

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

**CARACTERIZAÇÃO E EFICIÊNCIA DE DIFERENTES MEIOS  
FILTRANTES FIBROSOS NA REMOÇÃO DE NANOPARTÍCULAS**

**Ana Cláudia Canalli Bortolassi**

**São Carlos – SP**  
**2015**

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

**CARACTERIZAÇÃO E EFICIÊNCIA DE DIFERENTES MEIOS  
FILTRANTES FIBROSOS NA REMOÇÃO DE NANOPARTÍCULAS**

**Ana Cláudia Canalli Bortolassi**

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

**Orientadora: Mônica Lopes Aguiar**  
**Co-orientadora: Vádila Giovana Guerra**

**São Carlos – SP**

**2015**

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

B739ce Bortolassi, Ana Cláudia Canalli.  
Caracterização e eficiência de diferentes meios filtrantes  
fibrosos na remoção de nanopartículas / Ana Cláudia Canalli  
Bortolassi. -- São Carlos : UFSCar, 2015.  
113 f.

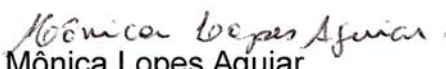
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São  
Carlos, 2015.

1. Filtração. 2. Nanopartículas. 3. Mecanismo de coleta. 4.  
Meios filtrantes. 5. Permeabilidade. I. Título.

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

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE ANA CLÁUDIA CANALLI BORTOLASSI APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 23 DE JANEIRO DE 2015.

BANCA EXAMINADORA:

  
Mônica Lopes Aguiar  
(Orientadora), UFSCar

  
Vádila Giovana Guerra Béttega  
(Coorientadora), UFSCar

  
Gabriela Cantarelli Lopes  
UFSCar

  
Eduardo Hiromitsu Tanabe  
UFSM

  
Maria Angélica Martins Costa  
UNESP

**“Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado”.**

**(Roberto Shinyashiki)**

**Aos meus pais, Cléo e Eny,  
pelo esforço e dedicação para me proporcionar estudos.**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por estar do meu lado em todos os momentos da minha caminhada e pela oportunidade de alcançar mais uma vitória em minha vida.

Agradeço especialmente aos meus pais Cléo Alcides Bortolassi e Eny Canalli que sempre me incentivaram, apoiaram e me deram suporte em toda minha vida. Em especial à minha mãe que nunca me deixou desistir e fez o possível e o impossível para me proporcionar estudos. Quero dedicar também a minha irmã Ana Paula que esteve sempre ao meu lado, pela amizade e por participar dos momentos mais importantes da minha vida.

A Prof<sup>ª</sup>. Dra. Mônica Lopes Aguiar e Prof<sup>ª</sup>. Dra. Vádila Giovana Guerra pela orientação, apoio, disposição, sugestões, conhecimentos adquiridos e oportunidades oferecidas ao longo desse trabalho.

Aos demais membros da banca: Prof. Dr. Eduardo Tanabe, Prof<sup>ª</sup>. Dra. Maria Angélica e Prof<sup>ª</sup>. Dra. Gabriela Cantarelli Lopes pelas sugestões e contribuições para o trabalho.

Aos meus familiares que sempre me apoiaram e torceram para que eu conseguisse alcançar meus objetivos.

À Ana Isabela, Laís e Paula de Paula que sempre me acompanharam nas horas de alegria e de dificuldade durante o mestrado. Fizeram papel de família e me proporcionaram-me muitos momentos de alegria.

À Bruna que contribuiu muito com seus conhecimentos e teve paciência nas minhas horas de desespero, nesses dois anos morando juntas.

As minhas amigas de laboratório: Samirys e Priscila Barros, pelos ensinamentos repassados ao longo do mestrado e os momentos de descontração dentro do laboratório.

Aos amigos e amigas conquistados do Departamento de Engenharia Química: Isabel, Vitor, Helberth, Waldir, Mélécio, Diego, Homero, Jorge.

Às minhas amigas de infância: Jeane, Jaqueline, Gabriela e Marília pela grande amizade durante todas as fases da minha vida.

Aos meus amigos de graduação: Priscila, Kátia, Aline, João, Maicon, Marcos e Gabriel que sempre me ajudaram, compartilharam conhecimento e experiência.

Aos funcionários da Ufscar que de algum modo contribuíram para a realização desse trabalho. Principalmente ao Marcos, técnico do Laboratório, que sempre me ajudou quando eu encontrava dificuldades.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro disponibilizado.

Ao departamento de Engenharia Química da Ufscar pela infra-estrutura e equipamentos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao departamento de Engenharia de Materiais da Ufscar pelas análises realizadas no MEV.

A todos o meu sincero muito obrigada.



## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>1</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>7</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>10</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>13</b>
2.1. Nanopartículas.....	13
2.2. Filtração.....	15
2.2.1. Tipos de filtros.....	16
2.2.2. Mecanismos de coleta.....	17
2.3. Permeabilidade.....	25
2.4. Eficiência de coleta.....	26
2.5. Estudos envolvendo a filtração de nanopartículas.....	30
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
3.1. Material Particulado.....	32
3.2. Meios filtrantes.....	32
3.3. Caracterização dos meios filtrantes.....	35
3.3.1. Determinação da espessura do meio filtrante.....	36
3.3.2. Determinação do diâmetro das fibras.....	36
3.3.3. Determinação da permeabilidade do meio filtrante.....	36
3.4. Unidade Experimental.....	40
3.4.1. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	41
3.4.2. Compressor de ar.....	42
3.4.3. Filtros de ar.....	43
3.4.4. Gerador de partículas.....	43

3.4.5.	Secador de difusão .....	44
3.4.6.	Fontes Neutralizadoras .....	45
3.4.7.	Dispositivo de filtração.....	46
3.4.8.	Amostragem de partículas .....	48
3.4.9.	Manômetro .....	51
3.4.10.	Medidor de temperatura.....	52
3.4.11.	Medidor de umidade .....	52
3.4.12.	Medidor de vazão .....	52
3.4.13.	Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica (SMPS).....	54
3.5.	Procedimento experimental .....	56
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>60</b>
4.1.	Distribuição granulométrica das partículas.....	60
4.2.	Caracterização dos meios filtrantes .....	60
4.2.1.	Espessura .....	62
4.2.2.	Diâmetro das fibras.....	64
4.2.3.	Permeabilidade .....	67
4.3.	Eficiência dos meios filtrantes .....	77
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>95</b>
<b>6.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>96</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>97</b>
<b>Apêndice A</b>	<b>.....</b>	<b>100</b>
<b>Apêndice B</b>	<b>.....</b>	<b>107</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tamanho relativo das partículas e padrões de deposição por via aérea no sistema respiratório.....	14
Figura 2 - Mecanismo físico de coleta.....	17
Figura 3 - Curva da eficiência de coleta dos mecanismos em função do diâmetro da partícula .....	17
Figura 4 - Desenho esquemático da captura por difusão.....	18
Figura 5 - Desenho esquemático da captura por ação gravitacional .....	21
Figura 6 - Desenho esquemático da captura por interceptação direta .....	22
Figura 7 - Desenho esquemático da captura por impactação inercial .....	23
Figura 8 - Mecanismo de coleta eletroforético (a) Coulômbico e (b) Dipolo-imagem.....	25
Figura 9 - Imagem da superfície do meio filtrante HEPA obtida em MEV-FEG.....	33
Figura 10 - Imagem da superfície do meio filtrante de vidro obtida em MEV-FEG .....	34
Figura 11 - Imagem da superfície do meio filtrante de Microfibras de Quartzo obtida em MEV-FEG .....	34
Figura 12 - Imagem da superfície do meio filtrante de poliéster obtida em MEV-FEG.....	35
Figura 14 - Medição dos diâmetros das fibras do filtro de Vidro utilizando o Programa Image Pro Plus através da imagem obtida pelo MEV-FEG com aumento de 5000 vezes.....	37
Figura 15 - Amostra do filtro de Quartzo com área de $40,7\text{cm}^2$ à esquerda e à direita amostra cortada do centro para utilizar na determinação da permeabilidade com a área de $5,3\text{cm}^2$ ....	38
Figura 16 - Ilustração da Unidade Experimental utilizada no trabalho.....	41
Figura 17 - Imagem do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	41
Figura 18 - Compressor de ar .....	42
Figura 19 - Dispositivo de purificação de ar .....	43
Figura 20 - Inalador comercial .....	44
Figura 21 - Secador de difusão .....	45
Figura 22 - Fonte Neutralizadora de Kriptônio .....	46
Figura 23 - Fonte Neutralizadora de Amerício.....	46
Figura 24 - Dispositivo de filtração com área de $5,3\text{cm}^2$ .....	47
Figura 25 - Dispositivo de filtração com área de $40,7\text{cm}^2$ .....	47
Figura 26 - Região interna do dispositivo de filtração com área de $40,7\text{cm}^2$ , respectivamente, primeira e segunda parte do dispositivo .....	48

Figura 27 - Esquema das sondas de amostragem .....	49
Figura 28 - Esquema do dispositivo de filtração com área de 5,3 cm <sup>2</sup> .....	49
Figura 29 - Esquema do dispositivo de filtração com área de 40,7 cm <sup>2</sup> .....	50
Figura 30 - Válvula de três vias.....	50
Figura 31 - Manômetro Digital.....	51
Figura 32 - Medidor de umidade .....	52
Figura 33 - Rotâmetro acoplado à saída da linha de filtração a) Número 3 utilizado com a área de filtração de 5,3 cm <sup>2</sup> b) Número 14 utilizado com a área de filtração de 40,7 cm <sup>2</sup> .....	53
Figura 34 - Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica (SMPS) .....	54
Figura 35 - Analisador de Mobilidade Diferencial: (1) <i>Long-DMA</i> e (2) <i>Nano-DMA</i> .....	55
Figura 36 - Esquema de funcionamento do DMA.....	56
Figura 38 - Distribuição granulométrica das nanopartículas geradas antes da passagem pelo meio filtrante de Vidro com área de 40,7 cm <sup>2</sup> .....	61
Figura 39 - Imagem da espessura do filtro HEPA obtida pelo MEV com aumento de 100 vezes .....	63
Figura 40 - Gráfico da distribuição das fibras do filtro HEPA.....	65
Figura 41 - Gráfico da distribuição das fibras do filtro HEPA, de Vidro e de Quartzo .....	66
Figura 42 - $\Delta P/L$ em função da velocidade superficial do gás para o Filtro HEPA .....	68
Figura 43 - $\Delta P/L$ em função da velocidade superficial do gás para o Filtro de Vidro .....	70
Figura 44 - $\Delta P/L$ em função da velocidade superficial do gás para o Filtro de Quartzo.....	72
Figura 45 - $\Delta P/L$ em função da velocidade superficial do gás para o Filtro de Poliéster.....	74
Figura 46 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no tempo zero da filtração utilizando o Filtro HEPA e a área de filtração de 5,3 cm <sup>2</sup> .....	78
Figura 47 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no final da filtração utilizando o Filtro HEPA e a área de filtração de 5,3 cm <sup>2</sup> .....	79
Figura 48 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no tempo zero da filtração utilizando o Filtro HEPA e a área de filtração de 40,7 cm <sup>2</sup> .....	80
Figura 49 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no final da filtração utilizando o Filtro HEPA e a área de filtração de 40,7 cm <sup>2</sup> .....	80
Figura 50 - Eficiência teórica e experimental do filtro HEPA com área de 5,3 e 40,7 cm <sup>2</sup> .....	81
Figura 51 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no tempo zero da filtração utilizando o Filtro de Vidro e a área de filtração de 5,3 cm <sup>2</sup> .....	82

Figura 52 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no final da filtração utilizando o Filtro de Vidro e a área de filtração de 5,3 cm <sup>2</sup> .....	82
Figura 53 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no tempo zero da filtração utilizando o Filtro de Vidro e a área de filtração de 40,7 cm <sup>2</sup> .....	83
Figura 54 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no final da filtração utilizando o Filtro de Vidro e a área de filtração de 40,7 cm <sup>2</sup> .....	83
Figura 55 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no tempo zero da filtração utilizando o Filtro de Quartzo e a área de filtração de 5,3 cm <sup>2</sup> a) com vazamento b) sem vazamento .....	84
Figura 56 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no final da filtração utilizando o Filtro de Quartzo e a área de filtração de 5,3 cm <sup>2</sup> a) com vazamento b) sem vazamento .....	85
Figura 57 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no tempo zero da filtração utilizando o Filtro de Quartzo e a área de filtração de 40,7 cm <sup>2</sup> a) com vazamento b) sem vazamento .....	85
Figura 58 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no final da filtração utilizando o Filtro de Quartzo e a área de filtração de 40,7 cm <sup>2</sup> a) com vazamento b) sem vazamento .....	86
Figura 59 - Eficiência teórica e experimental do filtro de Quartzo com área de 5,3 e 40,7 cm <sup>2</sup> .....	87
Figura 60 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no tempo zero da filtração utilizando o Filtro de Poliéster e a área de filtração de 5,3 cm <sup>2</sup> .....	87
Figura 61 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no final da filtração utilizando o Filtro de Poliéster e a área de filtração de 5,3 cm <sup>2</sup> .....	88
Figura 62 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no tempo zero da filtração utilizando o Filtro de Poliéster e a área de filtração de 40,7 cm <sup>2</sup> .....	88
Figura 63 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no final da filtração utilizando o Filtro de Poliéster e a área de filtração de 40,7 cm <sup>2</sup> .....	89
Figura 64 - Eficiência teórica e experimental do filtro de Poliéster com área de 5,3 e 40,7 cm <sup>2</sup> .....	89
Figura 65 - Imagem do Filtro de Vidro obtida pelo MEV .....	91
Figura 66 - Imagens do Filtro HEPA resultantes do processo de filtração obtidas pelo MEV. ....	91
Figura 67 - Imagens do Filtro de Vidro resultantes do processo de filtração obtidas pelo MEV. ....	92

Figura 68 - Imagens do Filtro de Micro Quartzo resultantes do processo de filtração obtidas pelo MEV. A) Área de 5,3 cm<sup>2</sup> B) Área de 40,7 cm<sup>2</sup> ..... 92

Figura 69 - Imagens do Filtro de Poliéster (FSN 300) resultantes do processo de filtração obtidas pelo MEV. A) Área de 5,3 cm<sup>2</sup> B) Área de 40,7 cm<sup>2</sup> ..... 93

Figura 70 - Imagem do Filtro de Poliéster obtido através do MEV ..... 93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros pré-estabelecidos para configuração do SMPS .....	58
Tabela 2 - Média da distribuição granulométrica das nanopartículas geradas antes da passagem pelo meio filtrante de Vidro com área de 5,3 cm <sup>2</sup> .....	62
Tabela 3 - Média da distribuição granulométrica das nanopartículas geradas antes da passagem pelo meio filtrante de Vidro com área de 40,7 cm <sup>2</sup> .....	62
Tabela 4 - Espessura de cada meio filtrante .....	63
Tabela 5 - Número de fibras com seus respectivos diâmetros e fração acumulada do filtro HEPA.....	64
Tabela 6 - Número de fibras com seus respectivos diâmetros e fração acumulada do filtro de Vidro.....	65
Tabela 7 - Número de fibras com seus respectivos diâmetros e fração acumulada do filtro de Quartzo .....	66
Tabela 8 - Diâmetro médio das fibras de cada meio filtrante.....	67
Tabela 9 - Constante de permeabilidade do Filtro HEPA limpo.....	69
Tabela 10 - Desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança 95% para o Filtro HEPA com área de 5,3 cm <sup>2</sup> .....	69
Tabela 11 - Desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança 95% para o Filtro HEPA com área de 40,7 cm <sup>2</sup> .....	70
Tabela 12 - Constante de permeabilidade do Filtro de Vidro limpo .....	71
Tabela 13 - Desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança 95% para o Filtro de Vidro com área de 5,3 cm <sup>2</sup> .....	71
Tabela 14 - Desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança 95% para o Filtro de Vidro com área de 40,7 cm <sup>2</sup> .....	72
Tabela 15 - Constante de permeabilidade do Filtro de Quartzo limpo.....	73
Tabela 16 - Desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança 95% para o Filtro de Quartzo com área de 5,3 cm <sup>2</sup> .....	73
Tabela 17 - Desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança 95% para o Filtro de Quartzo com área de 40,7 cm <sup>2</sup> .....	73
Tabela 18 - Constante de permeabilidade do Filtro de Poliéster limpo .....	75

Tabela 19 - Desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança 95% para o Filtro de Poliéster com área de 5,3 cm <sup>2</sup> .....	75
Tabela 20 - Desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança 95% para o Filtro de Poliéster com área de 40,7 cm <sup>2</sup> .....	76
Tabela 21 - Constante de permeabilidade para diferentes meios filtrantes .....	76
Tabela 22 - Preço dos meios filtrantes.....	94



## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área do filtro	[L <sup>2</sup> ]
A <sub>p</sub>	Área projetada	[L <sup>2</sup> ]
C	Concentração de partículas	[ML <sup>-3</sup> ]
C <sub>c</sub>	Fator de escorregamento de Cunningham	[-]
C <sub>d</sub>	Fator de correção para o efeito difusional	[-]
C <sub>d</sub>	Fator de correção para η <sub>d</sub> < 1	[-]
C <sub>e</sub>	Concentração de partículas na saída do filtro	[ML <sup>-3</sup> ]
C <sub>o</sub>	Concentração de partículas na entrada do filtro	[ML <sup>-3</sup> ]
C <sub>r</sub>	Termo de correção para o efeito de interceptação direta	[-]
D	Coefficiente de difusividade	[L <sup>2</sup> /t]
d <sub>f</sub>	Diâmetro das fibras	[L]
$\overline{df}$	Diâmetro médio das fibras	[L]
d <sub>fi</sub>	Diâmetro de fibras com determinada faixa de tamanho	[L]
d <sub>p</sub>	Diâmetro da partícula	[L]
d <sub>C</sub>	Varição da concentração de partículas	[-]
d <sub>L</sub>	Elemento diferencial da espessura do filtro	[L]
E	Eficiência de coleta	[-]
g	Aceleração da gravidade	[Lt <sup>-2</sup> ]
K <sub>B</sub>	Constante de Boltzman	[ML <sup>2</sup> t <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup> ]
K <sub>nf</sub>	Número de Knudsen da fibra	[-]
Ku	Coefficiente hidrodinâmico de Kuwabara	[-]
k <sub>1</sub>	Coefficiente de permeabilidade Darciana	[L <sup>2</sup> ]
L	Espessura do meio filtrante	[L]
L <sub>f</sub>	Comprimento da fibra por unidade de volume	[L <sup>-2</sup> ]
N	Número de amostras	[-]
N <sub>C</sub>	Número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo	[-]
n <sub>i</sub>	Número de fibras com determinado diâmetro	[-]
N <sub>p</sub>	Número de partículas depositadas por unidade de tempo	[-]
P	Pressão absoluta	[ML <sup>-1</sup> t <sup>-2</sup> ]
Pe	Número de Peclet	[-]
R	Parâmetro de interceptação direta	[-]
S	Desvio padrão	[-]
$\bar{S}$	Erro padrão	[-]
St	Número de Stokes	[-]
T	Temperatura absoluta	[T]
U <sub>o</sub>	Velocidade do gás	[L/t]
v	Velocidade intersticial do gás	[Lt <sup>-1</sup> ]
v <sub>s</sub>	Velocidade superficial do gás	[Lt <sup>-1</sup> ]
x	Média da queda de pressão	[ML <sup>-1</sup> t <sup>-2</sup> ]
x <sub>fi</sub>	Fração de fibras com determinado diâmetro	[-]
x <sub>i</sub>	Queda de pressão em determinado ponto	[-]
ΔP	Queda de pressão	[ML <sup>-1</sup> t <sup>-2</sup> ]
α	Densidade de empacotamento	[-]
β	Volume ocupado pelas fibras	[L <sup>3</sup> ]
ε	Porosidade do meio filtrante	[-]
ε <sub>i</sub>	Porosidade de determinada fração de fibras	[-]
η <sub>d</sub>	Eficiência de coleta difusional	[-]

$\eta_g$	Eficiência de coleta gravitacional	[-]
$\eta_i$	Eficiência de coleta inercial	[-]
$\eta_{id}$	Eficiência de coleta por interceptação direta	[-]
$\eta_t$	Soma das eficiências de cada mecanismo de coleta	[-]
$\rho_p$	Densidade da partícula	[ML <sup>-3</sup> ]
$\mu$	Viscosidade do gás	[ML <sup>-1</sup> t <sup>-1</sup> ]
$\lambda$	Caminho livre médio das moléculas no gás	[L]

## RESUMO

Há uma grande preocupação com a exposição de pessoas às partículas nanométricas presentes no ar, até mesmo no ambiente de trabalho. Isto se deve ao desenvolvimento urbano, industrial e o crescente uso de veículos motorizados. Uma das soluções que vem sendo muito utilizadas ultimamente é o processo de filtração utilizando filtros fibrosos. Como há poucas pesquisas sobre o comportamento desses filtros na remoção de nanopartículas, o objetivo desse estudo foi caracterizar, avaliar a eficiência e verificar se o tamanho da área de filtração influencia no desempenho de meios filtrantes HEPA (High Efficiency Particulate Air Filter), de Vidro, de Micro Quartzo e de Poliéster na remoção de nanopartículas. A área de filtração foi avaliada uma vez que em testes laboratoriais nem sempre são possíveis grandes áreas de filtração para avaliação do desempenho de meios filtrantes. O desempenho de um meio filtrante depende da estrutura dos filtros (espessura, porosidade, diâmetro das fibras), das condições operacionais (velocidade de filtração e área de filtração) e das características do material particulado (densidade, tamanho da partícula e distribuição). A caracterização foi utilizada para avaliar os meios filtrantes e justificar possíveis resultados, entre ela está a espessura, o diâmetro das fibras e a permeabilidade. O sistema experimental foi utilizado tanto para a realização de experimentos de permeabilidade como para experimentos de eficiência com áreas de filtração iguais a  $5,3\text{cm}^2$  e  $40,7\text{cm}^2$ . Nos testes de eficiência foram utilizados uma solução de 5 g/L de cloreto de sódio para geração de partículas e velocidade constante de 5 cm/s. A contagem das partículas antes e após a passagem pelo meio filtrante era feita em triplicata no tempo zero e também depois de uma hora de filtração utilizando a técnica de mobilidade elétrica. Os meios filtrantes HEPA, de Vidro e de Quartzo apresentaram as menores constantes de permeabilidade e os valores foram ligeiramente influenciados pela área de filtração. Já o filtro de Poliéster foi o mais permeável e não apresentou variação significativa com a área de filtração. De uma forma geral, todos os meios filtrantes foram muito eficientes na remoção de nanopartículas durante duas horas de filtração aproximadamente, com exceção do filtro de Poliéster para o qual a eficiência decaiu com o aumento do tamanho das partículas.

## ABSTRACT

Human exposure to nanoparticles is increasingly becoming a concern, including in the workplace, due to urban and industrial development and the increasing use of motor vehicles. Filtration using fibrous filters is among the various options that can be used to provide efficient elimination of particles. It is known that there has been little research concerning the removal of nanoparticles using these filtration media. The aim of this study was to characterize, evaluate the efficiency and analyze the influence of filtration area on the efficiencies of the filter media HEPA (high efficiency particulate air), glass, micro-quartz, and polyester (300 g/m<sup>2</sup>) for the removal of nanoparticles. The filtration area was analyzed because is not possible in general to do the experimental testes in laboratory with large filtration area. The evaluation of the filter media depend on the structure of the filters (fiber diameter, thickness, and permeability), the operating conditions (superficial velocity and filtration area), and the characteristics of the filtered aerosols (density and size distribution). The characterization was used to evaluate the filter media and explain some results. Thickness, fiber diameter and permeability are examples of characterization parameters. The experimental setup was used in experimental tests of permeability and efficiency for the 5.3 and 40.7 cm<sup>2</sup> filtration areas. A solution of 5 g/L sodium chloride (NaCl) was used to generate the nanoparticles in the filtration tests and a constant superficial velocity of 0.05 m/s. Particles were counted before and after passing through the filter media at the beginning of filtration using the electrical mobility technique. At the end of the filtration (one hour), the particles were again counted before and after the filters (in triplicate). The permeability constants of the HEPA, glass, and micro-quartz filters were the lower and they are influenced by the filtration area, while a much higher value was obtained for the polyester filter and showed no significant variation using different filtration area. Altogether, all the filter media were highly efficient in removing nanoparticles during approximately 2 hours of filtration, with the exception of the polyester filter, for which the efficiency decreased with increasing particle diameter.

Keywords: Collection mechanisms, Electrical Mobility, Fibrous filters, Filtration efficiency, Nanoparticle filtration, Permeability

## 1. INTRODUÇÃO

A emissão de poluentes na atmosfera tem crescido muito a partir da revolução industrial e isso está causando diversos impactos ambientais e problemas à saúde. Como por exemplo, chuva ácida, efeito estufa, irritação na pele, lacrimação exagerada, infecção nos olhos, ardência na mucosa da garganta e doenças respiratórias. Estes fatores estão associados ao desenvolvimento urbano, industrial e à crescente utilização de veículos motorizados.

A poluição era vista como sinal de evolução e modernidade, a qual não recebeu seus devidos cuidados. Apenas nas últimas décadas é que se formaram leis rigorosas e obrigaram o setor industrial a controlar a emissão de seus poluentes. Com isso, as indústrias tiveram que investir no desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos de gases para operar de acordo com as novas leis (AZEVEDO, 2009).

A poluição atmosférica é causada por diversos fatores, tais como a queima de combustíveis (fósseis, vegetal e outros), poeiras de origem natural ou das atividades humanas e outros aerodispersóides de origem diversas. Estes fatores estão associados ao desenvolvimento urbano, industrial e à crescente utilização de veículos motorizados, o que se reflete, cada vez mais, em efeitos negativos no equilíbrio dos ecossistemas (ASSUMPÇÃO, 2006 *apud* FEITOSA, 2009). Como consequência, óxidos de nitrogênio, de enxofre, de carbono e material particulado são enviados para a atmosfera.

Entre o material particulado encontrado na atmosfera, podem ser citadas as micropartículas e as nanopartículas. As nanopartículas têm sido alvo de intensas pesquisas ultimamente, pois é um grande desafio a retenção destas durante a filtração.

Uma operação muito utilizada na separação gás-sólido é a filtração de gases, na qual utilizam um meio poroso permeável para reter as partículas sólidas presentes na corrente gasosa. Um meio poroso permeável pode ser representado pelos meios filtrantes, que são equipamentos muito utilizados no processo de limpeza dos gases, pois possuem um baixo custo de mercado, são de fácil manuseio e possuem alta eficiência de operação.

Os meios filtrantes fibrosos são muito utilizados com grandes áreas para purificação de ar, como em ar condicionados, porém os utilizados em testes experimentais realizados em laboratório possuem uma área de filtração menor, sendo que muitas vezes não é possível atingir uma alta vazão de ar.

Ao escolher um meio filtrante para ser utilizado no processo de filtração devem ser analisados a alta eficiência dos filtros e o baixo custo operacional, e estes estão relacionados em geral com a porosidade, permeabilidade, queda de pressão no meio filtrante e a velocidade superficial de filtração. Com base nessas informações, para alcançar tal objetivo, este estudo propôs caracterizar, avaliar a eficiência e verificar se o tamanho da área de filtração influencia no desempenho de diferentes meios filtrantes na remoção de nanopartículas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foi realizada uma revisão bibliográfica a fim de expor uma breve definição de nanopartículas, parte da teoria sobre filtração, os mecanismos de coleta atuantes e o cálculo da permeabilidade e da eficiência de coleta.

### 2.1. Nanopartículas

Nanopartículas são partículas com uma ou mais dimensões na nanoescala (HANNAH, 2008). De acordo com a PAS71 (Publicly Available Specification), nanopartículas são aquelas com dimensão de 100 nm ou menor.

Contudo, a definição do tamanho das nanopartículas é diferente para alguns autores. Para Falaguasta (2005), tais partículas são aquelas que apresentam diâmetro menor que 50 nm. Já Steffens (2007) atribuiu o termo nanopartículas para aquelas com diâmetro inferior a 100 nm. No entanto, Englert (2004) denomina que partículas ultrafinas apresentam diâmetros menores que 100 nm.

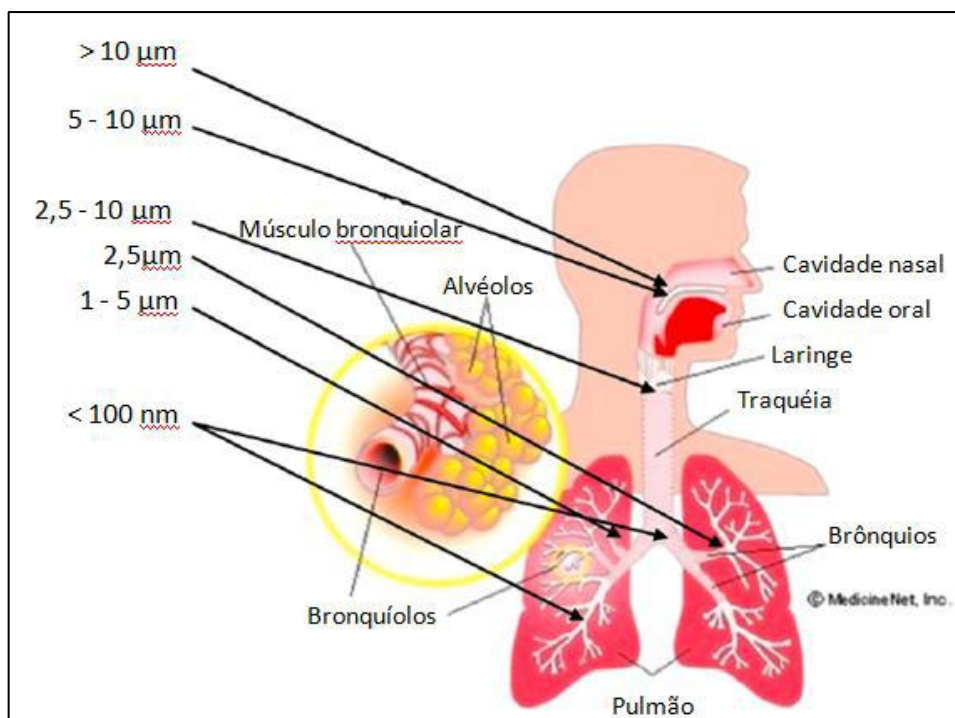
Essas partículas originam-se de fontes primárias (fontes naturais), como cinzas vulcânicas ou fontes secundárias (fontes artificiais), por exemplo, produtos técnicos e subprodutos, fumaça de cigarro, exaustão do motor a diesel, lareira (HETT, 2004).

No entanto, são poucas as possíveis comparações entre as partículas de origem natural e artificial. Algumas nanopartículas naturais, como as nanopartículas salinas que são solúveis em água, quando inaladas entram em contato com o tecido, elas se dissolvem e perdem seu formato. As nanopartículas provenientes de motores combustíveis e cigarros, mesmo não sendo solúveis em água, têm pouca duração e uma forte tendência de se aglomerarem. Assim, as nanopartículas se transformam em micropartículas, adquirindo diferentes propriedades (HETT, 2004).

Diversas pesquisas na área da epidemiologia e toxicologia atribuem que, quanto menor a dimensão das partículas expostas no ar, maior é a ocorrência de doenças cardiorrespiratórias (HUANG et al., 2004). Segundo EPA (2008 *apud* FEITOSA, 2009), isto é explicado pelo fato de que partículas menores que 10  $\mu\text{m}$  geralmente não são removidas pelo sistema respiratório

superior e, por consequência, acabam atingindo os alvéolos pulmonares e a corrente sanguínea, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Tamanho relativo das partículas e padrões de deposição por via aérea no sistema respiratório



Fonte: Adaptado de Chang (2010)

Foi constatado por SHI et al. (2001) que as reações de combustão são as maiores contribuintes para emissão de partículas nanométricas de 3 a 7 nm, nas quais os veículos automotivos contribuem muito, principalmente nos horários de pico e nos períodos de ventos. Pekkanen (2006) também concluiu que principalmente partículas ultrafinas menores que 100 nm provocam sérios problemas respiratórios. Segundo EPA (*apud* BARROS, 2014), já é confirmada a relação entre a exposição às partículas finas e problemas respiratórios, hospitalizações e mortes prematuras. As partículas avaliadas neste trabalho apresentam faixas de diâmetro de 7-300 nm.

