

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

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MEIOS FILTRANTES FIBROSOS  
NA REMOÇÃO DE PARTÍCULAS NANOMÉTRICAS**

**Priscila Martins de Barros**

**São Carlos – SP**

**2014**

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

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MEIOS FILTRANTES FIBROSOS  
NA REMOÇÃO DE PARTÍCULAS NANOMÉTRICAS**

**Priscila Martins de Barros**

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

**Orientadora: Mônica Lopes Aguiar**

**São Carlos - SP**

**2014**

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

B277ad Barros, Priscila Martins de.  
Avaliação do desempenho de meios filtrantes fibrosos na  
remoção de partículas nanométricas / Priscila Martins de  
Barros. -- São Carlos : UFSCar, 2014.  
73 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos,  
2014.

1. Filtração de gases. 2. Nanopartículas. 3. Filtros  
fibrosos. I. Título.

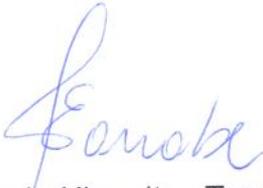
CDD: 660.284245 (20<sup>a</sup>)

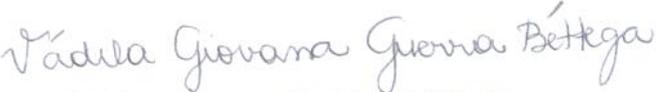
MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **PRISCILA MARTINS DE BARROS**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS EM 31 DE MARÇO DE 2014.

BANCA EXAMINADORA:

  
Mônica Lopes Aguiar  
**Orientadora / UFSCar**

  
Fábio de Oliveira Arouca  
**UFU**

  
Eduardo Hiromitsu Tanabe  
**UFSM**

  
Vádila Giovana Guerra Béttega  
**UFSCar**

  
Gabriela Cantarelli Lopes  
**UFSCar**

À minha família,  
meus maiores incentivadores.

“A alegria não chega apenas no encontro do achado, mas faz parte do processo da busca.

E ensinar e aprender não pode dar-se fora da procura, fora da boniteza e da alegria.”

(Paulo Freire)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por estar sempre presente em minha vida, iluminando e guiando meus passos, por ter me dado forças para seguir em frente nos momentos de desânimo.

Aos meus pais, Luiz e Abigail, pelo amor incondicional, incentivos e por sempre acreditarem em mim. Amo muito vocês!

Às minhas irmãs, Pauline e Patrícia, por todo amor, amizade, incentivos e por estarmos sempre unidas.

A todos os meus familiares, pelo carinho demonstrado por mim.

Ao Ruan pelo amor, carinho, paciência, incentivo e ajuda. Mesmo estando longe, você esteve sempre junto comigo!

À minha orientadora Mônica Lopes Aguiar, pela orientação, amizade, apoio nos momentos de desânimo e por sempre acreditar em mim.

Aos técnicos Marcos, Oscar e Adilson pelos socorros prestados.

À Bruna, Renata, Lívia, Ariany e Isabela, companheiras de república, pela companhia e pelos momentos de descontração.

Ao Eduardo (Japa) por todas as ajudas nos momentos de desespero e também pela amizade.

Aos amigos do Controle Ambiental I. Obrigada pela presença constante!

À todos os amigos de São Carlos!

À CAPES pelo apoio financeiro e ao Departamento de Engenharia Química da UFSCar pelas instalações para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Os filtros fibrosos são altamente eficientes na remoção de partículas micrométricas, mas na remoção de partículas na faixa nanométrica seu desempenho é ainda pouco conhecido. Durante a filtração, à medida que as partículas são depositadas no meio filtrante, tanto a queda de pressão quanto a eficiência de coleta tendem a aumentar. Diante disso, este trabalho objetivou verificar a deposição das partículas em meios filtrantes fibrosos e o desempenho deles limpos e durante esta deposição. Foi utilizado filtro de fibras de celulose (HEPA) e Poliéster na remoção de partículas nanométricas de NaCl. A deposição foi avaliada através das curvas de queda de pressão em função da massa acumulada. O desempenho do filtro foi avaliado pela contagem de partículas antes e após o meio filtrante e a queda de pressão foi monitorada a fim de obter as curvas de filtração. A velocidade de filtração foi mantida em  $6 \text{ cm.s}^{-1}$  e a concentração da solução gerada a uma vazão de  $0,0042 \text{ L/min}$  em um inalador comercial foi de  $5 \text{ g.L}^{-1}$ . Os resultados mostraram que a deposição das partículas nestes filtros ocorreu primeira no interior dos meios filtrantes e em seguida na superfície em ambos os filtros. O filtro HEPA apresentou menor permeabilidade, maior resistência específica da torta e menor ponto de colmatção. As eficiências experimentais para os filtros limpos variaram de 99,8 a 100% para o filtro HEPA e de 15 a 100% para o filtro de poliéster para a faixa de partículas avaliadas. As eficiências teóricas se ajustaram satisfatoriamente aos dados experimentais no filtro de fibras heterogêneas, para o filtro de fibras homogêneas, o ajuste não foi tão satisfatório. Ambos os filtros apresentaram uma aleatoriedade de dados experimentais, o que provavelmente ocorreu na região de transição entre mecanismos de coleta. Durante a deposição, a eficiência dos meios filtrantes aumentou com a deposição das partículas, chegando a 100% de eficiência ao final da filtração.

## ABSTRACT

Fibrous filters are highly efficient in removing micrometric particles, but when is related on the removal of particles in the nanometer range, their performance is still poorly understood. During filtration, as the particles are deposited on the filter medium, the pressure drops as much as the collection efficiency tends to increase. Thus, this study aimed to determine the deposition of particles in fibrous filter media and their performance, when clean, during this deposition. A cellulose fiber filter (HEPA) and a polyester one were used in the removal of nanometric particles of NaCl. The deposition was assessed by the pressure drop curves as a function of the accumulated mass. The filter performance was avaliated by counting the particles before and after the filter medium and the pressure was monitored to obtain the filtration curves. The filtration rate was maintained at  $6 \text{ cm.s}^{-1}$  and the concentration of the generated solution at  $0.0042 \text{ L min}^{-1}$  in a commercial inhaler was  $5 \text{ g L}^{-1}$ . The results showed that the deposition of these particles occurred first in the interior of the filters media and then in the surface of both filters. The HEPA filter showed lower permeability, higher specific strength of the cake filtration and lower point of clogging. The efficiencies for the cleaned filters ranged from 99.8 to 100% for the HEPA filter and from 15 to 100% for the polyester filter, for the range of particles avaliated. The theoretical efficiencies fitted to the experimental data in the filter of heterogeneous fibers. For the filter of homogeneous fibers, the data also did fit satisfactorily. Both filters showed, probably in the transition region between the mechanisms of collection, a randomness of experimental data. During deposition, the efficiency of the filter medium increased with the deposition of particles, reaching 100% of efficiency at the end of filtration.

## Lista de Figuras

Figura 2. 1: Forma dos dendritos no interior do meio filtrante. ....	5
Figura 2. 2: Método proposto por Walsh (1996).....	6
Figura 2. 3: Tamanho relativo das partículas e padrões de deposição por via aérea no sistema respiratório.....	8
Figura 2. 4: Mecanismo de coleta por difusão.....	16
Figura 2. 5: Mecanismo de coleta por impactação inercial. ....	17
Figura 2. 6: Mecanismo de coleta por interceptação direta.....	18
Figura 2. 7: Mecanismo de coleta por atração gravitacional.....	19
Figura 2. 8: Mecanismo de coleta eletroforético, (a) Coulômbico e (b) Dipolo-imagem. ....	20
Figura 2. 9: Eficiência de coleta com relação aos mecanismos.....	21
Figura 3. 1: Distribuição de diâmetros das partículas nanométricas geradas.....	23
Figura 3. 2: Imagem da superfície do meio filtrante de celulose (HEPA) obtida em MEV.....	24
Figura 3. 3: Imagem da superfície do meio filtrante de Poliéster obtida em MEV.....	25
Figura 3. 4: Unidade experimental.....	28
Figura 3. 5: Dispositivo de purificação de ar.....	29
Figura 3. 6: Gerador de partículas.....	30
Figura 3. 7: Secador de difusão.....	31
Figura 3. 8: Fonte Neutralizadora de Kriptônio.....	32
Figura 3. 9: Fonte Neutralizadora de Amerício.....	32
Figura 3. 10: Dispositivo de filtração.....	33
Figura 3. 11: Esquema das sondas de amostragem.....	34
Figura 3. 12: Manômetro digital.....	35
Figura 3. 13: SMPS.....	35
Figura 3. 14: Torres (1) Long-DMA e (2) Nano-DMA.....	36
Figura 3. 15: Princípio de funcionamento do DMA.....	37
Figura 4. 1: $\Delta P/L$ em função da velocidade superficial para o filtro HEPA.....	42
Figura 4. 2: Queda de pressão em função da massa acumulada para o filtro HEPA.....	42

Figura 4. 3: Partículas depositadas no filtro HEPA a uma queda de pressão de: a)451; b)549; c)647; d)745; e) 843 e f)1333Pa.....	44
Figura 4. 4:: Ponto de colmatação para o filtro HEPA.....	45
Figura 4. 5: Curva para obtenção da Resistência específica da torta para o filtro HEPA .....	46
Figura 4. 6: Concentração de Partículas antes da passagem pelo meio filtrante .....	47
Figura 4. 7: Concentração de Partículas depois da passagem pelo meio filtrante.....	47
Figura 4. 8: Eficiência de Coleta Experimental do filtro HEPA .....	48
Figura 4. 9: Eficiência de coleta experimental e teórica para o filtro HEPA. ....	49
Figura 4. 10: Comparação entre eficiência de coleta experimental e teórica para o filtro HEPA. ....	49
Figura 4. 11: Eficiência de coleta antes e durante a deposição para o filtro HEPA.....	50
Figura 4. 12: $\Delta P/L$ em função da velocidade superficial para o filtro de Poliéster .....	51
Figura 4. 13: Queda de pressão em função da massa acumulada para o filtro de Poliéster .....	52
Figura 4. 14: Partículas depositadas no filtro HEPA a uma queda de pressão de: a)140; b)238; c)336; d)434; e) 532 e f)1022Pa.....	54
Figura 4. 15: Ponto de Colmatação do filtro de poliéster.....	55
Figura 4. 16: Resistência específica da torta para o filtro de poliéster.....	56
Figura 4. 17: Concentração de Partículas antes e após da passagem pelo filtro.....	57
Figura 4. 18: Eficiência experimental do filtro de poliéster.....	57
Figura 4. 19: Eficiência de coleta experimental e teórica para o filtro de Poliéster.....	58
Figura 4. 20: Eficiência de coleta experimental x teórica para o filtro de Poliéster.....	59
Figura 4. 21: Eficiência de coleta antes e após a filtração.....	60
Figura 4. 22: Dendrito observado no filtro HEPA.....	61
Figura 4. 23: Dendritos observados no filtro de Poliéster .....	61
Figura A.1: Metodologia para obtenção do diâmetro das fibras para o Poliéster .....	72
Figura A.2: Metodologia para obtenção do diâmetro das fibras para o filtro HEPA.....	73

## Lista de Tabelas

Tabela 3. 1: Caracterização do meio filtrante de fibras heterogêneas .....	27
Tabela 3. 2: Porosidade e fração de fibras para cada conjunto de fibras.....	27
Tabela 3. 3: Caracterização do meio filtrante de fibras homogêneas .....	28
Tabela 3. 4: Parâmetros pré-estabelecidos para configuração do SMPS .....	38
Tabela 4. 1: Valores do ponto de colmatação e resistência específica da torta do filtro HEPA ...	46
Tabela 4. 2: Valores do ponto de colmatação e resistência específica da torta .....	56

## Lista de Símbolos

A	Área do Filtro	$[L^2]$
$A_p$	Área projetada pelas fibras	$[L^2]$
C	Concentração de partículas no gás	$[M L^{-3}]$
$C_0$	Concentração de partículas na entrada do filtro	$[M L^{-3}]$
$C_d$	Termo de correção para o efeito difusional	[-]
$C_E$	Concentração de partículas na saída do filtro	$[M L^{-3}]$
$C_r$	Fator de correção para o mecanismo de interceptação direta	[-]
D	Coefficiente de difusividade	$[L^2 t^{-1}]$
$D_f$	Diâmetro das fibras	[L]
$D_{fi}$	Diâmetro das fibras com determinada faixa de tamanho	[L]
$d_p$	Diâmetro da partícula	[L]
dC	Varição da concentração de partículas	[-]
dL	Elemento diferencial da espessura do filtro	[L]
E	Eficiência do filtro	[-]
$F_S$	Fator de escorregamento de Cunningham	[-]
g	Aceleração da gravidade	$[L t^{-2}]$
$k_I$	Constante de permeabilidade do meio filtrante	$[L^2]$
$k_M$	Resistência do meio filtrante	$[L^2]$
$k_C$	Resistência específica da torta de filtração	$[t^{-1}]$
$K_B$	Constante de Boltzmann	$[M L^2 t^{-2} T^{-1}]$

$K_M$	Parâmetro adimensional do mecanismo dipolo imagem	[-]
$K_n$	Número de Knudsen da partícula	[-]
$K_{nf}$	Número de Knudsen da fibra	[-]
$K$	Coefficiente Hidrodinâmico de Kuwabara	[-]
$L$	Espessura do filtro	[L]
$L_f$	Comprimento da fibra por unidade de volume	[L L <sup>-3</sup> ]
$N_c$	Número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo	[L <sup>-1</sup> ]
$N_p$	Número de partículas depositadas por unidade de tempo	[-]
$P$	Penetração	[-]
$P_{abs}$	Pressão absoluta	[M L <sup>-1</sup> t <sup>-2</sup> ]
$Pe$	Número de Peclet	[-]
$q$	Carga da partícula	[C]
$R$	Parâmetro de interceptação direta	[-]
$St$	Número de Stokes	[-]
$T$	Temperatura absoluta	[T]
$v$	Velocidade intersticial do gás	[L t <sup>-1</sup> ]
$v_s$	Velocidade superficial do gás	[L t <sup>-1</sup> ]
$v_t$	Velocidade terminal da partícula	[L t <sup>-1</sup> ]
$x_i$	Fração de fibras com determinado diâmetro	[-]
$W$	Massa depositada por unidade de área	[ML <sup>-2</sup> ]
$\beta$	Volume ocupado pelas fibras	[L <sup>3</sup> ]
$\Delta P$	Queda de pressão	[M L <sup>-1</sup> t <sup>-2</sup> ]
$\Delta P_T$	Queda de pressão total	[M L <sup>-1</sup> t <sup>-2</sup> ]

$\Delta P_M$	Queda de pressão referente ao meio filtrante	
$\Delta P_C$	Queda de pressão referente à torta	
$\Delta P_0$	Queda de pressão inicial	$[M L^{-1} t^{-2}]$
$\Delta P_{m\acute{a}x}$	Queda de pressão máxima	$[M L^{-1} t^{-2}]$
$\varepsilon$	Porosidade do filtro	[-]
$\varepsilon_0$	Permissividade do vácuo	$[t^2 C^2 M^{-1} L^{-3}]$
$\varepsilon_p$	Constante dielétrica da partícula	[-]
$\varepsilon_i$	Porosidade de determinada fração de fibras	[-]
$\varepsilon_f$	Constante dielétrica do fluido	[-]
$\gamma_c$	Coefficiente de polarização do coletor	[-]
$\eta_d$	Eficiência de coleta difusional	[-]
$\eta_e$	Eficiência de coleta eletroforética	[-]
$\eta_g$	Eficiência de coleta gravitacional	[-]
$\eta_i$	Eficiência de coleta inercial	[-]
$\eta_{id}$	Eficiência de coleta por interceptação direta	[-]
$\eta_t$	Eficiência total dos mecanismos de coleta	[-]
$\eta_{ti}$	Eficiência total dos mecanismos de coleta para uma fração de fibras	[-]
$\mu$	Viscosidade do gás	$[M L^{-1} t^{-1}]$
$\rho_p$	Densidade da partícula	$[M L^{-3}]$
$\rho_g$	Densidade do gás	$[M L^{-3}]$
$\lambda$	Caminho livre médio do gás	[L]
$\#/cm^3$	Número de partículas por unidade de volume	$[L^{-3}]$

## Sumário

RESUMO .....	i
ABSTRACT .....	ii
Lista de Figuras .....	iii
Lista de Tabelas .....	v
Lista de Símbolos .....	vi
CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO 2 .....	3
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1. Filtração .....	3
2.2. Nanotecnologia e nanopartículas .....	6
2.3. Meios filtrantes .....	8
2.4. Permeabilidade .....	9
2.5. Eficiência de coleta dos Filtros Fibrosos .....	10
2.6. Mecanismos de coleta .....	13
2.6.1. Mecanismo Difusional .....	14
2.6.2. Mecanismo Inercial .....	16
2.6.3. Mecanismo de interceptação direta .....	17
2.6.4. Mecanismo gravitacional .....	19
2.6.5. Mecanismo eletroforético .....	20
2.6.6. Coleta simultânea por vários mecanismos .....	21
CAPÍTULO 3 .....	23
MATERIAIS E MÉTODOS .....	23
3. 1. Material Particulado .....	23
3. 2. Meio Filtrante .....	24
3. 2. 1. Filtro de Fibras Heterogêneas .....	24
3. 2. 2. Filtro de Fibras Homogêneas .....	25
3. 3. Caracterização dos Meios Filtrantes .....	25
3. 3.1. Determinação da Espessura dos Meios Filtrantes .....	25
3. 3.2. Determinação do Diâmetro das Fibras .....	26
3. 3.3. Determinação da Porosidade dos Meios Filtrantes .....	26
3. 3.4. Caracterização do Meio Filtrante de Fibras Heterogêneas .....	26

3. 3.5. Caracterização do Meio Filtrante de Fibras Homogêneas.....	28
3. 4. Descrição da Unidade Experimental .....	28
3.4.1. Compressor de ar .....	29
3.4.2. Filtros de purificação .....	29
3.4.3. Gerador de partículas.....	30
3.4.4. Secador de difusão.....	31
3.4.5. Fontes Neutralizadoras .....	31
3.4.6. Dispositivo de filtração.....	32
3.4.7. Amostragem de partículas .....	33
3.4.9. Manômetro .....	34
3.4.10. Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica (SMPS) .....	35
3.5. Procedimento Experimental .....	37
3.5.1. Permeabilidade dos meios filtrantes.....	38
3.5.2. Ensaio de filtração.....	38
3.5.3. Ensaio de eficiência .....	39
CAPÍTULO 4 .....	41
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1. Filtro de Fibras Heterogêneas.....	41
4.1.1. Permeabilidade .....	41
4.1.2. Ensaio de Filtração (Deposição das partículas).....	42
4.1.3. Ponto de Colmatação e Resistência Específica da Torta.....	43
4.1.4. Ensaio de Eficiência Experimental.....	46
4.1.5. Eficiência Experimental x Eficiência Teórica .....	48
4.1.6. Eficiência de Coleta após a Deposição das partículas .....	50
4.2. Filtro de Fibras Homogêneas.....	51
4.2.1. Permeabilidade .....	51
4.2.2. Ensaio de Filtração (Deposição das partículas).....	52
4.2.3. Ponto de Colmatação e Resistência Específica da Torta.....	55
4.2.4. Ensaio de Eficiência Experimental.....	56
4.2.5. Eficiência Experimental x Eficiência Teórica .....	58
4.2.6. Eficiência de Coleta após a Deposição das partículas .....	59
4.3. Formação dos Dendritos.....	60
4.4. Comparação entre os Filtros .....	62
CAPÍTULO 5 .....	64

CONCLUSÕES .....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	66
Anexo A.....	70
Apêndice A.....	72

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica está diretamente relacionada aos processos industriais e de geração de energia, aos veículos automotores, à ocorrência de queimadas, sendo que na maioria das vezes são tóxicos à saúde humana e responsáveis por danos à flora terrestre.

É de se esperar que o aparecimento de novas tecnologias traga consequências inesperadas, sendo elas benéficas ou prejudiciais. Sendo assim, é importante tentar reduzir os efeitos prejudiciais de forma a não comprometer os feitos benéficos dessas novas tecnologias (SEATON et al., 2010).

De acordo com a EPA (Environmental Protection Agency), o tamanho da partícula está diretamente relacionado ao seu poder de causar danos à saúde humana. Uma especial atenção tem sido dada atualmente às partículas finas devido ao seu poder patogênico. Segundo esta mesma agência, já é confirmada a relação entre a exposição a partículas finas e problemas respiratórios, hospitalizações e mortes prematuras.

