,49.10 ³	134	4,35.10 ³	122
37,22	4,13.10 ³	132	4,58.10 ³	156	4,55.10 ³	173
46,82	4,20.10 ³	323	4,14.10 ³	327	4,85.10 ³	388
85,19	5,17.10 ³	1.116	4,85.10 ³	1.101	4,53.10 ³	1.123
94,78	6,69.10 ³	1.524	5,52.10 ³	1.325	5,41.10 ³	1.347

Diâmetro das partículas (nm)	U ₀ =6,4 cm/s		U ₀ =7,0 cm/s		U ₀ =7,7 cm/s	
	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)
8,44	3,50.10 ³	66	3,37.10 ³	67	2,93.10 ³	61
18,04	3,86.10 ³	96	3,55.10 ³	114	3,20.10 ³	134
27,63	4,28.10 ³	128	3,96.10 ³	149	3,60.10 ³	172
37,22	4,25.10 ³	246	4,14.10 ³	290	3,70.10 ³	292
46,82	4,37.10 ³	393	4,02.10 ³	402	3,90.10 ³	433
85,19	4,40.10 ³	1.276	4,24.10 ³	1.357	3,83.10 ³	1.280
94,78	5,22.10 ³	1.597	5,05.10 ³	1.702	4,99.10 ³	1.836

Continuação da Tabela M.1

Diâmetro das partículas (nm)	U ₀ =9,0 cm/s		U ₀ =10,2 cm/s		U ₀ =11,5 cm/s	
	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)
8,44	2,71.10 ³	68	2,26.10 ³	75	2,09.10 ³	81
18,04	2,87.10 ³	149	2,67.10 ³	163	2,18.10 ³	162
27,63	3,19.10 ³	216	3,08.10 ³	207	2,72.10 ³	22
37,22	3,17.10 ³	285	3,14.10 ³	327	2,91.10 ³	327
46,82	2,82.10 ³	412	2,16.10 ³	360	2,45.10 ³	431
85,19	3,60.10 ³	1.440	3,16.10 ³	1.338	3,14.10 ³	1.375
94,78	4,15.10 ³	1.768	3,95.10 ³	1.785,40	3,85.10 ³	1.804

Diâmetro das partículas (nm)	U ₀ =12,8 cm/s		U ₀ =19,2 cm/s		U ₀ =25,0 cm/s	
	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)
8,44	1,96.10 ³	88	1,30.10 ²	8	1,10.10 ²	10
18,04	2,16.10 ³	182	1,70.10 ²	23	1,50.10 ²	20
27,63	2,41.10 ³	230	2,30.10 ²	37	1,84.10 ²	39
37,22	2,61.10 ³	324	2,55.10 ²	50	2,07.10 ²	61
46,82	2,89.10 ³	545	2,80.10 ²	69	2,56.10 ²	94
85,19	3,10.10 ³	1.395	2,98.10 ²	143	2,74.10 ²	155
94,78	3,16.10 ³	1.517	3,07.10 ²	172	2,98.10 ²	182

Na Tabela M.2 mostra-se a concentração de entrada e saída do filtro HEPA para todas as velocidades estudadas.

Tabela M. 2 – Concentração de partículas na entrada e saída do filtro HEPA para todas as velocidades estudadas.

Diâmetros das partículas (nm)	U ₀ =3,0 cm/s		U ₀ =4,0 cm/s		U ₀ =5,0 cm/s	
	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)
8,44	1,37.10 ⁴	0,000	1,16.10 ⁴	0,000	1,07.10 ⁴	0,000
18,04	1,54.10 ⁴	0,000	1,43.10 ⁴	0,000	1,22.10 ⁴	0,000
27,63	1,85.10 ⁴	0,000	1,75.10 ⁴	0,001	1,42.10 ⁴	0,000
37,22	2,16.10 ⁴	0,000	2,03.10 ⁴	0,000	1,87.10 ⁴	0,000
46,82	2,44.10 ⁴	0,000	2,10.10 ⁴	0,000	2,04.10 ⁴	0,001
85,19	3,21.10 ⁴	0,000	3,07.10 ⁴	0,010	2,83.10 ⁴	0,010
94,78	4,93.10 ⁴	0,000	4,71.10 ⁴	0,010	4,51.10 ⁴	0,020