Enquanto de um lado tem-se a preocupação com o controle de particulados com dimensões pequenas, em outros casos, observa-se o avanço da aplicação tecnológica envolvendo as nanopartículas. Este interesse é encontrado nas propriedades ópticas,



mecânicas, magnéticas e químicas, na qual estas propriedades em aplicações tecnológicas formam a base da nanotecnologia de materiais (FEITOSA, 2009).

Um grande número de produtos que estão sendo usados em sprays pode ser inalado contendo nanopartículas, como desinfetante, aromatizador de ar, corantes, tintas, sprays de vestuário. Além da emissão de nanopartículas por meio de produtos finalizados, elas podem ser encontradas também no processo de fabricação, como técnicas de spray que são utilizadas em revestimentos, onde grandes quantidades de partículas podem ser liberadas como pó (HETT, 2004).

De um modo geral, o fato é que se torna cada vez mais indispensável o desenvolvimento de técnicas que reduzam a quantidade de nanopartículas das correntes gasosas.

## **2.2. Filtração**

Uma das técnicas mais utilizadas para capturar partículas de uma corrente gasosa é a filtração, seu processo ocorre pela passagem do aerossol através do meio filtrante, no qual as partículas vão se depositando sobre a superfície do filtro. Essa deposição deve-se ao contato físico entre as partículas e o elemento coletor, sendo necessária a retenção da partícula no coletor, ou seja, a sua aderência. Essa operação possui alta eficiência, fácil operação, flexibilidade e economia (DONOVAN, 1985).

Filtração interna é quando as partículas que entram em contato com o meio filtrante são capturadas no interior do filtro. A torta de filtração, que é a camada de partículas formada após um intervalo de tempo, passa a ser a responsável pela captura das partículas na superfície do filtro, conhecida como filtração superficial (DULLIEN, 1989).

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 que passam a atuar como coletores.

Alguns fatores devem ser avaliados para não interferirem no processo de filtração, como a característica do meio filtrante e do material particulado, a velocidade de filtração, a densidade e a viscosidade do gás, a temperatura, a umidade e a pressão do sistema.

### **2.2.1. Tipos de filtros**

Na filtração de gases industriais existem basicamente três tipos de filtros, classificados como filtros de tecido, filtros fibrosos e filtros granulares (DULLIEN, 1989).

Um filtro fibroso é constituído por muitas fibras finas, de vários tamanhos, posicionado mais ou menos perpendicular à direção do fluxo do fluido. Os filtros fibrosos podem ser feitos de celulose, vidro, quartzo e de fibras plásticas (LEE e RAMAMURTHI *apud* FEITOSA, 2009). O fluido passa através das regiões entre as fibras e as partículas que estão suspensas no fluido são removidos por sua colisão e aderência à superfície da fibra (DUNNETT e CLEMENT, 2006).

As fibras que constituem os meios filtrantes podem ser classificadas como microfibras e nanofibras. As nanofibras têm sido muito aplicadas ultimamente na filtração devido ao baixo peso, alta permeabilidade e ao tamanho do poro (Yun et al, 2007).

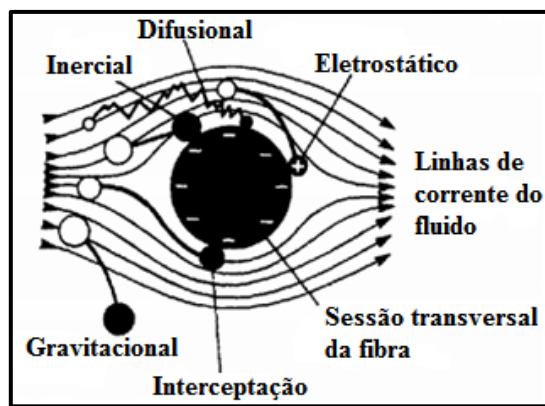
Antes de fazer a seleção dos meios filtrantes a serem utilizados na filtração, devem ser analisados as características dos filtros e os parâmetros do sistema, os quais incluem: temperatura, nível de umidade, tamanho da partícula, composição da corrente do gás, abrasividade da partícula e fatores mecânicos como limpeza e instalação (BARNETT, 2000).

Neste estudo, teve-se interesse pelos filtros fibrosos pela simplicidade de uso, baixo custo e por atingirem altas eficiências de coleta. Isto se deve ao fato de que as fibras podem ser feitas de vários materiais, como celulose, vidro, plástico, cerâmica ou metais. Suas aplicações incluem: a proteção respiratória, a amostragem do ar, limpeza de ambientes, a recuperação de produtos em processos industriais, sistemas de ventilação de edifícios etc.

### 2.2.2. Mecanismos de coleta

A deposição das partículas em um meio filtrante deve-se aos mecanismos de coleta. Dentre os principais mecanismos atuantes, destacam-se o difusional, interceptação, impactação, gravitacional e eletroforético. Haverá regiões com predomínio de mais de um mecanismo de captura, como pode ser visto na Figura 2.

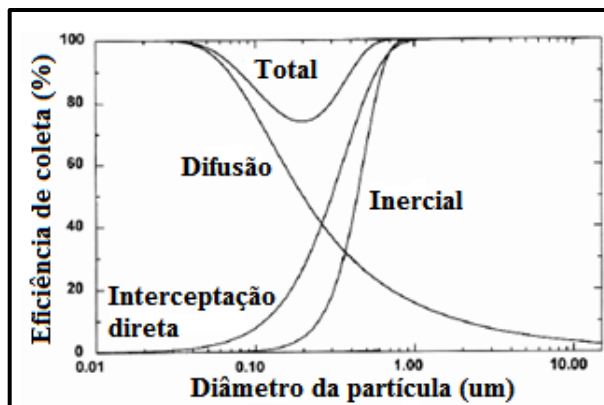
Figura 2 - Mecanismo físico de coleta



Fonte: Adaptado de Spurny (1997)

A Figura 3 representa um gráfico da eficiência de coleta em função do diâmetro da partícula com as respectivas curvas dos mecanismos de coleta. Esse gráfico se torna muito importante ao discutir os resultados, pois por meio dele é possível compreender alguns resultados e esclarecer o mecanismo de coleta atuante.

Figura 3 - Curva da eficiência de coleta dos mecanismos em função do diâmetro da partícula



Fonte: Hinds (1999)

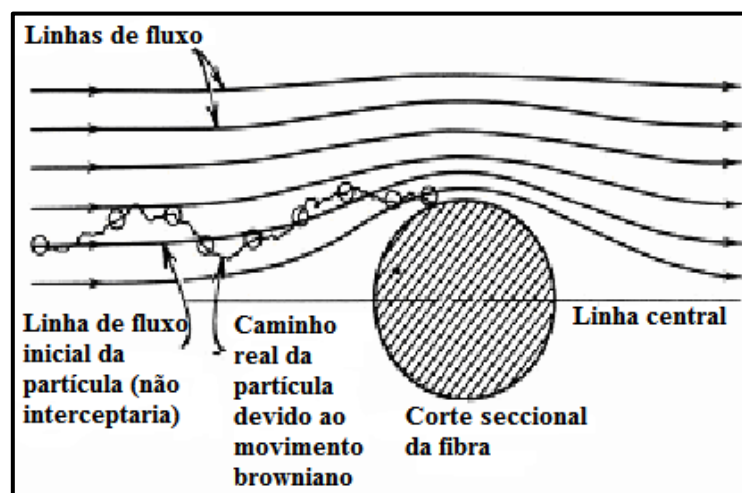
A seguir há uma breve abordagem dos principais mecanismos de coleta que atuam nos processos de filtração.

### 2.2.2.1. Mecanismo difusional

O mecanismo difusional é o resultado do movimento aleatório (Browniano), na qual as partículas seguem várias direções, aumentando muito a probabilidade de se chocarem com as fibras e ali ficarem COURY (1983 *apud* TANABE, 2011). Este mecanismo ocorre, predominantemente, com partículas submicrômicas e em baixas velocidades de filtração.

As partículas pequenas não seguem perfeitamente as linhas de corrente de ar devido aos seus deslocamentos pelas constantes colisões das moléculas do ar, como pode ser visto na Figura 4. Ao reduzir a velocidade do gás, a eficiência tende a aumentar, porque o tempo de permanência no meio filtrante é maior (TANABE, 2011).

Figura 4 - Desenho esquemático da captura por difusão



Fonte: Rodrigues (2006)

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

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

em que  $\alpha$  é a densidade de empacotamento ( $1-\varepsilon$ ),  $Ku$  é o coeficiente hidrodinâmico de Kuwabara e  $Pe$  é o número de Peclet, dados pelas equações:

$$Ku = -\frac{\ln \alpha}{2} - 0,75 + \alpha - 0,25\alpha^2 \quad (2)$$

$$Pe = \frac{U_o d_f}{D} \quad (3)$$

sendo  $U_o$  a velocidade do gás,  $d_f$  o diâmetro das fibras e  $D$  o coeficiente de difusividade.

O coeficiente de difusividade  $D$  pode ser estimado por meio da equação de Stokes-Einstein quando associado ao movimento Browniano. Para partícula esférica de diâmetro  $d_f$ , o coeficiente de difusividade é representado por:

$$D = \frac{K_B C_c T}{3\pi\mu d_p} \quad (4)$$

sendo que  $K_B$  é a constante de Boltzman,  $T$  a temperatura absoluta,  $C_c$  o fator de escorregamento de Cunningham e  $\mu$  a viscosidade do gás.

Para partículas muito pequenas o mecanismo difusional é significativo. Geralmente a deposição Browniana de partículas em um meio fibroso pode ser considerada como um processo de transferência de massa. Existe uma boa aderência entre a partícula e o coletor para condições de baixos números de Reynolds e  $d_p < 1\mu\text{m}$  (STENHOUSE, 1975 *apud* STEFFENS, 2007), e o processo pode ser considerado análogo à difusão molecular de um gás para um sólido. Assim, foi possível aplicar as correlações de transferência de massa convencionais, utilizando-se  $D$  em vez da difusividade molecular.

O termo  $C_c$  é conhecido como o fator de escorregamento de Cunningham, representado por (FUCHS, 1964, CLIFT et al., 1978 *apud* STEFFENS, 2007):

$$C_c = 1 + Kn_f \left[ 1,246 * 0,42 * \exp\left(-\frac{0,87}{Kn_f}\right) \right] \quad (5)$$

O número de Knudsen ( $Kn_f$ ) em relação ao diâmetro da fibra ( $d_f$ ), pode ser calculado por:

$$Kn_f = \frac{2\lambda}{d_f} \quad (6)$$

sendo que  $\lambda$  é o livre caminho médio e pode ser calculado por (BEARD, 1976 *apud* STEFFENS, 2007):

$$\lambda = \frac{2,15 \cdot 10^{-4} \cdot \mu \cdot T^{0,5}}{P'} \quad (7)$$

na qual  $P'$  é a pressão (bar),  $\mu$  é a viscosidade (kg/m.s) e  $T$  é a temperatura absoluta (K).

A correlação desenvolvida por Lee e Liu (1982), apresentada na Equação (1), é aplicada em regime de fluxo contínuo, sendo caracterizado por baixos valores de números de Knudsen relativo à fibra coletora. Com isso, os efeitos de escorregamento tornam-se importantes na descrição do fluxo ao redor da fibra que são maiores para as fibras finas (LIU e RUBOW, 1990).

Dessa forma, Liu e Rubow (1990) sugeriram que o efeito de escorregamento do gás poderia ser levado em conta na Equação (1), através de um termo de correção ( $C_d$ ):

$$\eta_d = 1,6 \left( \frac{1-\alpha}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} C_d \quad (8)$$

em que  $C_d$  é expresso como

$$C_d = 1 + 0,388Kn_f \left[ \frac{(1-\alpha)Pe}{Ku} \right]^{1/3} \quad (9)$$

No entanto, Payet et al. (1992) notaram que o valor de  $\eta_d$  da Equação (5) pode exceder a unidade para baixos valores de Peclet ( $Pe$ ), ou seja, para partículas pequenas e para baixas velocidades de filtração. Desta forma, tais autores modificaram a Equação (5) para obter  $\eta_d < 1$  para partículas muito finas:

$$\eta_d = 1,6 \left( \frac{1-\alpha}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} C_d C_d' \quad (10)$$

$$C_d' = \frac{1}{1 + 1,6 \left( \frac{1-\alpha}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} C_d} \quad (11)$$

#### 2.2.2.2. Mecanismo gravitacional

O mecanismo gravitacional é o resultado do efeito da gravidade sobre a partícula, causando um desvio na sua trajetória normal, sendo representado pela Figura 5. Quando o

fluxo for de cima para baixo, as partículas tendem a se aproximarem do coletor, pois a eficiência de coleta depende da direção do fluxo e do sentido da corrente gasosa (COURY, 1983 *apud* TANABE, 2011). Este mecanismo é predominante para grandes partículas e baixas velocidades do gás.

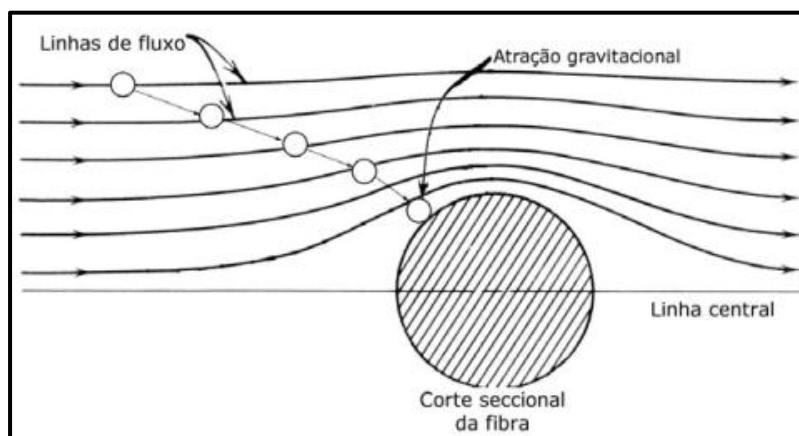
A eficiência de coleta pode ser descrita pelo mecanismo estimado por TIEN (2007 *apud* TANABE, 2011):

$$\eta_g = \frac{\alpha^{2/3} v_t}{U_o} \quad (12)$$

$$v_t = \frac{d_p^2 g \rho_p}{18\mu} \quad (13)$$

sendo que  $g$  é a aceleração da gravidade.

Figura 5 - Desenho esquemático da captura por ação gravitacional



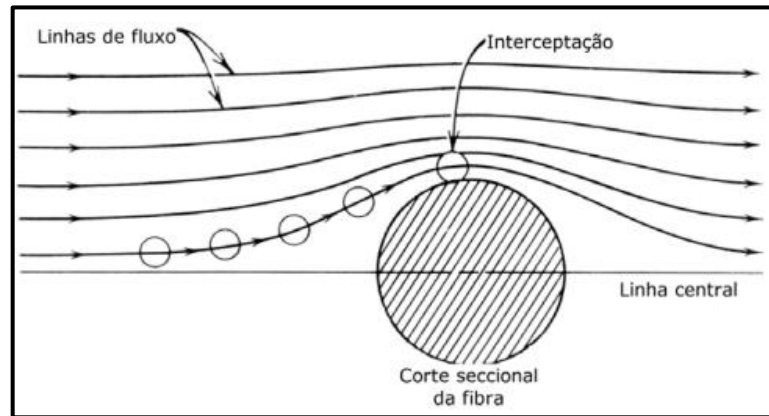
Fonte: Rodrigues (2006)

### 2.2.2.3. Mecanismo por interceptação direta

Ao seguir as linhas de corrente do gás, a partícula pode ser capturada quando seu centro passa pela superfície do coletor a uma distância menor ou igual ao seu raio, conforme Figura 6. Este mecanismo é significativo para partículas de diâmetro grande, com a ordem de grandeza do diâmetro da partícula ( $d_p$ ) pouco abaixo do diâmetro do coletor ( $d_f$ ) COURY

(1983 *apud* TANABE, 2011). A coleta por esse mecanismo depende das propriedades de transporte do fluido e da razão entre diâmetro da partícula e diâmetro do coletor ( $R=d_p/d_f$ ). Portanto, o mecanismo de interceptação direta é função desta razão,  $R$ .

Figura 6 - Desenho esquemático da captura por interceptação direta



Fonte: Rodrigues (2006)

Segundo Liu e Rubow (1990) a descrição do fluxo ao redor da fibra precisa ser levada em conta no efeito de escorregamento em casos que o diâmetro da fibra é da mesma ordem de grandeza que o caminho livre médio das moléculas do gás. Esses autores propuseram a adição de um fator de correção na equação de eficiência de coleta do mecanismo de interceptação direta proposta por Lee e Liu (1982), sendo representada por:

$$\eta_{id} = 0,6 \left( \frac{1-\alpha}{Ku} \right) \frac{R^2}{1+R} C_r \quad (14)$$

sendo,

$$C_r = 1 + \frac{1,996Kn_f}{R} \quad (15)$$

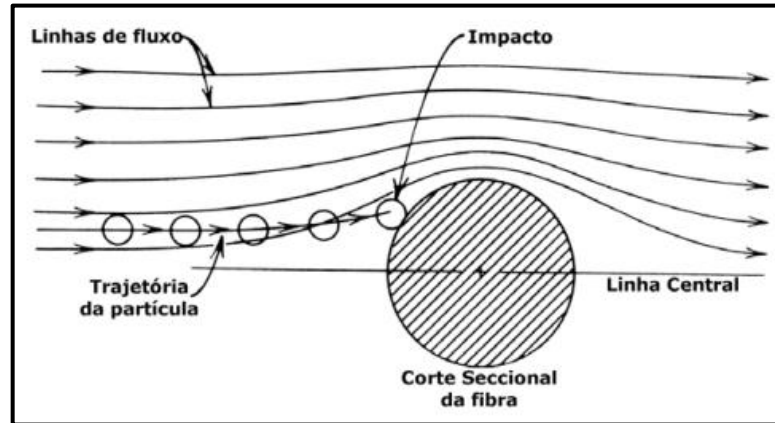
#### 2.2.2.4. Mecanismo por impactação inercial

Neste mecanismo, as linhas de corrente do gás se curvam ao passar em torno de um coletor, devido à inércia das partículas presentes em uma corrente gasosa. Com o aumento da



massa, as partículas não conseguem acompanhar essas linhas de corrente, como pode ser visto na Figura 7. Este mecanismo é mais utilizado para altas velocidades do gás COURY (1983 *apud* TANABE, 2011; HINDS, 1999).

Figura 7 - Desenho esquemático da captura por impactação inercial



Fonte: Rodrigues (2006)

Contudo, quando se tem escoamento com elevado número de  $Re$ , a hipótese de perfeita aderência da partícula ao coletor torna-se questionável, principalmente para aerossóis sólidos. Neste caso, existe grande possibilidade da partícula chocar-se com o coletor (havendo a coleta) e, em seguida retornar à corrente gasosa por choque elástico. Segundo Steffens (2007), isto provavelmente é uma das razões que explicam os dados discrepantes encontrados na literatura para a eficiência de coleta inercial.

Landahal e Hermann (1949 *apud* SPURNY, 1998 b) propuseram um cálculo que determina a eficiência de filtração das partículas pelo mecanismo inercial:

$$\eta_i = \frac{St^3}{St^3 + 0,77St^2 + 0,22} \quad (16)$$

$$St = \frac{c_s \rho_p d_p^2 U_o}{18 \mu d_f} \quad (17)$$

na qual  $St$  é o número de Stokes e  $\rho_p$  a densidade da partícula.

Segundo Willeke e Baron (1993 *apud* TANABE, 2011), o número de Stokes (St) é o parâmetro básico para descrever o mecanismo inercial para coleta de partículas em filtros. Se o número de Stokes for alto, a probabilidade de coleta pelo mecanismo inercial aumenta, no entanto, se ele for pequeno uma baixa probabilidade de coleta por este mecanismo.

#### 2.2.2.5. Mecanismo eletroforético

O mecanismo eletroforético é importante quando as partículas são carregadas eletricamente (STEFFENS, 2007), o qual não foi o objetivo do presente estudo, visto que o equipamento de filtração possui fontes ionizantes que asseguram a neutralização de eventuais cargas eletrostáticas presentes nas partículas geradas.

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

$$\eta_e = 8,242K_M^{0,494} \quad (18)$$

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

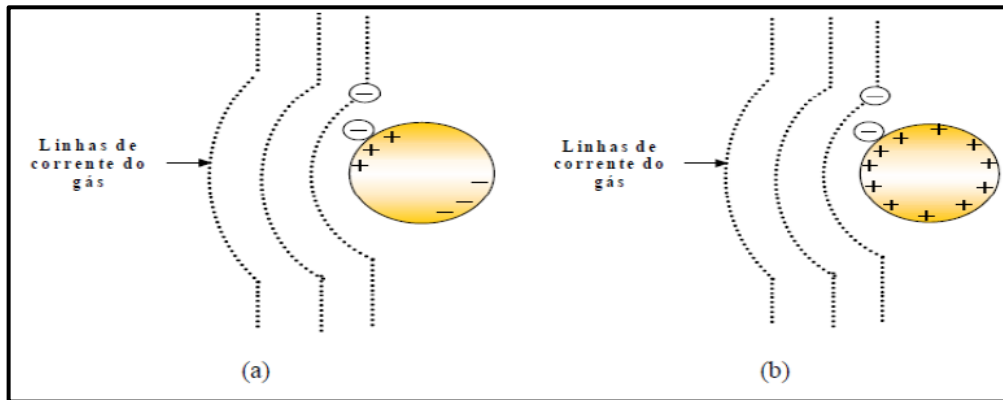
$$K_M = \frac{\gamma_c F_s q^2}{3\pi^2 \varepsilon_o d_p d_f^2 \mu v_s} \quad (19)$$

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

$$\gamma_c = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_f}{\varepsilon_c + 2\varepsilon_f} \quad (20)$$

em que  $\varepsilon_c$  é a constante dielétrica da partícula e  $\varepsilon_f$  a constante dielétrica do fluido.

Figura 8 - Mecanismo de coleta eletroforético (a) Coulômbico e (b) Dipolo-imagem



Fonte: Tanabe (2008)

### 2.3. Permeabilidade

Um dos parâmetros que deve ser analisado em um meio filtrante é a permeabilidade, a qual indica a facilidade que o fluido tem de atravessar o meio filtrante. Segundo BARROS (2014), a permeabilidade leva em consideração a completa interação entre o fluido e o meio filtrante e não apenas as características do fluido.

A equação de Forchheimer é utilizada para avaliar o escoamento de fluidos em meios porosos. O primeiro termo desta equação refere-se aos efeitos puramente viscosos e o segundo termo aos efeitos inerciais, conforme Equação 21 (INNOCENTINI, SEPULVEDA e ORTEGA, 2005).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} \cdot v_s + \frac{\rho_g}{k_2} v_s^2 \quad (21)$$

sendo que L representa a espessura do meio filtrante,  $\mu$  a viscosidade do fluido,  $k_1$  e  $k_2$  são constantes de permeabilidade do meio filtrante,  $\rho_g$  representa a densidade do gás e  $v_s$  a velocidade superficial.  $\Delta P$  representa a queda de pressão que é a diferença entre a pressão de entrada e a de saída do filtro durante a passagem da corrente gasosa.

Como neste trabalho foram utilizadas baixas velocidades de filtração, o segundo termo da Equação 18 pode ser desprezado e a Equação 22 pode ser utilizada (INNOCENTINI,

SEPULVEDA e ORTEGA, 2005). Assim, a permeabilidade dos meios porosos pode ser obtida por meio da Equação de Darcy. Esta equação avalia o escoamento de fluidos em meios porosos, relacionando os valores de perda de carga com a velocidade superficial.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} \cdot v_s \quad (22)$$

#### 2.4. Eficiência de coleta

A eficiência de coleta, a queda de pressão e a permeabilidade são parâmetros usados para avaliar o desempenho de um meio filtrante. Para que um meio filtrante tenha um ótimo desempenho ele deve ter uma alta eficiência de coleta, baixa queda de pressão e baixa permeabilidade. A eficiência de coleta está relacionada com as características das partículas geradas, como o tamanho, a densidade, o formato, e as características do meio filtrante.

A eficiência de coleta é obtida experimentalmente por meio da técnica de mobilidade elétrica, na qual é calculada a quantidade de partículas antes e após a passagem pelo meio filtrante, sendo determinada pela equação:

$$E = \frac{C_o - C_e}{C_o} \quad (23)$$

em que  $C_o$  e  $C_e$  representam a concentração de partículas na entrada e na saída do meio filtrante, respectivamente.

Steffens (2007) e Barros (2014) avaliaram a eficiência dos filtros HEPA e de Poliéster e assumiram  $L_f$  como sendo o comprimento da fibra por unidade de volume, como nas equações:

$$L_f = \frac{\text{comprimento da fibra}}{\text{unidade de volume}} \quad (24)$$

$$\text{Comprimento da fibra} = L_f \cdot A \cdot dL \quad (25)$$

A área projetada pelas fibras cilíndricas desordenadas no plano da seção pode ser vista na equação:

$$A_p = d_f \cdot L_f \cdot A \cdot dL \quad (26)$$

em que  $d_f$  é o diâmetro da fibra,  $A$  é a área do filtro e  $dL$  um elemento diferencial de espessura do filtro.

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

$$\eta_T = \frac{\text{Número de partículas depositadas por unidade de tempo}}{\text{Número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo}} = \frac{N_p}{N_c} \quad (27)$$

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

$$N_c = C \cdot v \cdot d_f \cdot L_f \cdot A \cdot dL \quad (28)$$

em que  $C$  é a concentração de partículas no gás e  $v$  é a velocidade intersticial do gás que pode ser encontrada por:

$$v = \frac{v_s}{\varepsilon} \quad (29)$$

na qual  $v_s$  é a velocidade superficial do gás e  $\varepsilon$  a porosidade do meio filtrante.

Fazendo um balanço de massa para o número de partículas depositadas na seção por unidade de tempo  $N_p$ , tem-se:

$$N_p = -dC \cdot v_s \cdot A \quad (30)$$

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

Substituindo as Equações 28, 29 e 30 na Equação 27, tem-se:

$$-\frac{dc}{c} = \eta_T \frac{d_f}{\varepsilon} L_f dL \quad (31)$$

Integrando-se a Equação 31, utilizando os limites  $L=0$  para  $C=C_0$  e  $L=L$  para  $C=C_E$ , obtém-se:

$$\ln \frac{C_E}{C_0} = -\frac{\eta_T L_f D_f L}{\varepsilon} \quad (32)$$

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

A porosidade e a fração volumétrica ocupada pelas fibras podem estar relacionadas pela seguinte equação:

$$\varepsilon = 1 - \beta \quad (33)$$

na qual  $\beta$  é a fração de volume ocupado pelas fibras e pode ser descrito pela equação:

$$\beta = \frac{\pi d_f^2}{4} L_f \quad (34)$$

Substituindo as Equações 33 e 34 na Equação 32, obtém-se:

$$P = \frac{C_E}{C_0} = \exp \left[ -\frac{4L(1-\varepsilon)\eta_T}{\pi \varepsilon d_f} \right] \quad (35)$$

em que  $P$  é a penetração e representa a fração numérica de partículas que conseguem atravessar o filtro, ou seja, não são coletadas pelo meio filtrante.

Considera-se eficiência do filtro como a fração de partículas que são coletadas pela seção filtrante, assim:

$$E = 1 - P = 1 - \exp\left[-\frac{4L(1-\varepsilon)\eta_T}{\pi\varepsilon d_f}\right] \quad (36)$$

É necessário que se conheça a eficiência total de cada fibra para encontrar a eficiência do meio filtrante. E isso é possível estimar por meio dos mecanismos de coleta atuantes, sendo função das características do aerossol a ser filtrado, das condições de escoamento e das características do meio filtrante (DUARTE FILHO, 1995 *apud* STEFFENS, 2007).

Steffens (2007) constatou que as equações da literatura não representaram satisfatoriamente os dados experimentais quando se utilizam os meios filtrantes com fibras heterogêneas, provavelmente pelo fato de utilizar um diâmetro médio para representar todas as fibras. Com isso, foi proposto uma subdivisão para o meio filtrante, na qual era 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 meio filtrante que apresenta fibras heterogêneas pode ser escrita de acordo com a equação:

$$E = 1 - P = 1 - \exp\left[\frac{-4L}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{(1-\varepsilon_i)\eta_{Ti}}{\varepsilon_i d_{fi}}\right] \quad (37)$$

em que  $\varepsilon_i$  e  $x_{fi}$  podem ser obtidos pelas equações:

$$\varepsilon_i = 1 - (1 - \varepsilon) \cdot x_{fi} \quad (38)$$

$$x_{fi} = \frac{n_i \cdot d_{fi}}{\sum n_i \cdot d_{fi}} \quad (39)$$

## 2.5. Estudos envolvendo a filtração de nanopartículas

Muitos trabalhos já foram realizados envolvendo micropartículas na geração de partículas no processo de filtração. Atualmente, é possível verificar que as partículas contidas no ar estão tanto na microescala como na nanoescala, assim tem-se o interesse pelo estudo dos meios filtrantes fibrosos na remoção de nanopartículas. A seguir, serão descritos resumidamente alguns trabalhos experimentais envolvendo a filtração de nanopartículas.

Hinds (1999) calculou a eficiência de coleta como função do tamanho da partícula para três filtros com a mesma queda de pressão, densidade e velocidade. Os três filtros eram compostos por fibras de 0,5, 2 e 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro. Os resultados mostraram que o tamanho da partícula mais penetrante era o menor e a menor eficiência foi encontrada para filtros compostos por fibras mais finas. Entretanto, o filtro com fibras mais finas obteve um fator de qualidade superior para partículas maiores que 0,2  $\mu\text{m}$  de diâmetro.

Balazy et al. (2004) avaliaram a eficiência de filtração dos filtros fibrosos na remoção de partículas nanométricas e verificaram que a eficiência máxima com diâmetro de partículas foi em torno de 20 nm.

Boscovic et al. (2005) verificaram que partículas com diferentes formatos se movem diferentemente na superfície da fibra depois de sofrerem colisão. Partículas esféricas deslizam ou rolam antes de parar. Já as partículas cúbicas deslizam ou caem rapidamente sem controle causando uma mudança na área de contato entre a partícula cúbica e a superfície da fibra, e desse modo aumentando a probabilidade da partícula se separar da fibra.

Kim et al. (2006) verificaram que a eficiência de coleta para partículas de NaCl menores de 100 nm de diâmetro era independente da umidade, mas quando as partículas estavam carregadas eletricamente a eficiência aumentava. Ainda, para partículas menores que 2 nm a penetração era aumentada com a redução do tamanho da partícula.

Yun et al (2007) produziu nanofibras de 0,27  $\mu\text{m}$  usando o processo *electrospinning*, na qual as nanofibras são produzidas continuamente em massa de diferentes polímeros e assim podem ser usadas comercialmente. Os resultados mostraram que para atingir a mesma eficiência de coleta dos filtros comerciais, os filtros de nanofibras requerem menos massa, mas uma queda de pressão maior. Para um dado tamanho de partícula, o fator de qualidade do



filtro e a eficiência de uma única fibra para filtros de nanofibras dependem principalmente da densidade e do diâmetro da fibra.

Steffens (2007) avaliou o comportamento de um filtro industrial de poliéster e de um filtro de alta eficiência (HEPA) com o intuito de verificar o desempenho dos mesmos operando na remoção de partículas nanométricas de aerossóis. Feitosa (2009) além de avaliar os filtros de poliéster e HEPA, também avaliou filtros de Microfibras de Quartzo e Membranas filtrantes cilíndricas. Ambos concluíram que o aumento da velocidade de filtração, assim como o aumento do diâmetro das partículas proporcionaram queda na eficiência em ambos os filtros, comportamento típico de filtros operando na região de predominância do mecanismo difusional.

Hung e Leung (2011) mostraram que os filtros com nanofibras mais finas para partículas de 50-200 nm obtiveram maior eficiência de filtração que os filtros com nanofibras grossas principalmente pela difusão convectiva e interceptação. Entretanto, a queda de pressão foi significativamente alta para os filtros com nanofibras mais finas. Verificaram também que em aplicações que requerem elevada eficiência de filtração, é mais eficaz produzir meios filtrantes com camadas de nanofibras de baixo peso para formar um filtro de multi-camada em vez de usar uma única camada de filtro de nanofibras com elevado peso.