Desta forma, estudar metodologias para diminuir a exposição a estas partículas está sendo uma exigência dos órgãos governamentais. Dentre as técnicas disponíveis para tal fim, a filtração é a que vem se destacando dentre as demais, por ser uma operação simples na coleta de material particulado. Os filtros fibrosos vêm sendo amplamente utilizados por serem altamente eficazes para separar partículas de um fluxo de gás. Sabe-se que a eficiência de coleta para remover partículas micrométricas está acima de 99%, e na remoção de partículas na faixa nanométrica, o desempenho destes filtros está sendo estudado atualmente.

Durante a filtração, à medida que as partículas são depositadas no meio filtrante, tanto a queda de pressão quanto a eficiência de coleta tendem a aumentar. A queda de pressão

---

aumenta devido ao aumento da resistência à passagem do fluxo provocada pela deposição das partículas. Já a eficiência aumenta devido à formação de cadeias de partículas (dendritos) sobre as fibras, sendo que estas partículas passam a atuar como coletores. Cai (1989) comenta que o tamanho e a forma dos dendritos podem influenciar no comportamento do filtro durante a filtração.

Grande parte dos trabalhos encontrados na literatura refere-se ao desempenho inicial do meio filtrante, ou seja, ao seu desempenho quando limpo, sem partículas depositadas, como no caso de VanOsdell et al., (1990), Lee e Liu (1981), Podgórski; Balazi; Gradón, (2006), Steffens e Coury (2007a, 2007b), Kim et al., (2007) e Feitosa (2009).

Desta forma, se verifica a importância de se estudar a deposição das partículas no meio filtrante bem como a influência que esta deposição gera no desempenho dos filtros. Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento de dois diferentes meios filtrantes fibrosos na remoção de partículas nanométricas de NaCl e também verificar a influência desta deposição no desempenho dos meios filtrantes.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica foi elaborada a fim de apresentar uma visão geral da teoria de filtração aplicada a este trabalho juntamente com uma definição e os efeitos adversos causados pelas nanopartículas.

#### 2.1. Filtração

Dentre os métodos de remoção de material particulado de um fluxo de gás, a filtração é uma técnica que têm se destacado dentre as demais, devido à simplicidade de operação, alta eficiência e por ser uma técnica que apresenta um custo relativamente baixo.

Durante este processo, um fluxo de gás contendo partículas atravessa um meio filtrante poroso. Este meio filtrante é o responsável pela coleta das partículas e sua eficiência depende das características de cada um, tais como espessura, diâmetro das fibras, permeabilidade ao ar, dentre outras.

Durante a filtração, as partículas depositadas promovem um aumento na queda de pressão do sistema. A queda de pressão total desse sistema é representada pela queda de pressão do filtro e pela queda de pressão referente à camada de material particulado depositado, como indicado pelas equações:

$$\Delta P_T = \Delta P_M + \Delta P_C \quad (2.1)$$

$$\Delta P_T = k_M \cdot v_s + k_C \cdot v_s \cdot W \quad (2.2)$$

sendo  $\Delta P_M$  e  $\Delta P_C$  as quedas de pressão referentes ao meio filtrante e à torta, respectivamente e

$k_M$  é a resistência do meio filtrante,  $k_C$  é a resistência específica da torta,  $v_s$  é a velocidade superficial de filtração e  $W$  representa a massa de material particulado acumulada por unidade de área do filtro.

Rearranjando a equação que corresponde à queda de pressão referente à torta, tem-se:

$$\frac{\Delta P_C}{v_s} = k_c \cdot W \quad (2.3)$$

A equação 2.3 é frequentemente utilizada para estimar a resistência específica da torta através de dados experimentais de  $\Delta P_C/v_s$  em função de  $W$ .

Durante a captura das partículas, podem ser observadas duas etapas, sendo denominadas de filtração interna e de filtração superficial. Inicialmente, as partículas são coletadas pelas fibras do meio filtrante, se depositando no interior dele, sendo esta etapa chamada de filtração interna. A fase inicial da filtração (filtração interna), caracterizada por um lento aumento na queda de pressão, pode ter maior ou menor duração, dependendo das características do tecido (WALSH, 1996; CALLÉ, 2002). No caso dos filtros HEPA (High Efficiency Particulate Aerosol), esta etapa é praticamente inexistente, sendo a formação da torta quase instantânea (JAPUNTICH; STENHOUSE e LIU, 1994).

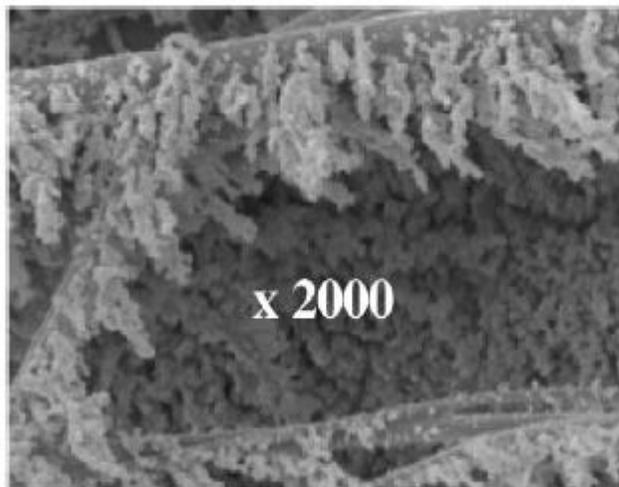
Com o transcorrer da filtração e conseqüente aumento na quantidade de partículas coletadas, inicia-se uma fase de transição, com a formação dos dendritos, que são estruturas formadas pela aglomeração de partículas no interior do meio, que passam a agir como novos elementos coletores. A Figura 2.1 ilustra a forma destes dendritos:

Posteriormente, as partículas são depositadas na superfície do meio filtrante, sendo que o principal coletor passa a ser as próprias partículas capturadas; esta etapa é chamada de filtração superficial.

Com a captura das partículas pelo meio filtrante, a camada de material particulado depositada na superfície do meio filtrante é chamada de torta de filtração. Esta torta de filtração é

responsável pelo aumento da eficiência do filtro, mas também é responsável pelo aumento na resistência ao fluxo sendo caracterizada pelo aumento da queda de pressão.

Figura 2. 1: Forma dos dendritos no interior do meio filtrante.



Fonte: THOMAS et al., (2001)

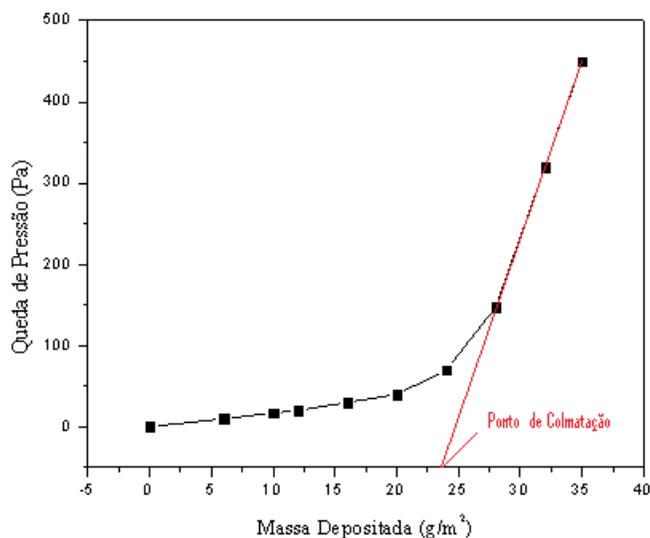
Na filtração superficial, o meio filtrante atua apenas como um suporte para a torta sendo esta capaz de remover partículas mais finas da corrente gasosa. Desta forma, é interessante que se estabeleça a filtração superficial o quanto antes para que o sistema alcance maior eficiência de remoção (ROTHWELL, 1980).

Uma vez que o aumento na queda de pressão está relacionado ao aumento de custo operacional do processo, não é interessante obter altos valores deste parâmetro. Sendo assim, é importante tentar adequar um processo que relacione altas eficiências de coleta e baixos valores de queda de pressão.

É difícil determinar fisicamente o momento exato de formação da torta de filtração, pois geralmente os meios filtrantes não apresentam características uniformes. Alguns autores admitem um valor experimental para demarcar o ponto que a torta começa a se formar. Este ponto é chamado de ponto de colmatação e pode ser entendido como a capacidade de retenção do meio filtrante.

Walsh (1996) propôs um método que é possível encontrar o momento de transição entre filtração interna e filtração superficial. Esta transição é obtida pelo ponto através do prolongamento da parte linear da curva ao eixo das abscissas a partir da curva de queda de pressão em função da massa acumulada. Este ponto é chamado de ponto de colmatação ou ponto de entupimento do filtro. A Figura 2.2 destaca como é encontrado o ponto de colmatação pelo método proposto por Walsh (1996).

Figura 2. 2: Método proposto por Walsh (1996)



Fonte: Adaptado de Walsh (1996)

Este método será aqui utilizado para encontrar a massa de partículas necessária para o início da formação da torta de filtração.

## 2.2. Nanotecnologia e nanopartículas

A nanotecnologia é uma ciência que envolve aplicações na síntese de moléculas na faixa da nanoescala. Ao longo dos últimos anos, as pesquisas envolvendo a nanotecnologia têm aumentado substancialmente. A geração de novos produtos usando nanomateriais é animadora, pois ao reduzir a faixa de tamanho das partículas, suas propriedades são modificadas podendo ser exploradas para fornecer produtos com melhores aplicações (WARHEIT et al, 2008). Por

---

apresentar tamanho muito pequeno, as nanopartículas apresentam propriedades muito diferentes das partículas com a mesma composição, mas tamanhos maiores, dentre elas Chen et al. (1998) destaca a melhoria nas atividades ópticas, mecânicas, elétricas e magnéticas. Bhatt e Tripathi (2011) comentam que propriedades como solubilidade, transparência, cor, condutividade, pontos de fusão e comportamento catalítico variam consideravelmente com o tamanho da partícula. Sendo assim, estes materiais podem ser utilizados em indústrias da eletrônica, da farmacêutica, de cosméticos, de catalisadores e de materiais (CHEN et al. 1998).

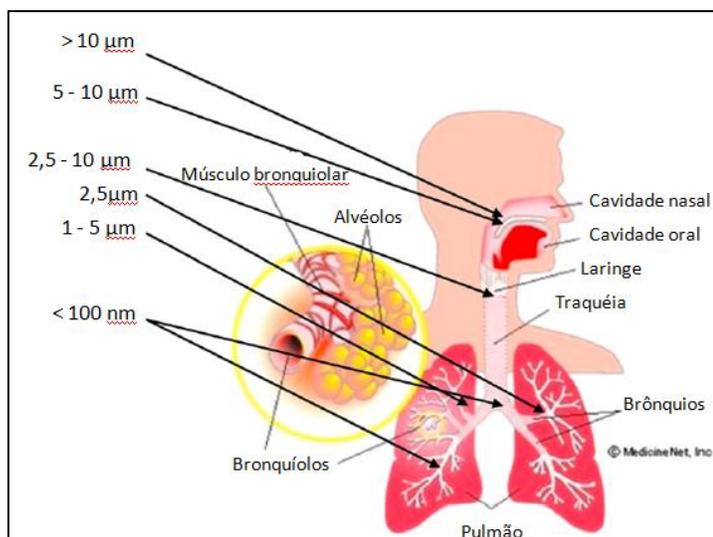
Liu (2006) comenta que os resíduos das nanopartículas que provavelmente são gerados durante a produção, vão aparecendo em vários ambientes aumentando a possibilidade de que os seres humanos sejam expostos a elas através de inalação, absorção cutânea e digestão. Devido ao amplo campo e aplicação das nanopartículas e à grande atenção que tem sido dada a elas, muitos estudos tem demonstrado seu efeitos adversos na saúde humana e no meio ambiente (AITTKEN; CREELY; TRAN, 2004).

De acordo com a EPA (Environmental Protection Agency), o tamanho da partícula está diretamente relacionado ao seu poder de causar danos à saúde humana. Uma especial atenção tem sido dada atualmente às partículas nanométricas devido ao seu poder patogênico. Segundo esta mesma agência, já é confirmada a relação entre a exposição a estas partículas e problemas respiratórios, hospitalizações e mortes prematuras. Watanabe et al., (1995) atribui este fato principalmente à capacidade destas partículas de se depositarem nos alvéolos pulmonares causando danos patológicos ao pulmão.

A Figura 2.3 ilustra o tamanho relativo das partículas e padrões de deposição por via aérea no sistema respiratório.

Diante da ampla e crescente aplicação das nanopartículas, e dos efeitos nocivos à saúde relacionados a elas, conforme descrito anteriormente, é de grande interesse que se desenvolva novas tecnologias capazes de diminuir a emissão destas partículas ou que se aprimorem os métodos comuns de controle de particulados, de modo que possam capturar esta faixa de tamanho de partículas em estudo.

Figura 2. 3: Tamanho relativo das partículas e padrões de deposição por via aérea no sistema respiratório.



Fonte: Adaptado de Chang (2010)

### 2.3. Meios filtrantes

A seleção adequada dos meios filtrantes a serem utilizados em filtração depende da compatibilidade destes com o material particulado a ser coletado e das características e aplicações de cada processo de filtração, que abrangem a temperatura, a abrasão, a energia de absorção, as propriedades da filtração, a resistência a álcalis, a ácidos, a oxigênio e o custo relativo do material (BARNETT, 2000).

Os meios porosos podem ser classificados em função de sua estrutura como granulares ou fibrosos. Os granulares são usualmente modelados como um conjunto de partículas ou grãos, de forma esférica ou não, dispostas regular ou randomicamente, e representam a grande maioria dos meios porosos. Já os fibrosos são modelados como um conjunto de fibras, que podem ser naturais ou sintéticas, retas ou curvas, estando randomicamente dispostas ou em malhas regulares.

Este estudo será focado na remoção de nanopartículas por filtros fibrosos.

Um filtro fibroso é constituído por várias fibras em forma de fios, em tamanhos variados, posicionados normalmente à direção do fluido. Durante a filtração, o fluido passa na

região entre as fibras, e as partículas suspensas são coletadas pela colisão e aderência à superfície da fibra (DUNNETT e CLEMENT, 2006).

As principais características dos filtros fibrosos se relacionam com sua simplicidade de operação, baixo custo e por conseguirem atingir altas eficiências de coleta (STEFFENS, 2007). Segundo Wang (2001), filtros fibrosos apresentam baixa queda de pressão quando submetido à filtração, que está relacionado com a baixa densidade de empacotamento destes filtros. Este mesmo autor destaca que os materiais mais adequados para sua confecção incluem vidro, polipropileno, policarbonato, cerâmica e aço inoxidável, sendo que alguns destes podem ser utilizados para filtração à alta temperatura.

#### 2.4. Permeabilidade

A permeabilidade é um parâmetro que representa a resistência encontrada pelo fluido ao atravessar um meio filtrante. É importante destacar que este parâmetro não leva em conta apenas as características do fluido, mas considera a completa interação entre o fluido e o meio filtrante.

A equação 2.4, chamada de equação de Forchheimer é empregada para avaliar o escoamento de fluidos em meios porosos. O primeiro termo desta equação referente-se aos efeitos puramente viscosos e o segundo termo refere-se aos efeitos inerciais (INNOCENTINI, SEPULVEDA e ORTEGA, 2005; TANABE, 2011).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho_g}{k_2} v_s^2 \quad (2.4)$$

em que  $L$  representa a espessura do filtro,  $\mu$  a viscosidade do fluido,  $\rho_g$  representa a densidade do gás,  $v_s$  é a velocidade superficial do gás,  $k_1$  e  $k_2$  são as constantes de permeabilidade do meio poroso.

Para o caso de escoamentos puramente viscosos, como é o caso deste trabalho em que se trabalhou com baixas velocidades de filtração, o segundo termo da equação 2.4 pode ser

desprezado e a equação 2.5 pode ser utilizada (INNOCENTINI, SEPULVEDA e ORTEGA, 2005; TANABE, 2011).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s \quad (2.5)$$

Esta equação é conhecida como equação de Darcy e é tradicionalmente empregada para avaliar o escoamento de fluidos em meios porosos, relacionando os valores de queda de pressão com a velocidade superficial e será aqui utilizada.

## 2.5. Eficiência de coleta dos Filtros Fibrosos

Considera-se o escoamento de um fluido que passa através de uma fina seção de fibras de espessura  $dL$  e área  $A$ . Esta espessura deve ser muito maior que o diâmetro das fibras, mas fina o suficiente para se aproximar de uma simples camada de fibra no plano da seção (DULLIEN, 1989).

Assumindo  $L_f$  como sendo o comprimento da fibra por unidade de volume, tem-se a seguinte equação:

$$L_f = \frac{\text{comprimento da fibra}}{\text{unidade de volume}} \quad (2.6)$$

Desta forma, o comprimento da fibra nesta seção pode ser expresso por  $L_f \cdot A_f \cdot dL$ .

A área projetada pelas fibras cilíndricas desordenadas no plano da seção pode ser representada pela multiplicação do diâmetro das fibras e seu comprimento, dada pela equação:

$$A_p = d_f \cdot L_f \cdot A_f \cdot dL \quad (2.7)$$

em que  $d_f$  é o diâmetro da fibra.

A eficiência total de coleta ( $\eta_T$ ) para uma única fibra pode ser representada por:

$$\eta_T = \frac{\text{número de partículas depositadas por unidade de tempo}}{\text{número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo}} = \frac{N_p}{N_c} \quad (2.8)$$

sendo  $N_c$  expresso como:

$$N_c = C.v.d_f.L_f.A_f.dL \quad (2.9)$$

em que  $C$  é a concentração de partículas no gás e  $v$  é a velocidade intersticial do gás que pode ser encontrada pela Equação 2.10.

$$v = \frac{v_s}{\varepsilon} \quad (2.10)$$

em que  $v_s$  é a velocidade superficial do gás e  $\varepsilon$  é a porosidade do filtro.

O número de partículas depositadas nesta seção por unidade de tempo ( $N_p$ ) pode ser expresso por um balanço de massa (DULLIEN, 1989) representado a seguir:

$$N_p = -dC(v_s.A_f) \quad (2.11)$$

em que  $-dC$  representa a variação na concentração na entrada e saída da seção e  $v_s.A_f$  é a vazão volumétrica do gás.

Substituindo as Equações 2.9, 2.10 e 2.11 na Equação 2.8, obtém-se:

$$\frac{-dC}{C} = \frac{\eta_T.d_f.L_f}{\varepsilon} dL \quad (2.12)$$

Ao integrar a Equação 2.12 utilizando os limites  $L=0$  para  $C=C_0$  e  $L=L$  para  $C=C_E$ , obtém-se:

$$\ln \frac{C_E}{C_0} = -\frac{\eta_T.d_f.L_f.L}{\varepsilon} \quad (2.13)$$

em que  $C_0$  e  $C_E$  são as concentrações de partículas na entrada e saída do filtro.

A relação entre a porosidade e a fração volumétrica ocupada pelas fibras se dá pela seguinte equação:

$$\varepsilon = 1 - \beta \quad (2.14)$$

A fração volumétrica ocupada pelas fibras ( $\beta$ ) pode ser obtida pela equação:

$$\beta = \frac{\pi \cdot d_f^2 \cdot L_f}{4} \quad (2.15)$$

Substituindo as Equações 2.14 e 2.15 na Equação 2.13, obtém-se:

$$\frac{C_E}{C_0} = \exp \left[ -\frac{4 \cdot L \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \eta_T}{\pi \cdot \varepsilon \cdot d_f} \right] = P \quad (2.16)$$

em que P é a penetração e representa a fração numérica de partículas que conseguem atravessar o filtro.

Considera-se eficiência do filtro como a fração de partículas que são coletadas pela seção filtrante, podendo ser representada por:

$$E = 1 - P = 1 - \exp \left[ -\frac{4 \cdot L \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \eta_T}{\pi \cdot \varepsilon \cdot d_f} \right] \quad (2.17)$$

Sendo assim, a Equação 2.17 representa a eficiência de coleta do filtro com relação à penetração.

Para encontrar a eficiência do meio filtrante, é necessário que se conheça a eficiência total de cada fibra. Desta forma, este parâmetro pode ser estimado através dos mecanismos de coleta atuantes, conforme será descrito posteriormente, sendo função das características do aerossol a ser filtrado, das condições de escoamento e das características do meio filtrante.