Diâmetros das partículas (nm)	U ₀ =6,4 cm/s		U ₀ =7,0 cm/s		U ₀ =7,7 cm/s	
	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)
8,44	0,88.10 ⁴	0,000	0,50.10 ⁴	0,000	0,37.10 ⁴	0,000
18,04	1,17.10 ⁴	0,000	0,86.10 ⁴	0,000	0,52.10 ⁴	0,000
27,63	1,36.10 ⁴	0,000	1,08.10 ⁴	0,000	0,87.10 ⁴	0,000
37,22	1,55.10 ⁴	0,001	1,15.10 ⁴	0,001	0,93.10 ⁴	0,001
46,82	1,85.10 ⁴	0,010	1,37.10 ⁴	0,002	1,02.10 ⁴	0,001
85,19	2,53.10 ⁴	0,010	2,04.10 ⁴	0,020	1,74.10 ⁴	0,010
94,78	4,01.10 ⁴	0,020	3,22.10 ⁴	0,020	3,05.10 ⁴	0,010

Continuação da Tabela M.2

Diâmetros das partículas (nm)	$U_0=9,0$ cm/s		$U_0=10,2$ cm/s		$U_0=11,5$ cm/s	
	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)
8,44	$2,93 \cdot 10^3$	0,001	$2,61 \cdot 10^3$	0,001	$2,26 \cdot 10^3$	0,001
18,04	$0,35 \cdot 10^4$	0,001	$2,97 \cdot 10^3$	0,001	$2,67 \cdot 10^3$	0,001
27,63	$0,42 \cdot 10^4$	0,001	$3,29 \cdot 10^3$	0,001	$3,08 \cdot 10^3$	0,001
37,22	$0,61 \cdot 10^4$	0,002	$3,57 \cdot 10^3$	0,002	$3,14 \cdot 10^3$	0,010
46,82	$0,84 \cdot 10^4$	0,002	$5,92 \cdot 10^3$	0,003	$6,26 \cdot 10^3$	0,010
85,19	$1,23 \cdot 10^4$	0,010	$0,94 \cdot 10^4$	0,010	$7,06 \cdot 10^3$	0,071
94,78	$2,01 \cdot 10^4$	0,020	$1,13 \cdot 10^4$	0,010	$9,05 \cdot 10^3$	0,090

Diâmetros das partículas (nm)	$U_0=12,8$ cm/s		$U_0=19,2$ cm/s		$U_0=25$ cm/s	
	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)	Entrada (#/cm ³)	Saída (#/cm ³)
8,44	$2,09 \cdot 10^3$	0,001	$1,86 \cdot 10^3$	0,001	$0,52 \cdot 10^3$	0,001
18,04	$2,18 \cdot 10^3$	0,001	$2,06 \cdot 10^3$	0,002	$0,74 \cdot 10^3$	0,001
27,63	$2,76 \cdot 10^3$	0,002	$2,41 \cdot 10^3$	0,001	$0,93 \cdot 10^3$	0,001
37,22	$2,94 \cdot 10^3$	0,001	$2,62 \cdot 10^3$	0,001	$1,05 \cdot 10^3$	0,001
46,82	$3,40 \cdot 10^3$	0,002	$3,13 \cdot 10^3$	0,004	$1,21 \cdot 10^3$	0,013
85,19	$5,07 \cdot 10^3$	0,005	$4,21 \cdot 10^3$	0,181	$1,80 \cdot 10^3$	0,113
94,78	$7,05 \cdot 10^3$	0,007	$6,10 \cdot 10^3$	0,244	$2,90 \cdot 10^3$	0,174

APÊNDICE N

Queda de pressão dos filtros

Na filtração a queda de pressão é um parâmetro importante no processo, pois altos valores inviabilizam o processo. Neste trabalho, a deposição ou até a formação de torta no filtro é desprezível, como pode-se verificar a seguir. Foi escolhido o maior diâmetro de partícula para verificar a se havia queda de pressão nos filtros, pois diâmetros menores não influenciam, pois o tempo de filtração era pequeno.

A Figura N.1 mostra o comportamento da queda de pressão do filtro de poliéster em função do tempo, para $d_p = 94,78$ nm.