Barros (2014) avaliou o meio filtrante (HEPA) e Poliéster na remoção de partículas nanométricas de NaCl e verificou que a deposição das partículas ocorreu primeiro no interior dos meios filtrantes e em seguida na superfície em ambos os filtros. 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, visto que o filtro HEPA apresentou menor permeabilidade. Após a filtração final, a eficiência foi de 100% devido à deposição das partículas em ambos os meios filtrantes.

A eficiência de coleta dos filtros depende além da estrutura do filtro (porosidade, densidade e diâmetro de fibras), das condições de operação (velocidade superficial do gás) e das características do gás a ser limpo (densidade, tamanho de partícula).

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados, como o material particulado e os meios filtrantes, e também a unidade experimental detalhando cada componente deste aparato. Por fim, será apresentado o procedimento experimental e as condições operacionais que foram aferidas para a execução dos testes.

#### **3.1. Material Particulado**

Nos ensaios de filtração foram geradas partículas a partir de soluções de 5 g/L de cloreto de sódio (NaCl) puro da marca CHEMIS, cuja densidade era de 2,165 g/cm<sup>3</sup>. As soluções foram feitas com água destilada obtida por meio do Laboratório Didático para garantir uma maior pureza da amostra. Foi utilizado um inalador comercial da marca NS, modelo I-205, que operava com uma pressão de 17236,90 Pa para a geração das partículas. A contagem das partículas foi feita no tempo zero em triplicata e também após uma hora de filtração em triplicata para se obter um resultado mais preciso e se ter uma comparação.

#### **3.2. Meios filtrantes**

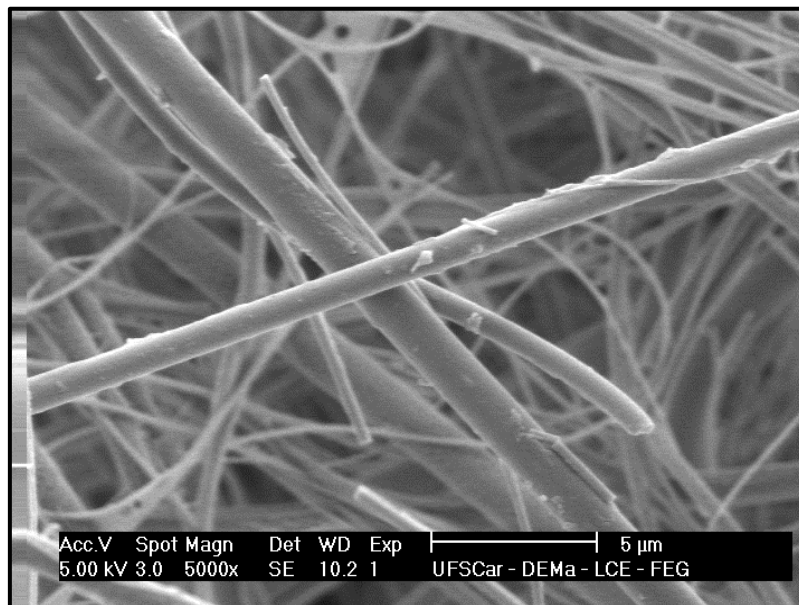
Os meios filtrantes avaliados neste trabalho foram os filtros HEPA, de Vidro, de Microfibras de Quartzo e de Poliéster. Foi realizada a caracterização dos meios filtrantes e posteriormente foram realizados testes para avaliar a eficiência destes na remoção de nanopartículas. Nas seções seguintes são apresentadas as principais características de cada meio filtrante.

##### **3.2.1. Filtro HEPA**

O meio filtrante “High Efficiency Particulate Air Filter” conhecido como filtro HEPA é um dos filtros mais eficientes na remoção de nanopartículas e uma das características para explicar tal fato é que o meio filtrante é constituído por fibras heterogêneas, pois apresentam

uma ampla faixa de diâmetros das fibras. Este meio filtrante é constituído por micro fibras de vidro e foi fornecido pela empresa Filtracom Ltda – Divisão Filtros e Sistemas. A Figura 9 apresenta a imagem da superfície deste meio filtrante obtida em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)-FEG.

Figura 9 - Imagem da superfície do meio filtrante HEPA obtida em MEV-FEG



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

### 3.2.2. Filtro de vidro

O filtro de vidro como o próprio nome diz é composto por fibras de vidro e como o filtro HEPA, ele também possui fibras heterogêneas, mas em geral com tamanho maiores. Esse meio filtrante é bastante frágil, assim deve-se ter muito cuidado ao manuseá-lo, pois pode ocorrer rompimento das fibras o que pode ser imperceptível, mas pode alterar o desempenho do meio filtrante. Esse meio filtrante foi obtido pela empresa ENERGÉTICA Indústria e Comércio LTDA e está representado pela Figura 10.

Figura 10 - Imagem da superfície do meio filtrante de vidro obtida em MEV-FEG



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

### 3.2.3. Filtro de Microfibras de Quartzo

Nota-se na Figura 11 que este meio filtrante é composto por Microfibras de Quartzo que são distribuídas aleatoriamente. Este filtro foi fornecido pela empresa ENERGÉTICA Indústria e Comércio LTDA.

Figura 11 - Imagem da superfície do meio filtrante de Microfibras de Quartzo obtida em MEV-FEG



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

### 3.2.4. Filtro de Poliéster

Diferente dos outros filtros já apresentados, o filtro de poliéster é caracterizado como filtro homogêneo, por apresentar fibras com tamanho de diâmetros similares. O filtro de Poliéster foi cedido pela empresa Filtracom Ltda – Divisão Filtros e Sistemas, e foi classificado em FSN 300 formado 100% por poliéster. A Figura 12 apresenta a imagem da superfície deste meio filtrante obtida em Microscópio Eletrônico de Varredura.

Figura 12 - Imagem da superfície do meio filtrante de poliéster obtida em MEV-FEG



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

### 3.3. Caracterização dos meios filtrantes

Este estudo requer avaliar a caracterização dos meios filtrantes, na qual consiste em determinar a espessura, o diâmetro das fibras e a permeabilidade dos meios filtrantes. Com esses dados é possível explicar resultados obtidos nos experimentos de filtração para remoção de nanopartículas. A seguir será apresentada a metodologia para a obtenção de cada parâmetro.

### 3.3.1. Determinação da espessura do meio filtrante

A espessura dos meios filtrantes foi determinada utilizando-se dois métodos. Em dos métodos utilizou-se um paquímetro digital (marca Starrett) e no outro método determinou-se a espessura através de imagens obtidas pelo MEV. Em ambos os métodos foram feitas medidas em 5 amostras de diferentes regiões do filtro amostrado e a média desses valores representa a espessura de cada meio filtrante.

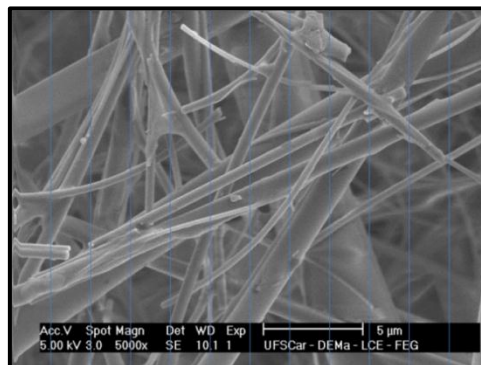
### 3.3.2. Determinação do diâmetro das fibras

A determinação do diâmetro das fibras é muito importante na caracterização dos meios filtrantes, pois quanto menor o diâmetro das fibras, maior é a possibilidade de retenção das partículas no meio filtrante.

As amostras dos meios filtrantes foram preparadas no Laboratório de Caracterização Estrutural DEMa da Universidade Federal de São Carlos e analisadas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV). Após as imagens serem geradas pelo MEV-FEG, foi possível analisá-las em um microcomputador utilizando o programa Image Pro Plus versão 7.0 e assim obter o diâmetro médio das fibras dos meios filtrantes.

As imagens foram divididas em 12 partes verticais iguais, como pode ser visto na Figura 13, a fim de se obter uma grande quantidade de diâmetros das fibras para calcular o diâmetro médio de cada meio filtrante.

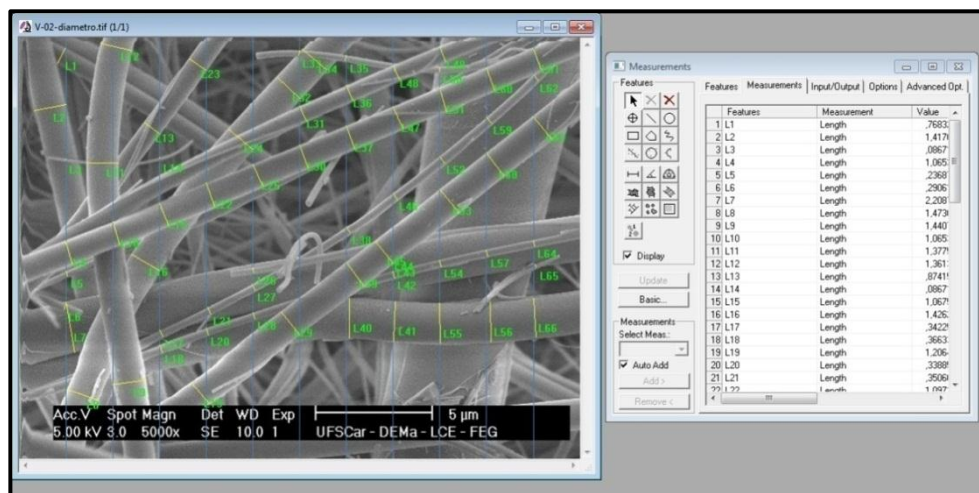
Figura 13 - Foto do filtro HEPA obtida pelo MEV com aumento de 5000 vezes



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

O método de análise consistiu em observar a largura da fibra em cada cruzamento com as linhas verticais em azul, como pode ser visto na Figura 14. Assim, o operador do programa traçou retas perpendiculares às fibras que cruzam as linhas verticais, sendo representadas pelas linhas amarelas e o programa calculou automaticamente esse valor, no qual são os diâmetros das fibras representados pelas escritas em verdes. Para uma boa eficiência no cálculo dos diâmetros médios dos filtros, necessitou-se de muita atenção na seleção das fibras, pois muitos erros acarretam em dados não muito satisfatórios. As análises foram realizadas em todas as linhas azuis, da esquerda para a direita, assim formou-se uma tabela com todos os diâmetros das fibras calculados.

Figura 14 - Medição dos diâmetros das fibras do filtro de Vidro utilizando o Programa Image Pro Plus através da imagem obtida pelo MEV-FEG com aumento de 5000 vezes



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Foram analisadas 6 imagens em diferentes posições de cada meio filtrante, sendo realizado em média o cálculo de 50 diâmetros de fibras em cada imagem. Para determinar o diâmetro médio das fibras do filtro HEPA, de Vidro e de Quartzo utilizou-se a Equação 40, visto que esses filtros não possuem fibras homogêneas.

$$\overline{D_f} = \frac{\sum n_i d_{fi}}{N} \quad (40)$$

em que  $n_i$  é o número de fibras de determinado diâmetro,  $d_{fi}$  é o diâmetro das fibras em determinada faixa e N é o número total de fibras.

VAN OSDELL et al. (1990) e PODGÓRSKI et al. (2006), os quais utilizaram esse método de determinação de diâmetros de filtro HEPA, destacaram ser este um método simples, porém muito trabalhoso e impossível se ser representado o real diâmetro das fibras.

Já para o filtro de Poliéster que possui fibras homogêneas foram somados todos os diâmetros de fibras encontrados e este foi dividido pelo número total de fibras analisadas, encontrando-se assim o diâmetro médio das fibras.

### 3.3.3. Determinação da permeabilidade do meio filtrante

A permeabilidade dos filtros sem a presença de partículas, conhecidos como filtros limpos, foram determinadas utilizando a unidade experimental. A velocidade superficial foi variada de 1 a 15 cm/s e assim foi obtida a queda de pressão correspondente. Com estes valores, foi possível obter a curva e a constante de permeabilidade a partir da Equação de Darcy (Equação 22). Foi determinada a permeabilidade de cada meio filtrante utilizando a unidade experimental, primeiramente com a área de filtração de 40,7 cm<sup>2</sup> e depois esse mesmo meio filtrante era cortado no centro e utilizado para a realização do experimento com a área de 5,3 cm<sup>2</sup>, como pode ser visto na Figura 15. Foram realizadas cinco réplicas de cada procedimento com o mesmo meio filtrante. Os experimentos foram realizados em dias alternados para verificar a influência do clima ou possíveis mudanças no funcionamento do equipamento.

Figura 15 - Amostra do filtro de Quartzo com área de 40,7cm<sup>2</sup> à esquerda e à direita amostra cortada do centro para utilizar na determinação da permeabilidade com a área de 5,3 cm<sup>2</sup>



Fonte: Acervo Pessoal (2014)



Para medição da vazão do ar foram utilizados rotômetros que vieram de fábrica calibrados a 1 atm e 70°F e não estavam nas mesmas condições ao realizar os experimentos. Foi necessário fazer uma correção de pressão e temperatura e com isso obtinha o valor da vazão corrigida e conseqüentemente da velocidade corrigida. As Equações (41) e (42) foram obtidas das cartas dos próprios rotômetros. As equações a seguir representam a correção da pressão e da temperatura, respectivamente.

$$Vazão\ corrigida = Vazão\ medida * \sqrt{\frac{Pressão\ de\ Operação}{Pressão\ Calibrada}} \quad (41)$$

$$Vazão\ corrigida = Vazão\ medida * \sqrt{\frac{Temperatura\ Calibrada}{Temperatura\ de\ Operação}} \quad (42)$$

Assim:

$$Vazão\ corrigida = Vazão\ medida * \sqrt{\frac{Pressão\ de\ Operação}{Pressão\ Calibrada}} * \sqrt{\frac{Temperatura\ Calibrada}{Temperatura\ de\ Operação}} \quad (43)$$

Após a realização dos cinco experimentos para cada área, obteve-se a média da queda de pressão e assim foi possível calcular o desvio padrão pela equação:

$$S = \pm \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (44)$$

em que  $S$  é o desvio padrão,  $x_i$  é a queda de pressão em cada ponto (velocidade variando de 1 a 15 cm/s),  $\bar{x}$  é a média da queda de pressão e  $n$  é o número de amostras. O desvio padrão é que indica o possível erro caso fosse realizado um único experimento. Quanto maior o número de observações  $n$ , menor será o desvio padrão da média e com isso maior será a precisão do resultado. Porém foram realizados cinco experimentos, como o número de amostras se refere a uma pequena amostragem foi utilizado  $(n-1)$ , caso houvesse uma amostragem muito grande essa parte da equação se tornaria apenas  $(n)$ .

O erro padrão é a medida de incerteza do estudo e foi obtido mediante a equação:

$$\bar{S} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (45)$$

na qual  $\bar{S}$  é o erro padrão,  $S$  é o desvio padrão e  $n$  é o número de amostras.

O intervalo de confiança no nível 95% é usado para indicar a confiabilidade de uma estimativa. Um intervalo de confiança pode ser usado para descrever o quanto os resultados de um experimento são confiáveis. Sendo todas as estimativas iguais, um teste que resulte num intervalo de confiança pequeno é mais confiável do que aquele que resulta num intervalo de confiança maior. Assim, para uma quantidade de amostras pequenas deve-se usar a equação (46) da confiança:

$$\text{Confiança} = 2,776 * \bar{S} \quad (46)$$

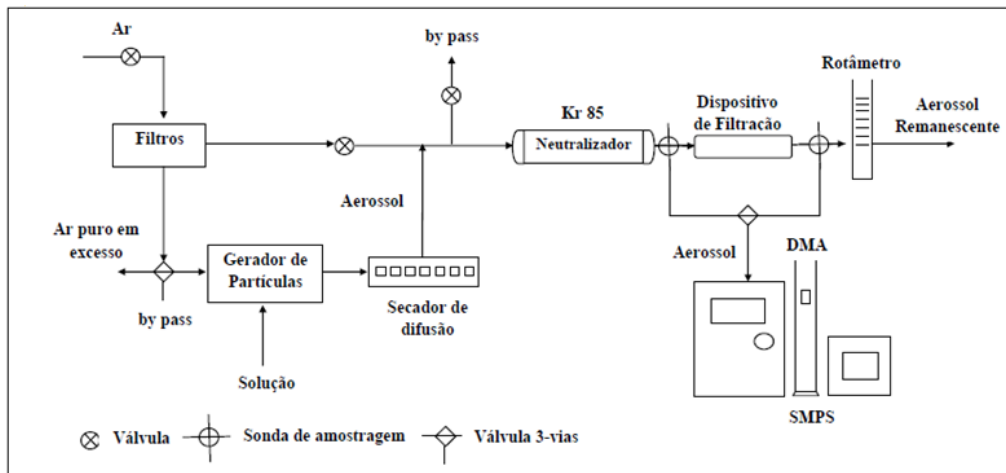
na qual o valor de 2,776 é retirado da Tabela de distribuição T de Student, com o número de amostras 5 e o nível de confiança 95% (RIBEIRO JR, 2011).

Lunet et al.(2006) cita que quando a população não segue uma distribuição normal ou aproximadamente normal, o desvio padrão não deve ser utilizado como medida de dispersão. O erro padrão é utilizado quando se deseja indicar a imprecisão associada à estimativa de um determinado parâmetro e o intervalo de confiança podem ser interpretados mais diretamente que os erros padrão. No presente trabalho são apresentados os valores do desvio padrão, erro padrão médio e intervalo de confiança das quedas de pressões, porém na construção dos gráficos das curvas de permeabilidade foram utilizados somente os valores do desvio padrão.

### **3.4. Unidade Experimental**

A Figura 16 representa a unidade experimental utilizada para a realização dos ensaios experimentais e posteriormente serão descritos todos os equipamentos utilizados, com exceção da balança analítica.

Figura 16 - Ilustração da Unidade Experimental utilizada no trabalho



Fonte: Feitosa (2009)

### 3.4.1. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

O Microscópio Eletrônico de Varredura conhecido como MEV, Modelo Philips XL-30 FEG, foi utilizado para captar imagens das amostras de meios filtrantes, conforme Figura 17. As amostras foram preparadas no Laboratório de Caracterização Estrutural DEMa da Universidade Federal de São Carlos, na qual foi feito o recobrimento de ouro puro para a condução dos elétrons, pois o MEV funciona pela visualização de elétrons. Após obter as imagens, utilizou-se o Programa Image Pró Plus para analisá-las.

Figura 17 - Imagem do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)



Fonte: LCE – DEMa UFSCAR (2014)

### 3.4.2. Compressor de ar

O ar comprimido utilizado na unidade experimental era obtido por meio do compressor de ar localizado na parte externa do laboratório. A escolha do ar comprimido como fluido gasoso foi devido ao seu menor custo e também por questões de segurança, pois o gás não é inflamável. Dependendo da frequência de uso do equipamento era necessário abrir a válvula do compressor para retirar água existente no tanque, pois isso poderia acarretar na condensação da água, já que a quantidade de água é função da umidade relativa do ar aspirado, da temperatura, do volume de ar fornecido e da pressão de compressão. O compressor utilizado era um compressor de pistão da marca Schulz, modelo MSV12/175 e com capacidade de 120 psi, como ilustra a Figura 18.

Figura 18 - Compressor de ar



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

### 3.4.3. Filtros de ar

Os filtros de ar foram utilizados para remover qualquer impureza contida na corrente de ar provinda do compressor de ar. A composição deste equipamento se dá por um conjunto de três filtros e um sistema de membranas. O conjunto de três filtros era formado pelo pré-filtro, um filtro coalescente e o filtro composto por carvão ativado. A corrente de ar atravessava esse equipamento e por último passava pelo filtro de carvão ativado para garantir uma maior purificação da corrente de ar. Esse equipamento era da marca TSI (*Trust Science Innovation*) e modelo 3074B que pode ser visualizado na Figura 19.

Figura 19 - Dispositivo de purificação de ar



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

### 3.4.4. Gerador de partículas

As partículas foram geradas a partir de um gerador de partículas, o qual neste estudo consistia em um inalador comercial a ar comprimido da marca NS, modelo I-205. Este inalador possuía um reservatório de armazenamento da solução e um bocal de entrada e de saída, como pode ser visto na Figura 20. Geralmente é utilizado em ambientes domiciliares e hospitalares, recomendado no tratamento de problemas respiratórios como gripes, resfriados e rinites.

Figura 20 - Inalador comercial



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

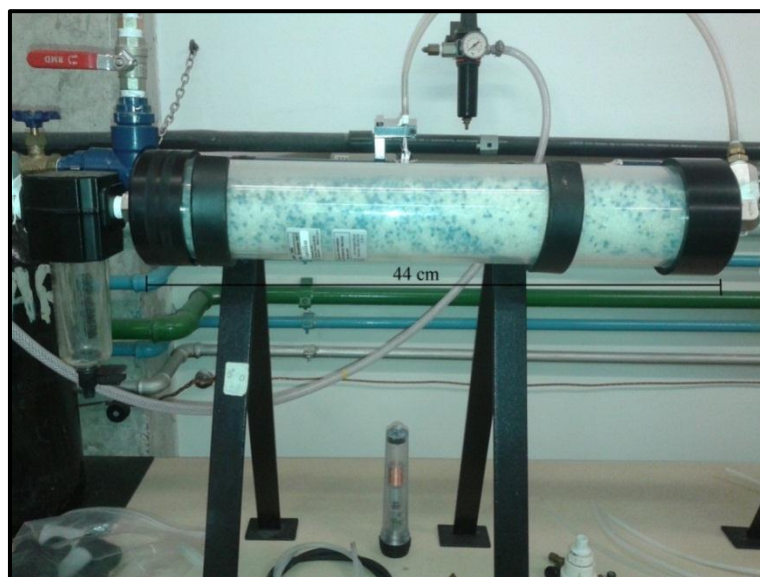
O ar comprimido entrava pela parte inferior do inalador, sendo que a pressão do ar na entrada do gerador era ajustada em aproximadamente 17236,90 Pa, e saiam gotas pequenas no bocal superior, pois o contato entre o ar comprimido e a solução a uma velocidade relativa alta produz a atomização desta solução, uma vez que o ar era forçado a passar por um orifício pequeno localizado no seu interior (BARROS, 2014).

As gotas menores seguiam em direção ao secador de difusão e depois de secas chegavam à corrente de ar puro da linha principal, já as gotas maiores retornavam ao reservatório por impactação inercial.

### **3.4.5. Secador de difusão**

O secador de difusão utilizado tem o objetivo de remover a umidade presente nas partículas geradas. Esse secador era composto por uma parte cilíndrica de acrílico e outro cilindro concêntrico com tela de fio metálico, conforme Figura 21. O espaço entre os dois foi preenchido com sílica-gel para adsorver a umidade. Com o tempo a sílica passava da cor azul para rosa, isso demonstrava que o secador estava cumprindo seu papel, pois o ar úmido atravessava o cilindro interno e o vapor de água a tela metálica que se difundia no espaço preenchido por sílica.

Figura 21 - Secador de difusão



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

#### 3.4.6. Fontes Neutralizadoras

A fim de estabilizar as possíveis cargas eletrostáticas presentes nas partículas geradas foram utilizadas fontes neutralizadoras, visto que partículas eletrizadas apresentam maior probabilidade de serem depositadas nas paredes das tubulações e mangueiras, devido às forças eletrostáticas atuantes no sistema.

Eram duas as fontes neutralizadoras, a fonte de Kriptônio 85 e de Amerício 241, conforme as Figuras 22 e 23, respectivamente. Uma foi instalada após o secador de difusão e a outra fonte foi instalada em uma caixa preta de chumbo antes do fluxo de ar seguir para o equipamento *Scanning Mobility Particle Sizer* (SMPS), na qual mede a concentração e a distribuição de tamanhos das partículas. A utilização desta segunda fonte neste posição deve-se ao princípio de funcionamento do SMPS se baseia em uma técnica de detecção de partículas por mobilidade elétrica.

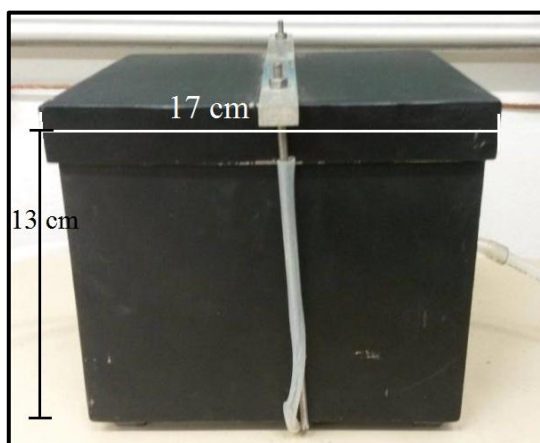


Figura 22 - Fonte Neutralizadora de Kriptônio



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Figura 23 - Fonte Neutralizadora de Amerício



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

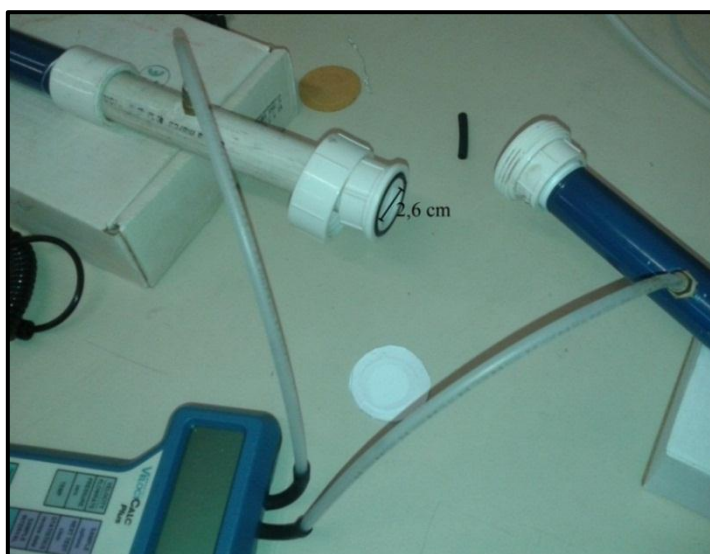
### 3.4.7. Dispositivo de filtração

O dispositivo de filtração era a parte do equipamento na qual o meio filtrante ficava sustentado. Este aparato era composto por material de PVC e obtinha duas partes desmontáveis, o que facilitava a troca dos meios filtrantes. Os experimentos foram realizados



com áreas de filtração de  $5,3 \text{ cm}^2$  e  $40,7 \text{ cm}^2$ , como ilustram as Figuras 24 e 25, respectivamente. Em ambas as figuras a corrente gasosa provém do lado esquerdo.

Figura 24 - Dispositivo de filtração com área de  $5,3 \text{ cm}^2$



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

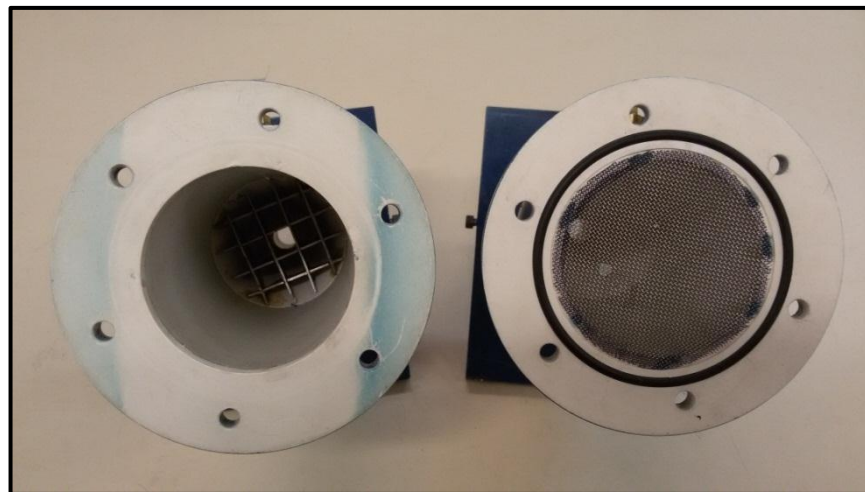
Figura 25 - Dispositivo de filtração com área de  $40,7 \text{ cm}^2$



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

No dispositivo de filtração com área de  $40,7 \text{ cm}^2$ , foi acoplada uma tela metálica de suporte na abertura da segunda parte do dispositivo, no local onde era feito o contato com os meios filtrantes, para evitar que o filtro se rompesse durante a realização dos experimentos. As regiões internas tanto de entrada como de saída, possuíam formato cônico para minimizar os efeitos de turbulência do gás ao adentrar e sair do mesmo, como podem ser vistas na Figura 26. A região de junção destas seções possuía uma vedação assegurada, com o propósito de evitar possíveis vazamentos do aerossol.

Figura 26 - Região interna do dispositivo de filtração com área de  $40,7 \text{ cm}^2$ , respectivamente, primeira e segunda parte do dispositivo

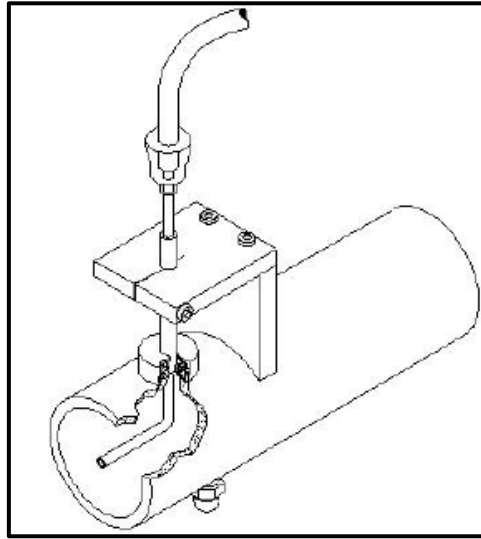


Fonte: Acervo Pessoal (2014)

#### **3.4.8. Amostragem de partículas**

A amostragem de partículas era feita por meio de sondas metálicas que permitia avaliar o desempenho das amostragens do aerossol antes e depois da passagem pelo meio filtrante. Essas sondas ficavam alinhadas ao centro do duto nas quais escoava o aerossol e tinham diâmetros interno de 2 mm. A Figura 27 esquematiza a disposição da sonda de amostragem no duto, onde o escoamento do gás ocorre da esquerda para a direita.

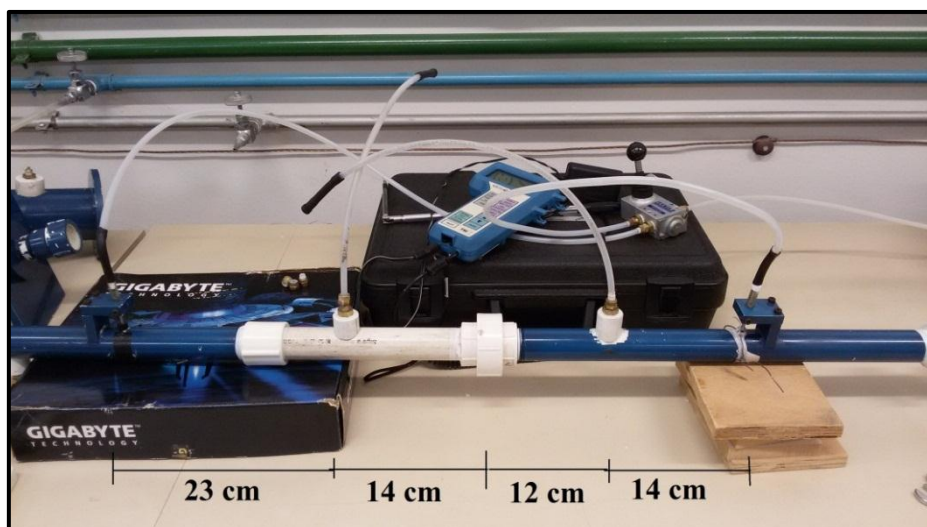
Figura 27 - Esquema das sondas de amostragem



Fonte: FEITOSA (2009)

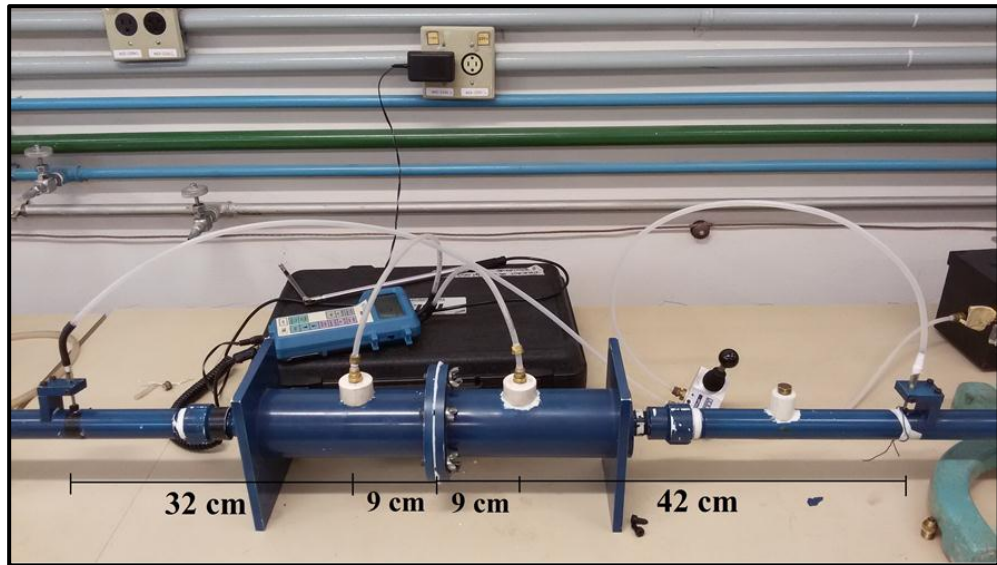
Para ambas as áreas de filtração, a sonda de amostragem ficava localizada no centro do duto de escoamento do gás. Para a área de filtração de  $5,3 \text{ cm}^2$  a sonda ficava disposta a uma distância de 37 cm antes do meio filtrante e 26 cm depois, já com a área de filtração de  $40,7 \text{ cm}^2$  essa distância era de 41 cm antes e 51 cm depois do meio filtrante, como pode ser visto nas Figuras 28 e 29.