A teoria de filtração é mais bem representada para filtros fibrosos quando estes apresentam fibras homogêneas. No caso de meios filtrantes com fibras heterogêneas, Steffens e

Coury (2007b) constataram que as equações da literatura não representaram satisfatoriamente os dados experimentais, o que certamente está relacionado ao uso de um diâmetro médio para representar as fibras. Diante disso, estes autores propuseram que o filtro fosse subdividido, sendo visualizado um leito de fibras como sendo composto de vários leitos em sequência, cada um com fibras  $D_{fi}$  e porosidade  $\varepsilon_i$ . Portanto, a eficiência total do filtro que apresenta fibras heterogêneas pode ser escrita de acordo com a equação:

$$E = 1 - P = 1 - \exp \left[ \frac{-4L}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{(1 - \varepsilon_i) \eta_{Ti}}{\varepsilon_i d_{fi}} \right] \quad (2.18)$$

em que  $\varepsilon_i$  e  $x_i$  podem ser obtidos pelas equações:

$$\varepsilon_i = 1 - (1 - \varepsilon) \cdot x_i \quad (2.19)$$

$$x_i = \frac{n_i \cdot d_{fi}}{\sum n_i \cdot d_{fi}} \quad (2.20)$$

Dessa forma, a Equação 2.18 pode ser utilizada para obter a eficiência de coleta teórica de meios filtrantes de fibras heterogêneas.

## 2.6. Mecanismos de coleta

A coleta de partículas em um filtro fibroso se faz inicialmente através das fibras do filtro. Os mecanismos que governam esta captura são: difusional, inercial, de interceptação direta, gravitacional e eletroforético. Estes mecanismos serão mais explorados adiante.

O transporte de partículas de um fluido está fortemente ligado às interações que se dão entre as moléculas do gás e as partículas presentes nele. O número de Knudsen é um adimensional que determina esta interação, representado pela equação:

$$Kn = \frac{2\lambda}{d_p} \quad (2.21)$$

em que  $\lambda$  é o caminho livre médio das moléculas no gás e  $d_p$  é o diâmetro das partículas.

Este adimensional caracteriza o comportamento da partícula em relação ao gás, sendo que o tamanho da partícula influencia o comportamento do aerossol e as leis que determinam suas propriedades (HINDS, 1999).

O caminho livre médio das moléculas pode ser obtido pela equação:

$$\lambda = 2,15 \cdot 10^{-4} \cdot \mu \cdot P \cdot T^{0,5} \quad (2.22)$$

em que  $P$  é a pressão,  $\mu$  é a viscosidade do ar e  $T$  a temperatura absoluta do gás.

Quando se trata de partículas de tamanhos reduzidos, apresentando tamanhos da ordem de grandeza do caminho livre médio das moléculas ( $kn \gg 1$ ), tais partículas não avistam o meio gasoso como uma massa contínua, e sim como um aglomerado de partículas. Neste caso, a correção dos efeitos das interações a nível molecular pode ser feita pelo fator de escorregamento de Cunningham ( $F_s$ ) (CLIFT et al., 1978 apud STEFFENS, 2007):

$$F_s = 1 + Kn \left[ 1,246 + 0,42 \exp\left(\frac{-0,87}{Kn}\right) \right] \quad (2.23)$$

Este fator considera a não-continuidade do meio para partículas de tamanho próximo ao caminho livre médio.

### 2.6.1. Mecanismo Difusional

Em se tratando de partículas de tamanho muito reduzido, as linhas de corrente não coincidem com a trajetória das partículas, o que é devido ao movimento aleatório das partículas (movimento Browniano). Este mecanismo de coleta é atuante especialmente para partículas que apresentam diâmetros menores que 1 $\mu$ m submetidas a baixas velocidades de filtração (DULLIEN, 1989).

A eficiência de coleta devido ao mecanismo difusional de cada fibra individualmente pode ser obtida pela equação seguinte (LEE e LIU, 1982a):

$$\eta_d = 2,6 \left( \frac{\varepsilon}{K} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} \quad (2.24)$$

em que  $K$  é o coeficiente hidrodinâmico de Kuwabara e  $Pe$  é o número de Peclet, dados pelas equações:

$$K = -\frac{1}{2} \ln(1-\varepsilon) - \frac{3}{4} + (1-\varepsilon) - \frac{1}{4} (1-\varepsilon)^2 \quad (2.25)$$

$$Pe = \frac{v_s \cdot d_f}{D} \quad (2.26)$$

em que  $D$  é o coeficiente de difusividade, para partículas de diâmetro esférico  $d_p$ , e pode ser obtido pela equação:

$$D = \frac{K_B \cdot T \cdot F_s}{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p} \quad (2.27)$$

em que  $K_B$  é a constante de Boltzman,  $T$  a temperatura absoluta,  $\mu$  a viscosidade do fluido e  $F_s$  o fator de escorregamento de Cunningham.

Os mesmos autores aplicaram a equação 2.24 a outros dados experimentais e propuseram a equação seguinte (LEE e LIU, 1982b):

$$\eta_d = 1,6 \left( \frac{\varepsilon}{K} \right)^{1/3} \cdot Pe^{-2/3} \quad (2.28)$$

Liu e Rubow (1990) sugeriram levar em conta o efeito de escorregamento do gás na equação de Lee e Liu (1982b) e propuseram um termo de correção ( $C_d$ ), conforme equação:

$$\eta_d = 1,6 \left( \frac{\varepsilon}{K} \right)^{1/3} \cdot Pe^{-2/3} \cdot C_d \quad (2.29)$$

em que  $C_d$  pode ser obtido através da seguinte equação:

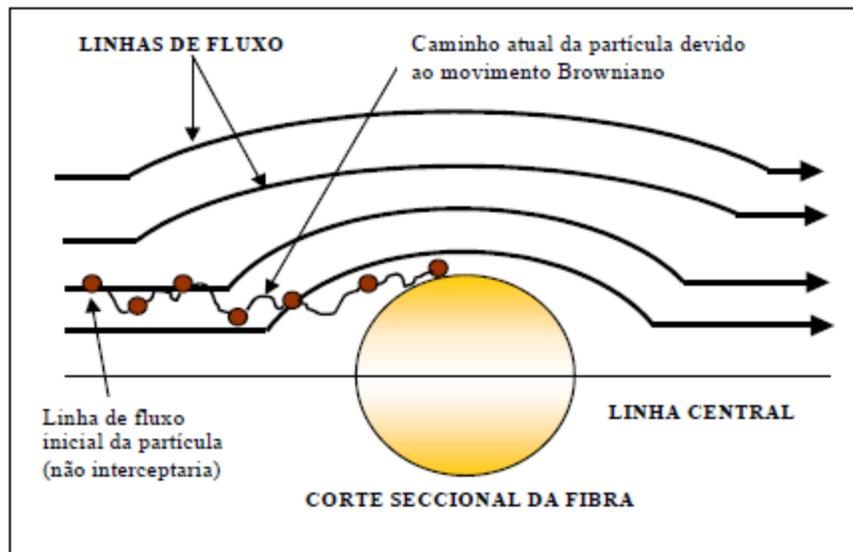
$$C_d = 1 + 0,388Kn_f \left( \frac{\varepsilon \cdot Pe}{K} \right)^{1/3} \quad (2.30)$$

em que  $Kn_f$  é definido como o número de Knudsen com relação ao diâmetro da fibra ( $d_f$ ) e pode ser encontrado pela equação:

$$Kn_f = \frac{2\lambda}{d_f} \quad (2.31)$$

A Figura 2.4 ilustra a coleta pelo mecanismo difusional.

Figura 2. 4: Mecanismo de coleta por difusão.



(Fonte: TANABE, 2008)

### 2.6.2. Mecanismo Inercial

A coleta por este mecanismo ocorre devido à inércia das partículas. Quanto maior a energia cinética das partículas, maior a eficiência de coleta por este mecanismo, sendo assim, este mecanismo predomina em altas velocidades do gás. A coleta ocorre pois as partículas não conseguem seguir a corrente de gás.

O número de Stokes é o parâmetro que descreve o mecanismo inercial para coleta de partículas em meios filtrantes (WILLEKE e BARON, 1993). Altos números de Stokes refletem alta probabilidade de coleta por este mecanismo, enquanto baixos números de Stokes refletem baixa probabilidade de coleta. Este parâmetro pode ser obtido pela equação:

$$St = \frac{F_s \cdot d_p^2 \cdot \rho_p \cdot v_s}{18 \cdot \mu \cdot d_f} \quad (2.32)$$

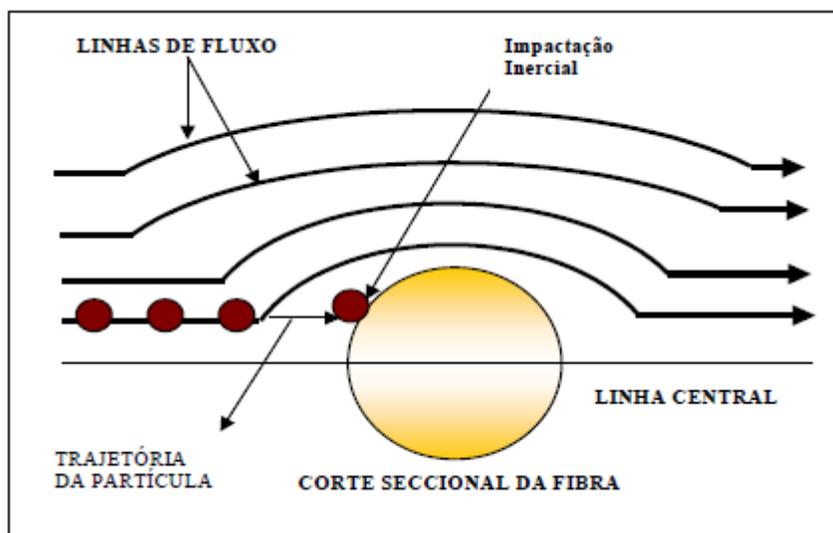
em que  $\rho_p$  e  $d_p$  são, respectivamente, a densidade e o diâmetro das partículas.

Friendlander e Pasceri (apud SPURNY, 1998) propuseram uma equação para determinar a eficiência de filtração das partículas por este mecanismo:

$$\eta_i = 0,075 \cdot St^{6/5} \quad (2.33)$$

A Figura 2.5 ilustra a coleta pelo mecanismo inercial.

Figura 2. 5: Mecanismo de coleta por impactação inercial.



Fonte: TANABE, 2008.

### 2.6.3. Mecanismo de interceptação direta

A coleta por este mecanismo depende da razão entre o tamanho da partícula e do coletor ( $R = d_p/d_f$ ), sendo significativo para partículas com  $d_p$  da ordem de grandeza pouco abaixo

do diâmetro do coletor ( $D_f$ ) (COURY, 1983). Se uma partícula, ao seguir as linhas de corrente passa pela superfície do coletor a uma distância igual ou menor ao seu raio, é provável que ela seja capturada.

Lee e Liu (1982a) propuseram a seguinte equação para a eficiência de coleta pelo mecanismo de interceptação direta:

$$\eta_{id} = 0,6 \cdot \frac{\varepsilon}{K} \cdot \left( \frac{R^2}{1+R} \right) \quad (2.34)$$

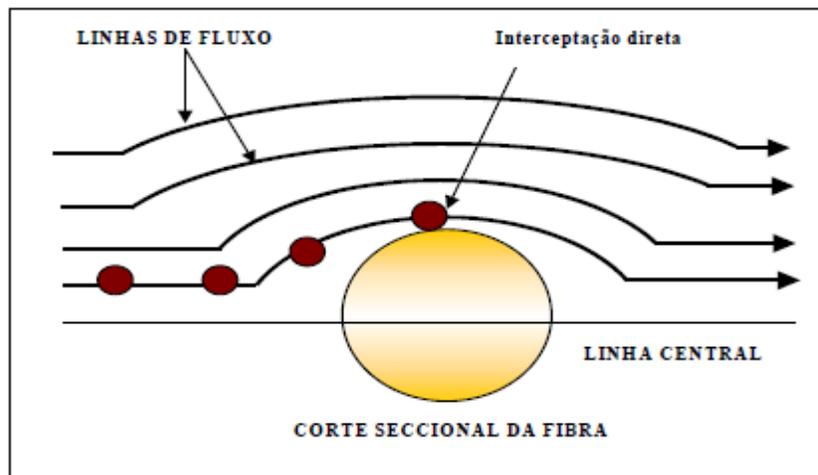
Segundo Liu e Rubow (1990), o efeito do escorregamento do gás deve ser levado em conta na descrição do fluxo ao redor da fibra em casos em que o diâmetro da fibra é da mesma ordem de grandeza que o caminho livre médio das moléculas de gás. Estes autores propuseram a adição de um novo fator de correção ( $C_r$ ) na equação de eficiência de coleta:

$$\eta_{id} = 0,6 \cdot \frac{\varepsilon}{K} \cdot \left( \frac{R^2}{1+R} \right) \cdot C_r \quad (2.35)$$

em que

$$C_r = 1 + \frac{1,996 \cdot Kn_f}{R} \quad (2.36)$$

Figura 2. 6: Mecanismo de coleta por interceptação direta



Fonte: TANABE, 2008.

#### 2.6.4. Mecanismo gravitacional

No mecanismo gravitacional as partículas sofrem o efeito da gravidade, que causa um desvio da sua trajetória normal. Este mecanismo é mais evidente quando o fluxo ocorre de cima para baixo e também para baixas velocidades do gás e grandes partículas.

A eficiência de coleta por este mecanismo pode ser estimada pela equação (TIEN, 2007):

$$\eta_g = \frac{(1-\varepsilon)^{2/3} \cdot v_t}{v_s} \quad (2.37)$$

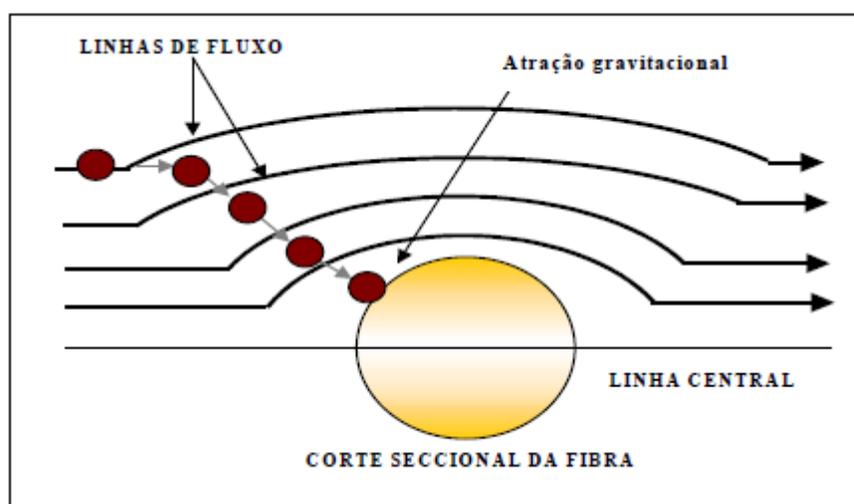
em que  $V_t$  é a velocidade terminal da partícula e pode ser determinada pela equação:

$$v_t = \frac{d_p^2 \cdot g \cdot \rho_p}{18 \cdot \mu} \quad (2.38)$$

em que  $g$  é a aceleração da gravidade.

A Figura 2.7 ilustra a coleta pelo mecanismo gravitacional.

Figura 2. 7: Mecanismo de coleta por atração gravitacional.



Fonte: TANABE, 2008.

2.6.5. Mecanismo eletroforético

A coleta pelo mecanismo eletroforético ocorre quando há presença de cargas eletrostáticas devido a choques ou atritos entre partículas e meio filtrante ou gerada pelo sistema.

Coury (1983) propôs uma equação para determinar a eficiência de coleta pelo mecanismo eletroforético a partir da partícula carregada:

$$\eta_e = 8,242 K_M^{0,494} \tag{2.39}$$

A equação 2.39 pode ser usada para  $St < 10^{-3}$  e  $10^{-4} < K_M < 10^{-6}$ , e  $K_M$  pode ser obtido pela equação:

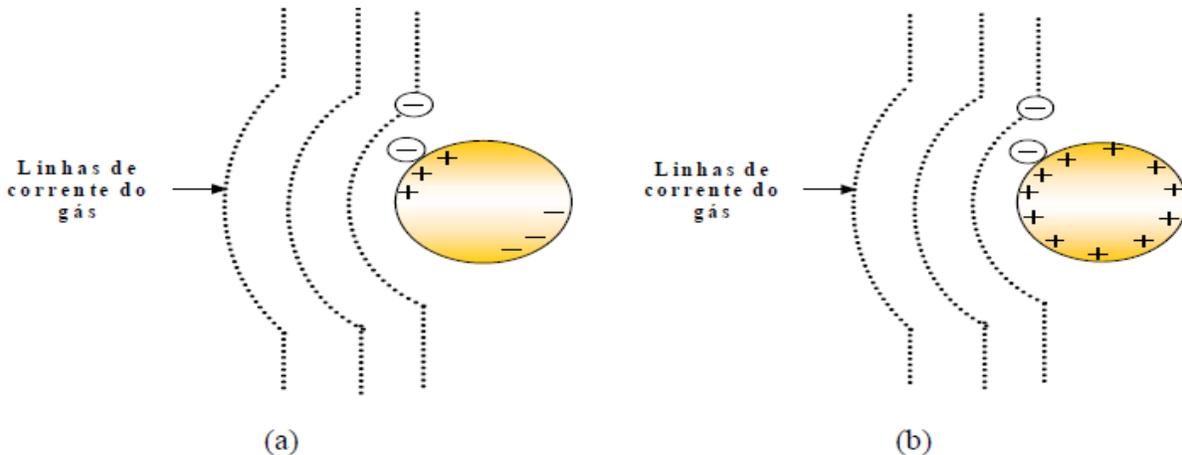
$$K_M = \frac{\gamma_c \cdot F_s \cdot q^2}{3 \cdot \pi^2 \cdot \epsilon_0 \cdot d_p \cdot d_f^2 \cdot \mu \cdot v_s} \tag{2.40}$$

sendo  $\epsilon_0$  a permissividade no vácuo e tem valor de  $8,855 \cdot 10^{-12}$  A.s/V.m, q a carga da partícula e  $\gamma_c$  o coeficiente de polarização do coletor, dado pela equação:

$$\gamma_c = \frac{\epsilon_c - \epsilon_f}{\epsilon_c + 2\epsilon_f} \tag{2.41}$$

em que  $\epsilon_c$  é a constante dielétrica da partícula e  $\epsilon_f$  a constante dielétrica do fluido.

Figura 2. 8: Mecanismo de coleta eletroforético, (a) Coulômbico e (b) Dipolo-imagem.



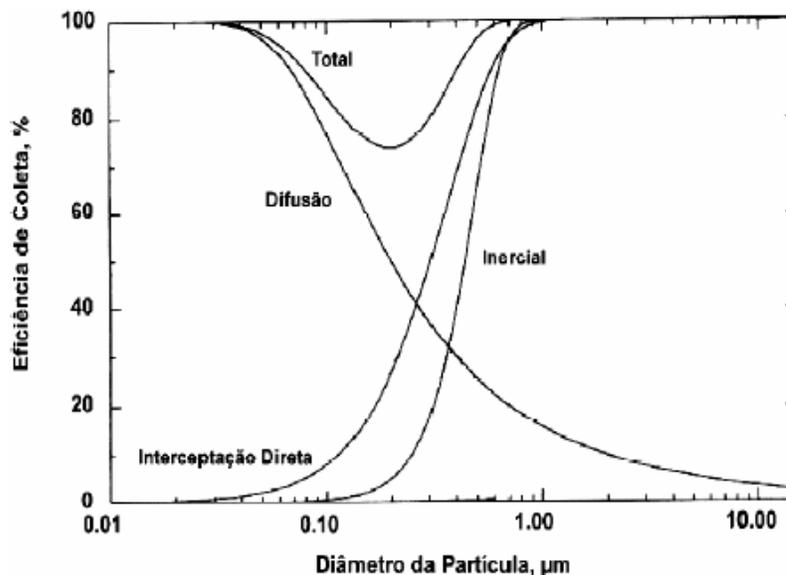
Fonte: TANABE, 2008.

Embora as cargas eletrostáticas tenham sido estabilizadas no presente estudo justamente para que este mecanismo não interferisse nos resultados, é de interesse citá-lo para possível inclusão em outros trabalhos.