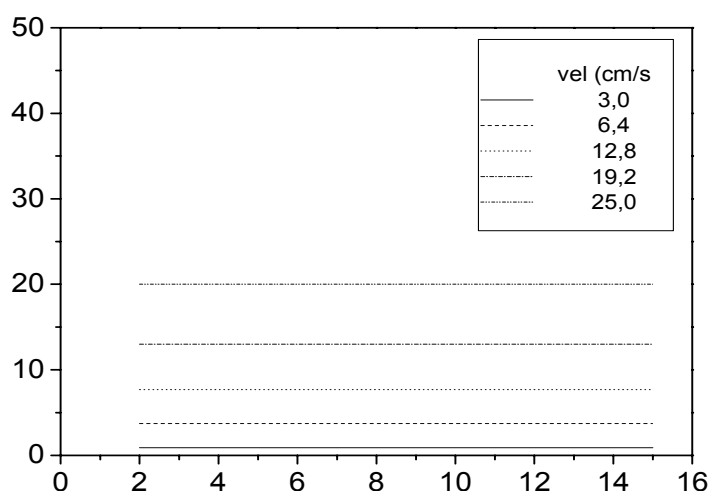


Figura N. 1 - Variação da queda de pressão do filtro de Poliéster em função do tempo para $U_0 = 3,0$ a $25,0$ cm/s e $d_p = 94,8$ nm.

O filtro de poliéster apresenta uma queda de pressão máxima de 20 mmca para $U_0 = 25,0$ cm/s e mínima de 1 mmca para $U_0 = 3,0$ cm/s, permanecendo constante em cada velocidade. Como as partículas são muito pequenas e o tempo de filtração é curto, não há

acúmulo de partículas sobre o filtro, o que não deixa ocorrer aumento de queda de pressão numa determinada velocidade.

A Figura N.2 mostra o comportamento da queda de pressão do filtro HEPA em função do tempo, para $d_p = 94,8$ nm.

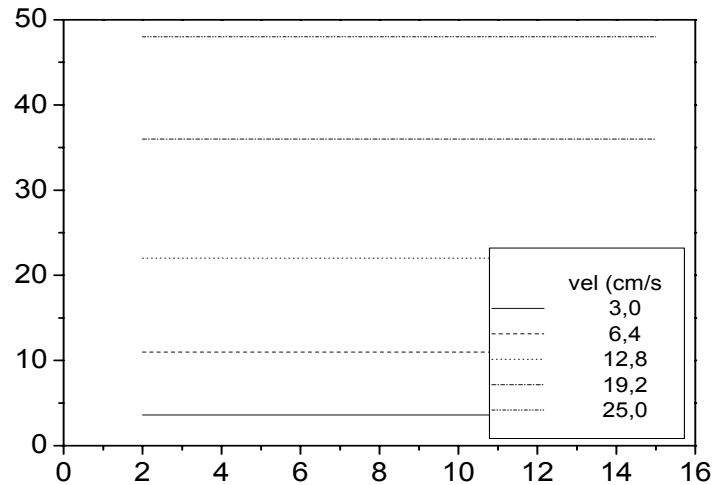


Figura N. 2 - Variação da queda de pressão do filtro HEPA em função do tempo para $U_0 = 3,0$ a $25,0$ cm/s e $d_p = 94,8$ nm.

O que se pode verificar é que a queda de pressão não aumenta com o tempo, mas somente aumenta com a velocidade. Como as partículas são muito pequenas, a deposição delas nas fibras ocorre, mas o acúmulo não é percebido.

A queda de pressão no filtro HEPA permanece constante com o tempo e aumenta com a velocidade.

Como pode-se verificar, a queda de pressão do filtro de poliéster é muito menor que a do filtro HEPA, devido a diferente estrutura do mesmo.

Na Tabela N.1 mostra-se os valores das quedas de pressão do filtro de poliéster e HEPA, e verifica-se que a queda de pressão não muda com o tempo, ela só muda com a velocidade.

Tabela N. 1 - Valores das quedas de pressão do filtro de poliéster e HEPA.

Tempo (min)	Queda de pressão do filtro de poliéster (mmca)					Queda de pressão do filtro HEPA (mmca)				
	Velocidade (cm/s)					Velocidade (cm/s)				
	3,0	6,4	12,8	19,2	25,0	3,0	6,4	12,8	19,2	25,0
2	0,9	3,7	7,7	13,0	20	3,6	11,0	22,0	36,0	48,0
5	0,9	3,7	7,7	13,0	20	3,6	11,0	22,0	36,0	48,0
10	0,9	3,7	7,7	13,0	20	3,6	11,0	22,0	36,0	48,0
15	0,9	3,7	7,7	13,0	20	3,6	11,0	22,0	36,0	48,0