Figura 28 - Esquema do dispositivo de filtração com área de  $5,3 \text{ cm}^2$



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Figura 29 - Esquema do dispositivo de filtração com área de 40,7 cm<sup>2</sup>



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

As sondas eram conectadas a uma mangueira que se ligava a uma válvula de três vias, que foi empregada para realizar um acionamento manual da alavanca, na qual poderia ser selecionada a amostragem antes ou após o meio filtrante, como pode ser visto na Figura 30.

Figura 30 - Válvula de três vias

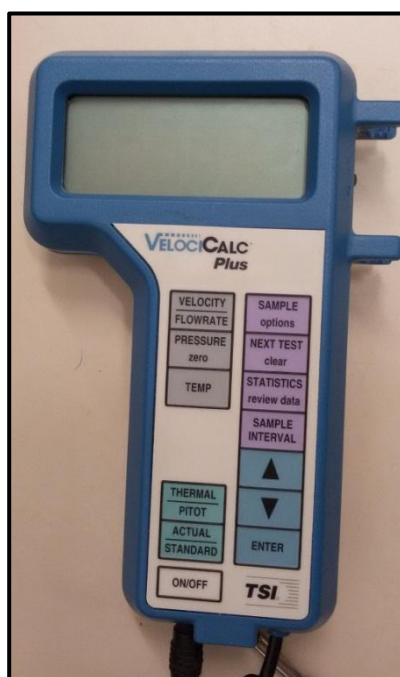


Fonte: Acervo Pessoal (2014)

### 3.4.9. Manômetro

O manômetro digital Velocicalc da marca TSI, modelo 8385A, foi utilizado para calcular a queda de pressão no meio filtrante, conforme Figura 31. O equipamento também era utilizado para medir a temperatura durante os testes.

Figura 31 - Manômetro Digital



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

O manômetro foi conectado por duas mangueiras a uma distância de 14 cm antes e 12 cm depois do meio filtrante para a área de 5,3 cm<sup>2</sup>. Já para a área de filtração de 40,7 cm<sup>2</sup> o manômetro estava conectado a uma distância de 9 cm antes e depois do meio filtrante, como pode ser visto nas Figuras 28 e 29.

Este manômetro mede pressões que variam de -1245 a 3735 Pa, com a precisão de leitura de  $\pm 1\%$  e  $\pm 1\text{Pa}$ . Estes são valores encontrados no manual do manômetro.

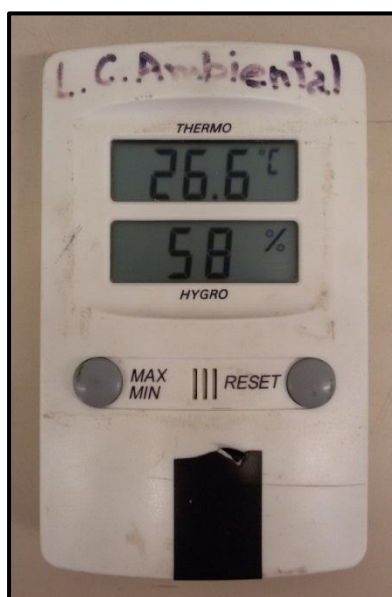
### 3.4.10. Medidor de temperatura

Além da medição de temperatura por meio do manômetro, a temperatura foi medida por meio de um medidor termopar da marca TFA nº30.50000 e modelo HYGROTHERM.

### 3.4.11. Medidor de umidade

O mesmo equipamento que era utilizado para medir a temperatura foi utilizado na medição de umidade, como pode ser visto na Figura 32.

Figura 32 - Medidor de umidade



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

### 3.4.12. Medidor de vazão

Foram feitos testes com vários medidores de vazão. Todos os rotâmetros eram da marca Gilmont Instruments Inc. Dois deles possuíam uma carta que indicavam as vazões

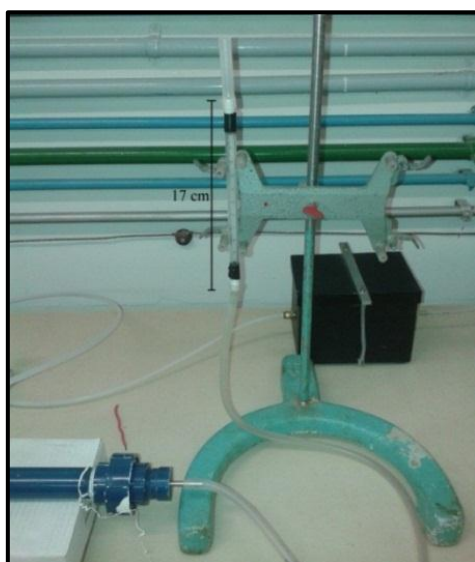


referentes às medidas apresentadas nas escalas dos rotômetros, um era o número 3 - Modelo 31601-31700 com esfera de vidro e o outro, número 5 - Modelo 50301-50400 com esfera de aço que era mais usado para altas vazões. Nos outros três rotômetros as escalas já eram os valores de vazões do próprio equipamento, não possuíam carta de rotâmetro, e eram do Modelo GF 2260, Modelo GF 2460 e Modelo GF 2560, respectivamente, os números 12, 14 e 15.

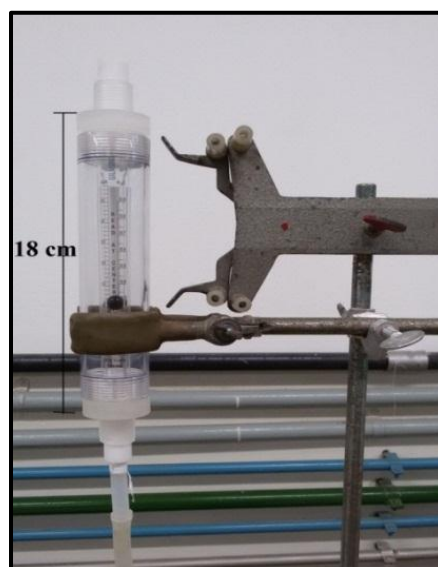
Depois de realizados os testes, foi decidido usar o rotômetro de número 3 para a área de filtração menor e o de número 14 para a área maior, como pode ser visto na Figura 33. Pois não era possível medir baixas vazões da área de  $5,3 \text{ cm}^2$  com o rotômetro para a área maior. O erro médio do rotômetro de número 3 era de  $\pm 2\%$  e o erro máximo de  $\pm 6\%$ . Para o rotômetro de número 14 a precisão era de  $\pm 0,001-0,002 \text{ in.}$

O controle da vazão na unidade foi feito por uma válvula do tipo agulha localizada na entrada do sistema, logo após os filtros de purificação de ar, já o medidor era acoplado à saída da linha de filtração.

Figura 33 - Rotômetro acoplado à saída da linha de filtração a) Número 3 utilizado com a área de filtração de  $5,3 \text{ cm}^2$  b) Número 14 utilizado com a área de filtração de  $40,7 \text{ cm}^2$



(a)



(b)

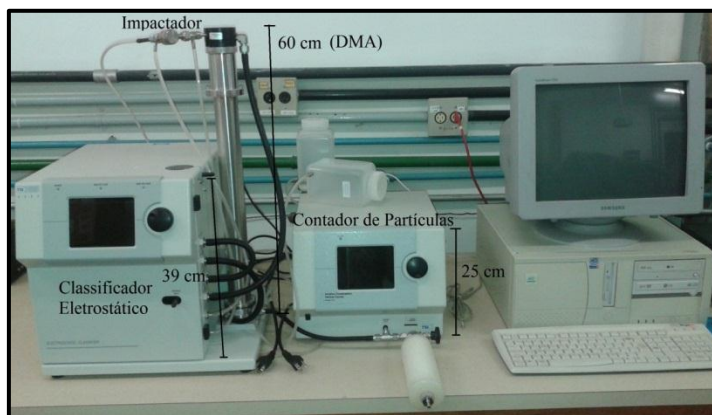
Fonte: Acervo Pessoal (2014)

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

Antes do aerossol chegar ao Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica, conhecido por SMPS (*Scanning Mobility Particle Sizer*), ele passa pela fonte neutralizadora de Amerício que foi posicionada neste local porque o princípio de funcionamento do SMPS se baseia em uma técnica de detecção de partículas por mobilidade elétrica.

O SMPS é capaz de fornecer a concentração de partículas por faixa de diâmetros do aerossol amostrado. Ele é constituído por um Impactador (*Impactor Inlet*, Modelo 1035900), um Classificador Eletrostático (*Eletrostatic Classifier*, Modelo 3080), na qual encontra-se um Analisador de Mobilidade Diferencial (*Differential Mobility Analyser*, DMA) acoplado, e um Contador de Partículas Ultrafinas (*Ultrafine Condensation Particle Counter –UCPC*, Modelo 3776), ambos da marca TSI, como pode ser visto na Figura 34.

Figura 34 - Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica (SMPS)



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

O impactador utilizado foi com o orifício de 0,071 cm de diâmetro, o qual está relacionado com a vazão de ar de diluição que é recirculada no interior do DMA (*sheath flow*). O manual do equipamento indica usar a vazão de 1,4 L/min quando se usa esse tamanho de orifício.

O Analisador de Mobilidade Diferencial (DMA) pode ser configurado utilizando o *Long-DMA* ou *Nano-DMA*. A diferença entre as duas configurações é a classificação da faixa



de diâmetro de partículas. O *Long-DMA* (Modelo 3081) oferece uma classificação de partículas na faixa de 6 a 800 nm, já o *Nano-DMA* (Modelo 3085) classifica partículas entre 2 e 165 nm. O presente trabalho utilizou o *Long-DMA*, visto que a faixa de classificação deste equipamento adequou-se a faixa de diâmetro das partículas pretendida. A Figura 35 ilustra estes dois tipos de Analisador de Mobilidade Diferencial (DMA).

Figura 35 - Analisador de Mobilidade Diferencial: (1) *Long-DMA* e (2) *Nano-DMA*



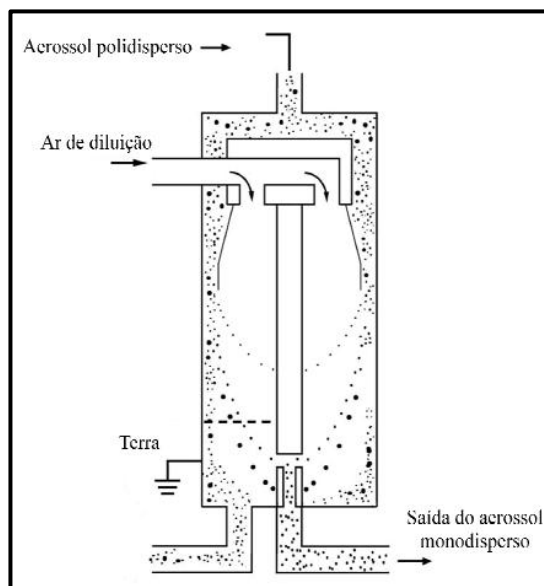
Fonte: Feitosa (2009)

O princípio de funcionamento do SMPS se dá primeiramente pela passagem do aerosol polidisperso pelo impactador inercial, na qual as partículas maiores são removidas por impactação inercial. Posteriormente, as partículas que não foram removidas passam para o DMA, onde as partículas são separadas de acordo com a sua habilidade em atravessar um campo elétrico no DMA, essa separação é conhecida como mobilidade elétrica. Mediante uma pequena abertura inferior do DMA saem partículas monodispersas que se direcionam para o contador de partículas. A Figura 36 ilustra o princípio de funcionamento do equipamento DMA.

O princípio de funcionamento do DMA depende de alguns parâmetros para que se tenha um bom desempenho, entre eles estão a viscosidade do gás, a densidade da partícula, o tamanho do impactador, o modelo de DMA utilizado, a vazão de aerosol amostrada (aerosol flow), a vazão de ar de diluição que é recirculada no interior do DMA (sheath flow), os tempos scan up, retrace e break que se refere, respectivamente, ao tempo que as partículas são

classificadas em função da tensão, ao tempo necessário para a tensão retorne ao valor inicial para que seja realizada uma nova varredura e ao tempo de espera entre um escaneamento e outro.

Figura 36 - Esquema de funcionamento do DMA



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

### 3.5. Procedimento experimental

O procedimento experimental foi dividido em duas partes, na qual a primeira parte consiste na caracterização dos meios filtrantes, que envolve a espessura, o diâmetro das fibras e a permeabilidade dos meios filtrantes. Depois de ser feita a caracterização dos meios filtrantes, foram realizados ensaios de filtração para avaliar a eficiência de diferentes meios filtrantes utilizando duas áreas de filtração.

Primeiramente foram realizados testes preliminares para avaliar os rotâmetros existentes no Laboratório de Controle Ambiental, pois existem rotâmetros específicos para cada vazão. Também foram realizados testes para avaliar a área de filtração, já que foi possível utilizar as áreas de filtração de 5,3 e 40,7 cm<sup>2</sup> existentes no laboratório, ambas foram facilmente acopladas à Unidade Experimental.

Os rotômetros foram avaliados e percebeu-se que foram obtidas as mesmas vazões em cada rotômetro. Portanto foi utilizado o rotômetro de número 3 quando se utilizava a área de filtração de  $5,3 \text{ cm}^2$  e o rotômetro de número 14 para a área de filtração de  $40,7 \text{ cm}^2$ , pois esta área necessitava de um rotômetro com faixa de vazão maior. Quando foram feitos testes com o rotômetro de número 3, sendo utilizada a área de  $40,7 \text{ cm}^2$ , nas mesmas condições da área menor, a esfera chegava à escala limite do rotômetro e oscilava muito, portanto os resultados não eram precisos.

Após a realização de vários testes experimentais utilizando o mesmo equipamento, mesmo operador e nas mesmas condições, percebeu-se uma diferença maior que 5% entre os testes realizados. Com isso, a unidade experimental foi analisada e foram detectados alguns vazamentos que foram solucionados. As partes nas quais se localizavam as mangueiras que eram ligadas ao manômetro foram refeitas para que não ficasse nenhuma parte dentro do duto onde passava a corrente de ar. As sondas de amostragem também foram reajustadas, pois havia alguns pontos de vazamento. Antes de iniciar qualquer experimento era avaliado se havia vazamentos na Unidade Experimental e se a sonda de amostragem estava exatamente do centro do duto. Também foi avaliado se a tela, que atua como suporte para os meio filtrantes na área maior e que pode ser vista na Figura 26, exercia influência sobre a queda de pressão no equipamento. Os testes indicaram que a tela não apresentou queda de pressão com a variação da velocidade do ar.

Assim foram iniciados os testes experimentais que seguem o esquema da Unidade Experimental, Figura 16. O ar proveniente do compressor passava pelos filtros de ar, para eliminar impurezas presentes na corrente gasosa, parte deste seguia para o gerador de partículas, na qual foi utilizado um inalador comercial que liberavam gotas pequenas na parte superior e posteriormente passavam pelo secador de difusão a fim de remover a umidade das partículas geradas. Após a passagem pelos filtros, a vazão do ar ultrapuro que era transportado através do duto de escoamento era controlada por uma válvula do tipo agulha e uma válvula fina também podia ser utilizada para ajustar pequenas vazões. O regime de escoamento do aerossol no duto de escoamento da linha principal era estritamente laminar. O aerossol se juntava com o ar puro na linha principal e passavam pelo neutralizador para estabilizar possíveis cargas eletrostáticas presentes nas partículas geradas, assim seguia para o dispositivo de filtração onde era filtrado. As sondas de amostragem se dispunham antes e depois do dispositivo de filtração e eram conectadas ao SMPS. Na saída do sistema

encontrava-se o rotâmetro que media a vazão da linha principal e o aerossol remanescente era descartado.

Como já foi mencionado, o princípio de funcionamento do DMA depende de alguns parâmetros para que se tenha um bom desempenho. Feitosa (2009) avaliou o funcionamento do SMPS e determinou alguns parâmetros que serão utilizados neste trabalho para as duas áreas de filtração, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros pré-estabelecidos para configuração do SMPS

Área de filtração (cm <sup>2</sup> )	Impactador (cm)	Vazão de Amostragem (L/min)	<i>Sheath flow</i> (lpm)	<i>Aerosol flow</i> (lpm)	Tempos (s)		
					<i>Scan up</i>	<i>Retrace</i>	<i>Break</i>
5,3	0,0710	1,59	10	1	300	15	0
40,7	0,0710	12,21	10	1	300	15	0

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Os testes experimentais foram realizados utilizando diferentes áreas de filtração, uma possuía 2,6 cm e a outra 7,2 cm de diâmetro interno, respectivamente, 5,3 cm<sup>2</sup> e 40,7 cm<sup>2</sup> de área de filtração. Nos ensaios de eficiência, a velocidade superficial do ar foi mantida constante em 0,05 m/s. Esta velocidade foi estipulada por estar dentro da faixa de velocidade utilizada para o cálculo da permeabilidade deste trabalho e é adequada para filtração de partículas nanométricas. Feitosa (2009) observou que quando as velocidades de filtração eram baixas, a eficiência foi alta para faixas de tamanho entre 6,15 e 50 nm, mas para velocidades maiores, como as de 8 a 10 cm/s, o filtro de poliéster apresentou um baixo desempenho para diâmetros maiores que 70 nm, atingindo eficiências abaixo de 40%.

Depois de ligar o compressor, abrir as válvulas de ar, colocar a solução de 5 g/L de NaCl no inalador comercial, o meio filtrante no dispositivo de filtração, ligar a bomba e ajustar os parâmetros pré-estabelecidos, a queda de pressão era avaliada. Posteriormente, era iniciada a contagem das partículas antes do meio filtrante e em seguida modificava-se a posição da válvula de três vias para a análise do aerossol após o meio filtrante. Isso era feito

em triplicata, considerando o tempo zero. Após a tréplica, desligava-se a bomba e o dispositivo era deixado uma hora filtrando com a vazão constante de 1,59 L/min para a área menor e de 12,21 L/min para a área maior. Ao término da filtração, eram contadas mais três vezes as partículas antes e depois do meio filtrante, e analisada a queda de pressão. Esse experimento era realizado para obter as respectivas eficiências de coleta dos diferentes meios filtrantes.

Após realizados os experimentos as amostras foram levadas imediatamente no Laboratório de Caracterização Estrutural DEMa da Universidade Federal de São Carlos para serem preparadas para a análise, pois as partículas de NaCl não podem ficar expostas à umidade e o dessecador não consegue manter os meios filtrantes com as partículas sem umidade por muito tempo.

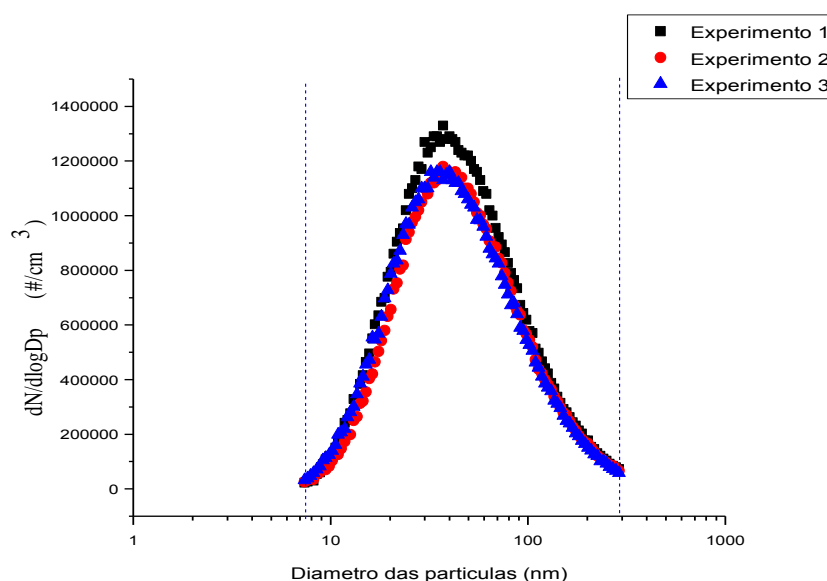
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os valores obtidos na determinação do diâmetro das fibras, da espessura e permeabilidade dos meios filtrantes, seguido do desempenho obtido de diferentes meios filtrantes fibrosos.

### 4.1. Distribuição granulométrica das partículas

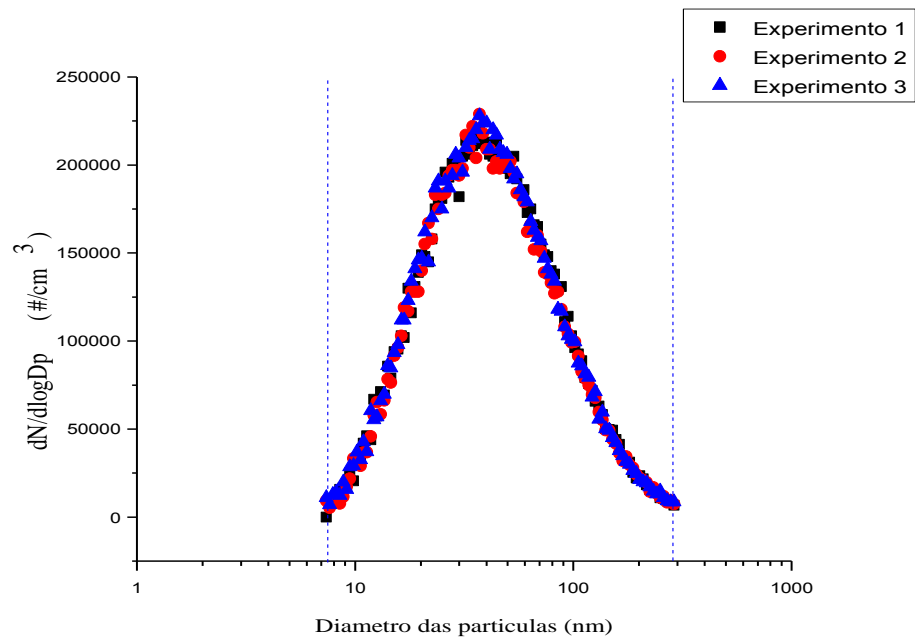
As distribuições granulométricas das nanopartículas geradas a partir da solução de cloreto de sódio podem ser vistas nas Figuras 37 e 38, para a área de filtração de 5,3 e 40,7 cm<sup>2</sup>, respectivamente. Todos os meios filtrantes obtiveram o mesmo padrão da curva da distribuição granulométrica, tanto para a área maior como para a área menor, foram detectadas partículas compreendidas na faixa entre 7,4 a 289 nm com o auxílio de um analisador de partículas por mobilidade elétrica (SMPS), acoplado à linha de filtração.

Figura 37 - Distribuição granulométrica das nanopartículas geradas antes da passagem pelo meio filtrante de Vidro com área de 5,3 cm<sup>2</sup>



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Figura 38 - Distribuição granulométrica das nanopartículas geradas antes da passagem pelo meio filtrante de Vidro com área de  $40,7 \text{ cm}^2$



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Verifica-se nas Figuras 37 e 38 que a quantidade de partículas geradas por volume foi maior para a área menor quando comparado à área de filtração maior. Isso pode ser explicado pelo fato que os experimentos realizados para as duas áreas de filtração utilizam a mesma velocidade superficial que foi de  $5 \text{ cm/s}$ , porém a vazão dos experimentos não foram as mesmas, sendo de  $1,59 \text{ L/min}$  para a área menor e de  $12,21 \text{ L/min}$  para a área maior.

A seguir estão apresentadas as Tabelas 2 e 3, com a mediana, média, média geométrica, moda e concentração total do número, diâmetro, superfície, volume e massa das partículas do meio filtrante de Vidro com área de  $5,3$  e  $40,7 \text{ cm}^2$ , respectivamente. Os valores das tabelas estão representados pela média dos três experimentos antes da passagem através do meio filtrante. As Tabelas 2 e 3 mostram que os valores para a geração de partículas são semelhantes para as duas áreas de filtração, mesmo o ar de diluição sendo diferente.

Tabela 2 - Média da distribuição granulométrica das nanopartículas geradas antes da passagem pelo meio filtrante de Vidro com área de 5,3 cm<sup>2</sup>

	Número de partículas	Diâmetro das partículas	Superfície das partículas	Volume das partículas	Massa das partículas
Mediana (nm)	41,93	72,73	123,53	174,60	174,60
Média (nm)	55,97	91,30	134,67	173,10	173,10
Média Geométrica (nm)	43,53	72,07	113,57	155,90	155,90
Moda (nm)	38,13	70,27	190,63	269,43	269,43
Concentração Total	929,67E <sup>+3</sup>	52,00	149,00E <sup>+8</sup>	334,67E <sup>+9</sup>	724,67
	(#/cm <sup>3</sup> )	(mm/cm <sup>3</sup> )	(nm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	(nm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	(µg/m <sup>3</sup> )

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Tabela 3- Média da distribuição granulométrica das nanopartículas geradas antes da passagem pelo meio filtrante de Vidro com área de 40,7 cm<sup>2</sup>

	Número de partículas	Diâmetro das partículas	Superfície das partículas	Volume das partículas	Massa das partículas
Mediana (nm)	40,13	68,90	113,03	160,70	160,70
Média (nm)	52,80	85,40	125,77	163,40	163,40
Média Geométrica (nm)	41,20	67,73	105,83	146,17	146,17
Moda (nm)	37,20	75,90	134,60	241,53	241,53
Concentração Total	169,67E <sup>+3</sup>	8,96	2,40E <sup>+9</sup>	50,37E <sup>+9</sup>	109,03
	(#/cm <sup>3</sup> )	(mm/cm <sup>3</sup> )	(nm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	(nm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	(µg/m <sup>3</sup> )

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

## 4.2. Caracterização dos meios filtrantes

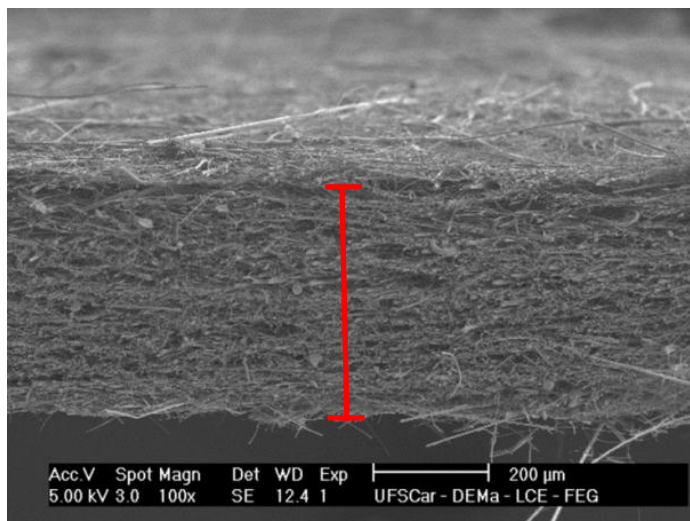
### 4.2.1. Espessura

Primeiramente, as cinco medidas diretas de diferentes regiões das amostras dos meios filtrantes foram obtidas por meio de um paquímetro digital e posteriormente foram feitas as



análises de imagens, conforme Figura 39. As médias destas medidas para cada meio filtrante estão dispostas na Tabela 4.

Figura 39 - Imagem da espessura do filtro HEPA obtida pelo MEV com aumento de 100 vezes



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Tabela 4 - Espessura de cada meio filtrante

Meio filtrante	Espessura ( $\mu\text{m}$ )	
	Paquímetro	Análise de imagens
HEPA	$324 \pm 16,80$	$383 \pm 27,80$
Vidro	$270 \pm 69,60$	$249 \pm 21,71$
Quartzo	$400 \pm 26,40$	$521 \pm 33,35$
Poliéster	$6300 \pm 412,80$	$10534 \pm 413,57$

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

O filtro de Vidro apresentou a menor espessura em ambos os métodos e isso é claramente perceptível ao realizar os experimentos, pois é um filtro muito sensível e deve se tomar muito cuidado ao manuseá-lo.

Segundo Dullien (1989), a espessura do meio filtrante deve ser maior que o diâmetro da fibra, porém fina o suficiente para se aproximar de uma simples camada de fibra no plano da seção.

#### 4.2.2. Diâmetro das fibras

Após realizar todo o procedimento apresentado na seção 3.2.2, encontrou-se um valor médio ponderado dos diâmetros das fibras para cada meio filtrante. O Apêndice A apresenta as imagens analisadas pelo Programa Image Pro Plus e suas respectivas tabelas com o número de fibras. A Tabela 5 apresenta o número de fibras com seus respectivos diâmetros e fração acumulada para o filtro HEPA.

Tabela 5 - Número de fibras com seus respectivos diâmetros e fração acumulada do filtro HEPA

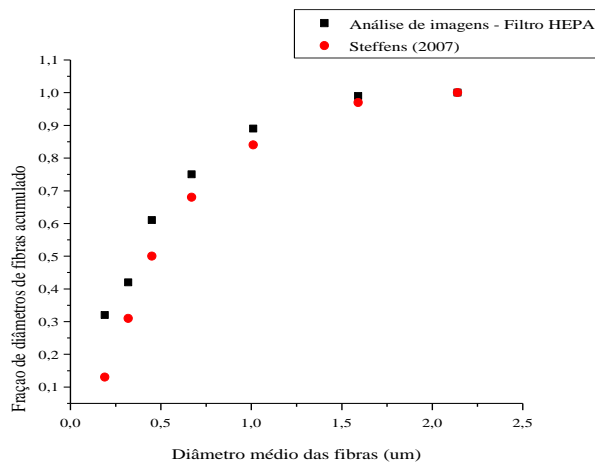
$\Delta d_i$	Diâmetro das fibras ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro médio das fibras ( $\mu\text{m}$ ) ( $d_i$ )	Número de fibras ( $n_i$ )	Fração de diâmetros de fibras acumulada	$\Delta n_i / \Delta d_i$
0,22	0,075-0,30	0,19	83	0,32	377,27
0,04	0,30-0,34	0,32	25	0,42	625,00
0,22	0,34-0,56	0,45	51	0,61	231,82
0,23	0,56-0,79	0,67	34	0,75	147,83
0,45	0,79-1,24	1,01	38	0,89	84,44
0,7	1,24-1,94	1,59	26	0,99	37,14
0,41	1,94-2,35	2,14	2	1,00	4,88

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Pode-se verificar na Tabela 5 que o maior número de fibras se encontra entre a faixa de menor diâmetro das fibras (0,075-0,30 $\mu\text{m}$ ) e há poucas fibras na faixa de 1,94-2,35  $\mu\text{m}$ , o que indica que o filtro HEPA possui fibras com diâmetros pequenos e isso o torna altamente eficiente. Com os valores da Tabela 5 foi possível fazer um gráfico da distribuição das fibras que se encontra na Figura 40.

Por meio da Figura 40 é possível notar que a distribuição das fibras realizado nesse trabalho ficou muito próximo quando comparado ao de STEFFENS (2007).