#### 2.6.6. Coleta simultânea por vários mecanismos

A eficiência de coleta total de um coletor é geralmente associada à soma das eficiências individuais de cada mecanismo de coleta (Equação 2.42), embora Coury (1983) tenha destacado que essa forma não está inteiramente correta, uma vez que ocorre a influência de um mecanismo sobre o outro. A Figura 2.9 apresenta a eficiência de coleta de uma fibra individual para os mecanismos difusional, inercial e interceptação direta e também a eficiência total do filtro, sendo que o filtro utilizado apresentava espessura de 1 mm, porosidade de 0,95, diâmetro do coletor igual a 2,0  $\mu\text{m}$  e a velocidade de filtração utilizada foi de 0,1 m/s (HINDS,1999)

Figura 2. 9: Eficiência de coleta com relação aos mecanismos



Fonte: HINDS, 1999.

Embora a Figura 2.9 não apresente a atuação dos mecanismos eletroforético e gravitacional, a eficiência total de coleta das partículas para um coletor é determinada pela soma de todos os mecanismos. Desta forma, a eficiência de coleta total é dada pela equação:

---

$$\eta_T = \eta_d + \eta_i + \eta_{id} + \eta_g + \eta_e \quad (2.42)$$

## CAPÍTULO 3

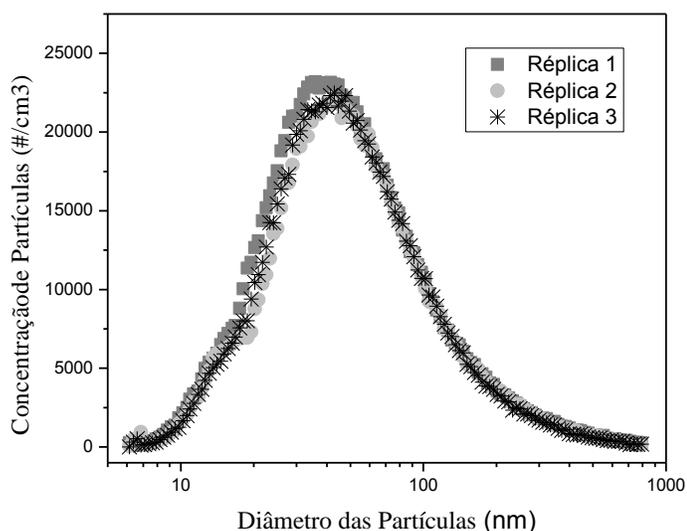
### MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo visa apresentar os materiais utilizados nos testes experimentais, tais como material particulado e os meios filtrantes. Será apresentada também a unidade experimental e detalhado cada componente deste aparato. Para finalizar, será apresentado o procedimento experimental e as condições operacionais que foram aferidas para a execução dos testes.

#### 3. 1. Material Particulado

Cloreto de sódio puro, da marca Quemis, cuja densidade corresponde a  $2,165 \text{ g/cm}^3$  foi usado como material particulado na geração das nanopartículas. A geração foi proveniente da atomização de uma solução  $5\text{g/L}$  de NaCl em um inalador comercial da marca NS, modelo I-205. Durante a geração, foram detectadas partículas compreendidas na faixa entre  $6 - 800\text{nm}$  conforme mostra a Figura 3.1, que apresenta a distribuição das partículas nanométricas geradas a uma vazão de  $0,0042 \text{ L/min}$ .

Figura 3. 1: Distribuição de diâmetros das partículas nanométricas geradas



Fonte: Acervo Pessoal

Observa-se que a maior concentração das partículas nanométricas geradas encontra-se em torno de 40 nm.

A contagem de partículas foi realizada em duas varreduras para conseguir a distribuição de partículas na faixa compreendida entre 6 a 800 nm, ou seja, o equipamento utilizado não faz a contagem direta de diâmetros de partículas de 6 a 800nm. Este fato será comentado mais adiante, nas descrições do equipamento SMPS.

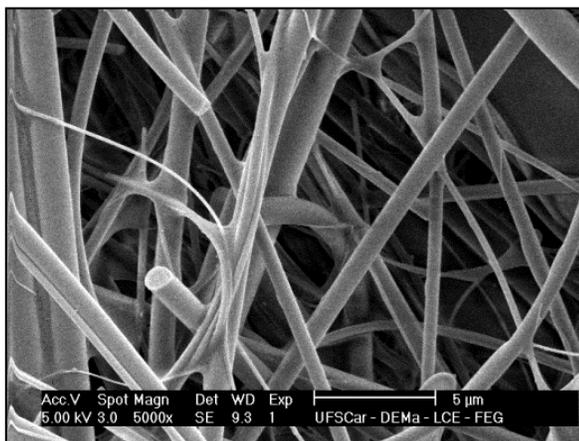
### 3. 2. Meio Filtrante

Os meios filtrantes avaliados na remoção das nanopartículas foram divididos em duas categorias: Filtro de Fibras Heterogêneas e Filtro de Fibras Homogêneas. Cada uma delas está relacionada à faixa de diâmetros das fibras que estes meios apresentam.

#### 3. 2. 1. Filtro de Fibras Heterogêneas

Como filtro de fibras heterogêneas foi usado o Filtro de Celulose HEPA, que é um filtro que apresenta uma ampla faixa de diâmetros das fibras. Neste caso não é conveniente representar as fibras por um diâmetro médio. Este filtro foi utilizado para avaliar a remoção das partículas nanométricas de NaCl geradas. O filtro HEPA foi fornecido pela empresa VECO do Brasil Indústria e Comércio de Equipamentos Ltda. A Figura 3.2 apresenta a imagem da superfície deste meio filtrante obtida em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Figura 3. 2: Imagem da superfície do meio filtrante de celulose (HEPA) obtida em MEV

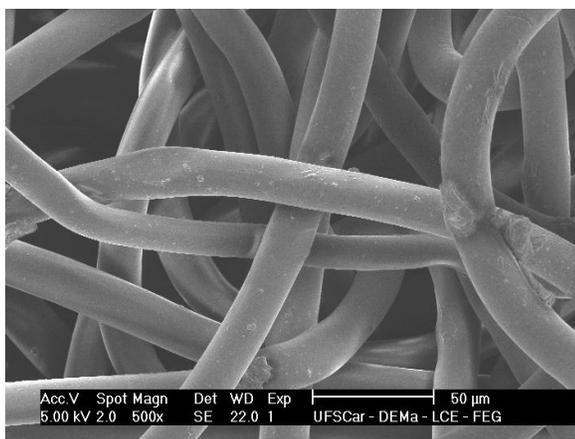


Fonte: Acervo Pessoal

### 3. 2. 2. Filtro de Fibras Homogêneas

Como filtro de fibras homogêneas, foi utilizado o Filtro de Poliéster. Este filtro é classificado desta forma, pois apresenta pouca variação de tamanho entre os diâmetros das fibras. Neste caso, as fibras podem ser representadas por um diâmetro médio que representa todo o conjunto de fibras. O filtro de Poliéster foi cedido pela empresa Gino Cacciari Indústria e Comércio de Filtros de Tecido Ltda. A Figura 3.3 apresenta a imagem da superfície deste meio filtrante obtida em Microscópio Eletrônico de Varredura.

Figura 3. 3: Imagem da superfície do meio filtrante de Poliéster obtida em MEV



Fonte: Acervo Pessoal

## 3. 3. Caracterização dos Meios Filtrantes

A caracterização dos meios filtrantes quanto à espessura, diâmetro das fibras e porosidade foi necessária uma vez que para o cálculo da eficiência de coleta teórica dos filtros, estes parâmetros são de extrema importância. A seguir será apresentada a metodologia para a obtenção de cada parâmetro.

### 3. 3.1. Determinação da Espessura dos Meios Filtrantes

A espessura dos meios filtrantes foi obtida pela medida direta utilizando-se um paquímetro digital (marca Starrett). Foram selecionadas 5 amostras de diferentes regiões do filtro amostrado e a média desses valores representa a espessura de cada meio filtrante.

### *3. 3.2. Determinação do Diâmetro das Fibras*

O diâmetro das fibras foi determinado a partir de imagens superficiais dos meios filtrantes obtidas em Microscópio Eletrônico de Varredura e análise destas imagens no programa analisador de imagens “Image Pro Plus 7.0”. A análise do diâmetro das fibras foi feita manualmente e através da calibração do tamanho da imagem foi possível obter o diâmetro de cada fibra analisada. Para o filtro de Poliéster foram selecionadas 10 imagens que foram analisadas totalizando 170 fibras, sendo realizada uma média dos diâmetros das fibras. Para o filtro Hepa, foram analisadas 20 imagens totalizando 2388 fibras, sendo obtida uma distribuição de diâmetros. Um exemplo de como foi feita a contagem do diâmetro das fibras está apresentado no Apêndice A.

### *3. 3.3. Determinação da Porosidade dos Meios Filtrantes*

A porosidade de um meio poroso pode ser obtida através da razão entre o volume de espaços vazios e o volume total deste meio. Sendo assim, através do método proposto por Aguiar (1995) foi possível encontrar a porosidade dos meios filtrantes. Este método consiste na preparação de amostras de filtros de forma que estas possam ser examinadas em microscópio obtendo-se imagens transversais que posteriormente serão analisadas no programa analisador de imagens “Image Pro Plus 7.0”.

A metodologia proposta por Aguiar (1995) consiste no endurecimento dos filtros e embutimento em resina de modo que os filtros fiquem dispostos e sejam analisados transversalmente. Este método apresenta uma sequência de preparações que são: pré-endurecimento do meio filtrante, embutimento em resina, seccionamento, esmerilamento e polimento. Estas etapas estão apresentadas no Anexo A. Após este procedimento, a porosidade é obtida pela razão entre a área de espaços vazios e área total.

### *3. 3.4. Caracterização do Meio Filtrante de Fibras Heterogêneas*

A caracterização deste meio filtrante foi um pouco trabalhosa uma vez que este filtro apresenta fibras de diâmetros variados. Na caracterização relativa ao diâmetro das fibras, o

que representa este filtro é uma distribuição de diâmetros. A Tabela 3.1 apresenta a caracterização do filtro de fibras heterogêneas.

Tabela 3. 1: Caracterização do meio filtrante de fibras heterogêneas

Espessura (mm)		0,52	
Porosidade (-)		0,92	
Diâmetro das fibras ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro Médio das fibras ( $\mu\text{m}$ )	Número de Fibras	Fração de Diâmetros de fibra acumulado
0-0,2	0,1	567	23,74
0,2-0,3	0,25	523	45,64
0,3-0,4	0,35	304	58,38
0,4-0,5	0,45	231	68,05
0,5-0,7	0,6	279	79,73
0,7-1,0	0,85	240	89,78
1,0-1,5	1,25	170	96,90
1,5-2,5	2,0	74	100

Fonte: Acervo Pessoal

A partir da caracterização acima, foi possível obter os valores de porosidade  $\varepsilon_i$  e a fração de fibras  $x_i$  para cada conjunto de fibras. A tabela 3.2 apresenta os valores calculados.

Tabela 3. 2: Porosidade e fração de fibras para cada conjunto de fibras

Diâmetro Médio das fibras ( $\mu\text{m}$ )	$\varepsilon_i$	$x_i$
0,1	0,996	0,050
0,25	0,991	0,116
0,35	0,992	0,094
0,45	0,993	0,092
0,6	0,988	0,148
0,85	0,986	0,181
1,25	0,985	0,188
2,0	0,989	0,131

Fonte: Acervo Pessoal

3. 3.5. Caracterização do Meio Filtrante de Fibras Homogêneas

Utilizando a metodologia citada acima, a seguir será apresentada a caracterização do meio filtrante de fibras homogêneas. A Tabela 3.3 apresenta a caracterização do filtro de fibras homogêneas.

Tabela 3. 3: Caracterização do meio filtrante de fibras homogêneas

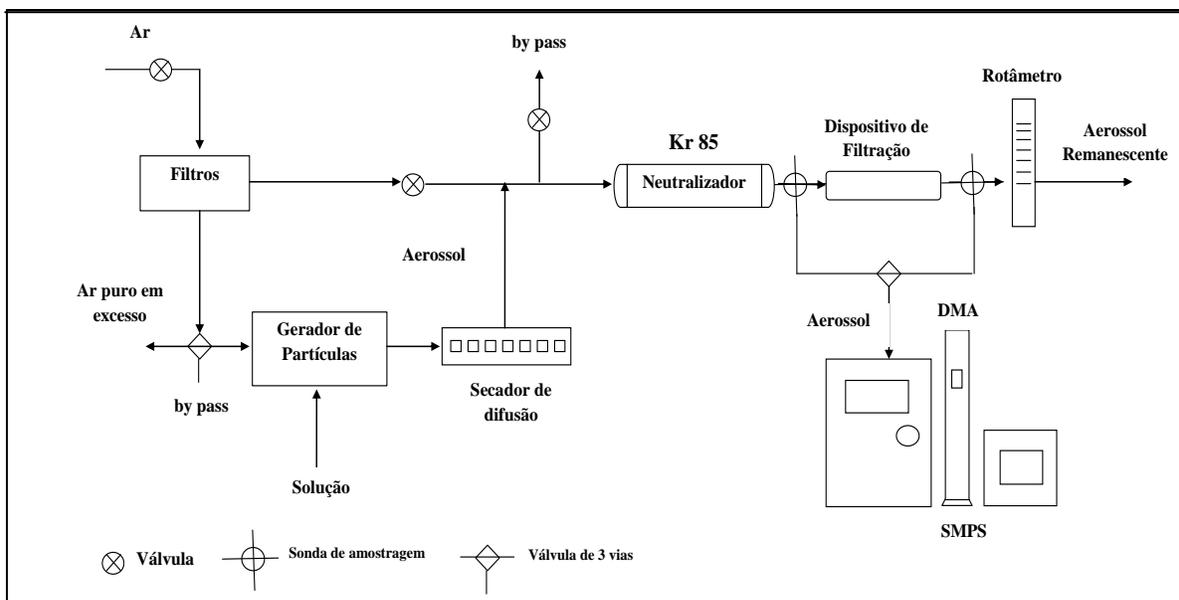
Meio Filtrante	Poliéster
Espessura (mm)	1,89
Porosidade (-)	0,80
Diâmetro Médio das Fibras (µm)	19,39

Fonte: Acervo Pessoal

3. 4. Descrição da Unidade Experimental

A Figura 3.4 apresenta a unidade experimental utilizada para a realização dos ensaios experimentais.

Figura 3. 4: Unidade experimental



Fonte: FEITOSA (2009)

A seguir, serão descritos separadamente cada módulo e constituinte da unidade experimental. Além dos equipamentos descritos a seguir, também foram usados um manômetro digital, um microscópio eletrônico de varredura e balanças analíticas.

#### 3.4.1. Compressor de ar

O compressor de ar localizado na parte externa do laboratório de controle ambiental fornecia o ar comprimido para o transporte das partículas na linha de filtração. Este compressor era um compressor de pistão da marca Schulz, modelo MSV12/175 e com capacidade de 120 psi.

#### 3.4.2. Filtros de purificação

Um dispositivo de purificação de ar da marca TSI *Incorporated* (Trust Science Innovation), modelo 3074B foi utilizado a fim de remover as impurezas contidas na corrente de ar. Este dispositivo é formado por um conjunto de três filtros e um sistema de membranas. Inicialmente, a corrente de ar passava por um pré-filtro, por um filtro coalescente, em seguida passava por uma série de membranas e finalmente um filtro composto por carvão ativado garantia a total purificação da corrente de ar. Este dispositivo pode ser visualizado na Figura 3.5.

Figura 3. 5: Dispositivo de purificação de ar.



Fonte: Acervo Pessoal

### 3.4.3. Gerador de partículas

Para a geração das partículas, foi utilizado um inalador comercial a ar comprimido da marca NS, modelo I-205. O mesmo era composto de um reservatório de armazenamento da solução e um bocal de saída. Este tipo de inalador é comumente utilizado em ambientes domiciliares e hospitalares e pode ser encontrado em lojas especializadas em equipamentos hospitalares.

Neste tipo de inalador, o ar comprimido adentra pela parte inferior do reservatório e é forçado a passar por um pequeno orifício localizado no seu interior. O contato entre o ar comprimido e a solução a uma velocidade relativa alta produz a atomização desta solução. As gotas maiores eram removidas pelo bocal por impactação inercial e retornavam novamente ao recipiente. Uma névoa das gotas menores seguia o fluxo de ar, passavam por um secador de difusão e as partículas já secas eram alimentadas na corrente de ar puro da linha principal. O gerador de partículas utilizado pode ser visualizado na Figura 3.6.

Figura 3. 6: Gerador de partículas



Fonte: Acervo Pessoal

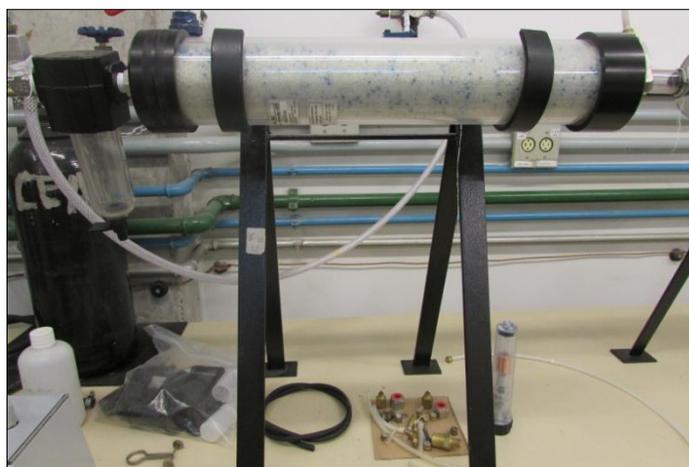
É importante destacar que existe no mercado geradores de partículas muito mais modernos que este utilizado, embora estes inaladores mais modernos são também mais sensíveis e entopem com facilidade, devido a isso não foi utilizado neste trabalho. Uma vez que o tempo de filtração de partículas nanométricas é relativamente longo, decidiu-se utilizar um inalador que

comportasse uma maior quantidade de solução e que não sofra interferência do longo tempo de filtração. Sendo assim, o inalador comercial utilizado foi considerado mais adequado para as condições operacionais utilizadas.

#### 3.4.4. Secador de difusão

O secador de difusão utilizado com o intuito de remover a umidade proveniente das partículas geradas era da marca TSI, modelo 3062. Este secador apresenta uma estrutura cilíndrica de acrílico composta por outro cilindro concêntrico de tela de fio metálico. A região anular foi preenchida com sílica-gel a fim de adsorver a umidade do fluxo de ar. O secador de difusão utilizado pode ser visualizado na Figura 3.7.

Figura 3. 7: Secador de difusão



Fonte: Acervo Pessoal

#### 3.4.5. Fontes Neutralizadoras

As fontes neutralizadoras foram utilizadas a fim de estabilizar as possíveis cargas eletrostáticas presentes nas partículas geradas. Sendo assim, foram utilizadas duas fontes neutralizadoras durante os ensaios experimentais. Uma delas, uma fonte de Kriptônio 85 foi instalada após o secador de difusão e a outra fonte, de Amerício 241, foi instalada nos amostradores, ou seja, antes do fluxo de ar contendo partículas seguir para o equipamento SMPS, este fluxo de ar passava por esta fonte neutralizadora de Amerício 241. A utilização desta

segunda fonte neste local foi necessária devido à técnica utilizada para detecção de partículas no equipamento SMPS, que será mais discutida posteriormente. As Figuras 3.8 e 3.9 apresentam as fontes neutralizadoras utilizadas, de Kriptônio e Amerício, respectivamente.

Figura 3. 8: Fonte Neutralizadora de Kriptônio



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 3. 9: Fonte Neutralizadora de Amerício



Fonte: Acervo Pessoal

#### 3.4.6. Dispositivo de filtração

O dispositivo de filtração tem a principal finalidade de dar sustentação ao meio filtrante. O dispositivo utilizado apresentava formato cilíndrico de material PVC com uma área filtrante de  $5,3 \text{ cm}^2$ . Era composto por duas partes desmontáveis que facilitavam a troca dos

meios filtrantes. A região de junção entre as duas partes apresentava uma vedação assegurada pelo uso de o-rings e rosca que impedia qualquer tipo de vazamento através do meio filtrante.

Dois conectores foram instalados a uma distância de 12 cm antes e depois do meio filtrante para que fosse possível monitorar a queda de pressão no filtro. O dispositivo de filtração pode ser visualizado na Figura 3.10.

Figura 3. 10: Dispositivo de filtração



Fonte: Acervo Pessoal

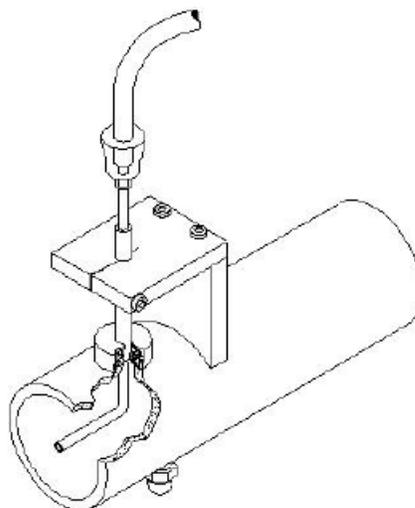
#### *3.4.7. Amostragem de partículas*

A amostragem de partículas foi realizada através de duas sondas de 2mm de diâmetro, sendo uma instalada antes do meio filtrante e outra instalada depois do meio filtrante. Estas sondas eram ligadas diretamente na linha de filtração sendo dispostas a uma distância de 26 cm antes e depois do meio filtrante. As sondas ficavam alinhadas exatamente no centro do duto para a coleta das partículas. A disposição das sondas de amostragem pode ser visualizada na Figura 3.11.

As sondas eram diretamente ligadas a uma válvula de 3 vias para que o acionamento manual da alavanca pudesse ser selecionado de acordo com a amostragem pretendida.

A amostragem de partículas foi realizada sobre condições sobre-isocinéticas, sendo que nenhum bocal foi inserido no tubo de amostragem. Não houve uma grande preocupação quanto ao tipo de amostragem, uma vez que Arouca, Feitosa e Coury (2010) constataram que os efeitos da amostragem não isocinética na distribuição de tamanho de partícula foram insignificantes ao avaliar este mesmo equipamento.

Figura 3. 11: Esquema das sondas de amostragem



Fonte: FEITOSA (2009)

#### 3.4.8. Medidor de vazão

A vazão de escoamento do ar dentro da linha de filtração foi medida através de um rotâmetro da marca Gilmont Instruments Inc., modelo 31601-31700, número 3, com esfera de vidro, acoplada na saída da linha de filtração. A vazão requerida foi ajustada por uma válvula tipo agulha, posicionada na entrada do sistema.

#### 3.4.9. Manômetro

A queda de pressão durante a filtração das partículas nanométricas foi monitorada pelo manômetro digital Velocicalc da marca TSI, modelo 8385A. Neste tipo de manômetro, é possível determinar o intervalo de tempo para serem feitas as medidas de queda de pressão. A Figura 3.12 mostra o manômetro digital utilizado.

Figura 3. 12: Manômetro digital



Fonte: Acervo Pessoal

#### 3.4.10. Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica (SMPS)

O Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica (SMPS) é um equipamento constituído por um Impactador, localizado logo na entrada do equipamento, um Classificador Eletrostático (modelo 3080) e um Contador de Partículas Ultrafinas (modelo 3776), ambos da marca TSI. Acoplado ao Classificador Eletrostático também se encontra um Analisador de Mobilidade Diferencial (DMA) que pode ser configurado de duas maneiras, que serão mais detalhadas posteriormente. Este conjunto é capaz de fornecer a concentração de partículas por faixa de diâmetros do aerossol amostrado. A Figura 3.13 ilustra este conjunto de equipamentos.

Figura 3. 13: SMPS



Fonte: Acervo Pessoal

Conforme dito anteriormente, o Analisador de Mobilidade Diferencial (DMA) pode ser configurado de duas maneiras: Long-DMA ou Nano-DMA. A diferença entre as duas configurações é a faixa de diâmetro de partículas em que é possível fazer a varredura. Com a configuração Long-DMA (modelo 3081-TSI) foi possível fazer a contagem de partículas na faixa compreendida entre 6-800 nm. Mas é importante destacar que não foi possível fazer a varredura para toda esta faixa de diâmetros de uma só vez, foi necessário aferir dois valores da vazão de amostragem no SMPS para obter a concentração de partículas em função do diâmetro da partícula para a faixa de 6-800nm. As vazões aferidas foram de 1,4 e 0,3 L/min.

A Figura 3.14 ilustra estes dois modos disponíveis de Analisadores de Mobilidade Diferencial.

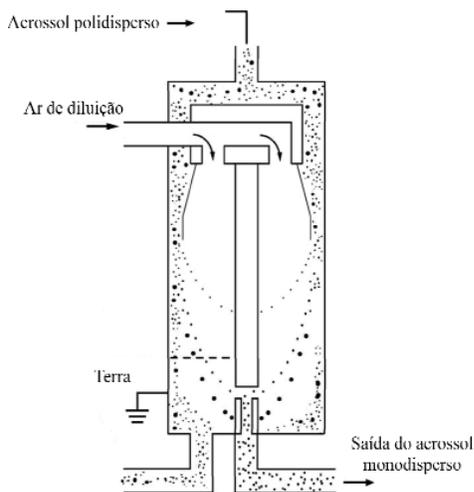
Figura 3. 14: Torres (1) Long-DMA e (2) Nano-DMA



Fonte: FEITOSA (2009)

O objetivo básico do SMPS é fazer a contagem das partículas amostradas por faixa de diâmetros. Para isso, o aerossol polidisperso passa por um impactador inercial, onde as partículas maiores são removidas por impactação inercial na entrada do SMPS. As partículas que passaram são direcionadas para o DMA para que elas sejam separadas de acordo com a mobilidade elétrica. Uma pequena fração de partículas monodispersas segue para o contador de partículas para que seja feita a contagem dessas partículas. A Figura 3.15 ilustra o princípio de funcionamento do equipamento DMA.

Figura 3. 15: Princípio de funcionamento do DMA



Fonte: FEITOSA (2009)

Alguns parâmetros devem ser pré-estabelecidos para o funcionamento do SMPS. Dentre eles, a viscosidade do gás, a densidade da partícula, o tamanho do impactador, o modelo de DMA, a vazão de aerosol amostrada, a vazão de ar de diluição, o tempo *scan up* que se refere ao tempo que as partículas são classificadas em função da tensão, sendo que a tensão aumenta exponencialmente, o tempo *retrace* que se refere ao tempo necessário para a tensão retorne ao valor inicial para que seja realizada uma nova varredura e o tempo *Break* que é o tempo de espera entre um escaneamento e outro.

### 3.5. Procedimento Experimental

A unidade experimental apresentada na Figura 3.4 foi utilizada para a realização de todos os ensaios experimentais descritos a seguir. Com relação ao SMPS, o ajuste adequado ao funcionamento deste equipamento foi estudado e determinado por Feitosa (2009). Diante das condições operacionais utilizadas neste trabalho, verificaram-se quais parâmetros poderiam ser utilizados e foram determinados os parâmetros que serão aqui utilizados. A Tabela 3.4 apresenta os parâmetros pré-determinados e configurados para um bom ajuste do equipamento SMPS.

Destaca-se que a torre DMA usada em todos os testes experimentais foi a torre Long- DMA. Através de um teste preliminar utilizando a torre Nano-DMA, constatou-se que a

geração de partículas não apresentou partículas menores que 6nm, sendo assim, não houve necessidade da utilização desta torre.

Tabela 3. 4: Parâmetros pré-estabelecidos para configuração do SMPS

Impactador	Vazão de Amostragem (L/min)	Tempos		
		Scan up	Retrace	Break
0,0710 cm	1,4	300	15	0
	0,3	300	15	0

Fonte: Acervo Pessoal

### 3.5.1. Permeabilidade dos meios filtrantes

A permeabilidade dos meios filtrantes foi determinada utilizando a unidade experimental dos demais ensaios. Neste ensaio apenas o ar puro circulava na linha de filtração. O que nos interessou para este ensaio foi a relação da queda de pressão com o aumento da velocidade superficial do ar no duto. Sendo assim, a velocidade de filtração foi variada desde zero até 0,25m/s e as quedas de pressão correspondentes foram obtidas. Com estes valores, foi possível obter a curva e a permeabilidade darciana a partir da Equação de Darcy (Equação 2.5).

### 3.5.2. Ensaios de filtração

Os ensaios de filtração foram realizados através da geração das partículas por um inalador comercial. A solução preparada e inserida no recipiente foi atomizada e as partículas secas após passarem por um secador de difusão foram direcionadas para a linha de filtração. A velocidade de filtração foi ajustada em 6 cm/s e a queda de pressão foi monitorada constantemente afim de obter as curvas características da filtração. Esta velocidade de filtração foi estipulada pelo fato de ser a menor velocidade possível que se conseguiu aferir devido já haver a contribuição do fluxo de ar que era direcionado ao gerador de partículas. Para avaliar o comportamento na filtração de partículas nanométricas é interessante trabalhar com baixas velocidades de filtração, sendo assim optou-se por trabalhar com a menor velocidade possível.

A queda de pressão máxima estipulada foi de  $\Delta P_{Máx} = \Delta P_0 + 980\text{Pa}$ , sendo o  $\Delta P_0$  a queda de pressão inicial de cada meio filtrante, tendo valores de 353Pa e 42Pa para os filtros HEPA e Poliéster.

A partir das curvas obtidas na filtração foi possível encontrar o ponto de colmatação das tortas de filtração.

### 3.5.3. Ensaio de eficiência

Os ensaios de eficiência experimentais foram realizados tanto para o meio filtrante limpo, sem partículas depositadas, e também para os meios filtrantes durante e após a filtração, ou seja, durante a deposição das partículas. Para o meio filtrante limpo, o filtro foi inserido no suporte de filtração, o gerador de partículas foi acionado e em seguida realizou-se a contagem de partículas anteriormente ao filtro e após a passagem pelo filtro. A diferença entre as partículas na saída com relação à entrada refere-se à quantidade de partículas que ficaram depositadas no filtro. Com estes dados foi possível obter as eficiências dos meios filtrantes limpos.

Os ensaios de eficiência experimentais durante a deposição das partículas foi realizado durante a filtração e também ao término dela. Quando a queda de pressão durante a filtração alcançava os valores pré-estabelecidos de  $\Delta P_0 + 98\text{Pa}$ ,  $\Delta P_0 + 196\text{Pa}$ ,  $\Delta P_0 + 294\text{Pa}$ ,  $\Delta P_0 + 392\text{Pa}$ ,  $\Delta P_0 + 490\text{Pa}$ , o SMPS era ligado para fazer a contagem das partículas antes e após o filtro para assim obter as respectivas eficiências de coleta. É importante destacar que a filtração não era interrompida no momento que realizava a contagem das partículas, os dois ensaios eram feitos paralelamente, sendo que um não interferia no outro. A filtração terminava quando os meios filtrantes atingiam valores de queda de pressão de  $\Delta P_0 + 980\text{Pa}$  e neste momento também era realizada a contagem das partículas para a obtenção da eficiência de coleta. O  $\Delta P_0$  refere-se ao valor inicial de cada meio filtrante, este valor depende das características e estrutura de cada filtro. Os valores de  $\Delta P_0$  dos filtros HEPA e poliéster apresentaram valores de 353Pa e 42Pa. A Tabela 3.5 apresenta os valores de queda de pressão pré-estabelecidos para cada meio filtrante para avaliar a eficiência.

Tabela 3.5: Valores de queda de pressão pré-determinados para avaliação da eficiência

Queda de Pressão (Pa)	Queda de Pressão (Pa)	
	Meio Filtrante	
	HEPA	Poliéster
$\Delta P = \Delta P_0$	353	42
$\Delta P = \Delta P_0 + 98$	451	140
$\Delta P = \Delta P_0 + 196$	549	238
$\Delta P = \Delta P_0 + 294$	647	336
$\Delta P = \Delta P_0 + 392$	745	434
$\Delta P = \Delta P_0 + 490$	843	532
$\Delta P = \Delta P_0 + 980$	1333	1022

Fonte: Acervo Pessoal

A eficiência de coleta experimental foi calculada através da Equação 3.1, que relaciona a concentração das partículas antes e depois da passagem pelo filtro.

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

em que  $C_0$  e  $C_E$  representam a concentração de partículas antes e depois a passagem pelo filtro, respectivamente.

As eficiências de coleta experimental obtidas pela equação 3.1 foram comparadas com as eficiências de coleta teóricas, obtidas pelas equações 2.17 e 2.18.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo objetiva apresentar e discutir os resultados obtidos neste estudo. Para isso, optou-se por apresentar os resultados de cada meio filtrante separadamente.

A ordem de apresentação dos resultados será a seguinte: Filtro de Fibras Heterogêneas e Filtro de Fibras Homogêneas.

#### 4.1. Filtro de Fibras Heterogêneas

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos neste estudo para o filtro de Celulose HEPA.

##### 4.1.1. Permeabilidade

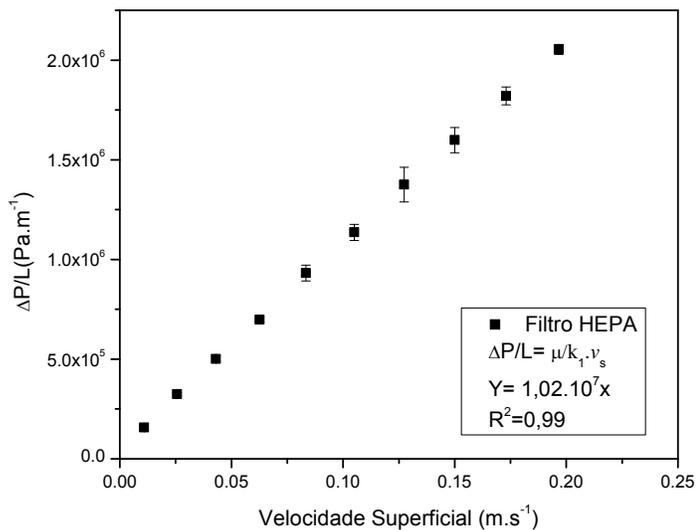
A permeabilidade do filtro limpo foi obtida através de dados experimentais utilizando a Equação de Darcy (Equação 2.5). A partir das curvas de queda de pressão/espessura ( $\Delta P/L$ ) em função da velocidade superficial do gás ( $v_s$ ) determinou-se a permeabilidade Darciana para o filtro de celulose HEPA.

Estes ensaios foram realizados em triplicata. Para a obtenção da permeabilidade, optou-se pela permeabilidade obtida em função da média dos valores das três réplicas.

A Figura 4.1 apresenta a curva de  $\Delta P/L$  em função da velocidade superficial para o filtro HEPA.

Após obter o coeficiente angular da curva, a constante de permeabilidade foi obtida pela igualdade deste valor com a razão  $\mu/k_1$ , conforme equação de Darcy. Sendo assim, o valor encontrado para a constante de permeabilidade do meio filtrante de celulose HEPA obtido pela equação de Darcy após o ajuste linear foi de  $1,77 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ .

Figura 4. 1:  $\Delta P/L$  em função da velocidade superficial para o filtro HEPA

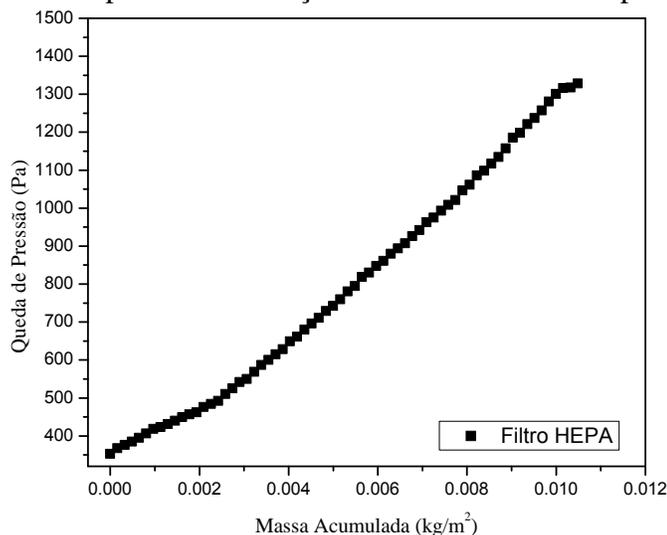


Fonte: Acervo Pessoal

#### 4.1.2. Ensaio de Filtração (Deposição das partículas)

A deposição das partículas foi avaliada até uma queda de pressão máxima de  $\Delta P_0 + 980$  Pa. No caso do filtro de Celulose HEPA,  $\Delta P_0$  apresentou valor igual a 353 Pa, sendo assim, a queda de pressão máxima estipulada foi de 1333 Pa. A Figura 4.2 apresenta a curva de queda de pressão em função da massa acumulada para as partículas de NaCl no filtro HEPA até a queda de pressão máxima estipulada.

Figura 4. 2: Queda de pressão em função da massa acumulada para o filtro HEPA



Fonte: Acervo Pessoal

Observa-se que a curva de filtração para o Filtro de celulose HEPA apresentou duas etapas. Nos instantes iniciais da filtração, até uma massa depositada de aproximadamente  $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ , observa-se que a inclinação foi menor quando comparado ao restante da curva. A partir deste momento da deposição, a inclinação da curva atingiu a sua inclinação máxima. Estas duas etapas caracterizadas pela inclinação da curva recebem o nome de filtração interna e filtração superficial. Embora a etapa de filtração interna tenha sido muito pequena para este filtro, observa-se que ela ocorreu, mas este meio filtrante apresenta características principalmente de filtração superficial, conforme destacado por Japuntich, Stenhouse e Liu, 1994.

Foram obtidas imagens em Microscópio Eletrônico de Varredura do meio filtrante de celulose HEPA durante a deposição das partículas para valores de queda de pressão de 451, 549, 647, 745 e 843 Pa e também ao final da filtração, ao atingir o valor de 1333 Pa.

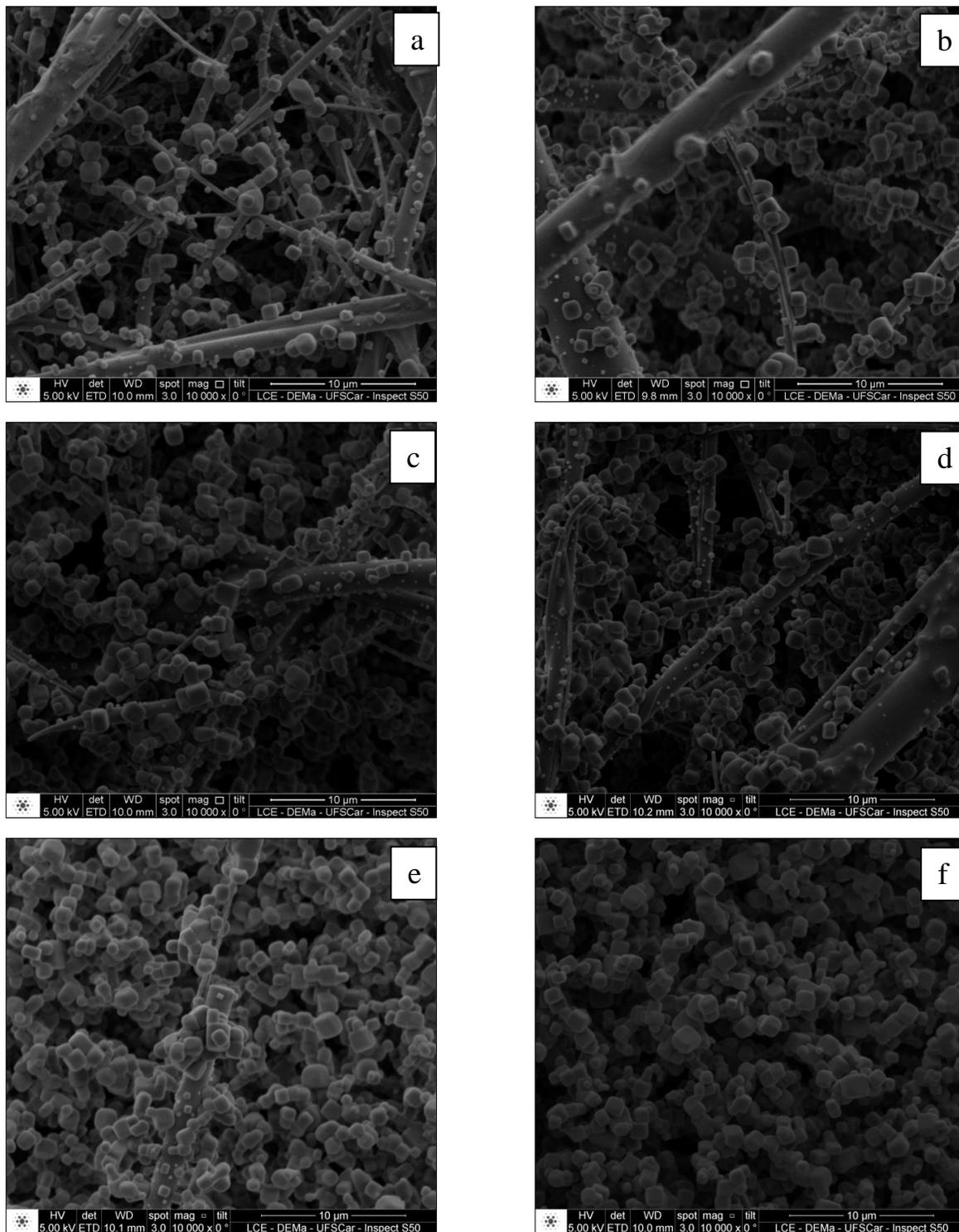
A Figura 4.3 (a, b, c, d, e e f) apresentam as imagens obtidas:

#### *4.1.3. Ponto de Colmatação e Resistência Específica da Torta*

O ponto de colmatação foi obtido pelo método proposto por Walsh (1996). O programa utilizado para a obtenção das curvas possui uma ferramenta onde é possível localizar as ordenadas em qualquer localidade das curvas, sendo assim foi possível encontrar a massa acumulada correspondente ao ponto de colmatação.