Figura 40 - Gráfico da distribuição das fibras do filtro HEPA



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

A Tabela 6 apresenta o número de fibras com seus respectivos diâmetros e fração acumulada para o filtro de Vidro.

Tabela 6 - Número de fibras com seus respectivos diâmetros e fração acumulada do filtro de Vidro

$\Delta d_i$	Diâmetro das fibras ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro médio das fibras ( $\mu\text{m}$ ) ( $d_i$ )	Número de fibras ( $n_i$ )	Fração de diâmetros de fibras acumulada	$\Delta n_i / \Delta d_i$
0,22	0,075-0,30	0,19	297	0,68	1350,00
0,04	0,30-0,34	0,32	17	0,72	425,00
0,22	0,34-0,56	0,45	51	0,84	231,82
0,23	0,56-0,79	0,67	22	0,89	95,65
0,45	0,79-1,24	1,01	27	0,95	60,00
0,7	1,24-1,94	1,59	20	1,00	28,57
0,41	1,94-2,35	2,14	1	1,00	2,44

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

É possível notar por meio da Tabela 6 que a maior quantidade de fibras encontra-se na faixa de tamanho de 0,075-0,30  $\mu\text{m}$ . Com isso é possível perceber que grande parte do filtro de Vidro é formada por fibras de tamanho pequeno.

A Tabela 7 apresenta o número de fibras com seus respectivos diâmetros e fração acumulada para o filtro de Quartzo.

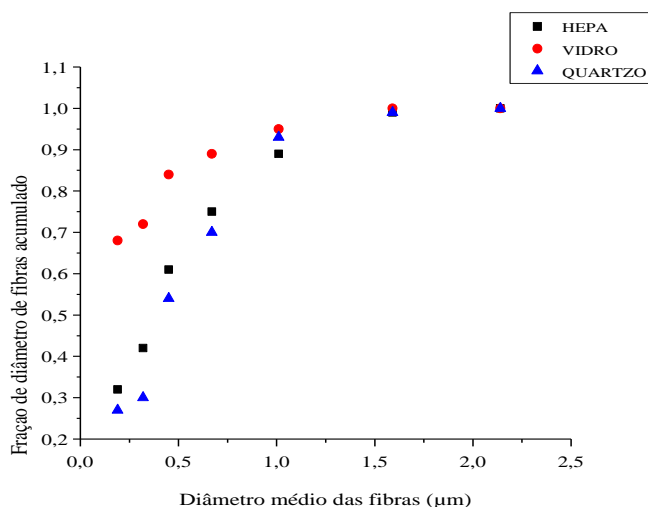
Tabela 7 - Número de fibras com seus respectivos diâmetros e fração acumulada do filtro de Quartzo

$\Delta d_i$	Diâmetro das fibras ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro médio das fibras ( $\mu\text{m}$ ) ( $d_i$ )	Número de fibras ( $n_i$ )	Fração de diâmetros de fibras acumulada	$\Delta n_i / \Delta d_i$
0,22	0,075-0,30	0,19	100	0,27	454,55
0,04	0,30-0,34	0,32	13	0,30	325,00
0,22	0,34-0,56	0,45	87	0,54	395,45
0,23	0,56-0,79	0,67	61	0,70	265,22
0,45	0,79-1,24	1,01	85	0,93	188,89
0,7	1,24-1,94	1,59	24	0,99	34,29
0,41	1,94-2,35	2,14	2	1,00	4,88

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Pode-se verificar na Tabela 7 que o maior número de fibras se encontra entre a faixa de menor diâmetro das fibras (0,075-0,30  $\mu\text{m}$ ) e há poucas fibras na faixa de 1,94-2,35  $\mu\text{m}$ .

Figura 41 - Gráfico da distribuição das fibras do filtro HEPA, de Vidro e de Quartzo



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Por meio da Figura 41 é possível notar que a curva de distribuição das fibras do filtro HEPA, de Vidro e de Quartzo se comportam da mesma forma, com uma única diferença que o filtro de Vidro possui a maior quantidade de fibras pequenas.

Utilizando a Equação 40 foi possível obter o diâmetro médio das fibras dos meios filtrantes que estão dispostos na Tabela 8, com exceção do filtro de Poliéster que possui fibras com diâmetros homogêneos.

Tabela 8 - Diâmetro médio das fibras de cada meio filtrante

Meio filtrante	HEPA	Vidro	Quartzo	Poliéster
Diâmetro das fibras ( $\mu\text{m}$ )	0,59	0,37	0,62	20,89

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Como pode ser visto na Tabela 8, o filtro de Vidro apresentou o menor diâmetro médio das fibras em relação aos outros meios filtrantes. Já as fibras do filtro de poliéster são bem maiores que dos outros meios filtrantes, o que o torna menos eficiente. A diferença deste em relação ao filtro de Vidro foi de aproximadamente 98%.

STEFFENS (2007) também avaliou o diâmetro de fibras para o filtro de Poliéster e obteve um diâmetro médio de  $16 \mu\text{m} \pm 0,06$ .

#### 4.2.3. Permeabilidade

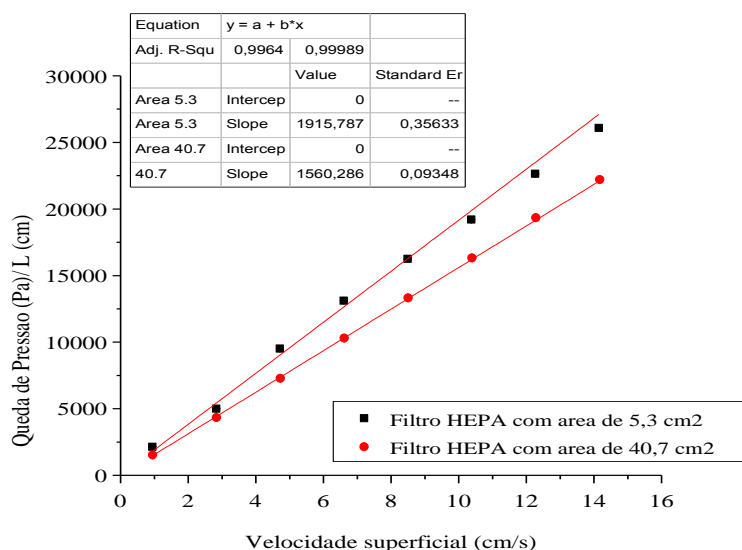
Nessa seção serão apresentados os valores das constantes de permeabilidade encontrados para cada meio filtrante, com as áreas de  $5,3 \text{ cm}^2$  e  $40,7 \text{ cm}^2$ , e seus respectivos desvios padrões, erros padrões e intervalos de confiança.

A constante de permeabilidade do filtro limpo foi obtida por meio de dados experimentais utilizando a Equação de Darcy (Equação 22). 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 todos os meios filtrantes ( $k_1$ ).

A velocidade foi variada de 1 cm/s até 15 cm/s e a cada 1 cm/s foi analisada a queda de pressão, a qual foi obtida por meio de um manômetro. Para a obtenção da constante de permeabilidade, optou-se pela permeabilidade obtida em função da média dos valores das cinco réplicas. Foram realizadas as cinco réplicas para obter um número maior de amostras e com isso calcular o valor dos desvios padrões, erros padrões e intervalos de confiança.

A Figura 42 apresenta a curva de queda de pressão pela espessura ( $\Delta P/L$ ) em função da velocidade superficial para o filtro HEPA utilizando a área de filtração de 5,3 e 40,7 cm<sup>2</sup>.

Figura 42 -  $\Delta P/L$  em função da velocidade superficial do gás para o Filtro HEPA



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Como pode ser visto na Figura 42, a queda de pressão para a área de 40,7 cm<sup>2</sup> foi menor do que para a área de 5,3 cm<sup>2</sup>. Este parâmetro é avaliado para se obter um melhor desempenho dos meios filtrantes.

Os valores das constantes de permeabilidade para os filtros avaliados foram obtidos pela igualdade do coeficiente angular da curva com a razão  $\mu/k1$  e encontram-se na Tabela 9. O coeficiente angular foi determinado a partir de um ajuste linear ( $y=ax$ ) para cada área da Figura 42.

Tabela 9 - Constante de permeabilidade do Filtro HEPA limpo

Área filtrante do filtro HEPA (cm <sup>2</sup> )	Constante de permeabilidade (cm <sup>2</sup> )
5,3	$9,62E^{-09} \pm 1,78E^{-12}$
40,7	$1,18E^{-08} \pm 9,09E^{-13}$

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Pode-se notar na Tabela 9 que o filtro HEPA possui constantes de permeabilidade próximas para ambas áreas de filtração, isto é, os valores apresentam escalas de grandeza equivalentes. No entanto a diferença entre os valores foi de aproximadamente 18%, estando dentro do desvio aceitável em engenharia de cerca de 20%. Dessa forma, foram avaliados os desvios padrões, erros padrões e intervalos de confiança para cada média de queda de pressão, como pode ser visto nas Tabelas 10 e 11, respectivamente, com a área de 5,3 e 40,7 cm<sup>2</sup>.

Com isso, pode-se notar que com o aumento da queda de pressão, os valores de desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança em geral foram aumentando, provavelmente pelo fato de que quando se atinge altas velocidades o rotâmetro não é tão estável quando se trabalha com baixas velocidades.

Tabela 10 - Desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança 95% para o Filtro HEPA com área de 5,3 cm<sup>2</sup>

Média da Queda de Pressão (Pa)	Desvio Padrão (%)	Erro padrão (%)	Intervalo de Confiança 95%
61,20	1,64	0,73	2,04
143,20	3,11	1,39	3,87
272,20	4,21	1,88	5,22
375,20	6,50	2,91	8,06
464,80	6,83	3,06	8,48
549,00	7,42	3,32	9,21
647,40	19,98	8,94	24,81
745,80	19,02	8,51	23,61

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Tabela 11 - Desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança 95% para o Filtro HEPA com área de 40,7 cm<sup>2</sup>

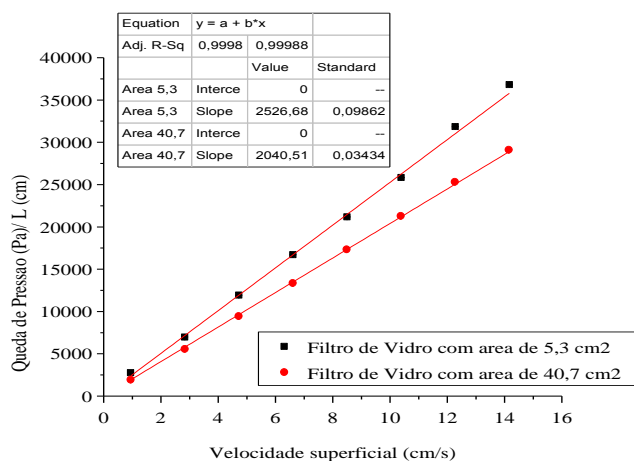
Média da Queda de Pressão (Pa)	Desvio Padrão (%)	Erro padrão (%)	Intervalo de Confiança 95%
43,80	1,64	0,73	2,04
123,80	0,84	0,37	1,04
208,40	1,14	0,51	1,42
294,60	1,52	0,68	1,88
381,20	2,17	0,97	2,69
466,80	2,86	1,28	3,56
553,40	2,51	1,12	3,12
635,20	3,77	1,69	4,68

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Comparando a área menor com a área maior, percebe-se que tanto o desvio padrão, como o erro padrão e a confiança apresentam valores maiores para a área de 5,3 cm<sup>2</sup>. Isto representa que o valor da constante de permeabilidade para a área menor não é tão confiável como para a área maior.

Da mesma forma como foi obtida para o filtro HEPA, a permeabilidade do filtro limpo de Vidro foi obtida por meio de dados experimentais utilizando a Equação de Darcy (Equação 22). A Figura 43 ilustra a curva de queda de pressão/espessura ( $\Delta P / L$ ) em função da velocidade superficial do gás ( $v_s$ ) para o Filtro de Vidro.

Figura 43 -  $\Delta P/L$  em função da velocidade superficial do gás para o Filtro de Vidro



Fonte: Acervo Pessoal (2014)



É possível perceber por meio da Figura 43 que a queda de pressão foi maior para o filtro menor. Os valores das constantes de permeabilidade para o filtro de Vidro limpo com a área de 5,3 e 40,7 cm<sup>2</sup> estão presentes na Tabela 12.

Tabela 12 - Constante de permeabilidade do Filtro de Vidro limpo

Área filtrante do filtro de Vidro (cm <sup>2</sup> )	Constante de permeabilidade (cm <sup>2</sup> )
5,3	$7,28E^{-09} \pm 2,73E^{-13}$
40,7	$9,04E^{-09} \pm 3,29E^{-13}$

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

As constantes de permeabilidade do filtro de Vidro para ambas as áreas foram aproximadamente iguais, com uma diferença de 19% entre as áreas. Como no experimento realizado com o Filtro HEPA também foram feitos cálculos dos desvios padrões, erros padrões e confiança para ambas as áreas e estão dispostos nas Tabelas 13 e 14.

Por meio das Tabelas 13 e 14, verifica-se que os valores do desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança foram aumentando com o aumento da queda de pressão para ambas as áreas e que para a área de 5,3 cm<sup>2</sup> esses valores são ainda maiores.

Tabela 13 - Desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança 95% para o Filtro de Vidro com área de 5,3 cm<sup>2</sup>

Média da Queda de Pressão (Pa)	Desvio Padrão (%)	Erro padrão (%)	Intervalo de Confiança 95%
74,20	1,30	0,58	1,62
1870	8,97	4,01	11,14
319,60	3,21	1,44	3,98
4480	0,71	0,32	0,88
567,60	2,88	1,29	3,58
692,20	5,22	2,33	6,47
853,80	17,46	7,81	21,67
9870	31,29	13,99	38,84

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

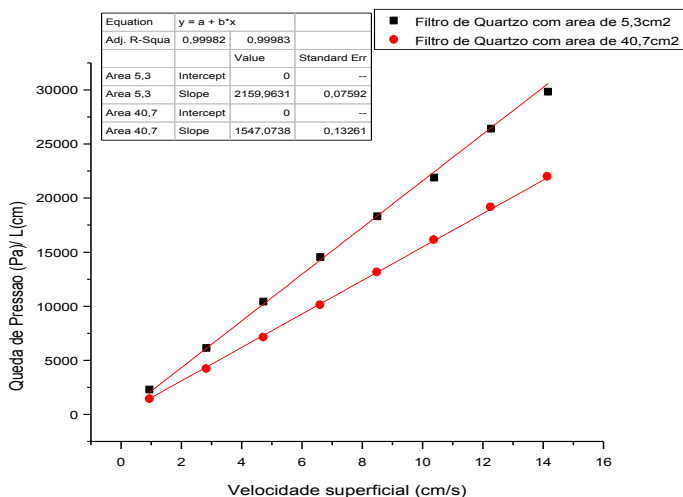
Tabela 14 - Desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança 95% para o Filtro de Vidro com área de 40,7 cm<sup>2</sup>

Média da Queda de Pressão (Pa)	Desvio Padrão (%)	Erro padrão (%)	Intervalo de Confiança 95%
52,20	0,45	0,20	0,56
149,60	0,55	0,24	0,68
253,20	0,45	0,20	0,56
358,20	1,30	0,58	1,62
464,80	0,45	0,20	0,56
571,00	0,71	0,32	0,88
678,80	1,92	0,86	2,39
780,40	1,67	0,75	2,08

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

A Figura 44 apresenta o gráfico de  $\Delta P/L$  em função da velocidade superficial do gás para o filtro de Quartzo para a área de filtração de 5,3 cm<sup>2</sup> e 40,7 cm<sup>2</sup>.

Figura 44 -  $\Delta P/L$  em função da velocidade superficial do gás para o Filtro de Quartzo



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Por meio da Figura 44 é visível que a queda de pressão para o Filtro de Quartzo com área de 40,7 cm<sup>2</sup> é menor comparando com a de menor área. Foi obtido o valor da constante de permeabilidade para o Filtro de Quartzo com a área de 5,3 e de 40,7 cm<sup>2</sup> como foi feito para os filtros anteriores e estes valores estão dispostos na Tabela 15.

Tabela 15 - Constante de permeabilidade do Filtro de Quartzo limpo

Área filtrante do filtro de Quartzo (cm <sup>2</sup> )	Constante de permeabilidade (cm <sup>2</sup> )
5,3	$8,52E^{-09} \pm 3,87E^{-15}$
40,7	$1,19E^{-08} \pm 1,21E^{-12}$

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

A Tabela 15 mostra que os valores da constante de permeabilidade não foram tão próximos, com diferença de 28%. O passo seguinte foi avaliar o desvio padrão, o erro padrão e o intervalo de confiança de 95% que estão dispostos nas Tabelas 16 e 17.

Tabela 16 - Desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança 95% para o Filtro de Quartzo com área de 5,3 cm<sup>2</sup>

Média da Queda de Pressão (Pa)	Desvio Padrão (%)	Erro padrão (%)	Intervalo de Confiança 95%
91	1,10	0,49	1,36
244	0,45	0,20	0,56
416	1,79	0,80	2,22
577	2,05	0,92	2,54
728	2,19	0,98	2,72
870	3,08	1,38	3,83
1050	1,30	0,58	1,62
1138	27,87	12,46	34,60

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Tabela 17 - Desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança 95% para o Filtro de Quartzo com área de 40,7 cm<sup>2</sup>

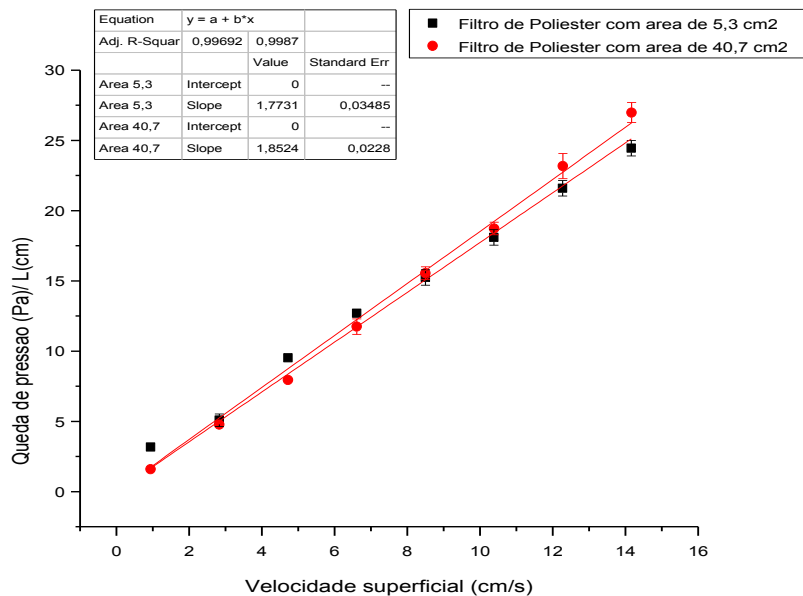
Média da Queda de Pressão (Pa)	Desvio Padrão (%)	Erro padrão (%)	Intervalo de Confiança 95%
58,20	1,51	0,67	1,87
168,60	1,32	0,59	1,63
284,60	3,01	1,35	3,74
403,40	1,75	0,78	2,17
523,80	3,50	1,57	4,35
643,40	3,01	1,35	3,74
763,60	4,13	1,85	5,13
876,20	4,79	2,14	5,95

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Ambos os valores de desvio padrão, o erro padrão e o intervalo de confiança de 95% aumentaram com o aumento da queda de pressão. Mas foi visível que para a maior queda de pressão obtida no Filtro de Quartzo com área de 5,3 cm<sup>2</sup> esses valores foram muito maiores, como pode ser visto na Tabela 16. Isso provavelmente pode ser explicado pelo fato que ao atingir velocidades altas a esfera do rotâmetro oscilava e não era possível conseguir um resultado muito preciso.

Por fim, foi feito o teste de permeabilidade com o Filtro de Poliéster limpo e obteve-se a curva de permeabilidade presente na Figura 45.

Figura 45 -  $\Delta P/L$  em função da velocidade superficial do gás para o Filtro de Poliéster



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Por meio da Figura 45, foi possível perceber que a queda de pressão para o filtro de Poliéster com a área de 5,3 cm<sup>2</sup> era maior que da área de 40,7 cm<sup>2</sup> para velocidades superficiais iniciais e que ao longo do experimento isso se inverteu. Utilizando a Equação de Darcy (Equação 22) foi possível encontrar as constantes de permeabilidade, que se apresentam na Tabela 18.

Tabela 18 - Constante de permeabilidade do Filtro de Poliéster limpo

Área filtrante do filtro de Poliéster (cm <sup>2</sup> )	Constante de permeabilidade (cm <sup>2</sup> )
5,3	1,04E <sup>-05</sup> ± 2,00E <sup>-7</sup>
40,7	9,94E <sup>-06</sup> ± 1,21E <sup>-7</sup>

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Mediante os valores da constante de permeabilidade encontrados na Tabela 18 e mesmo a curva de permeabilidade ter se invertido no meio do experimento, verificou-se que foram muito próximos esses valores para as duas áreas em análise, com uma diferença de apenas 4%.

Nos gráficos construídos para determinar a curva de permeabilidade foram utilizados a média da queda de pressão dividida pela espessura, a velocidade superficial e o desvio padrão. A barra do desvio padrão se encontra nos gráficos, mas como são valores pequenos acabam não sendo perceptíveis.

Depois de avaliar o valor da constante de permeabilidade verificou-se o valor do desvio padrão, do erro padrão e da confiança para ambas as áreas, na qual encontram-se nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19 - Desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança 95% para o Filtro de Poliéster com área de 5,3 cm<sup>2</sup>

Média da Queda de Pressão (Pa)	Desvio Padrão (%)	Erro padrão (%)	Intervalo de Confiança 95%
2,00	0	0	0
3,20	0,45	0,20	0,56
6,00	0	0	0
8,00	0	0	0
9,60	0,55	0,24	0,68
11,40	0,55	0,24	0,68
13,60	0,55	0,24	0,68
15,40	0,55	0,24	0,68

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Tabela 20 - Desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança 95% para o Filtro de Poliéster com área de 40,7 cm<sup>2</sup>

Média da Queda de Pressão (Pa)	Desvio Padrão (%)	Erro padrão (%)	Intervalo de Confiança 95%
1,00	0	0	0
3,00	0	0	0
5,00	0	0	0
7,40	0,55	0,24	0,68
9,80	0,45	0,20	0,56
11,80	0,45	0,20	0,56
14,60	0,89	0,40	1,11
17,00	0,71	0,32	0,88

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Os valores do desvio padrão, o erro padrão e o intervalo de confiança de 95% para o Filtro de Poliéster também variaram como os outros meios filtrantes, aumentaram com a queda de pressão, tanto para a área menor quanto para a área maior. Mas para o Filtro de Poliéster estes valores foram muito menores comparados aos outros meios filtrantes e mesmo comparando as duas áreas do mesmo filtro a diferença foi de apenas 4%. Vale ressaltar que por ser muito mais permeável, o filtro de poliéster apresentou baixos valores de queda de pressão para as velocidades avaliadas o que reflete nos baixos valores dos desvios padrões e erros padrões encontrados. Além disso, os menores valores de queda de pressão medidos ficaram dentro da faixa de precisão do manômetro que era de  $\pm 1$ Pa.

Tabela 21 - Constante de permeabilidade para diferentes meios filtrantes

Meios filtrantes	Constante de permeabilidade (cm <sup>2</sup> )	
	Área de 5,3 cm <sup>2</sup>	Área de 40,7 cm <sup>2</sup>
HEPA	$9,62E^{-09} \pm 1,78E^{-12}$	$1,18E^{-08} \pm 9,09E^{-13}$
Vidro	$7,28E^{-09} \pm 2,73E^{-13}$	$9,04E^{-09} \pm 3,29E^{-13}$
Quartzo	$8,52E^{-09} \pm 3,87E^{-15}$	$1,19E^{-08} \pm 1,21E^{-12}$
Poliéster	$1,04E^{-05} \pm 2,00E^{-7}$	$9,94E^{-06} \pm 1,21E^{-7}$

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Como pode ser visto na Tabela 21, o valor da constante de permeabilidade para o Filtro HEPA com área de  $5,3 \text{ cm}^2$  ficou menor, mas próxima quando comparada à área maior, uma vez que os experimentos foram realizados com o mesmo meio filtrante. E isso também ocorreu com o Filtro de Vidro e de Quartzo, foram obtidos valores próximos analisando as duas áreas de filtração. Comparando os meios filtrantes entre si percebe-se que a menor constante de permeabilidade foi obtida com o filtro de Vidro com área de  $5,3 \text{ cm}^2$ , a variação no valor da constante de permeabilidade foi na faixa de 20% entre eles, com exceção do Filtro de Poliéster que obteve uma diferença de 99% do Filtro de Vidro, o que era esperado já que trata-se de um filtro com fibras homogêneas com diâmetros maiores que os demais filtros.

Comparando os valores do desvio padrão, erro padrão e intervalo de confiança dos meios filtrantes HEPA, de Vidro e de Quartzo, pode-se observar que houve uma variação significativa entre as duas áreas de filtração. Essa discrepância provavelmente ocorreu pela imprecisão no ajuste da vazão do ar nos rotômetros, conforme aumentava-se a velocidade superficial para a menor área de filtração.

A queda de pressão é um parâmetro muito importante na escolha de um meio filtrante. Avaliando os meios filtrantes verificou-se que todos obtiveram uma menor queda de pressão nos experimentos realizados com a área de filtração de  $40,7 \text{ cm}^2$ , com exceção do Filtro de Poliéster, para o qual a curva de permeabilidade foi invertida, aproximadamente em  $9 \text{ cm/s}$ . Comparando esses meios filtrantes utilizando a maior área de filtração, o filtro de Microfibras de Quartzo foi o que obteve menor queda de pressão durante os testes de permeabilidade.

### **4.3. Eficiência dos meios filtrantes**

Nessa seção serão avaliados os meios filtrantes HEPA, de Vidro, de Micro Quartzo e de Poliéster, de acordo com a eficiência para as áreas de  $5,3 \text{ cm}^2$  e  $40,7 \text{ cm}^2$ .

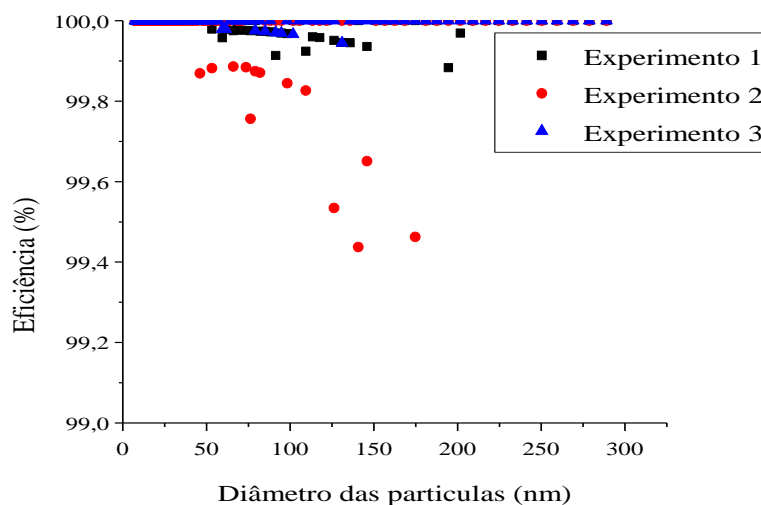
A realização de testes preliminares foi imprescindível para avaliar as condições operacionais determinantes para um bom funcionamento da unidade experimental. E por meio disso foi possível iniciar os experimentos.

Os testes experimentais foram feitos para avaliar o desempenho dos meios filtrantes na coleta de nanopartículas, tanto para a área de filtração de  $5,3 \text{ cm}^2$  como para a área de

40,7 cm<sup>2</sup>. Para a geração de partículas foi utilizada a solução de 5 g/L de NaCl, operando a uma pressão de 17236,90 Pa. Os experimentos foram realizados a uma velocidade superficial constante de 5 cm/s e os parâmetros representados pela Tabela 1.

A Figura 46 representa a eficiência de coleta da deposição das partículas no tempo zero, quando se inicia a filtração de partículas, para o Filtro HEPA com área de 5,3 cm<sup>2</sup>. Os três experimentos da legenda representam os testes realizados um seguido do outro e cada um com a análise da contagem de partículas antes e depois do meio filtrante. A contagem de partículas antes do meio filtrante durava 315s e depois do meio filtrante era o mesmo tempo. Assim, cada experimento durava em torno de dez minutos e o total dos três experimentos meia hora. Após isso, a bomba era desligada e iniciava-se a contagem de uma hora de filtração. Depois dessa uma hora de filtração e mais a meia hora dos experimentos, eram realizados novamente três experimentos para a contagem das partículas antes e depois do meio filtrante que está representado pela Figura 47. Os experimentos 4, 5 e 6 representam os testes realizados após uma hora de filtração, um seguido do outro e cada um com a análise da contagem de partículas antes e depois do meio filtrante. Todo o procedimento tinha aproximadamente duas horas no total.

Figura 46 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no tempo zero da filtração utilizando o Filtro HEPA e a área de filtração de 5,3 cm<sup>2</sup>

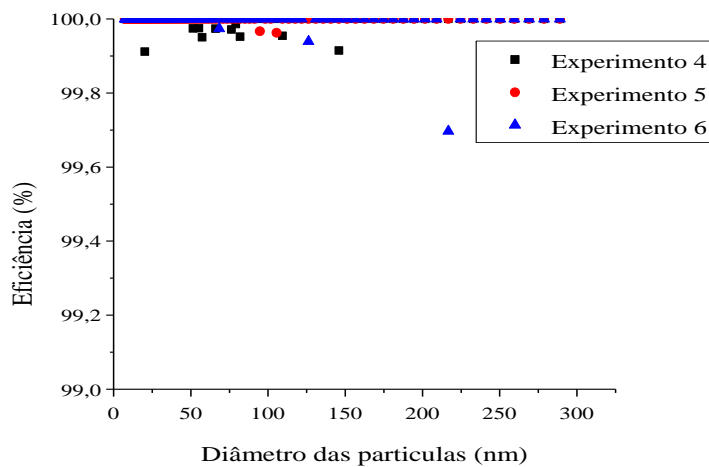


Fonte: Acervo Pessoal (2014)



Por meio da Figura 46 é possível visualizar que algumas partículas conseguem atravessar o meio filtrante nos primeiros minutos de filtração, isso se torna mais perceptível para o experimento 2. Mesmo assim a eficiência é maior que 99%.

Figura 47 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no final da filtração utilizando o Filtro HEPA e a área de filtração de 5,3 cm<sup>2</sup>

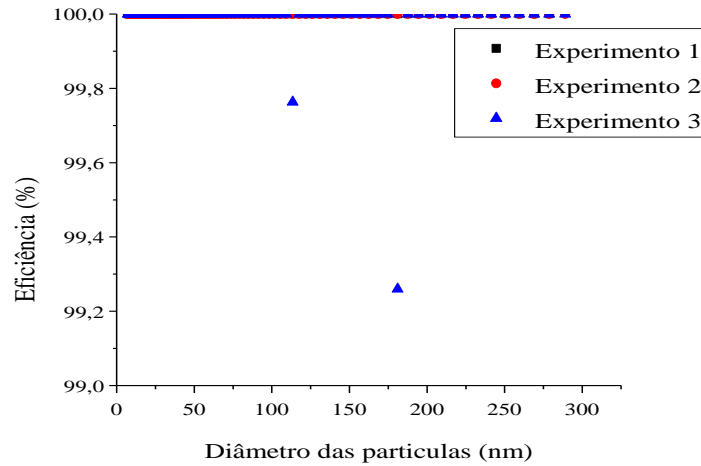


Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Na Figura 47 pode-se observar que não ocorreu essa passagem mais acentuada das partículas através do meio filtrante, elas ficaram depositadas, e isso possivelmente pode ser explicado pelo fato de que as partículas depositadas nos primeiros minutos de filtração ajudam na retenção das novas partículas que passavam.

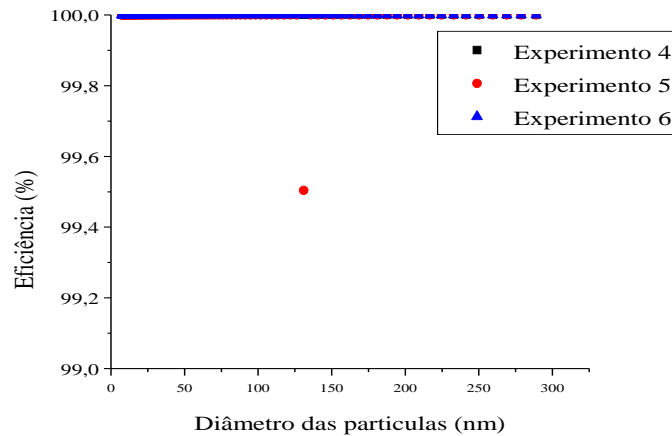
Depois de realizado o experimento para o Filtro HEPA com a área de filtração de 5,3 cm<sup>2</sup>, foi realizado o experimento com o Filtro HEPA para a área de 40,7 cm<sup>2</sup>. Também foram realizados em triplicata no tempo zero (Figura 48) e depois da filtração mais três experimentos (Figura 49).

Figura 48 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no tempo zero da filtração utilizando o Filtro HEPA e a área de filtração de 40,7 cm<sup>2</sup>



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Figura 49 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no final da filtração utilizando o Filtro HEPA e a área de filtração de 40,7 cm<sup>2</sup>

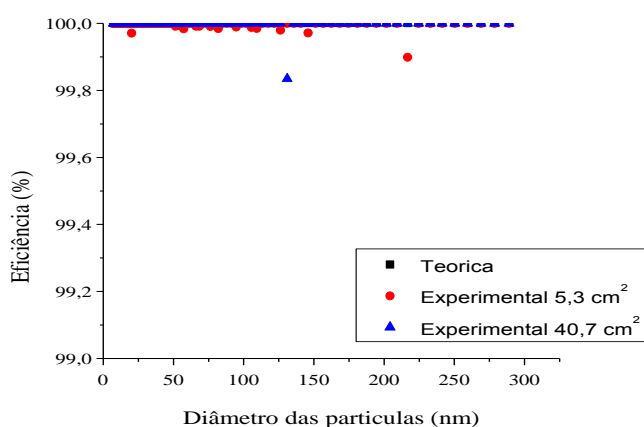


Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Comparando as Figuras 48 e 49 pode-se verificar que o comportamento de penetração das partículas no tempo zero e após 1 hora de filtração foram similares, como observada nas Figuras 46 e 47 para a área menor. Essa leve penetração das partículas que ocorreu para a área menor (Figuras 46 e 47), provavelmente pode ter ocorrido devido à erros experimentais, como partículas que se desprenderam do filtro ou estavam presentes na linha de filtração.

Após a análise das eficiências experimentais utilizando o filtro HEPA, esses resultados foram comparados com a eficiência teórica, obtida por meio da Equação de Liu e Rubow (1990) e estão dispostos na Figura 50. A eficiência teórica foi calculada por meio da porosidade (0,91) obtida por Steffens (2007).

Figura 50 - Eficiência teórica e experimental do filtro HEPA com área de 5,3 e 40,7 cm<sup>2</sup>



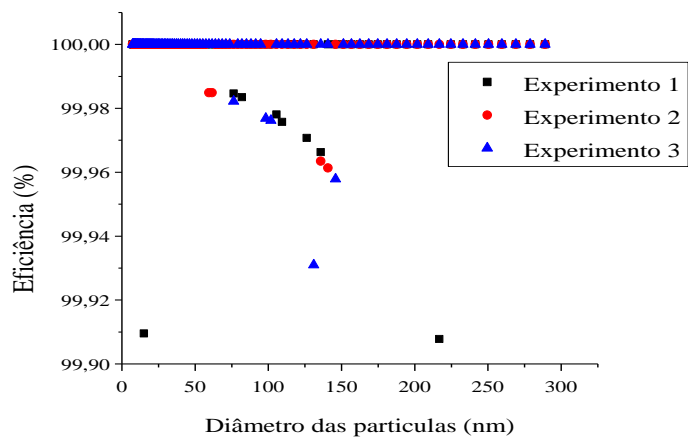
Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Observa-se na Figura 50 que as eficiências experimentais das áreas de 5,3 e 40,7 cm<sup>2</sup> ficaram muito próximas quando comparadas com a eficiência teórica.

Todos os cálculos para determinação da eficiência teórica podem ser vistos no Apêndice B. Como pode ser visto na Tabela B.1 os mecanismos de eficiência predominantes para esse filtro na faixa de tamanho de partículas estudada são os mecanismos difusional e interceptação direta. Isso pode ser constatado pelos valores de  $\eta_d$  e  $\eta_{id}$  apresentados na Tabela B.1. Para baixos valores de diâmetro de partícula o mecanismo difusional predomina e com o aumento do diâmetro da partícula o mecanismo de interceptação direta vai tornando-se relevante.

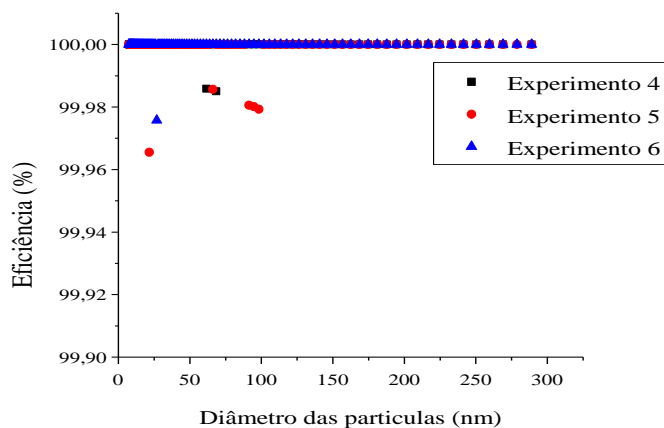
O mesmo experimento feito para o Filtro HEPA para avaliar o desempenho de remoção das nanopartículas também foi feito para o Filtro de Vidro nas mesmas condições operacionais. As Figuras 51 e 52 representam os gráficos de eficiência de coleta para o Filtro de Vidro para a área de filtração de 5,3 cm<sup>2</sup>, no início e no final da filtração, respectivamente.

Figura 51 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no tempo zero da filtração utilizando o Filtro de Vidro e a área de filtração de 5,3 cm<sup>2</sup>



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Figura 52 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no final da filtração utilizando o Filtro de Vidro e a área de filtração de 5,3 cm<sup>2</sup>

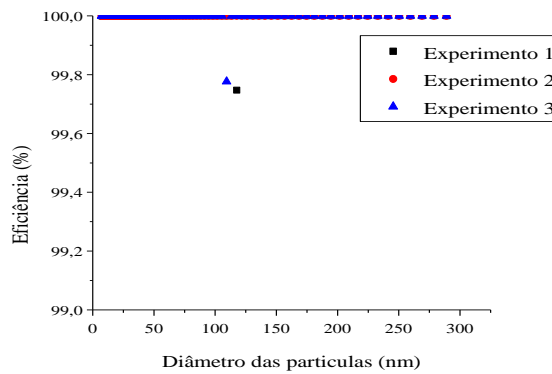


Fonte: Acervo Pessoal (2014)

É possível perceber que no tempo zero e no final da filtração para o Filtro de Vidro com área de 5,3 cm<sup>2</sup>, os gráficos se comportaram como o Filtro HEPA com área menor, porém houve uma menor quantidade de partículas que conseguiram atravessar o meio filtrante com eficiência maior que 99%.

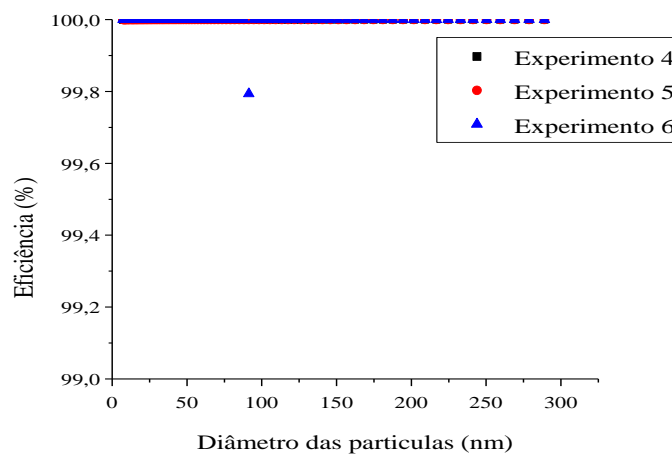
Foi realizado também teste de eficiência antes e depois da filtração com o Filtro de Vidro com área de  $40,7 \text{ cm}^2$ , estes resultados estão dispostos nas Figuras 53 e 54, respectivamente.

Figura 53 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no tempo zero da filtração utilizando o Filtro de Vidro e a área de filtração de  $40,7 \text{ cm}^2$



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Figura 54 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no final da filtração utilizando o Filtro de Vidro e a área de filtração de  $40,7 \text{ cm}^2$



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

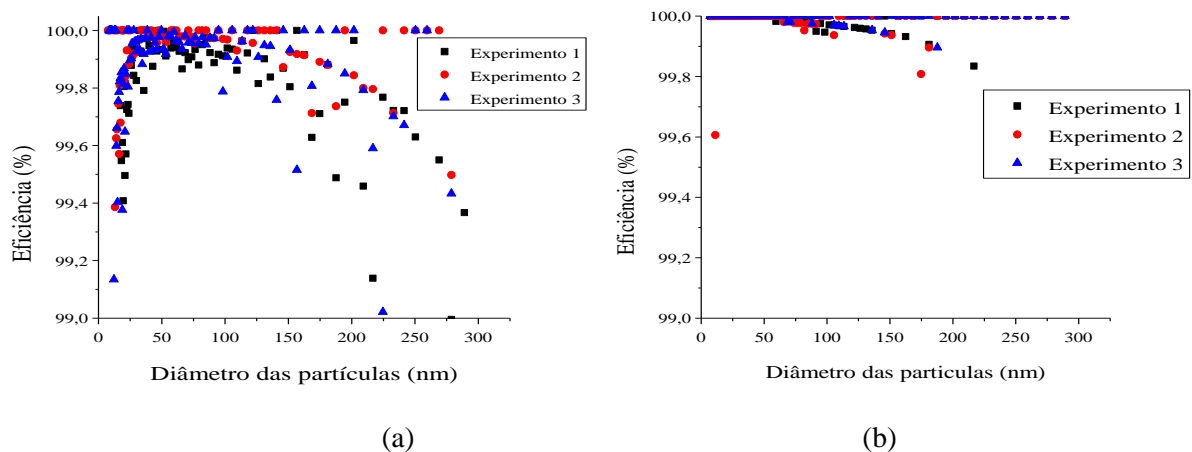
Pode-se verificar que a eficiência antes e depois da filtração com o Filtro de Vidro com área de  $40,7 \text{ cm}^2$  se comportou como o Filtro HEPA para a mesma área de filtração,

diminuindo o número de partículas que atravessaram o meio filtrante no final de toda a filtração.

Não foi possível fazer uma comparação da eficiência experimental com a eficiência teórica, pois não foi possível encontrar o valor da porosidade do meio filtrante de vidro na literatura.

Dando continuidade aos experimentos, foram feitos testes experimentais da eficiência de coleta antes e ao final da deposição das partículas com o Filtro de Quartzo, ou seja, do filtro limpo até alcançar aproximadamente duas horas de filtração. Percebeu-se que um grande número de partículas havia penetrado o meio filtrante (Figura 55 a). Assim, fazendo uma análise na linha de filtração foram detectados alguns pontos com vazamento. Foram tomadas as devidas medidas para conter esses vazamentos e novos experimentos foram realizados (Figura 55 b).

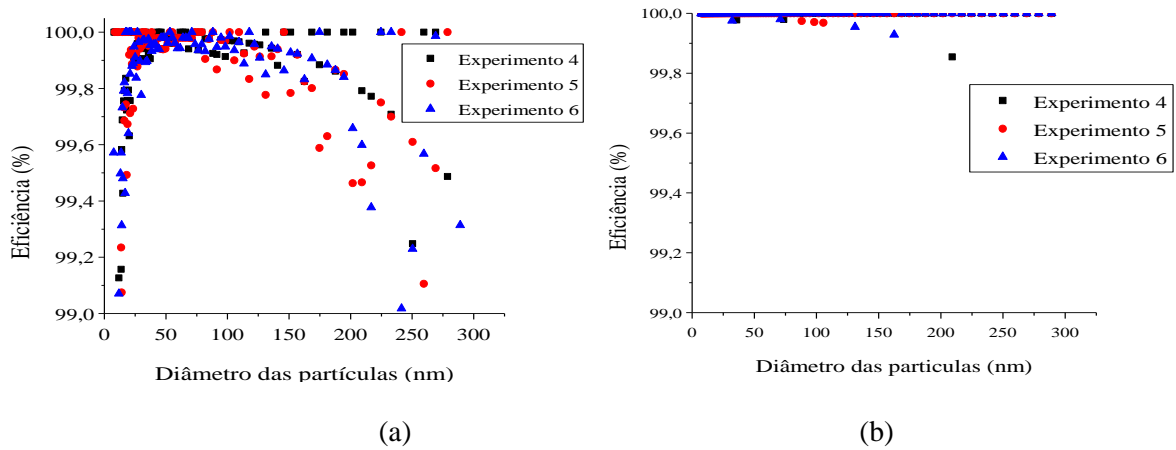
Figura 55 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no tempo zero da filtração utilizando o Filtro de Quartzo e a área de filtração de  $5,3 \text{ cm}^2$  a) com vazamento b) sem vazamento



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Pode-se verificar que houve uma leve penetração das partículas no meio filtrante de Quartzo quando comparado com o meio filtrante de Vidro, mas ao longo da filtração a penetração das partículas também diminuiu.

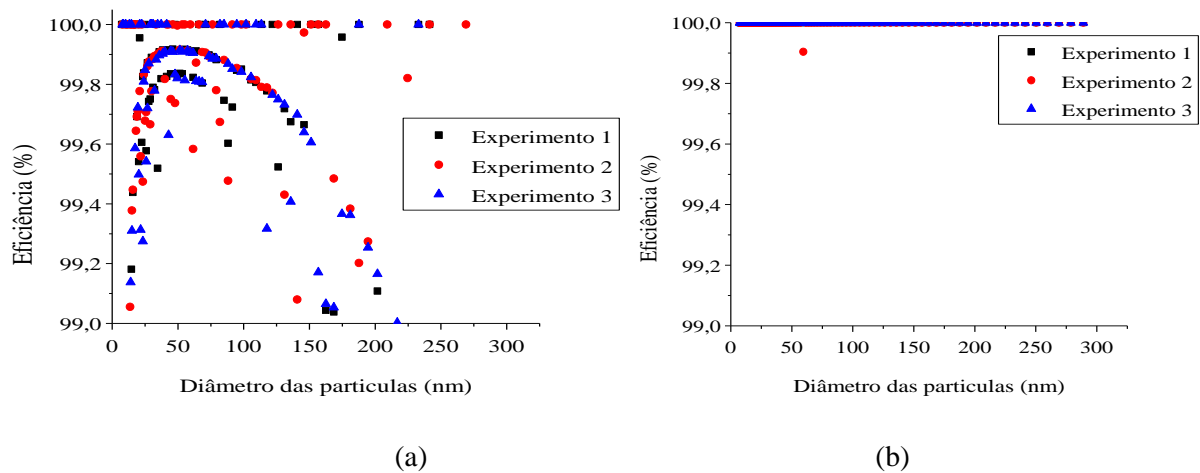
Figura 56 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no final da filtração utilizando o Filtro de Quartzo e a área de filtração de 5,3 cm<sup>2</sup> a) com vazamento b) sem vazamento



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

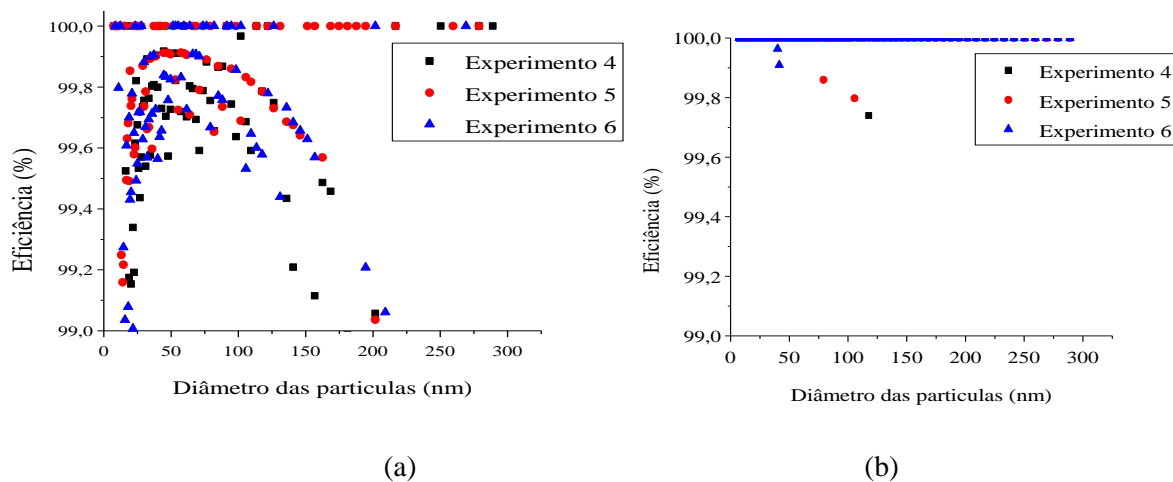
Utilizando os mesmos parâmetros desses experimentos foram realizados testes experimentais com o Filtro de Quartzo com área de 40,7 cm<sup>2</sup> e se apresentam nas Figuras 57 e 58. Os experimentos com e sem vazamento também são apresentados.

Figura 57 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no tempo zero da filtração utilizando o Filtro de Quartzo e a área de filtração de 40,7 cm<sup>2</sup> a) com vazamento b) sem vazamento



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Figura 58 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no final da filtração utilizando o Filtro de Quartzo e a área de filtração de 40,7 cm<sup>2</sup> a) com vazamento b) sem vazamento



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Constatou-se que houve um leve aumento da penetração das partículas após o término da filtração com a área de 40,7 cm<sup>2</sup>. Isso provavelmente ocorreu devido a erros experimentais, algumas partículas podem ter se desprendido do meio filtrante ou até mesmo a tela que serve de suporte pode ter perfurado o meio filtrante, por ele ser muito sensível.

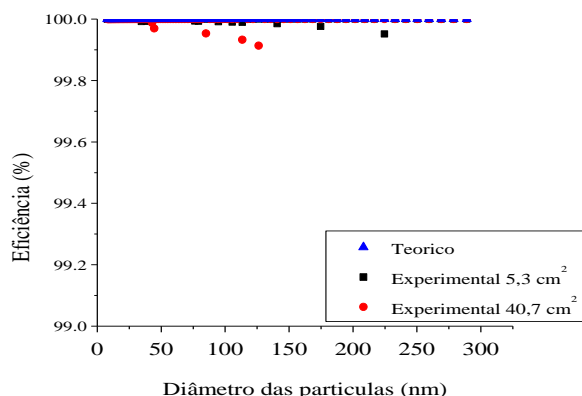
É notório como vazamentos presentes na linha de filtração afetaram diretamente os testes de eficiência. Portanto, antes de se iniciar qualquer teste realizado na linha de filtração foi necessário se atentar aos vazamentos.

Como foi visto nos outros meios filtrantes, utilizando a área de filtração maior (40,7 cm<sup>2</sup>), ocorreu uma menor penetração das partículas quando comparada com a área menor. Isso provavelmente ocorreu pelo fato que a área de 40,7 cm<sup>2</sup> possui uma maior área de amostragem.

Após a análise das eficiências experimentais utilizando o filtro de Quartzo, esses resultados foram comparados com a eficiência teórica, obtida por meio da Equação de Liu e Rubow (1990) e estão dispostos na Figura 59. A eficiência teórica foi calculada por meio da porosidade (0,70) obtida por Silva (2008).



Figura 59 - Eficiência teórica e experimental do filtro de Quartzo com área de 5,3 e 40,7 cm<sup>2</sup>



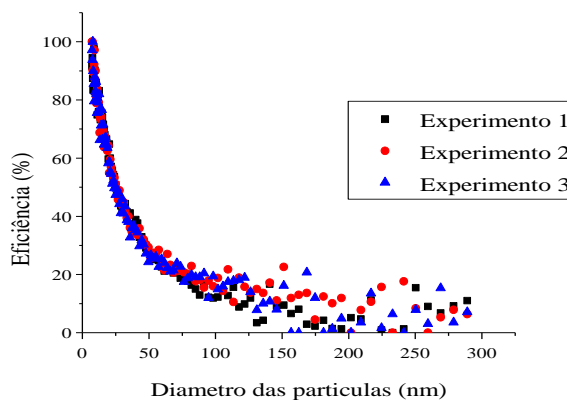
Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Analisando o gráfico da Figura 59, é possível verificar que as eficiências experimentais ficaram próximas ao modelo teórico.

Assim como visto para o filtro HEPA os mecanismos de coleta predominantes para o meio filtrante de quartzo foram o difusional e interceptação direta, os valores calculados podem ser vistos na Tabela B2 do Apêndice B.

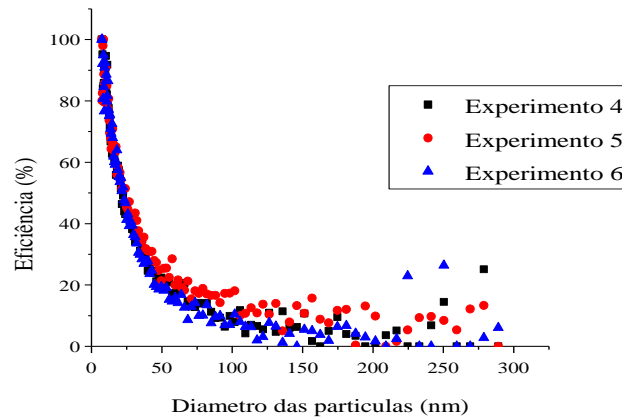
Por fim, foi avaliado o meio filtrante de Poliéster utilizando o SMPS para fazer a contagem das partículas antes e depois do meio filtrante, tanto para a área de 5,3 cm<sup>2</sup> como para a área de 40,7 cm<sup>2</sup>. Os experimentos foram realizados nas mesmas condições já apresentadas para os outros meios filtrantes.

Figura 60 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no tempo zero da filtração utilizando o Filtro de Poliéster e a área de filtração de 5,3 cm<sup>2</sup>



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Figura 61 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no final da filtração utilizando o Filtro de Poliéster e a área de filtração de 5,3 cm<sup>2</sup>

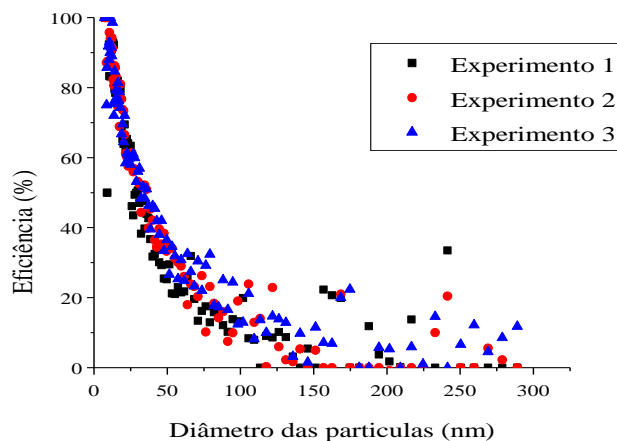


Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Diferentemente dos outros meios filtrantes, a curva da concentração das partículas se apresentou com um perfil diferente em função do diâmetro das partículas para o Filtro de Poliéster.

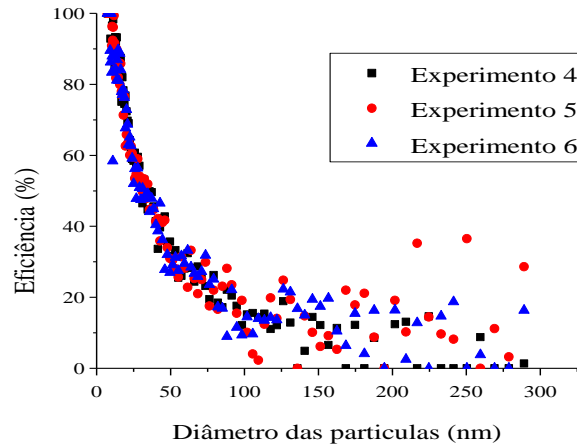
Pode-se perceber que para o Filtro de Poliéster, a eficiência diminui com o aumento do diâmetro das partículas. No início da filtração utilizando a área de 5,3 cm<sup>2</sup>, a eficiência de filtração é aproximadamente zero na faixa de 150 a 300 nm, já ao final da filtração essa faixa do diâmetro das partículas é de 120 a 300 nm.

Figura 62 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no tempo zero da filtração utilizando o Filtro de Poliéster e a área de filtração de 40,7 cm<sup>2</sup>



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Figura 63 - Eficiência de coleta da deposição das partículas no final da filtração utilizando o Filtro de Poliéster e a área de filtração de 40,7 cm<sup>2</sup>

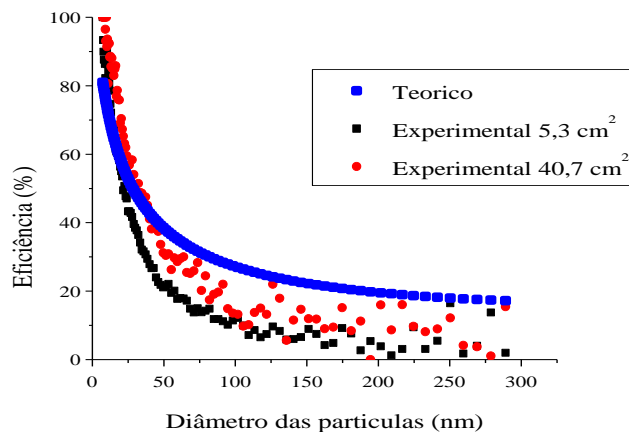


Fonte: Acervo Pessoal (2014)

As curvas de eficiência para a área maior apresentaram o mesmo perfil que para a área menor, os valores de eficiência chegaram tão próximos de zero como o filtro de 5,3 cm<sup>2</sup> para partículas na faixa de 100 a 300 nm. Isso provavelmente ocorreu pelo fato do meio filtrante de Poliéster ser muito permeável e possuir diâmetro das fibras maior quando comparado aos meios filtrantes já apresentados.

Os valores de eficiência experimental foram comparados com a eficiência teórica, obtida por meio da Equação de Liu e Rubow (1990) e estão dispostos na Figura 64. A eficiência teórica foi calculada por meio da porosidade (0,88) obtida por Steffens (2007).

Figura 64 - Eficiência teórica e experimental do filtro de Poliéster com área de 5,3 e 40,7 cm<sup>2</sup>



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

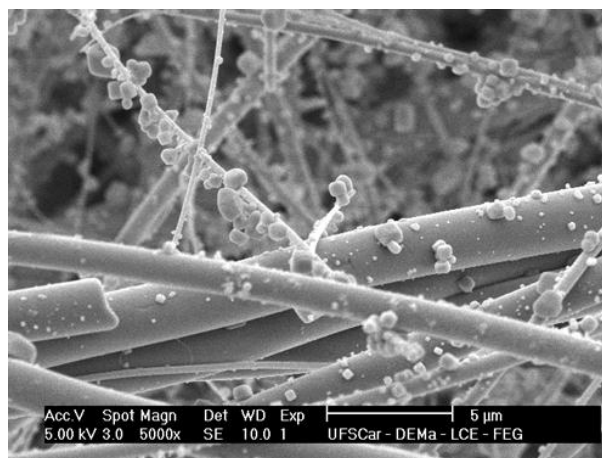
Na Figura 64 pode-se observar que a eficiência teórica foi equivalente às eficiências experimentais utilizando áreas de filtração de 5,3 e 40,7 cm<sup>2</sup>, as eficiências experimentais chegaram mais próximas de zero com o aumento do diâmetro da partícula. Como a porosidade tem uma influência significativa na eficiência teórica, o leve desvio entre as curvas de eficiências provavelmente ocorreu pelo fato que a porosidade foi obtida por Steffens (2007), sendo que esse valor possivelmente não seria o mesmo obtido com o meio filtrante de poliéster utilizado nesse trabalho. Uma vez que o valor médio das fibras para o filtro foi de 16 µm e a espessura 4,5 mm utilizado por Steffens (2007) e deste trabalho em torno de 21 µm e 6 mm, respectivamente. Com isso, provavelmente o filtro de poliéster utilizado por Steffens (2007) não foi o mesmo utilizado neste trabalho. Assim, o valor da porosidade pode alterar o valor das eficiências para a faixa de tamanho das partículas estudadas, mas não o comportamento da curva teórica que continuaria decrescendo com o aumento do tamanho da partícula.

O mecanismo predominante foi o difusional, como pode ser visto no Apêndice B. O mecanismo por interceptação direta apresentou influência desprezível na eficiência total. Esse comportamento também foi observado por Steffens (2007) que comparou a eficiência do meio filtrante de poliéster experimental com a eficiência teórica utilizando a Equação de Liu e Rubow (1990).

Todos os meios filtrantes se comportaram em geral da mesma forma, houve uma menor penetração das partículas ao final da filtração utilizando o meio filtrante com área maior. Os meios filtrantes HEPA, de Vidro e de Micro Quartzo que possuem fibras heterogêneas, conseguem atingir altos valores de eficiência. É perceptível por meio da Figura 65, que as fibras de menores diâmetros conseguem reter maior quantidade de partículas comparando-as com as fibras de maiores diâmetros.

Foram obtidas imagens em Microscópio Eletrônico de Varredura dos meios filtrantes HEPA, de Vidro, de Micro Quartzo e de Poliéster após os experimentos de filtração, tanto para a área de 5,3 cm<sup>2</sup> como para a área de 40,7 cm<sup>2</sup>, como pode ser visto nas Figuras 65 a 70.

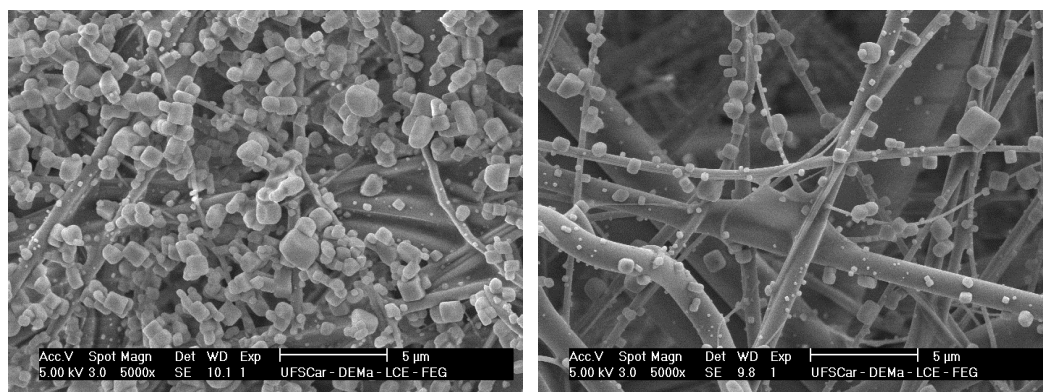
Figura 65 - Imagem do Filtro de Vidro obtida pelo MEV



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Figura 66 - Imagens do Filtro HEPA resultantes do processo de filtração obtidas pelo MEV.

A) Área de 5,3 cm<sup>2</sup> B) Área de 40,7 cm<sup>2</sup>



(A)

(B)

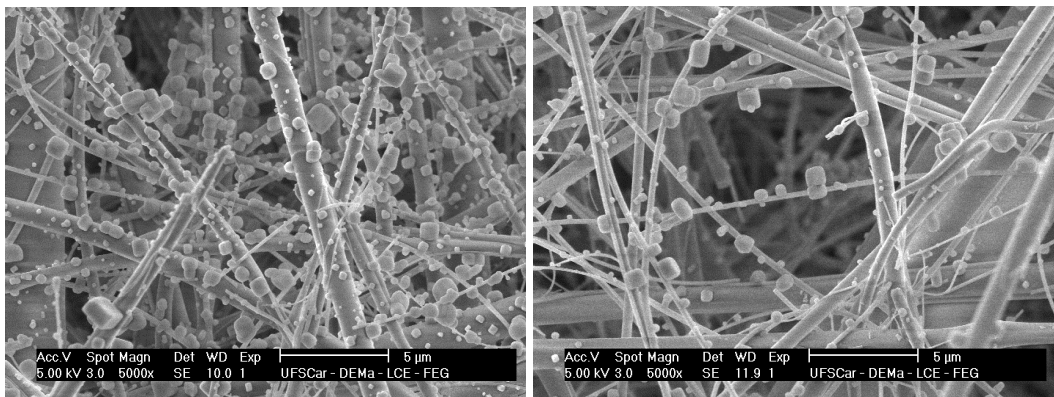
Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Portanto pode-se perceber que não é necessária a formação de torta para ajudar na captura das partículas, já nas primeiras horas de filtração as partículas ocupam grande parte do meio filtrante e as novas partículas que chegam tem dificuldade de atravessar a área de filtração menor e a queda de pressão não é significativa. Pode-se perceber que no tempo de aproximadamente 2 horas de filtração o filtro HEPA com área de 5,3 cm<sup>2</sup> é muito eficiente, após esse tempo a torta logo seria formada e a queda de pressão seria significativa. O mesmo ocorre para o Filtro de Vidro e de Micro Quartzo.