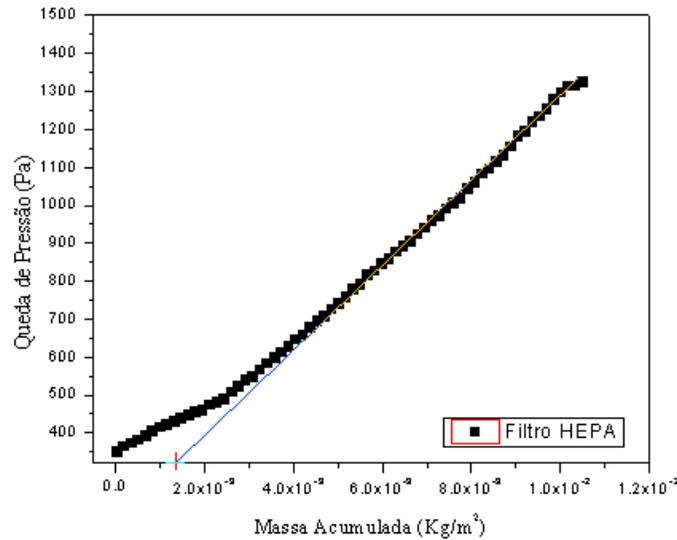
Ao se prolongar a parte linear da curva correspondente à filtração superficial ao eixo das abcissas, esta linha interceptou o eixo x no valor de  $1,35 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ , conforme mostrado na Figura 4.4. Esse valor corresponde ao ponto de colmatação do meio filtrante de celulose HEPA, ou seja, essa massa corresponde ao valor necessário aproximado para o início da formação da torta de filtração.

Figura 4. 3: Partículas depositadas no filtro HEPA a uma queda de pressão de: a)451; b)549; c)647; d)745; e) 843 e f)1333Pa



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 4. 4:: Ponto de colmatação para o filtro HEPA

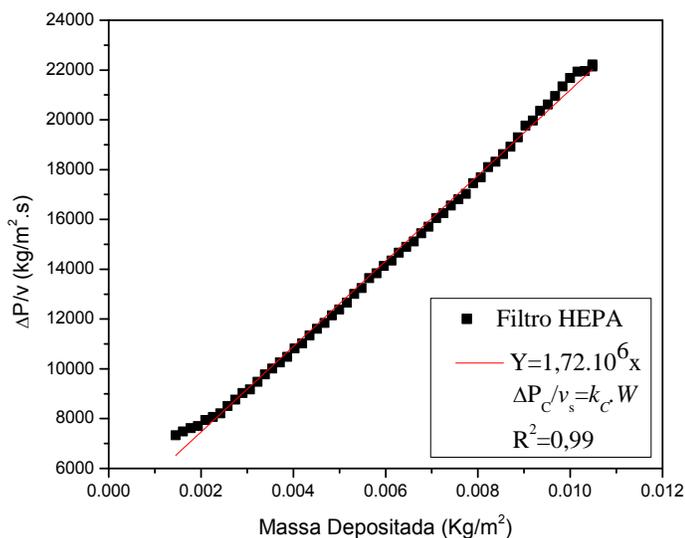


Fonte: Acervo Pessoal

A resistência específica da torta foi determinada a partir de dados experimentais da razão da pressão diferencial da torta e da velocidade superficial do gás ( $\Delta P_c / v_s$ ) em função da massa de pó depositada por unidade de área ( $W$ ), através de um ajuste linear ( $Y = ax$ ) da curva que corresponde à torta de filtração. De acordo com o método discutido anteriormente, a torta de filtração começou a ser formada a partir de uma massa depositada aproximada de  $1,35 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ , sendo assim, o ajuste linear para a obtenção da resistência específica da torta foi realizada a partir dessa massa. A Figura 4.5 ilustra a curva e o ajuste linear para obtenção da resistência específica da torta.

Conforme Equação 2.4, o coeficiente angular da curva corresponde à resistência específica da torta, sendo assim a resistência específica da torta para o filtro HEPA teve valor correspondente a  $1,72 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ .

Figura 4. 5: Curva para obtenção da Resistência específica da torta para o filtro HEPA



Fonte: Acervo Pessoal

A Tabela 4.1 apresenta os valores encontrados para o ponto de colmatação e para a resistência específica da torta formada para o filtro HEPA.

Tabela 4. 1: Valores do ponto de colmatação e resistência específica da torta do filtro HEPA

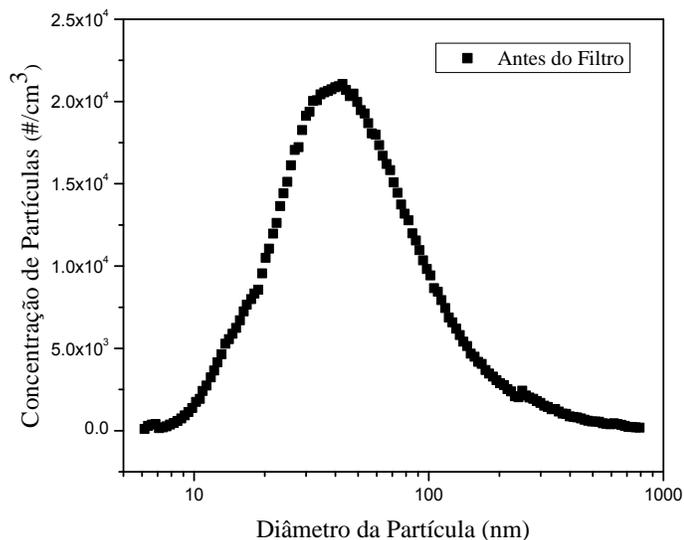
	Ponto de Colmatação	Resistência Específica da Torta
Filtro HEPA	$1,35 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$	$1,72 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$

Fonte: Acervo Pessoal

#### 4.1.4. Ensaio de Eficiência Experimental

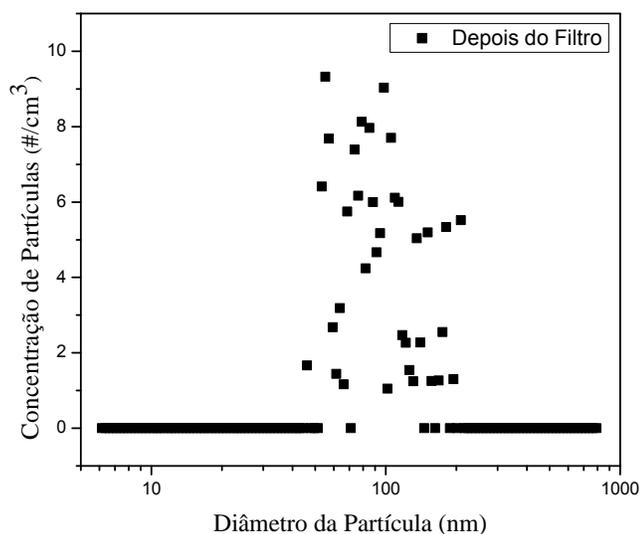
A partir das amostragens *online* da concentração de partículas antes e após a passagem da corrente de ar pelo filtro foi possível obter a eficiência de coleta experimental para o filtro HEPA. Estes valores foram calculados a partir da Equação 3.1. As figuras seguintes mostram as curvas de concentração de partículas antes da passagem pelo filtro (Figura 4.6), depois da passagem pelo filtro (Figura 4.7), e a curva de eficiência experimental obtida (Figura 4.8).

Figura 4. 6: Concentração de Partículas antes da passagem pelo meio filtrante



Fonte: Acervo Pessoal

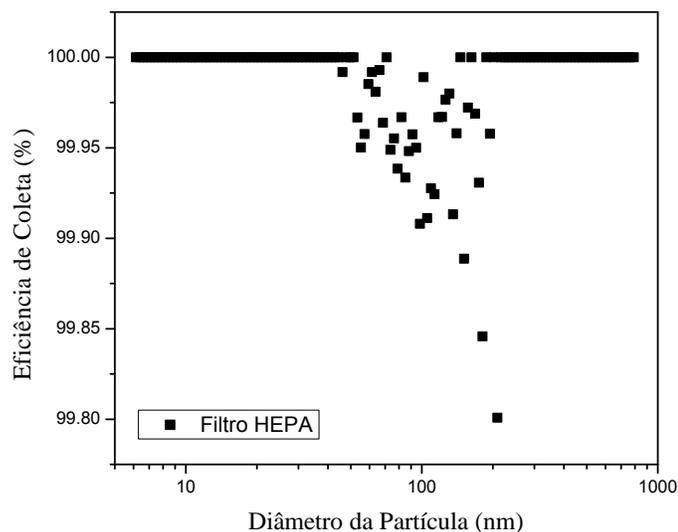
Figura 4. 7: Concentração de Partículas depois da passagem pelo meio filtrante



Fonte: Acervo Pessoal

A Figura 4.6 representa a concentração total de partículas na linha, ou seja, a concentração de partículas máxima na linha. Já a Figura 4.7 representa a concentração de partículas que conseguiram penetrar o meio filtrante e não foram coletadas. Observa-se que a penetração ocorreu somente em uma faixa específica de diâmetros, na faixa compreendida entre 40 a 200nm.

Figura 4. 8: Eficiência de Coleta Experimental do filtro HEPA



Fonte: Acervo Pessoal

É possível observar que a eficiência para este filtro foi alta, sendo que para a maioria dos diâmetros avaliados a remoção foi de 100%. Alguma penetração ocorreu na faixa compreendida entre 40-200 nm, mas nenhuma tendência foi observada. Feitosa (2009) comprovou que existe penetração neste mesmo filtro HEPA na faixa de diâmetros entre 45 e 160nm, onde este autor verificou e descartou todas as possibilidades que poderiam estar incoerentes com relação à eficiência deste filtro, tais como desprendimentos de partículas nas tubulações e ao tempo de permanência no espectrômetro. Mesmo com a penetração observada, este filtro foi altamente eficiente na remoção de partículas na faixa avaliada. Este fato se deve às características deste meio filtrante, sendo este composto de fibras heterogêneas e havendo a predominância de fibras de pequenos diâmetros.

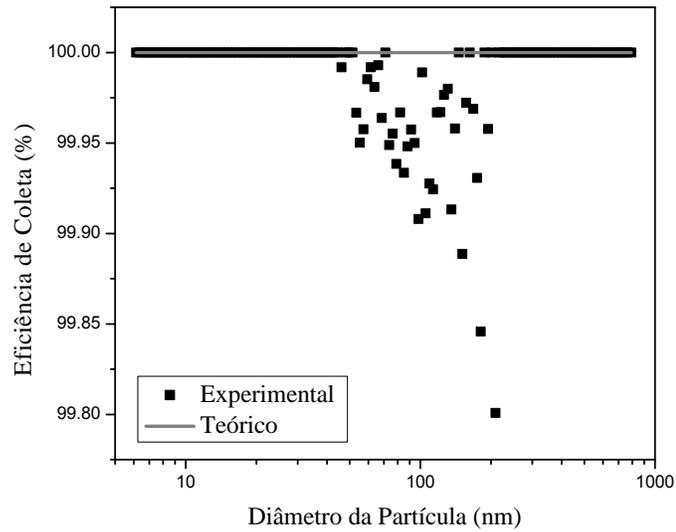
A penetração observada, embora bem pequena, provavelmente está ocorrendo na região de mínima eficiência deste filtro, o que seria uma região de transição entre os mecanismos difusional e interceptação direta.

#### 4.1.5. Eficiência Experimental x Eficiência Teórica

A Figura 4.9 representa as eficiências de coleta experimental, obtida pela Equação 3.1, e eficiência de coleta teórica, obtida pela Equação 2.18, para o meio filtrante de fibras

heterogêneas, Celulose (HEPA), na condição de filtro limpo, ou seja, a eficiência inicial deste filtro.

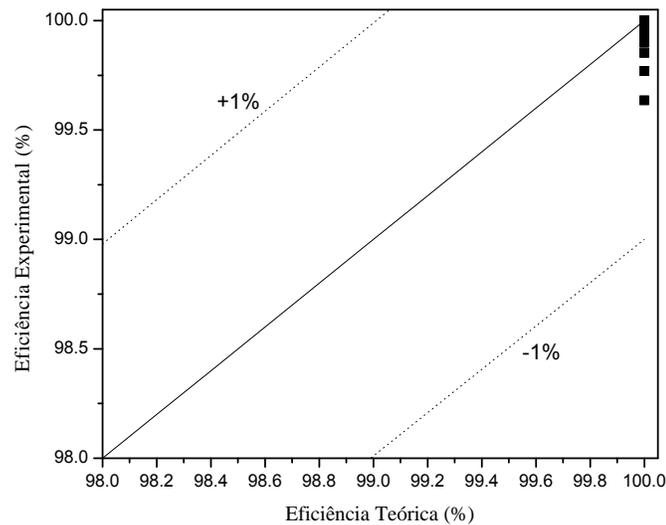
Figura 4. 9: Eficiência de coleta experimental e teórica para o filtro HEPA.



Fonte: Acervo Pessoal

A Figura 4.10 representa um comparativo entre os resultados experimentais e teóricos.

Figura 4. 10: Comparação entre eficiência de coleta experimental e teórica para o filtro HEPA.



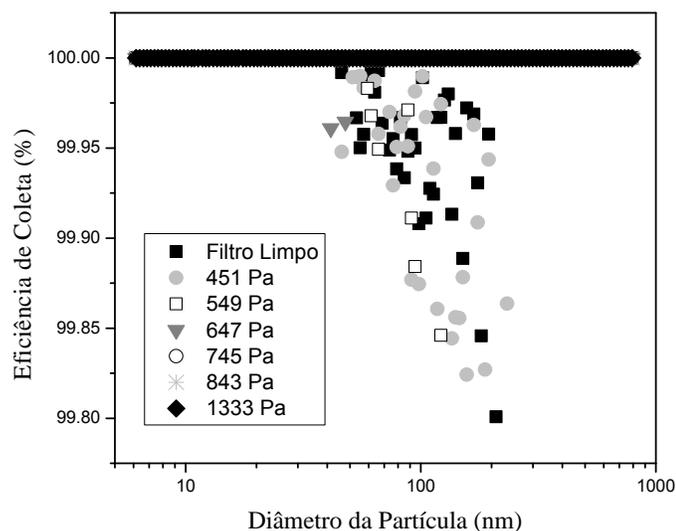
Fonte: Acervo Pessoal

A eficiência de coleta teórica estima que este filtro apresente uma eficiência de 100% para a faixa de diâmetros avaliada. Embora o filtro tenha apresentado eficiências experimentais acima de 99%, na faixa compreendida entre 40-200nm a teoria superestimou os resultados experimentais, sendo que a variação máxima não passou de 1%.

#### 4.1.6. Eficiência de Coleta após a Deposição das partículas

Esta etapa experimental foi realizada com o objetivo de avaliar a influência da deposição das partículas na eficiência do meio filtrante durante a filtração. A Figura 4.11 apresenta a eficiência de coleta experimental antes e durante a deposição das partículas, ou seja, do filtro limpo e durante a filtração ao alcançar quedas de pressão de 451Pa, 549Pa, 647Pa, 745Pa, 843Pa e 1333Pa.

Figura 4. 11: Eficiência de coleta antes e durante a deposição para o filtro HEPA



Fonte: Acervo Pessoal

Embora este filtro já seja bastante eficiente na coleta das partículas avaliadas, observa-se que esta eficiência aumentou até alcançar 100% ao atingir uma queda de pressão de 1333Pa. Isto confirma o fato de que as partículas após serem depositadas agem como coletores para as partículas posteriores sendo responsáveis pelo aumento da eficiência do filtro.

Constatou-se também que mesmo com as partículas depositadas, a penetração ocorreu na mesma faixa de tamanho de partículas observada para o filtro limpo, na faixa compreendida entre 40 a 200nm.

## 4.2. Filtro de Fibras Homogêneas

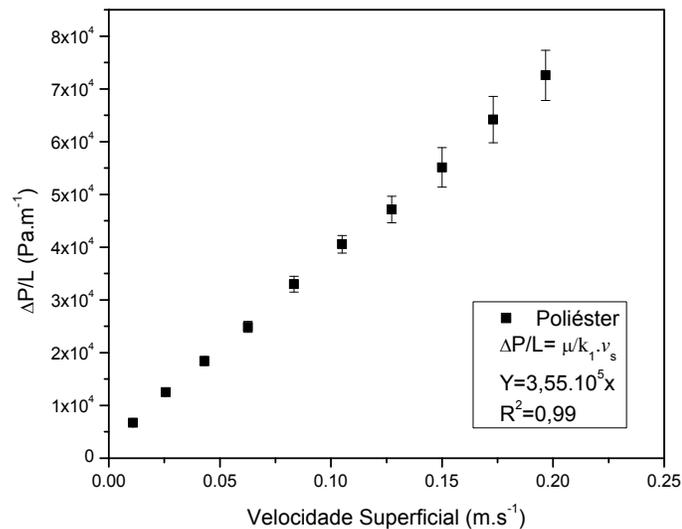
A seguir, serão apresentados os resultados obtidos neste estudo para o filtro de Fibras homogêneas de Poliéster.

### 4.2.1. Permeabilidade

Da mesma forma como foi obtida para o filtro anterior, a permeabilidade do filtro limpo de Poliéster foi obtida através de dados experimentais utilizando a Equação de Darcy (Equação 2.5).

A Figura 4.12 ilustra a curva de queda de pressão/espessura ( $\Delta P/L$ ) em função da velocidade superficial do gás ( $v_s$ ) para o Filtro de Poliéster.

Figura 4. 12:  $\Delta P/L$  em função da velocidade superficial para o filtro de Poliéster



Fonte: Acervo Pessoal

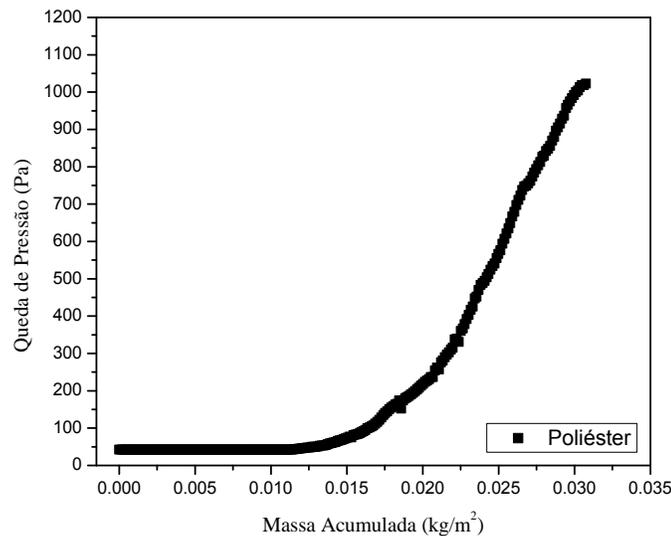
Após obter o coeficiente angular da curva, a constante de permeabilidade foi obtida pela igualdade deste valor com a razão  $\mu/k_1$ , conforme equação de Darcy. O valor encontrado para a permeabilidade do meio filtrante de Poliéster obtido pela Equação de Darcy foi de  $5,07.10^{-11} \text{ m}^2$ .