Por meio das imagens obtidas pelo MEV no final da filtração com as duas áreas de filtração, é possível verificar que os filtros com área menor possuem uma quantidade maior de partículas depositadas. Isso provavelmente pode ser explicado pelo fato de que a área de filtração é menor, as partículas logo se concentram e o espaço de vazios quase não existem. Já para a área de 40,7 cm<sup>2</sup>, a área de amostragem é maior, as partículas se dispersam mais na maior área de filtração e não se depositam tão intensamente como na área menor.

Figura 67 - Imagens do Filtro de Vidro resultantes do processo de filtração obtidas pelo MEV.

A) Área de 5,3 cm<sup>2</sup> B) Área de 40,7 cm<sup>2</sup>

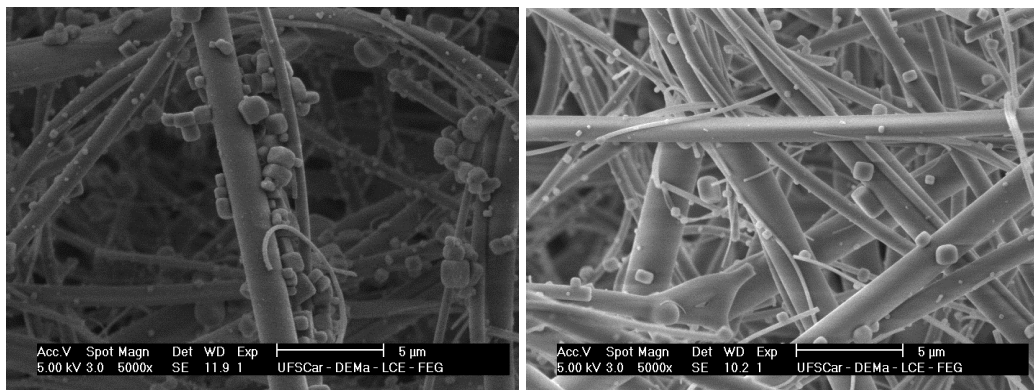


(A)

(B)

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Figura 68 - Imagens do Filtro de Micro Quartzo resultantes do processo de filtração obtidas pelo MEV. A) Área de 5,3 cm<sup>2</sup> B) Área de 40,7 cm<sup>2</sup>



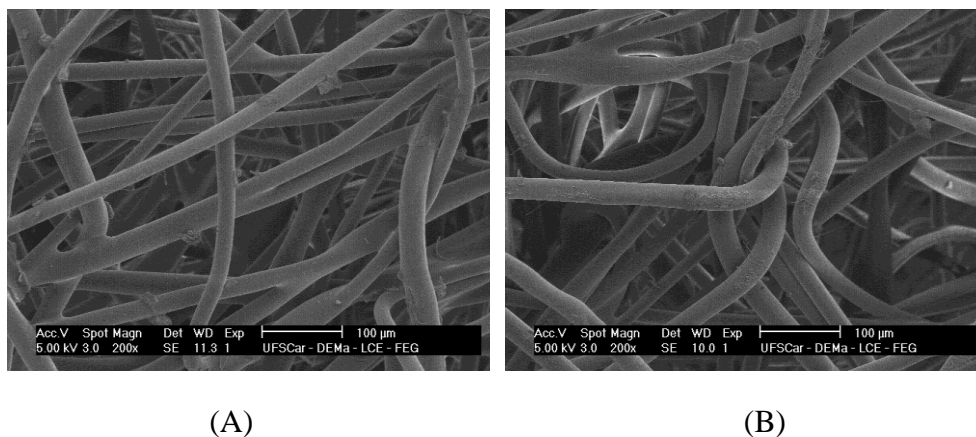
(A)

(B)

Fonte: Acervo Pessoal (2014)

Na Figura 69, as partículas não são visíveis como nos outros meios filtrantes. Percebe-se que a ampliação da imagem é de apenas 200x. Já nos outros meios filtrantes essa ampliação foi de 5000x.

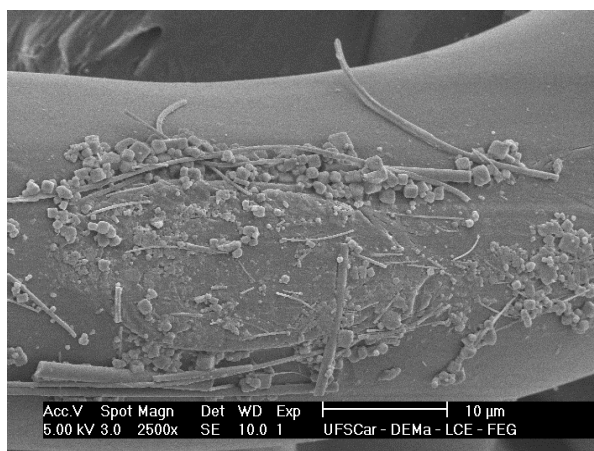
Figura 69 - Imagens do Filtro de Poliéster (FSN 300) resultantes do processo de filtração obtidas pelo MEV. A) Área de 5,3 cm<sup>2</sup> B) Área de 40,7 cm<sup>2</sup>



Fonte: Acervo Pessoal (2014)

As partículas não são visíveis como nos outros meios filtrantes devido ao tamanho do diâmetro do meio filtrante de Poliéster que é maior comparado aos outros (98% de diferença em relação ao Filtro HEPA). Porém, foi observado que a retenção das partículas ocorreu provavelmente por meio de resinas encontradas nas fibras que agiram como coletoras das partículas, como pode ser visto na Figura 70, onde a imagem foi ampliada 2500x.

Figura 70 - Imagem do Filtro de Poliéster obtido através do MEV



A queda de pressão e a umidade foram avaliadas durante o processo de filtração, porém não houve variação significativa nos resultados para todos os meios filtrantes, provavelmente pelo fato de que não ocorreu a formação da torta e a variação climática foi pequena.

É difícil se ter um resultado exato na comparação da eficiência dos meios filtrantes em relação à área de filtração, uma vez que amostras diferentes foram utilizadas nos experimentos e a disposição das fibras não é uniforme na confecção dos meios filtrantes.

A Tabela 22 apresenta o preço dos meios filtrantes avaliados. O preço do meio filtrante HEPA não foi obtido, pois os fabricantes vendem o filtro com molduras e não foi possível obter o preço somente do meio filtrante HEPA.

Tabela 22 - Preço dos meios filtrantes

Meio filtrante	HEPA	Vidro	Micro Quartzo	Poliéster
Preço aproximado de 1 m <sup>2</sup>	*	R\$ 45,00	R\$ 510,00	R\$16,00

\*Valor não obtido

FONTE: Grupo Veco, Energética e Slan Filtros

Avaliando-se as características dos filtros aqui estudados, foi possível verificar que as eficiências do Filtro HEPA, de Vidro e de Micro Quartzo foram acima de 99% e eles apresentaram valores de permeabilidade próximos. Nesse caso, o filtro de vidro apresentaria vantagem no quesito custo-benefício (Tabela 22). No entanto vale ressaltar que ele é um meio filtrante frágil e dependendo da vazão de ar utilizada nos experimentos ele se romperia facilmente.



## 5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, foi possível considerar que:

- O meio filtrante de Vidro obteve a menor espessura quando comparado ao meio filtrante HEPA, de Quartzo e de Poliéster. Já o filtro de Poliéster foi o mais espesso quando comparado aos outros.
- Os menores diâmetros das fibras foram encontrados no meio filtrante de Vidro e os maiores no meio filtrante de Poliéster.
- Os Filtros HEPA, de Vidro e de Micro Quartzo possuem baixas constantes de permeabilidade quando comparada ao Filtro de Poliéster.
- Comparando os meios filtrantes com suas respectivas áreas de filtração, observa-se que a constante de permeabilidade apresentou valores muito próximos para as duas áreas, porém ao avaliar o desvio padrão de cada área de filtração houve uma discrepância nos valores, sendo que esse valor foi menor para a área de filtração de  $40,7 \text{ cm}^2$ .
- Avaliando-se o desempenho dos meios filtrantes, nota-se que todos os meios filtrantes alcançaram eficiência acima de 99% para partículas na faixa de 7 a 289 nm, com exceção do Filtro de Poliéster para o qual sua eficiência diminuiu com o aumento do diâmetro das partículas, chegando a cerca de 0% para a área menor.
- Foi possível verificar que os filtros com área menor possuem uma quantidade maior de partículas depositadas no final da filtração comparando com o meio filtrante com área de filtração maior. Isso provavelmente pode ser explicado pelo fato de que a área de filtração é menor e as partículas se concentram mais, comparando com a área de filtração de  $40,7 \text{ cm}^2$  em um tempo de aproximadamente duas horas de filtração, assim o espaço de vazios entre as fibras quase não existe.
- Comparando-se as eficiências experimentais e teóricas para o meio filtrante HEPA, de Quartzo e de Poliéster, nota-se que esses valores foram similares.
- Foi notado entre os meios filtrantes que apresentavam fibras heterogêneas, que as partículas ficam mais depositadas nas fibras com diâmetro menor do que com diâmetro maior. Portanto, quanto menor for o diâmetro das fibras mais eficiente será o meio filtrante.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Sugere-se como trabalhos futuros:

- Desenvolver uma técnica para determinar a porosidade desses meios filtrantes.
- Por meio da porosidade, comparar os valores das constantes de permeabilidade obtidos experimentalmente com os valores encontrados na literatura.
- Realizar os testes experimentais com rotômetros digitais para se obter resultados mais precisos.
- Estudar a geração de partículas a partir de outros materiais.
- Aprofundar o estudo da influência da área de filtração no processo de filtração.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSUMPTÃO, L.F.J. Sistema de Gestão Ambiental: Manual prático para implementação de SGA e Certificação de ISO 14.001. 3.ed. Curitiba: Juruá,p.204, 2006.

AZEVEDO, S. G. R. **Estudo da influência do formato das partículas na operação de filtração de gases**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

BARNETT, T. Improving the performance of fabric filter dry dust collection equipment. **Filtration and Separation**, p.28-32, 2000.

BARROS, P. M. **Avaliação do desempenho de meios filtrantes fibrosos na remoção de partículas nanométricas**. 2014.p.77. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

BOSKOVIC, L.; ALTMAN, I. S.; AGRANOVSKI, I. E.; BRADDOCK, R. D.; MYOJO, T.; CHOI, M. Influence of Particle Shepe on Filtration Processes. **Aerosol Science Technology**, 39, 1184, 2005.

CHANG, C. The immune effects of naturally occurring and synthetic nanoparticles. **Journal of Autoimmunity**, 34, J234-J246, 2010.

COURY, J.R. **Electrostatic effects in granular bed filtration in gases**. Tese de Doutorado, Cambridge University, Cambridge, U.K, 1983.

DULLIEN, F. A. L. **Introduction to industrial gas cleaning**. San Diego: Academic Press, p.285, 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**, 37,1116–1139, 2006.

ENERGÉTICA – Qualidade do ar. Disponível em: <[www.energetica.ind.br](http://www.energetica.ind.br)>. Acessado em: 13/10/2014.

ENGLERT, N. Fine particles and human health – a review of epidemiological studies. **Toxicology Letters**, n.149, p.235-242, 2004.

FALAGUASTA, M.C.R. **Estudo do desempenho de um precipitador eletrostático operando na captura de partículas submicrométricas e nanométricas**. 2005.p.305. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

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, 2009.

GRUPO VECO. Disponível em: <[www.veco.com.br](http://www.veco.com.br)>. Acesso em: 13/10/2014.

HETT, A., Nanotechnology - Small matter, many unknown, 2004.

HINDS, W. C. **Aerosol Technology: properties, behavior and measurement of airborne particles**. 2. ed., New York: John Willey & Sons, p.483, 1999.

HUANG, H.L.; HUANG, Y.C.; WANG, D.M. Aerosol filtration efficiency of Teflon fibrous filters. **Abstracts of the European Aerosol Conference**, p.973-974, 2004.

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.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA. Laboratório de física 24. Disponível em: <<http://www.fis.ita.br/labfis24/indice.htm>>. Acesso em: 01/10/2014.

KIM, C. S.; BAO, L.; OKUYAMA, K.; SHIMADA, M.; NIINUMA, H. Filtration Efficiency of a Fibrous Filter for Nanoparticles. **J. Nanopart. Res.**, 8, 215, 2006.

LABORATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL - DEMa / UFSCar. Disponível em/: <<http://www.lce.dema.ufscar.br>>. Acesso em 02/10/2014.

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

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 5th World Filtration Congress, Nice, p.112, 1990.

LUNET, N.; SEVERO, M.; BARROS, H. Desvio Padrão ou Erro Padrão. **Arquivos de Medicina**, Vol. 20, 2006.

PAS71 – Publicly Available Specification. Disponível em: <[www.bsi-global.com/en/](http://www.bsi-global.com/en/)>. Acesso em 24/02/2014.

PAYET, S.; BOULAUD, D.; MADELAINE, G.; RENOUX, A. Penetration and pressure-drop of Hepa filter during loading with submicron liquid particles. **Journal of Aerosol Science**, v.23, p. 723-735, 1992.

PEKKANEN, J., “Exposure to ultrafine particles and respiratory health effects”, **Abstracts Toxicology Letters**, S33, 2006.

PODGÓRSKI, A.; BALAZY, A.; GRADÓN, L. “Applications of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters”, **Chemical Engineering Science**, Vol.61, p. 6804-6815, 2006.

RIBEIRO JR, Paulo Justiniano. **Intervalos de Confiança**. Disponível em: <<http://www.leg.ufpr.br/~paulojus/>>. Acesso em: 01/10/2014.

RODRIGUES, K. B. **Filtração de gases: estudo da deposição de diferentes tortas de filtração em diferentes meios filtrantes**. 2006. Tese de Doutorado em Engenharia Química – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

SHI, J. P.; EVANS, D. E.; KHAN, A.A; HARRISON, R. M., “Sources and concentration of nanoparticles (< 10 nm diameter) in urban atmosphere”, **Atmospheric Environmental**, Vol. 35, p. 1193-1202, 2001.

SILVA, G.M.C. **Desempenho de filtros cerâmicos na filtração de gases a altas temperaturas**. p.175. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2008.

SLAN FILTROS. Disponível em: <[www.slan.com.br](http://www.slan.com.br)>. Acessado em: 13/10/2014.

SPURNY, K. R. On the history of air filters and aerosol filtration. **L. Aerosol Sci.** Vol. 28, Suppl. 1, p. 391-392, 1997a.

SPURNY, K.R. *Advances in aerosol filtration*. Florida: CRC Press LLC, p.533, 1998b.

STEFFENS, J. **Desempenho de filtros fibrosos operando na remoção de partículas nanométricas de aerossóis**. p.206. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2007.

TANABE, E. H. **Desempenho de meios filtrantes na filtração de gases a altas pressões**. Defesa de Doutorado – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2011.

VAN OSDELL, 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**, Vol.12, p.911-925,1990.

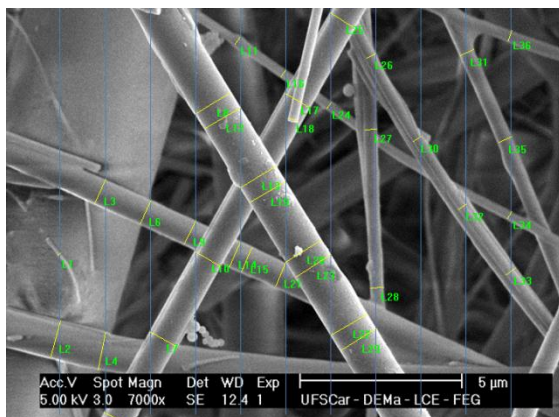
YUN, K. M.; HOGAN, C. J. Jr; MATSUBAYASHI, Y.; KAWABE, M.; ISKANDAR, F.; OKUYAMA, K. Nanoparticle Filtration by Electrospun Polymer Fibers. **Chem. Eng. Sci.**, 62, 4751, 2007.

## Apêndice A

### Análise de imagens para determinação do diâmetro das fibras

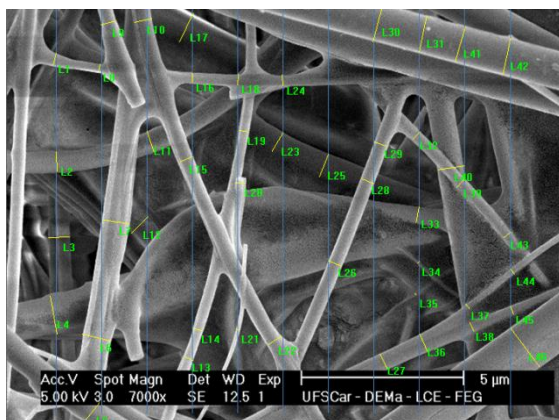
As figuras abaixo representam a análise de imagem feita por meio do Programa Image Pro Plus para todos os meios filtrantes.

Figura A.1 – Análise de imagem do filtro HEPA 1



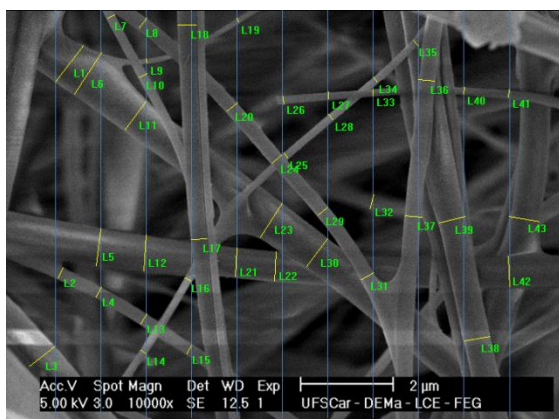
Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	5
0,30-0,34	3
0,34-0,56	7
0,56-0,79	1
0,79-1,24	12
1,24-1,94	8
1,94-2,35	0
Total	36

Figura A.2 – Análise de imagem do filtro HEPA 2



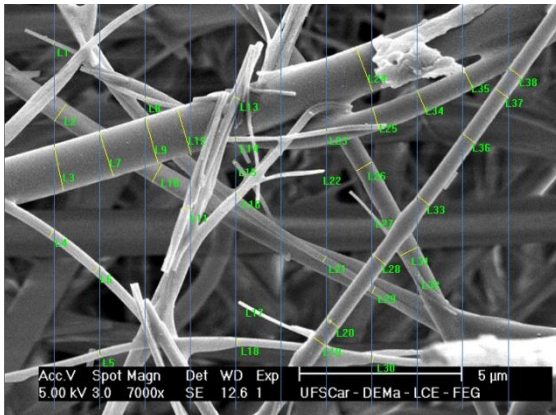
Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	7
0,30-0,34	9
0,34-0,56	12
0,56-0,79	8
0,79-1,24	9
1,24-1,94	1
1,94-2,35	0
Total	46

Figura A.3 – Análise de imagem do filtro HEPA 3



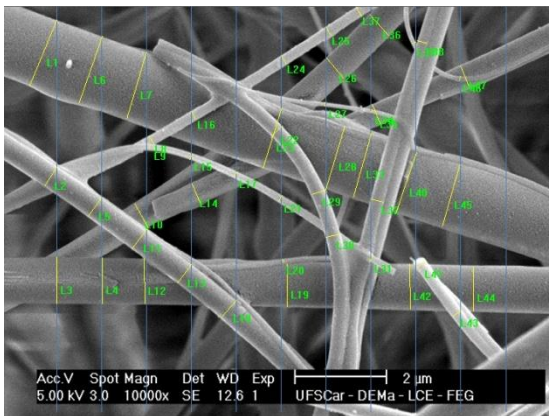
Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	22
0,30-0,34	3
0,34-0,56	4
0,56-0,79	9
0,79-1,24	5
1,24-1,94	0
1,94-2,35	0
Total	43

Figura A.4 – Análise de imagem do filtro HEPA 4



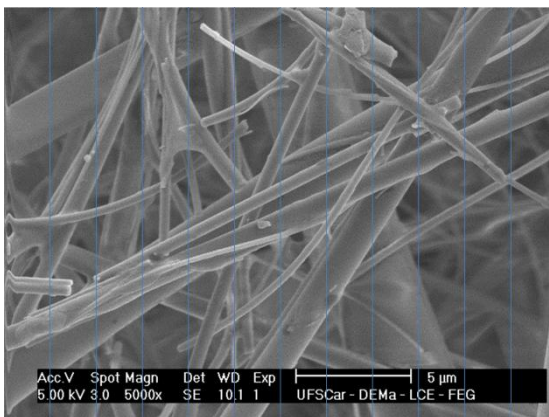
Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	18
0,30-0,34	1
0,34-0,56	8
0,56-0,79	6
0,79-1,24	0
1,24-1,94	5
1,94-2,35	0
<b>Total</b>	<b>38</b>

Figura A.5 – Análise de imagem do filtro HEPA 5



Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	20
0,30-0,34	2
0,34-0,56	8
0,56-0,79	3
0,79-1,24	6
1,24-1,94	8
1,94-2,35	0
<b>Total</b>	<b>47</b>

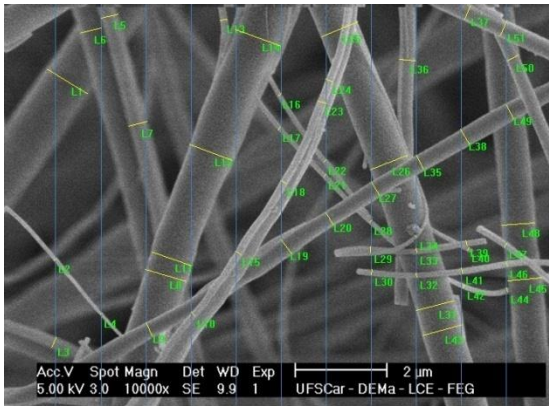
Figura A.6 – Análise de imagem do filtro HEPA 6



Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	11
0,30-0,34	7
0,34-0,56	12
0,56-0,79	7
0,79-1,24	6
1,24-1,94	4
1,94-2,35	2
<b>Total</b>	<b>49</b>

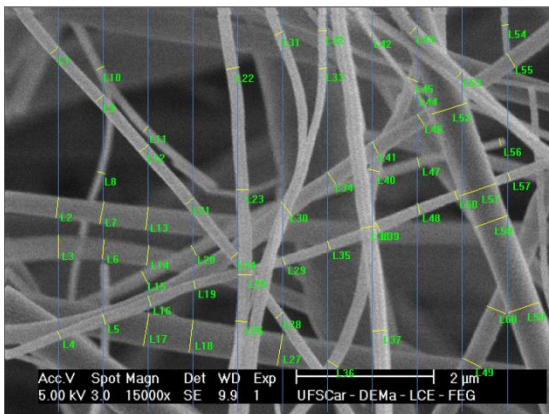


Figura A.7 – Análise de imagem do filtro de Vidro 1



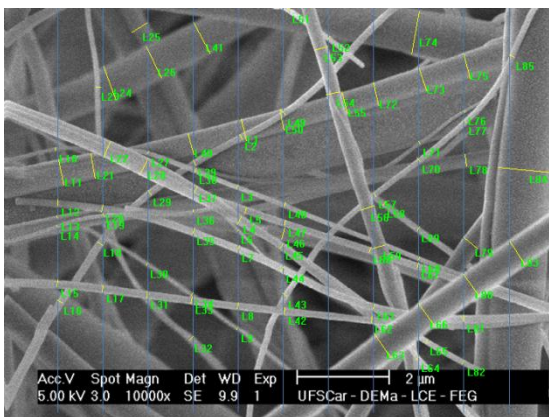
Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	27
0,30-0,34	2
0,34-0,56	11
0,56-0,79	2
0,79-1,24	9
1,24-1,94	0
1,94-2,35	0
	51

Figura A.8 – Análise de imagem do filtro de Vidro 2



Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	49
0,30-0,34	4
0,34-0,56	7
0,56-0,79	0
0,79-1,24	0
1,24-1,94	0
1,94-2,35	0
	60

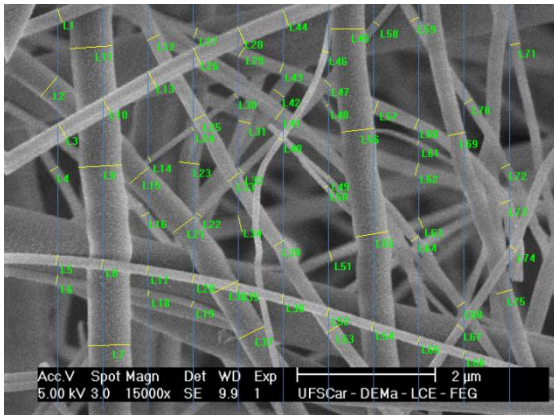
Figura A.9 – Análise de imagem do filtro de Vidro 3



Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	60
0,30-0,34	3
0,34-0,56	11
0,56-0,79	9
0,79-1,24	2
1,24-1,94	0
1,94-2,35	0
Total	85

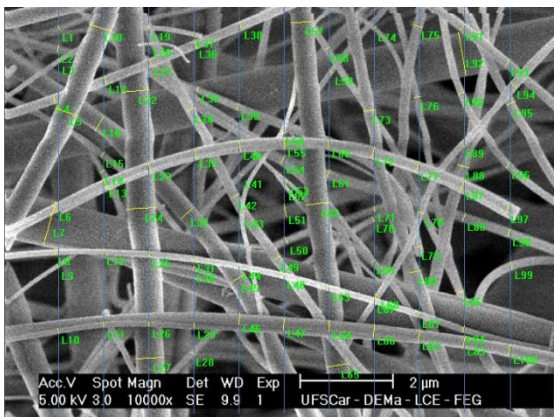


Figura A.10 – Análise de imagem do filtro de Vidro 4



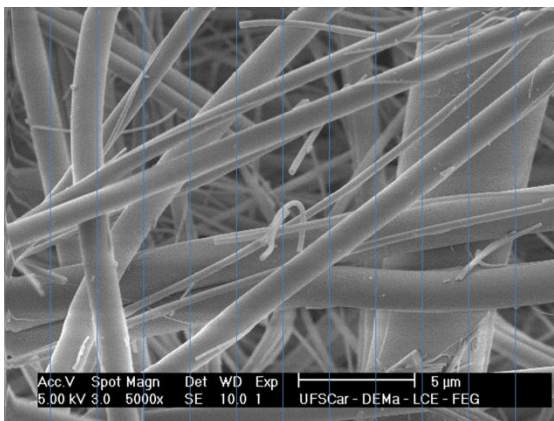
Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	64
0,30-0,34	0
0,34-0,56	8
0,56-0,79	3
0,79-1,24	0
1,24-1,94	0
1,94-2,35	0
Total	75

Figura A.11 – Análise de imagem do filtro de Vidro 5



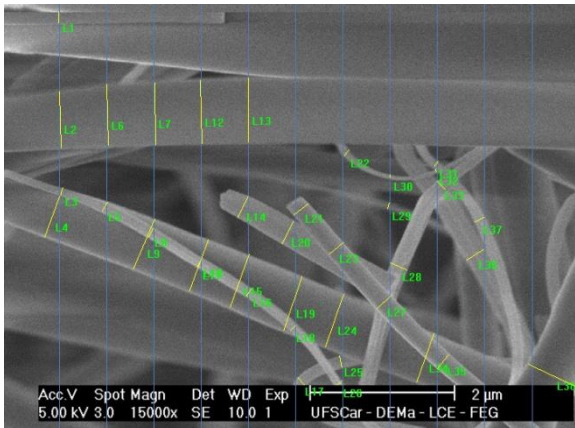
Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	86
0,30-0,34	1
0,34-0,56	8
0,56-0,79	3
0,79-1,24	2
1,24-1,94	0
1,94-2,35	0
Total	100

Figura A.12 – Análise de imagem do filtro de Vidro 6



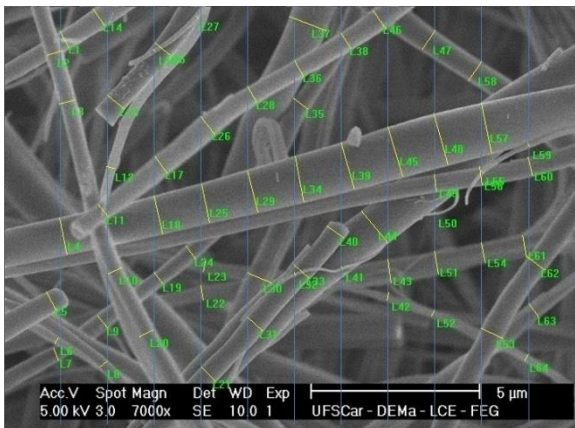
Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	11
0,30-0,34	7
0,34-0,56	6
0,56-0,79	5
0,79-1,24	14
1,24-1,94	20
1,94-2,35	1
Total	64

Figura A.13 – Análise de imagem do filtro de Quartzo 1



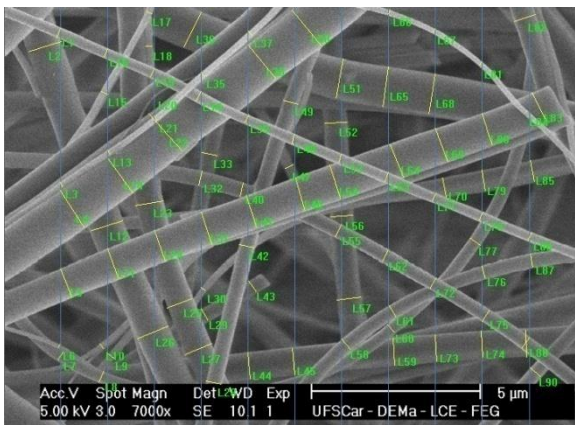
Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	23
0,30-0,34	1
0,34-0,56	1
0,56-0,79	9
0,79-1,24	4
1,24-1,94	0
1,94-2,35	0
Total	38

Figura A.14 – Análise de imagem do filtro de Quartzo 2



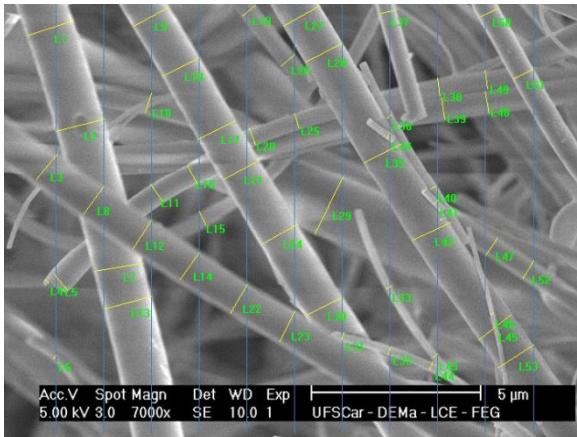
Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	13
0,30-0,34	0
0,34-0,56	15
0,56-0,79	25
0,79-1,24	5
1,24-1,94	6
1,94-2,35	0
Total	64

Figura A.15 – Análise de imagem do filtro de Quartzo 3



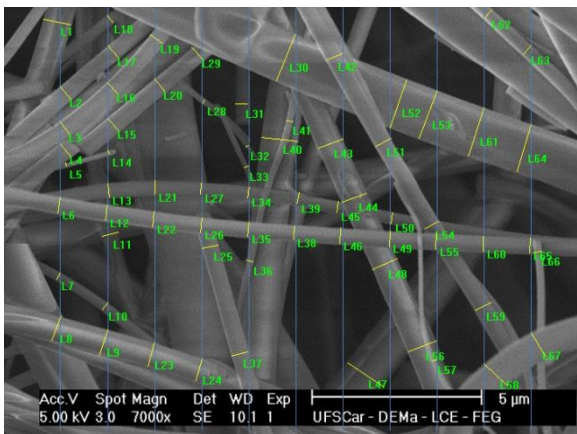
Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	26
0,30-0,34	5
0,34-0,56	20
0,56-0,79	7
0,79-1,24	28
1,24-1,94	4
1,94-2,35	0
Total	90

Figura A.16 – Análise de imagem do filtro de Quartzo 4



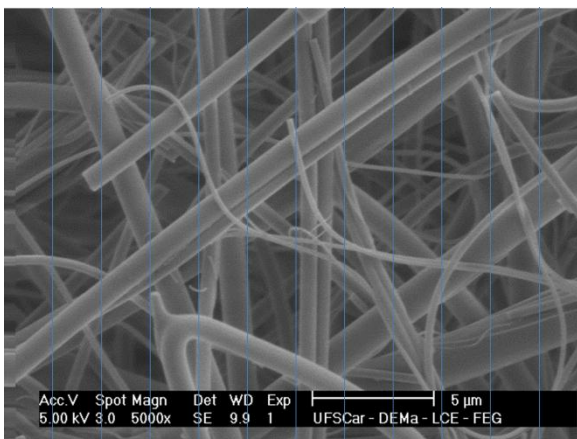
Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	12
0,30-0,34	0
0,34-0,56	7
0,56-0,79	11
0,79-1,24	16
1,24-1,94	7
1,94-2,35	0
Total	53

Figura A.17 – Análise de imagem do filtro de Quartzo 5



Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	12
0,30-0,34	1
0,34-0,56	36
0,56-0,79	3
0,79-1,24	9
1,24-1,94	6
1,94-2,35	0
Total	67

Figura A.18 – Análise de imagem do filtro de Quartzo 6



Diâmetro das fibras(um)	Número de fibras
0,075-0,30	14
0,30-0,34	6
0,34-0,56	8
0,56-0,79	6
0,79-1,24	23
1,24-1,94	1
1,94-2,35	2
Total	60



Como o meio filtrante de Poliéster é composto por fibras homogêneas não é necessário fazer a contagem das fibras por faixa de diâmetros das fibras.