#### 4.2.2. Ensaio de Filtração (Deposição das partículas)

A deposição das partículas foi avaliada até uma queda de pressão máxima de  $\Delta P_0 + 980 \text{ Pa}$ . Para o filtro de Poliéster,  $\Delta P_0$  apresentou valor igual a  $42 \text{ Pa}$ , então a queda de pressão máxima estipulada foi de  $1022 \text{ Pa}$ .

A Figura 4.13 apresenta a curva de queda de pressão em função da massa acumulada para as partículas de NaCl no filtro de Poliéster até a queda de pressão máxima estipulada.

Figura 4. 13: Queda de pressão em função da massa acumulada para o filtro de Poliéster



Fonte: Acervo Pessoal

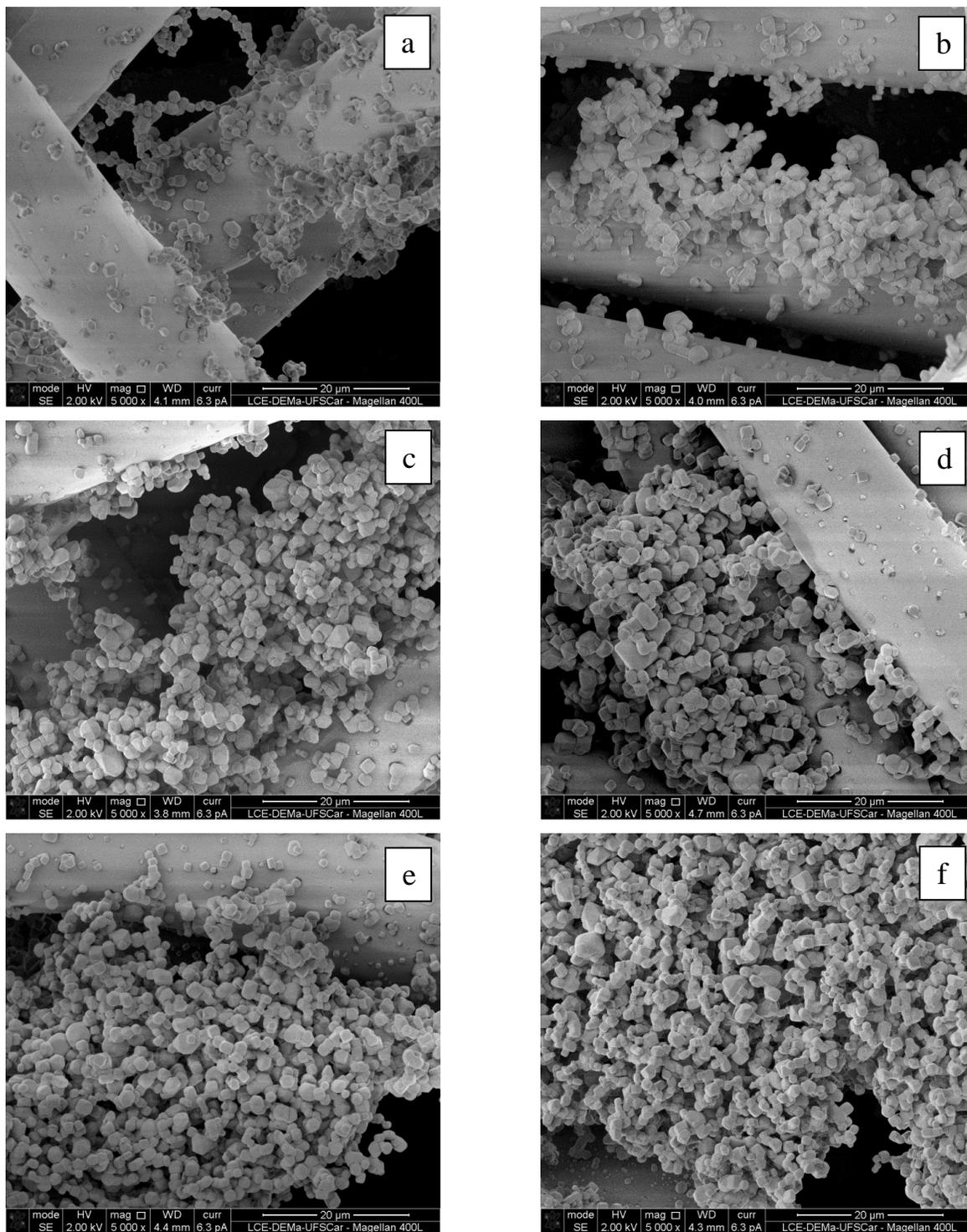
Observa-se que a curva de filtração para o Filtro de Poliéster apresentou duas etapas muito bem definidas. Nos instantes iniciais da filtração observa-se que a inclinação foi

---

perceptivelmente menor quando comparado ao restante da curva. A partir deste momento da deposição a inclinação da curva atingiu a sua inclinação máxima. Devido às características e estrutura do meio filtrante de Poliéster, as partículas primeiramente tendem a se depositar no interior do meio filtrante até sua saturação e a partir daí se depositam na superfície e formam a torta de filtração.

Foram obtidas imagens em Microscópio Eletrônico de Varredura do meio filtrante de Poliéster durante a deposição das partículas para valores de queda de pressão de 140, 238, 336, 434, 532 e 1022 Pa. As imagens estão apresentadas a seguir:

Figura 4. 14: Partículas depositadas no filtro HEPA a uma queda de pressão de: a)140; b)238; c)336; d)434; e) 532 e f)1022Pa

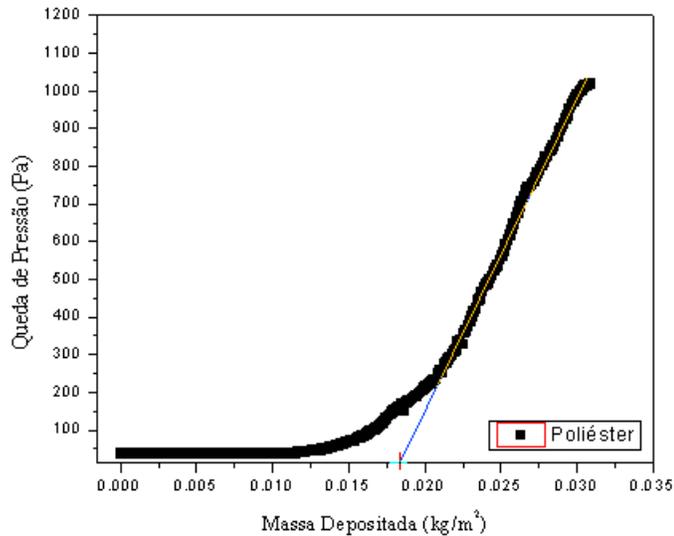


Fonte: Acervo Pessoal

#### 4.2.3. Ponto de Colmatação e Resistência Específica da Torta

O ponto de colmatação foi obtido pelo método proposto por Walsh (1996), conforme mostra a Figura 4.15

Figura 4. 15: Ponto de Colmatação do filtro de poliéster

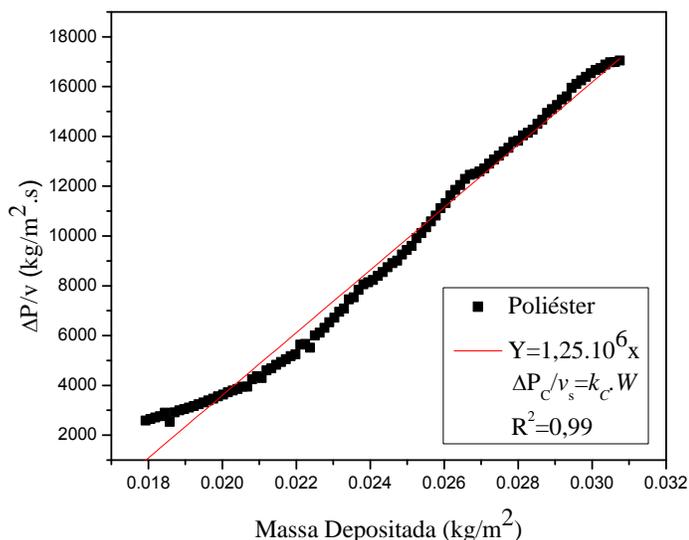


Fonte: Acervo Pessoal

Ao prolongar a parte linear da curva ao eixo das abscissas, esta linha interceptou o eixo x no valor de 0,018 kg/m<sup>2</sup>. Esse valor corresponde ao ponto de colmatação do meio filtrante de Poliéster.

A resistência específica da torta foi determinada a partir de dados experimentais da razão da pressão diferencial da torta e da velocidade superficial do gás ( $\Delta P_c / v_s$ ) em função da massa de pó depositada por unidade de área (W), através de um ajuste linear ( $Y = ax$ ) apenas da parte linear da curva, ou seja, a parte da curva que corresponde à torta de filtração. De acordo com o método discutido anteriormente (Walsh, 1996), a torta de filtração começou a ser formada a partir de uma massa depositada aproximada de 0,018 kg/m<sup>2</sup>, sendo assim, o ajuste linear para a obtenção da resistência específica da torta foi realizada a partir dessa massa. A Figura 4.16 ilustra a curva e o ajuste linear para obtenção da resistência específica da torta.

Figura 4. 16: Resistência específica da torta para o filtro de poliéster



Fonte: Acervo Pessoal

Conforme Equação 2.4, o coeficiente angular da curva corresponde à resistência específica da torta, sendo assim a resistência específica da torta para o filtro HEPA teve valor correspondente a  $1,25.10^6 \text{ s}^{-1}$ .

A Tabela 4.2 apresenta os valores encontrados para o ponto de colmatação e para a resistência específica da torta formada no filtro de Poliéster.

Tabela 4. 2: Valores do ponto de colmatação e resistência específica da torta

	Ponto de Colmatação	Resistência Específica da Torta
Filtro de Poliéster	0,018 kg/m <sup>2</sup>	$1,25.10^6 \text{ s}^{-1}$

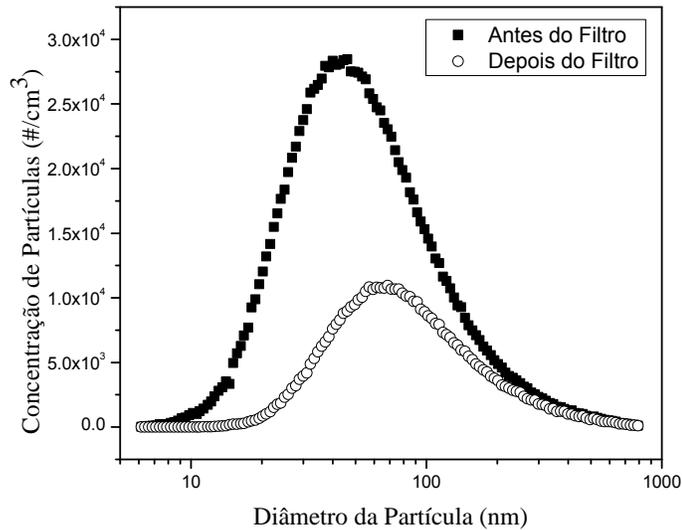
Fonte: Acervo Pessoal

#### 4.2.4. Ensaio de Eficiência Experimental

A partir das amostragens *online* da concentração de partículas antes e após a passagem da corrente de ar pelo filtro de Poliéster, foi possível obter a eficiência de coleta experimental para este filtro. Estes valores foram calculados a partir da Equação 3.1. As Figuras

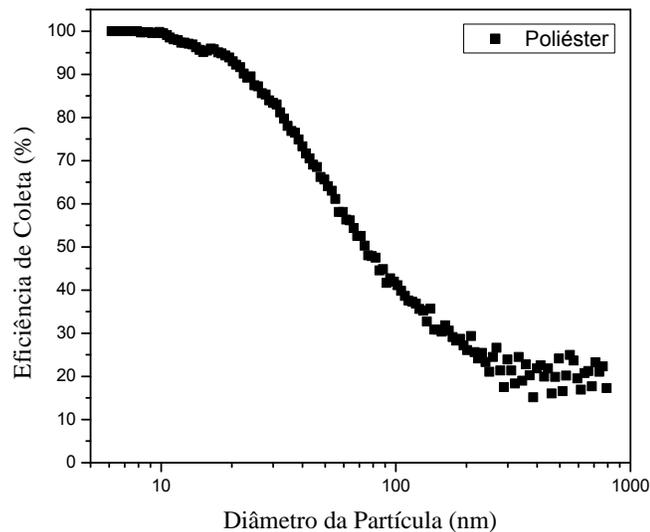
seguintes mostram a concentração de partículas antes e após a passagem pelo filtro (Figura 4.17) e a curva de eficiência experimental obtida para o filtro de Poliéster (Figura 4.18).

Figura 4. 17: Concentração de Partículas antes e após da passagem pelo filtro



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 4. 18: Eficiência experimental do filtro de poliéster



Fonte: Acervo Pessoal

Observa-se que a eficiência diminuiu com o aumento do tamanho das partículas, indicando a predominância do mecanismo difusional, este comportamento foi observado por

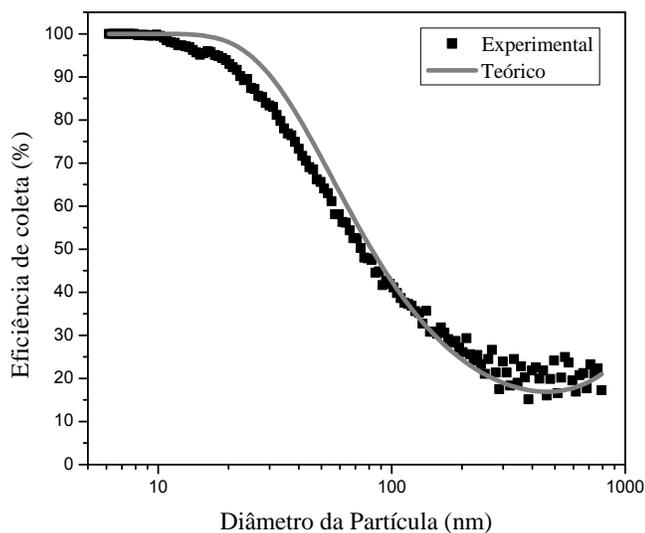
muitos autores, dentre eles VanOsdell et al. (1990), Podgórski et al. (2006), Steffens (2007-a) e Feitosa (2009). De acordo com a literatura, depois de atingir um mínimo, a eficiência tende a aumentar com o tamanho das partículas, mostrando o papel cada vez mais importante do mecanismo de interceptação direta (Lee e Liu, 1981).

A grande aleatoriedade dos dados experimentais na faixa de baixa eficiência pode estar relacionada à mínima eficiência deste meio filtrante. Hinds (1999) explica que na região de mínima eficiência, as partículas são consideradas muito grandes para serem coletadas pelo mecanismo difusional e muito pequenas para serem coletadas pelo mecanismo de interceptação direta. Este fato pode justificar a variação dos dados experimentais nesta região da curva. Uma outra justificativa para a grande aleatoriedade nesta região é que se trata de diâmetros que se aproximam do limite de detecção do equipamento usado, o SMPS, o que pode acarretar erros experimentais e ter ocasionado esta dispersão dos dados.

#### 4.2.5. Eficiência Experimental x Eficiência Teórica

A Figura 4.19 representa as eficiências de coleta experimental, obtida pela Equação 3.1, e eficiência de coleta teórica, obtida pela Equação 2.17, para o meio filtrante de fibras homogêneas, Poliéster, na condição de filtro limpo, ou seja, a eficiência inicial deste filtro.

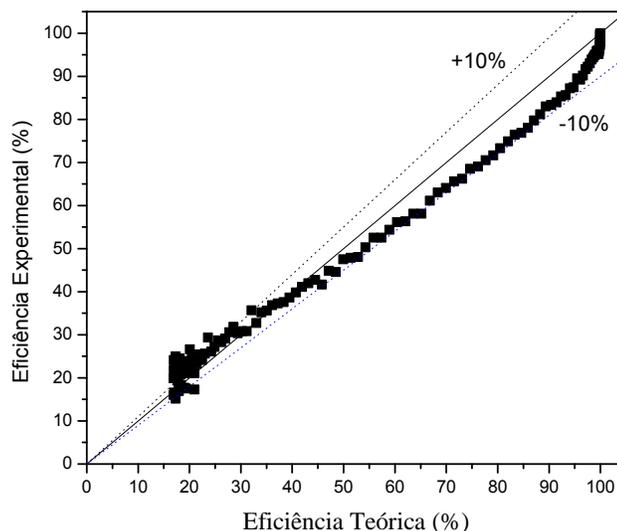
Figura 4. 19: Eficiência de coleta experimental e teórica para o filtro de Poliéster



Fonte: Acervo Pessoal

A Figura 4.20 representa um comparativo entre os resultados experimentais e teóricos.

Figura 4. 20: Eficiência de coleta experimental x teórica para o filtro de Poliéster



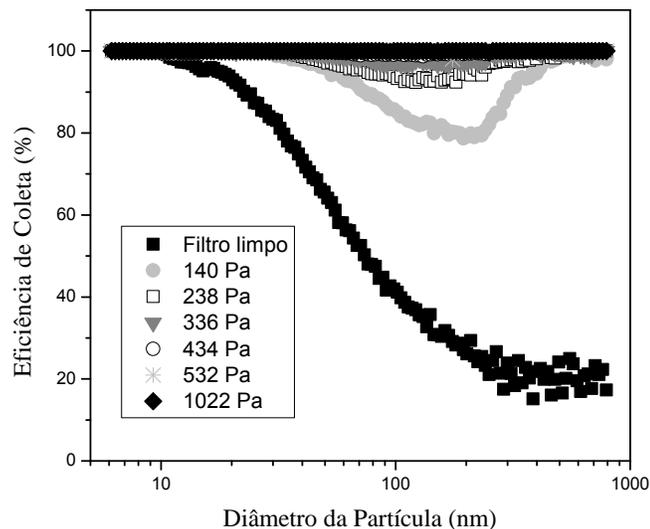
Fonte: Acervo Pessoal

O comportamento das curvas de eficiência experimental e teórica são semelhantes. A eficiência diminui com o aumento do diâmetro das partículas até atingir um mínimo. Observa-se que a teoria superestimou o experimental para uma grande faixa de diâmetros, sendo esta variação em torno de 10%. Para a faixa de baixa eficiência, devido à grande aleatoriedade dos dados experimentais, não houve uma tendência nítida observada, sendo que alguns pontos experimentais ficaram abaixo da teoria, outros acima e outros coincidiram com a teoria.

#### 4.2.6. Eficiência de Coleta após a Deposição das partículas

A Figura 4.21 apresenta a eficiência de coleta experimental antes e durante a filtração, ou seja, para o filtro limpo e ao alcançar valores de queda de pressão de 140, 238, 336, 434, 532 e 1022 Pa.

Figura 4. 21: Eficiência de coleta antes e após a filtração



Fonte: Acervo Pessoal

Observa-se que o filtro de Poliéster também alcançou praticamente 100% de eficiência ao final da filtração, ao atingir uma queda de pressão de 1022Pa, o que confirma novamente o fato de que quanto maior a quantidade de partículas depositadas, maior a eficiência dos meios filtrantes.

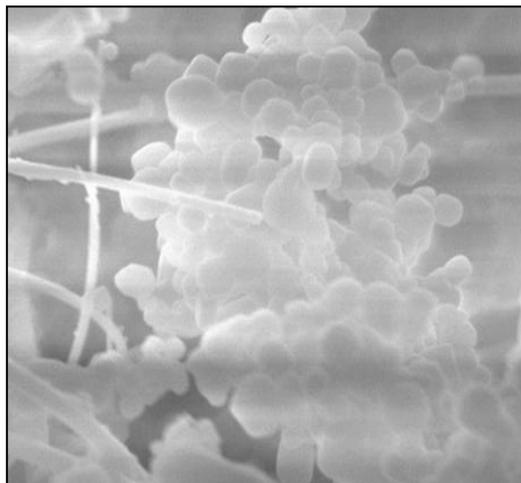
Inicialmente, o filtro de poliéster limpo apresentou eficiências de coleta variando de 15 a 100%, e após a deposição das partículas esta eficiência atingiu 100% para toda a faixa de partículas.

### 4.3. Formação dos Dendritos

Ao final da filtração, observou-se que o filtro ficou bastante eficiente devido às partículas que foram coletadas durante a filtração. Conforme já dito anteriormente, isto se deve à coleta pelas próprias partículas. Os dendritos formados são os principais responsáveis por este aumento na eficiência do filtro.

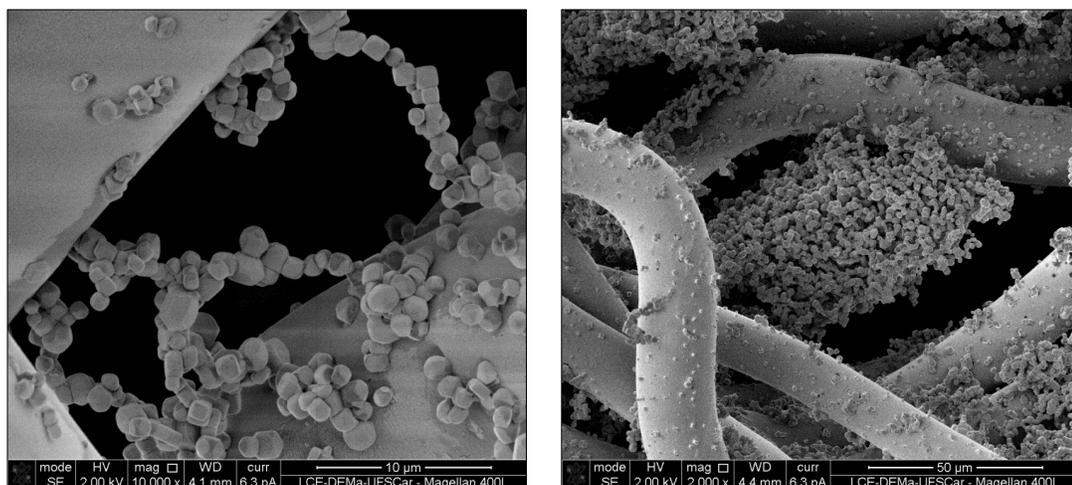
As figuras seguintes apresentam imagens obtidas em Microscópio Eletrônico de Varredura dos meios filtrantes submetidos à filtração até alcançar uma queda de pressão de  $\Delta P_0 + 980 \text{ Pa}$ .

Figura 4. 22: Dendrito observado no filtro HEPA



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 4. 23: Dendritos observados no filtro de Poliéster



Fonte: Acervo Pessoal

A partir destas figuras, é possível verificar as árvores e pontes formadas pelas partículas durante a deposição.

A grande maioria dos estudos experimentais de filtração de aerossóis através de meio filtrante fibroso para partículas nanométricas avalia a deposição em fibras limpas, sendo assim, fica difícil relacionar o comportamento da eficiência dos filtros à medida que as partículas são depositadas com a formação dos dendritos. O que se pode concluir baseado na literatura, é

que eles são os principais responsáveis pela coleta das partículas e é devido a eles que a eficiência do filtro aumenta. E experimentalmente, comprovou-se neste trabalho que a eficiência dos meios filtrantes aumenta significativamente com a deposição das partículas.

#### 4.4. Comparação entre os Filtros

Baseado nos resultados apresentados e discutidos anteriormente, este item foi proposto com a finalidade de apresentar uma comparação entre os filtros avaliados. A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos para ambos os meios filtrantes.

Tabela 4.3: Comparação entre os meios filtrantes HEPA e Poliéster

	Filtro HEPA	Poliéster
Permeabilidade	$1,77 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$	$5,07 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$
Ponto de Colmatação	$1,35 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$	$0,018 \text{ kg/m}^2$
Resistência Específica da Torta	$1,72 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$	$1,25 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$
Eficiência de Coleta (Filtro Limpo)	99,8-100%	15-100%
Eficiência de coleta após Filtração	100%	100%

Fonte: Acervo Pessoal

Inicialmente, foram encontradas as permeabilidades, a resistência específica da torta e o ponto de colmatação para ambos os filtros. O filtro HEPA apresentou uma menor permeabilidade que o filtro de poliéster, e apresentou uma torta de filtração mais resistente ao escoamento do gás. Com relação ao ponto de colmatação, para o filtro HEPA este ponto foi atingido a uma massa depositada menor que o do filtro de Poliéster, o que confirmou o fato de que o filtro HEPA apresenta características principalmente de filtração superficial.

O filtro HEPA apresentou maior eficiência que o filtro de Poliéster, como esperado. Esta eficiência variou de 99,8 a 100% de eficiência para o Filtro limpo HEPA e de 15 a 100% para o filtro limpo de Poliéster. Isto se deve às características de cada meio filtrante, tais como espessura e distribuição de diâmetro das fibras.

---

Durante a deposição das partículas, observou-se que a eficiência do meio filtrante aumentou para ambos os filtros, chegando a 100%. A eficiência depende da quantidade de partículas depositadas, e aumenta com o aumento na quantidade de partículas depositadas até atingir a eficiência máxima.

As estruturas dendríticas formadas pela deposição das partículas acontecem em ambos os meios filtrantes, o que foi verificado experimentalmente, e são eles os responsáveis pelo grande aumento na eficiência dos meios filtrantes após terem sido submetidos à filtração.

É importante destacar que embora a eficiência para o filtro contendo partículas seja maior que para o filtro limpo, a queda de pressão para o filtro contendo partículas também é maior que para o filtro limpo. Sendo assim, é interessante fazer um planejamento do processo de forma a otimizar estes dois parâmetros.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

De Acordo com os resultados obtidos, foi possível concluir o seguinte:

#### ***Filtro de Fibras Heterogêneas (HEPA)***

- A curva de filtração apresentou duas etapas muito pouco definidas, mas foi observada uma pequena etapa de filtração interna, seguida de filtração superficial.
- Embora este filtro seja altamente eficiente na coleta das partículas avaliadas, com quase 100% de eficiência, este filtro apresentou penetração na faixa de diâmetros compreendida entre 40 a 200 nm.
- A eficiência de coleta teórica estimou que este filtro apresentasse 100% de eficiência para toda a faixa de partículas avaliadas, sendo assim, a teoria superestimou o experimental na faixa de diâmetros compreendida entre 40 a 200 nm.
- Após a deposição das partículas na filtração, este filtro alcançou 100 % de eficiência.

#### ***Filtro de Fibras Homogêneas (Poliéster)***

- A curva de filtração apresentou duas etapas muito bem definidas, sendo etapa de filtração interna seguida de etapa de filtração superficial.
- A eficiência experimental deste filtro variou de 15 a 100%. A eficiência diminuiu com o aumento do tamanho das partículas comprovando a atuação predominante do mecanismo difusional.
- A eficiência de coleta teórica apresentou o mesmo comportamento da eficiência experimental, com um bom ajuste, apresentando um desvio aceitável.

- 
- Na faixa de baixa eficiência, a grande aleatoriedade dos dados experimentais pode ter sido ocasionada por se tratar de uma região de transição entre mecanismos de coleta, no caso transição entre mecanismo difusional e mecanismo de interceptação direta ou também por se tratar de diâmetros no limite de detecção do equipamento usado. Sendo assim, o desvio entre teoria e experimental também pode ser explicado por este fato.
  - Após a deposição das partículas na filtração, este filtro alcançou 100 % de eficiência, o que é devido à coleta pelas próprias partículas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AITKEN, R. J.; CREELY, K. S.; TRAN, C. L. Nanoparticles: an occupational hygiene review. Research Report 274. Institute of Occupational Medicine, 2004.
- AROUCA, F. O.; FEITOSA, N. R.; COURY, J. R. Effect of sampling in the evaluation of particle size distribution in nanoaerosols. **Powder Technology**, v. 200, p. 52-59, 2010.
- BARNETT, T. Improving the performance of fabric filter dry dust collection equipment. **Filtration and Separation**, p.28-32, 2000.
- BHATT, I; TRIPATHI, B. N. Interaction of engineered nanoparticles with various components of the environment and possible strategies for their risk assessment. **Chemosphere** 82 (2011) 308–317
- BHUTRA, S; PAYATAKES, A. C. Experimental Investigation of Dendritic Deposition of Aerosol Particles. **Journal of Aerosol Science**. V. 10, p. 445-464, 1979.
- CAI, J. Some Remarks on Efficiency due to Dentrite Formation. **Journal of Aerosol Science**. V. 20, p. 959-962, 1989.
- CALLÉ, S; CONTAL, P; THOMAS, D; BÉMER, D; LECLERC, D. Evolutions of efficiency and pressure drop of filter media during clogging and cleaning cycles. **Powder Technology**, v. 128, p. 213-217, 2002.
- CHANG, C. The immune effects of naturally occurring and synthetic nanoparticles. **Journal of Autoimmunity** 34 (2010) J234-J246
- CHEN, D.R.;PUI, D.Y.H.; HUMMES, D.; FISSANT, H.; QUANT, F.R; SEM, G.J. Design and evaluation of a nanometer aerosol differential mobility analyzer (Nano-DMA). **Journal of Aerosol Science**, v.29, n.5/6, p. 497-509, 1998.
- COURY, J. R. Electrostatic effects in granular bed filtration of gases. Tese de Doutorado, Cambridge Univ., Inglaterra, 1983.
- DULLIEN, F. A. L. Introduction to industrial gas cleaning. San Diego: Academic Press, 1989.
- DUNNETT, S. J; CLEMENT, C. F. A numerical study of the effects of loading from diffusive deposition on the efficiency of fibrous filters. **Aerosol Science** 37 (2006) 1116–1139.
- FEITOSA, N. R. Desempenho de meios filtrantes na remoção de partículas nanométricas de aerossóis. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos (SP), 2009

---

HINDS, W. C. *Aerosol Technology. Properties behavior and measurement of airborne particles*. 2<sup>a</sup> Ed. New York: Jonh Willey & Sons. 1999.

INNOCENTINI, M. D. M.; SEPULVEDA, F.; ORTEGA, F. Permeability, in: M. Sheffler, P. Colombo (Eds.), *Cellular Ceramics: Estructure, Manufacturing, Properties and Applications*, p. 313-340, 2005.

JAPUNTICH, D. A.; STENHOUSE, J. I. T., LIU, B.Y.H. Experimental results of solids monodisperse particle clogging of fibrous filters. **Journal of Aerosol Science**, v.25, n.02, pp.385-393, 1994.

KANAOKA, C; EMI, H; MYOJO, T. Simulation of the Growing Process of a Particle Dendrite and Evaluation of a Single Fiber Collection Efficiency with Dust Load. **Journal of Aerosol Science**. V. 11, p. 377-389, 1979.

KASPER, G; SCHOLLMEIER, S; MEYER, J. Structure and Density of Deposits Formed on Filter Fibers by Inertial Particle Deposition and Bounce. **Journal of Aerosol Science**. V. 41, p. 1167-1182, 2010.

KIM, S. C; HARRINGTON, M. S.; PUI, D. Y. H. Experimental study of nanoparticles penetration through commercial filter media. **Journal of Nanoparticle Research** n. 9, p.117–125, 2007.

LASTOW, O. Simulation of Dendrite Formations of Aerosol Particles on a Single Fibre. **Journal of Aerosol Science**. V. 25, p. 199-200, 1994

LEE, K. W.; LIU, B. Y. H. Theoretical Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters, **Aerosol Science and Technology**, vol. 1, 147-166, 1982a.

LEE, K. W.; LIU, B. Y. H. Experimental Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters, **Aerosol Science and Technology**, vol.1, 35-46, 1982b.

LIU, W-T. Nanoparticles and Their Biological and Environmental Applications. **Journal of Bioscience and Bioengineering**. Vol. 102, n<sup>o</sup>. 1, 1–7. 2006.

LIU, B. Y.H.; RUBOW, K.L. efficiency, pressure drop and figure of merit of high efficiency fibrous and membrane filter media. Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Filtration Congress, Nice, p.112, 1990.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Disponível em [www.epa.gov](http://www.epa.gov).

PAYATAKES, A. C; TIEN, C. Particle Deposition in Fibrous Media with Dendrite-Like Pattern: a Preliminary Model. **Journal of Aerosol Science**. V. 7, p. 85-100, 1976.

---

PODGÓRSKI, A; BALAZI, A; GRADÓN, L. Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters. **Chemical Engineering Science**, v. 61, p.6804-6815, 2006.

ROTHWELL, E. Fabric dust filtration: principles and practice. **Filtration and Separation**, p.471-475, 1980.

SEATON, A; TRAN, L; AITKEN, R; DONALDSON, K. Nanoparticles, human health hazard and regulation. **Journal of The Royal Society Interface**. V.7, 119-129, 2010.

SPURNY, K. R. Advances in aerosol filtration. Florida: CRC Press LLC, 1998.

STEFFENS, J; COURY, J. R. Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles: I- Homogeneous fibers. **Separation and Purification Technology**, n. 58, p.99-105, 2007-a.

STEFFENS, J; COURY, J. R. Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles: I- Heterogeneous fibers. **Separation and Purification Technology**, n. 58, p.106-112, 2007-b.

STEFFENS, J. Desempenho de filtros fibrosos operando na remoção de partículas nanométricas de aerossóis. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP. 2007.

TANABE, E. H. Estudo do Comportamento da Deposição das Partículas em Diferentes Meios Filtrantes. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. 2008.

TANABE, E. H. Desempenho de Meios Filtrantes na Filtração de Gases a Altas Pressões. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos. 2011.

THOMAS, D; PENICOT, P; CONTAL, P; LECLERC, D; VENDEL, J. Clogging of fibrous filter by solid aerosol particles. Experimental and modeling study. **Chemical Engineering Science**, v.56, p.3549-3561, 2001.

TIEN, C. Granular Filtration of Aerosols and Hydrosols, Butterworths, USA, 2007.

VANOSDELL, D. W; LIU, B. Y. H; RUBOW, K. L; PUI, D. Y. H. Experimental Study of Submicrometer and Ultrafine Particle Penetration and Pressure Drop for High Efficiency Filters. **Aerosol Science and Technology**, 12:4, p. 911-925, 1990.

WALSH, D.C. Recent advances in the understanding of fibrous filter behavior under solid particle load. **Filtration and Separation**. V.33, 1996.

---

WARHEIT, D. B; SAYES C. M; REED, K. L., SWAIN K. A. Health effects related to nanoparticle exposures: Environmental, health and safety considerations for assessing hazards and risks. **Pharmacology & Therapeutics**. V.120 (2008) 35–42

WATANABE, T; TOCGHIKUBO, F; KOIZUMI, Y; TSUCHIDA, T; HAUTANEN, J; KAUPPINEN, E. I. Submicron particle agglomeration by an electrostatic agglomerator. **Journal of electrostatic**. V. 34, 367-383, 1995.

WILLEKE, K.; BARON, P. A. Aerosol Measurement: principles, techniques and applications. New York: Van Nostrand Reinhold, p.876, 1993.

WANG, H; ZHAO, H; GUO, Z; ZHENG, C. Numerical simulation of particle capture process of fibrous filters using Lattice Boltzmann two-phase flow model. **Powder Technology**. V. 227, p. 111-122, 2012.

## **Anexo A**

### **Preparação do Meio Filtrante para Análise em Microscópio Eletrônico de Varredura para Obtenção da Porosidade**

O método proposto por Aguiar (1995) consistia nas etapas de pré-endurecimento, seccionamento, embutimento, esmerilamento e polimento. No caso deste trabalho, não houve a necessidade de pré-endurecer os filtros, pois não haviam partículas depositadas neste meio filtrante. O embutimento do filtro sem pré-endurecer já foi suficiente para a obtenção das imagens. Sendo assim, a preparação dos meio filtrantes consistiu nas etapas seccionamento, embutimento, esmerilamento e polimento para serem analisados em MEV. Este processo foi necessário, pois se desejava obter imagens transversais dos meio filtrantes para a obtenção da porosidade de cada filtro.

#### **A.1. Seccionamento**

Os meios filtrantes a serem analisados foram cortados em pedaços de aproximadamente  $1\text{cm}^2$  de área, sendo este o tamanho ideal para ser acomodado nos suportes de embutimento.

#### **A.2. Embutimento**

A partir de suportes cilíndricos de PVC, os meios filtrantes seccionados na etapa anterior foram embutidos dentro deste suporte utilizando uma resina, RESAPOL-208. Estas amostras ficaram em repouso até completo endurecimento.

#### **A.3. Esmerilamento**

Esta etapa consistiu em lixar a amostra embutida para eliminar a resina em excesso para que seja possível a análise em MEV. A superfície de análise deveria ser exatamente filtro/resina. As amostras embutidas foram lixadas a úmido, com lixas de carbetto de silício em uma sequência

---

de lixas de 320, 400, 600, 1200 e 2000 mesh. Esta operação teve duração de aproximadamente 10min para cada lixa.

#### A.4. Polimento

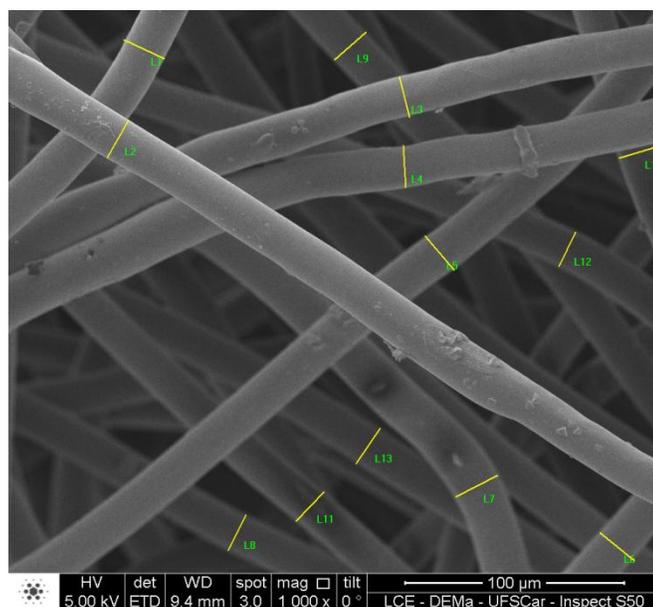
Esta etapa consistiu no polimento das amostras embutidas e lixadas objetivando eliminar qualquer ranhura que se encontra na amostra e que pode interferir nas imagens obtidas em MEV. O polimento foi realizado em uma politriz em baixa rotação. Esta politriz foi emprestada pelo Departamento de Engenharia de Materias (DEMA/UFSCar). O tecido utilizado na politriz foi um veludo vermelho que foi impregnado com suspensão de alumina 1 $\mu$ m. O polimento só foi finalizado até a amostra ficar totalmente sem ranhuras.

## Apêndice A

### Obtenção do Diâmetro das fibras

Para o filtro de Poliéster, foram selecionadas 10 imagens da superfície do meio filtrante para a obtenção do diâmetro das fibras. As imagens foram analisadas no programa analisador de imagens “Image Pro-Plus 6.0”. O diâmetro das fibras foi obtido conforme mostram as Figuras A.1 e A.2. De todas as fibras selecionadas, um diâmetro médio foi obtido para representar todas as fibras deste filtro.

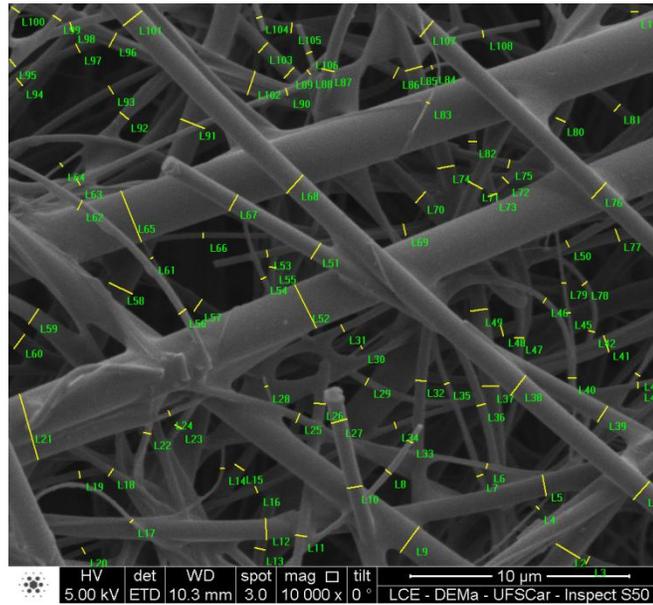
Figura A.1: Metodologia para obtenção do diâmetro das fibras para o Poliéster



Fonte: Acervo Pessoal

Para o filtro de celulose HEPA, foi utilizada a mesma metodologia anterior. Um total de 20 imagens foram analisadas para este filtro. A figura B.2 mostra a metodologia utilizada.

Figura A.2: Metodologia para obtenção do diâmetro das fibras para o filtro HEPA



Fonte: Acervo Pessoal