Figura A.19 – Análise de imagem do filtro de Poliéster 1 e 2

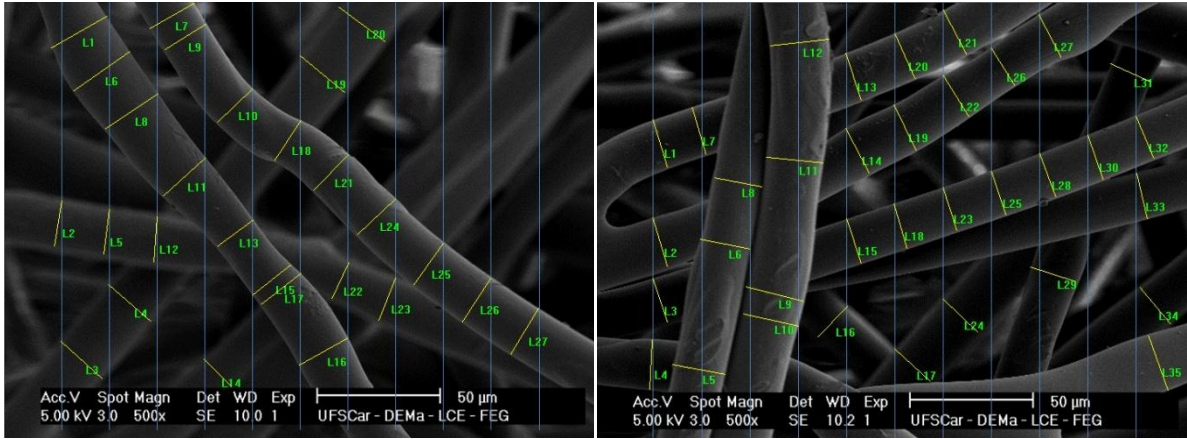


Figura A.20 – Análise de imagem do filtro de Poliéster 3 e 4

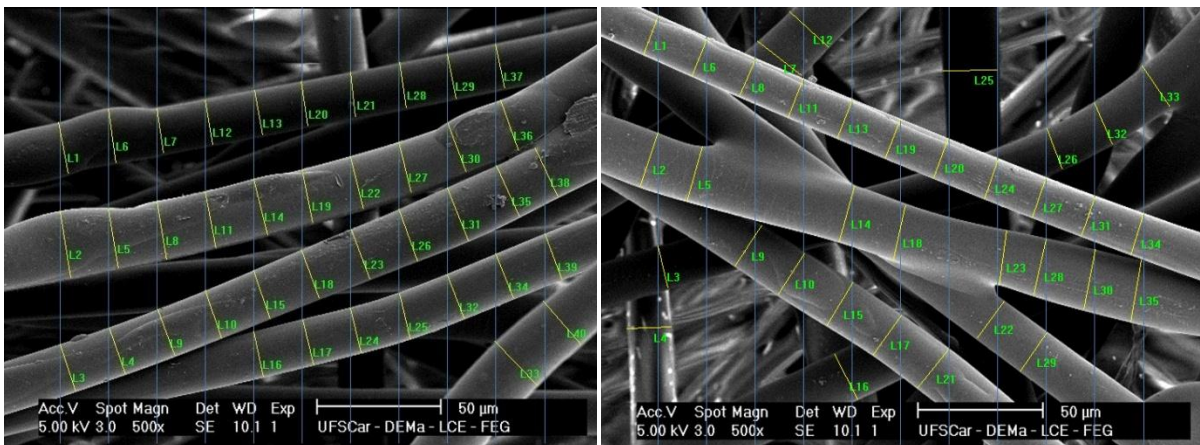
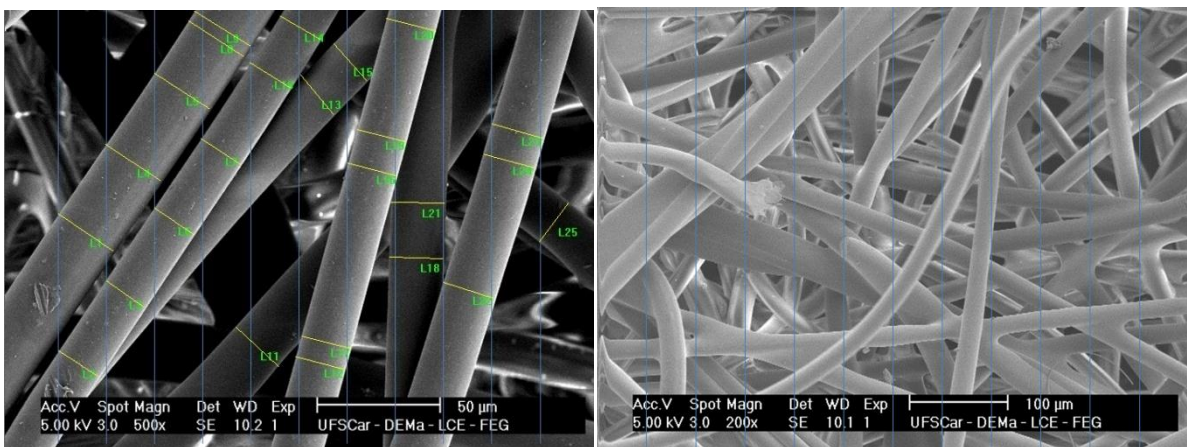


Figura A.21 – Análise de imagem do filtro de Poliéster 5 e 6



## Apêndice B

### Eficiência de coleta pelo mecanismo difusional e por interceptação direta para os filtros HEPA, de Quartzo e de Poliéster

A Tabela B.1 apresenta os valores calculados da eficiência de coleta pelo mecanismo difusional e por interceptação direta para o filtro HEPA.

Tabela B.1 – Resultados das eficiências difusional e por interceptação direta para o filtro HEPA

dp(m)	D	Pe	Cd	$\eta_d$	R	Cr	$\eta_{id}$	$\eta_t$	$\eta_{teórica}$	$\eta_{exper}$ Área menor	$\eta_{exper}$ Área maior
7,37E <sup>-09</sup>	2,09E <sup>-09</sup>	14,15	1,45	0,47	0,01	64,86	0,01	0,48	100	100,00	100
7,64E <sup>-09</sup>	2,01E <sup>-09</sup>	14,66	1,45	0,46	0,01	62,60	0,01	0,47	100	100,00	100
7,91E <sup>-09</sup>	1,94E <sup>-09</sup>	15,18	1,46	0,45	0,01	60,50	0,01	0,46	100	100,00	100
8,2E <sup>-09</sup>	1,87E <sup>-09</sup>	15,74	1,46	0,44	0,01	58,39	0,01	0,45	100	100,00	100
8,51E <sup>-09</sup>	1,81E <sup>-09</sup>	16,33	1,47	0,43	0,01	56,30	0,01	0,45	100	100,00	100
8,82E <sup>-09</sup>	1,74E <sup>-09</sup>	16,93	1,47	0,42	0,01	54,36	0,01	0,44	100	100,00	100
9,14E <sup>-09</sup>	1,68E <sup>-09</sup>	17,54	1,48	0,42	0,02	52,49	0,01	0,43	100	100,00	100
9,47E <sup>-09</sup>	1,62E <sup>-09</sup>	18,18	1,48	0,41	0,02	50,70	0,01	0,42	100	98,87	100
9,82E <sup>-09</sup>	1,57E <sup>-09</sup>	18,85	1,49	0,40	0,02	48,92	0,01	0,41	100	100,00	100
1,02E <sup>-08</sup>	1,51E <sup>-09</sup>	19,58	1,50	0,39	0,02	47,14	0,01	0,41	100	100,00	100
1,06E <sup>-08</sup>	1,45E <sup>-09</sup>	20,34	1,50	0,38	0,02	45,40	0,01	0,40	100	100,00	100
1,09E <sup>-08</sup>	1,41E <sup>-09</sup>	20,92	1,51	0,38	0,02	44,18	0,01	0,39	100	100,00	100
1,13E <sup>-08</sup>	1,36E <sup>-09</sup>	21,69	1,51	0,37	0,02	42,65	0,02	0,39	100	100,00	100
1,18E <sup>-08</sup>	1,30E <sup>-09</sup>	22,65	1,52	0,36	0,02	40,88	0,02	0,38	100	100,00	100
1,22E <sup>-08</sup>	1,26E <sup>-09</sup>	23,42	1,53	0,35	0,02	39,58	0,02	0,37	100	100,00	100
1,26E <sup>-08</sup>	1,22E <sup>-09</sup>	24,18	1,53	0,35	0,02	38,35	0,02	0,37	100	100,00	100
1,31E <sup>-08</sup>	1,17E <sup>-09</sup>	25,14	1,54	0,34	0,02	36,93	0,02	0,36	100	100,00	100
1,36E <sup>-08</sup>	1,13E <sup>-09</sup>	26,10	1,55	0,33	0,02	35,60	0,02	0,35	100	100,00	100
1,41E <sup>-08</sup>	1,09E <sup>-09</sup>	27,06	1,55	0,33	0,02	34,38	0,02	0,35	100	100,00	100
1,46E <sup>-08</sup>	1,05E <sup>-09</sup>	28,02	1,56	0,32	0,02	33,23	0,02	0,34	100	100,00	100
1,51E <sup>-08</sup>	1,02E <sup>-09</sup>	28,98	1,57	0,32	0,03	32,17	0,02	0,34	100	100,00	100
1,57E <sup>-08</sup>	9,79E <sup>-10</sup>	30,13	1,57	0,31	0,03	30,98	0,02	0,33	100	100,00	100
1,63E <sup>-08</sup>	9,43E <sup>-10</sup>	31,28	1,58	0,30	0,03	29,87	0,02	0,33	100	100,00	100
1,68E <sup>-08</sup>	9,15E <sup>-10</sup>	32,24	1,59	0,30	0,03	29,01	0,02	0,32	100	100,00	100
1,75E <sup>-08</sup>	8,78E <sup>-10</sup>	33,59	1,59	0,29	0,03	27,89	0,02	0,32	100	100,00	100
1,81E <sup>-08</sup>	8,49E <sup>-10</sup>	34,74	1,60	0,29	0,03	27,00	0,02	0,31	100	100,00	100
1,88E <sup>-08</sup>	8,18E <sup>-10</sup>	36,08	1,61	0,28	0,03	26,03	0,03	0,31	100	100,00	100
1,95E <sup>-08</sup>	7,88E <sup>-10</sup>	37,43	1,62	0,27	0,03	25,13	0,03	0,30	100	100,00	100
2,02E <sup>-08</sup>	7,61E <sup>-10</sup>	38,77	1,62	0,27	0,03	24,30	0,03	0,30	100	99,97	100
2,09E <sup>-08</sup>	7,35E <sup>-10</sup>	40,11	1,63	0,26	0,04	23,52	0,03	0,29	100	100,00	100
2,17E <sup>-08</sup>	7,08E <sup>-10</sup>	41,65	1,64	0,26	0,04	22,69	0,03	0,29	100	100,00	100
2,25E <sup>-08</sup>	6,83E <sup>-10</sup>	43,18	1,65	0,25	0,04	21,92	0,03	0,29	100	100,00	100
2,33E <sup>-08</sup>	6,60E <sup>-10</sup>	44,72	1,65	0,25	0,04	21,20	0,03	0,28	100	100,00	100
2,41E <sup>-08</sup>	6,38E <sup>-10</sup>	46,25	1,66	0,25	0,04	20,53	0,03	0,28	100	100,00	100
2,5 E <sup>-08</sup>	6,15E <sup>-10</sup>	47,98	1,67	0,24	0,04	19,82	0,03	0,27	100	100,00	100
2,59E <sup>-08</sup>	5,93E <sup>-10</sup>	49,71	1,68	0,24	0,04	19,17	0,04	0,27	100	100,00	100
2,69E <sup>-08</sup>	5,71E <sup>-10</sup>	51,63	1,69	0,23	0,05	18,50	0,04	0,27	100	100,00	100
2,79E <sup>-08</sup>	5,51E <sup>-10</sup>	53,55	1,69	0,23	0,05	17,87	0,04	0,27	100	100,00	100
2,89E <sup>-08</sup>	5,32E <sup>-10</sup>	55,47	1,70	0,22	0,05	17,28	0,04	0,26	100	100,00	100
3,00 E <sup>-08</sup>	5,12E <sup>-10</sup>	57,58	1,71	0,22	0,05	16,69	0,04	0,26	100	100,00	100
3,11E <sup>-08</sup>	4,94E <sup>-10</sup>	59,69	1,72	0,21	0,05	16,13	0,04	0,26	100	100,00	100

3,22E <sup>-08</sup>	4,77E <sup>-10</sup>	61,80	1,73	0,21	0,05	15,62	0,04	0,25	100	100,00	100
3,34E <sup>-08</sup>	4,60E <sup>-10</sup>	64,10	1,74	0,21	0,06	15,09	0,05	0,25	100	100,00	100
3,46E <sup>-08</sup>	4,44E <sup>-10</sup>	66,41	1,75	0,20	0,06	14,60	0,05	0,25	100	100,00	100
3,59E <sup>-08</sup>	4,28E <sup>-10</sup>	68,90	1,76	0,20	0,06	14,11	0,05	0,25	100	100,00	100
3,72E <sup>-08</sup>	4,13E <sup>-10</sup>	71,40	1,76	0,19	0,06	13,65	0,05	0,25	100	100,00	100
3,85E <sup>-08</sup>	3,99E <sup>-10</sup>	73,89	1,77	0,19	0,07	13,22	0,05	0,24	100	100,00	100
4,00 E <sup>-08</sup>	3,84E <sup>-10</sup>	76,77	1,78	0,19	0,07	12,77	0,06	0,24	100	100,00	100
4,14E <sup>-08</sup>	3,71E <sup>-10</sup>	79,46	1,79	0,18	0,07	12,37	0,06	0,24	100	100,00	100
4,29E <sup>-08</sup>	3,58E <sup>-10</sup>	82,34	1,80	0,18	0,07	11,97	0,06	0,24	100	100,00	100
4,45E <sup>-08</sup>	3,45E <sup>-10</sup>	85,41	1,81	0,18	0,08	11,58	0,06	0,24	100	100,00	100
4,61E <sup>-08</sup>	3,33E <sup>-10</sup>	88,48	1,82	0,17	0,08	11,21	0,06	0,24	100	100,00	100
4,78E <sup>-08</sup>	3,22E <sup>-10</sup>	91,74	1,83	0,17	0,08	10,85	0,07	0,24	100	100,00	100
4,96E <sup>-08</sup>	3,10E <sup>-10</sup>	95,20	1,84	0,17	0,08	10,49	0,07	0,24	100	100,00	100
5,14E <sup>-08</sup>	2,99E <sup>-10</sup>	98,65	1,85	0,16	0,09	10,16	0,07	0,24	100	99,99	100
5,33E <sup>-08</sup>	2,88E <sup>-10</sup>	102,30	1,86	0,16	0,09	9,83	0,07	0,24	100	100,00	100
5,52E <sup>-08</sup>	2,78E <sup>-10</sup>	105,94	1,87	0,16	0,09	9,53	0,08	0,24	100	99,99	100
5,73E <sup>-08</sup>	2,68E <sup>-10</sup>	109,97	1,88	0,16	0,10	9,21	0,08	0,24	100	99,98	100
5,94E <sup>-08</sup>	2,59E <sup>-10</sup>	114,01	1,89	0,15	0,10	8,92	0,08	0,24	100	100,00	100
6,15E <sup>-08</sup>	2,50E <sup>-10</sup>	118,04	1,90	0,15	0,10	8,65	0,09	0,24	100	100,00	100
6,38E <sup>-08</sup>	2,41E <sup>-10</sup>	122,45	1,92	0,15	0,11	8,38	0,09	0,24	100	100,00	100
6,61E <sup>-08</sup>	2,33E <sup>-10</sup>	126,86	1,93	0,15	0,11	8,12	0,09	0,24	100	99,99	100
6,85E <sup>-08</sup>	2,24E <sup>-10</sup>	131,47	1,94	0,14	0,12	7,87	0,10	0,24	100	99,99	100
7,10 E <sup>-08</sup>	2,16E <sup>-10</sup>	136,27	1,95	0,14	0,12	7,63	0,10	0,24	100	100,00	100
7,37E <sup>-08</sup>	2,09E <sup>-10</sup>	141,45	1,96	0,14	0,12	7,39	0,10	0,24	100	100,00	100
7,64E <sup>-08</sup>	2,01E <sup>-10</sup>	146,63	1,97	0,13	0,13	7,16	0,11	0,24	100	99,99	100
7,91E <sup>-08</sup>	1,94E <sup>-10</sup>	151,82	1,98	0,13	0,13	6,95	0,11	0,24	100	100,00	100
8,20 E <sup>-08</sup>	1,87E <sup>-10</sup>	157,38	2,00	0,13	0,14	6,74	0,12	0,25	100	99,98	100
8,51E <sup>-08</sup>	1,81E <sup>-10</sup>	163,33	2,01	0,13	0,14	6,53	0,12	0,25	100	100,00	100
8,82E <sup>-08</sup>	1,74E <sup>-10</sup>	169,28	2,02	0,13	0,15	6,34	0,12	0,25	100	100,00	100
9,14E <sup>-08</sup>	1,68E <sup>-10</sup>	175,42	2,03	0,12	0,15	6,15	0,13	0,25	100	100,00	100
9,47E <sup>-08</sup>	1,62E <sup>-10</sup>	181,76	2,04	0,12	0,16	5,97	0,13	0,25	100	99,99	100
9,82E <sup>-08</sup>	1,57E <sup>-10</sup>	188,47	2,06	0,12	0,17	5,79	0,14	0,26	100	100,00	100
1,02E <sup>-07</sup>	1,51E <sup>-10</sup>	195,38	2,07	0,12	0,17	5,62	0,14	0,26	100	100,00	100
1,05E <sup>-07</sup>	1,46E <sup>-10</sup>	202,48	2,08	0,11	0,18	5,46	0,15	0,26	100	99,99	100
1,09E <sup>-07</sup>	1,40E <sup>-10</sup>	209,97	2,10	0,11	0,19	5,30	0,15	0,27	100	99,98	100
1,13E <sup>-07</sup>	1,36E <sup>-10</sup>	217,65	2,11	0,11	0,19	5,15	0,16	0,27	100	100,00	100
1,18E <sup>-07</sup>	1,31E <sup>-10</sup>	225,71	2,12	0,11	0,20	5,00	0,17	0,28	100	100,00	100
1,22E <sup>-07</sup>	1,26E <sup>-10</sup>	233,96	2,14	0,11	0,21	4,86	0,17	0,28	100	100,00	100
1,26E <sup>-07</sup>	1,22E <sup>-10</sup>	242,41	2,15	0,11	0,21	4,73	0,18	0,28	100	99,98	100
1,31 E <sup>-07</sup>	1,17E <sup>-10</sup>	251,43	2,16	0,10	0,22	4,59	0,19	0,29	100	100,00	99,83
1,36E <sup>-07</sup>	1,13E <sup>-10</sup>	260,64	2,18	0,10	0,23	4,47	0,19	0,30	100	100,00	100
1,41E <sup>-07</sup>	1,09E <sup>-10</sup>	270,04	2,19	0,10	0,24	4,34	0,20	0,30	100	100,00	100
1,46E <sup>-07</sup>	1,05E <sup>-10</sup>	280,02	2,21	0,10	0,25	4,23	0,21	0,31	100	99,97	100
1,51E <sup>-07</sup>	1,02E <sup>-10</sup>	290,20	2,22	0,10	0,26	4,11	0,22	0,31	100	100,00	100
1,57E <sup>-07</sup>	9,80E <sup>-11</sup>	300,94	2,24	0,09	0,27	4,00	0,22	0,32	100	100,00	100
1,62E <sup>-07</sup>	9,46E <sup>-11</sup>	311,88	2,25	0,09	0,28	3,90	0,23	0,33	100	100,00	100
1,68E <sup>-07</sup>	9,12E <sup>-11</sup>	323,40	2,27	0,09	0,29	3,79	0,24	0,33	100	100,00	100
1,75E <sup>-07</sup>	8,80E <sup>-11</sup>	335,30	2,28	0,09	0,30	3,69	0,25	0,34	100	100,00	100
1,81E <sup>-07</sup>	8,49E <sup>-11</sup>	347,58	2,30	0,09	0,31	3,60	0,26	0,35	100	100,00	100
1,88E <sup>-07</sup>	8,19E <sup>-11</sup>	360,25	2,31	0,09	0,32	3,51	0,27	0,36	100	100,00	100
1,95E <sup>-07</sup>	7,90E <sup>-11</sup>	373,49	2,33	0,09	0,33	3,42	0,28	0,37	100	100,00	100
2,02E <sup>-07</sup>	7,62E <sup>-11</sup>	387,12	2,34	0,08	0,34	3,33	0,29	0,38	100	100,00	100
2,09E <sup>-07</sup>	7,35E <sup>-11</sup>	401,32	2,36	0,08	0,35	3,25	0,30	0,39	100	100,00	100
2,17E <sup>-07</sup>	7,09E <sup>-11</sup>	415,91	2,38	0,08	0,37	3,17	0,32	0,40	100	99,90	100
2,25E <sup>-07</sup>	6,84E <sup>-11</sup>	431,26	2,39	0,08	0,38	3,09	0,33	0,41	100	100,00	100
2,33E <sup>-07</sup>	6,60E <sup>-11</sup>	447,00	2,41	0,08	0,39	3,02	0,34	0,42	100	100,00	100
2,41E <sup>-07</sup>	6,37E <sup>-11</sup>	463,31	2,43	0,08	0,41	2,95	0,35	0,43	100	100,00	100

2,50E <sup>-07</sup>	6,14E <sup>-11</sup>	480,40	2,44	0,08	0,42	2,88	0,37	0,44	100	100,00	100
2,59E <sup>-07</sup>	5,92E <sup>-11</sup>	498,05	2,46	0,07	0,44	2,81	0,38	0,46	100	100,00	100
2,69 E <sup>-07</sup>	5,71E <sup>-11</sup>	516,29	2,48	0,07	0,46	2,75	0,40	0,47	100	100,00	100
2,79E <sup>-07</sup>	5,51E <sup>-11</sup>	535,10	2,50	0,07	0,47	2,69	0,41	0,48	100	100,00	100
2,89 E <sup>-07</sup>	5,32E <sup>-11</sup>	554,67	2,51	0,07	0,49	2,63	0,43	0,50	100	100,00	100

Tabela B.2 – Resultados das eficiências difusional e por interceptação direta para o filtro de Quartzo

dp(m)	D	Pe	Cd	$\eta_d$	R	Cr	$\eta_{id}$	$\eta_t$	$\eta_{teóric}$	$\eta_{exper}$ Área menor	$\eta_{exper}$ Área maior
7,37E <sup>-09</sup>	2,08E <sup>-09</sup>	14,92	1,64	0,76	0,01	64,86	0,03	0,79	100	100	100
7,64E <sup>-09</sup>	2,00E <sup>-09</sup>	15,46	1,65	0,75	0,01	62,60	0,03	0,78	100	100	100
7,91E <sup>-09</sup>	1,94E <sup>-09</sup>	16,01	1,65	0,73	0,01	60,50	0,03	0,77	100	100	100
8,2E <sup>-09</sup>	1,87E <sup>-09</sup>	16,60	1,66	0,72	0,01	58,39	0,03	0,75	100	100	100
8,51E <sup>-09</sup>	1,80E <sup>-09</sup>	17,22	1,67	0,71	0,01	56,30	0,03	0,74	100	100	100
8,82E <sup>-09</sup>	1,74E <sup>-09</sup>	17,85	1,68	0,69	0,01	54,36	0,04	0,73	100	100	100
9,14E <sup>-09</sup>	1,68E <sup>-09</sup>	18,50	1,69	0,68	0,01	52,49	0,04	0,72	100	100	100
9,47E <sup>-09</sup>	1,62E <sup>-09</sup>	19,17	1,70	0,67	0,02	50,70	0,04	0,71	100	100	100
9,82E <sup>-09</sup>	1,56E <sup>-09</sup>	19,87	1,70	0,65	0,02	48,92	0,04	0,69	100	100	100
1,02E <sup>-08</sup>	1,50E <sup>-09</sup>	20,64	1,71	0,64	0,02	47,14	0,04	0,68	100	100	100
1,06E <sup>-08</sup>	1,45E <sup>-09</sup>	21,45	1,72	0,63	0,02	45,40	0,04	0,67	100	100	100
1,09E <sup>-08</sup>	1,41E <sup>-09</sup>	22,06	1,73	0,62	0,02	44,18	0,04	0,66	100	100	100
1,13E <sup>-08</sup>	1,36E <sup>-09</sup>	22,87	1,74	0,61	0,02	42,65	0,05	0,65	100	100	100
1,18E <sup>-08</sup>	1,30E <sup>-09</sup>	23,88	1,75	0,59	0,02	40,88	0,05	0,64	100	100	100
1,22E <sup>-08</sup>	1,26E <sup>-09</sup>	24,69	1,76	0,58	0,02	39,58	0,05	0,63	100	100	100
1,26E <sup>-08</sup>	1,22E <sup>-09</sup>	25,50	1,76	0,57	0,02	38,35	0,05	0,62	100	100	100
1,31E <sup>-08</sup>	1,17E <sup>-09</sup>	26,51	1,77	0,56	0,02	36,93	0,05	0,62	100	100	100
1,36E <sup>-08</sup>	1,13E <sup>-09</sup>	27,52	1,78	0,55	0,02	35,60	0,05	0,61	100	100	100
1,41E <sup>-08</sup>	1,09E <sup>-09</sup>	28,54	1,79	0,54	0,02	34,38	0,06	0,60	100	100	100
1,46E <sup>-08</sup>	1,05E <sup>-09</sup>	29,55	1,80	0,53	0,02	33,23	0,06	0,59	100	100	100
1,51E <sup>-08</sup>	1,01E <sup>-09</sup>	30,56	1,81	0,52	0,02	32,17	0,06	0,58	100	100	100
1,57E <sup>-08</sup>	9,76E <sup>-10</sup>	31,77	1,82	0,51	0,03	30,98	0,06	0,58	100	100	100
1,63E <sup>-08</sup>	9,40E <sup>-10</sup>	32,99	1,83	0,50	0,03	29,87	0,07	0,57	100	100	100
1,68E <sup>-08</sup>	9,12E <sup>-10</sup>	34,00	1,84	0,49	0,03	29,01	0,07	0,56	100	100	100
1,75E <sup>-08</sup>	8,75E <sup>-10</sup>	35,42	1,85	0,48	0,03	27,89	0,07	0,55	100	100	100
1,81E <sup>-08</sup>	8,46E <sup>-10</sup>	36,63	1,86	0,48	0,03	27,00	0,07	0,55	100	100	100
1,88E <sup>-08</sup>	8,15E <sup>-10</sup>	38,05	1,87	0,47	0,03	26,03	0,08	0,54	100	100	100
1,95E <sup>-08</sup>	7,86E <sup>-10</sup>	39,46	1,88	0,46	0,03	25,13	0,08	0,54	100	100	100
2,02E <sup>-08</sup>	7,58E <sup>-10</sup>	40,88	1,90	0,45	0,03	24,30	0,08	0,53	100	100	100
2,09E <sup>-08</sup>	7,33E <sup>-10</sup>	42,30	1,91	0,44	0,03	23,52	0,08	0,53	100	100	100
2,17E <sup>-08</sup>	7,06E <sup>-10</sup>	43,92	1,92	0,43	0,04	22,69	0,09	0,52	100	100	100
2,25E <sup>-08</sup>	6,81E <sup>-10</sup>	45,54	1,93	0,43	0,04	21,92	0,09	0,52	100	100	100
2,33E <sup>-08</sup>	6,57E <sup>-10</sup>	47,15	1,94	0,42	0,04	21,20	0,09	0,51	100	100	100
2,41E <sup>-08</sup>	6,36E <sup>-10</sup>	48,77	1,95	0,41	0,04	20,53	0,10	0,51	100	100	100
2,5E <sup>-08</sup>	6,13E <sup>-10</sup>	50,60	1,96	0,40	0,04	19,82	0,10	0,51	100	100	100
2,59E <sup>-08</sup>	5,91E <sup>-10</sup>	52,42	1,97	0,40	0,04	19,17	0,11	0,50	100	100	100
2,69E <sup>-08</sup>	5,69E <sup>-10</sup>	54,44	1,98	0,39	0,04	18,50	0,11	0,50	100	100	100
2,79E <sup>-08</sup>	5,49E <sup>-10</sup>	56,46	2,00	0,38	0,05	17,87	0,11	0,50	100	100	100
2,89E <sup>-08</sup>	5,30E <sup>-10</sup>	58,49	2,01	0,38	0,05	17,28	0,12	0,49	100	100	100
3E <sup>-08</sup>	5,11E <sup>-10</sup>	60,71	2,02	0,37	0,05	16,69	0,12	0,49	100	100	100
3,11E <sup>-08</sup>	4,93E <sup>-10</sup>	62,94	2,03	0,36	0,05	16,13	0,13	0,49	100	100	100
3,22E <sup>-08</sup>	4,76E <sup>-10</sup>	65,17	2,05	0,36	0,05	15,62	0,13	0,49	100	99,99	100
3,34E <sup>-08</sup>	4,59E <sup>-10</sup>	67,60	2,06	0,35	0,05	15,09	0,14	0,49	100	100	100
3,46E <sup>-08</sup>	4,43E <sup>-10</sup>	70,02	2,07	0,34	0,06	14,60	0,14	0,48	100	100	100

3,59E <sup>-08</sup>	4,27E <sup>-10</sup>	72,65	2,08	0,34	0,06	14,11	0,15	0,48	100	99,99	100
3,72E <sup>-08</sup>	4,12E <sup>-10</sup>	75,29	2,10	0,33	0,06	13,65	0,15	0,48	100	100	100
3,85E <sup>-08</sup>	3,98E <sup>-10</sup>	77,92	2,11	0,33	0,06	13,22	0,16	0,48	100	100	100
4E <sup>-08</sup>	3,83E <sup>-10</sup>	80,95	2,12	0,32	0,06	12,77	0,16	0,48	100	100	99,99
4,14E <sup>-08</sup>	3,70E <sup>-10</sup>	83,79	2,14	0,31	0,07	12,37	0,17	0,48	100	100	99,97
4,29E <sup>-08</sup>	3,57E <sup>-10</sup>	86,82	2,15	0,31	0,07	11,97	0,18	0,48	100	100	100
4,45E <sup>-08</sup>	3,44E <sup>-10</sup>	90,06	2,16	0,30	0,07	11,58	0,18	0,49	100	100	100
4,61E <sup>-08</sup>	3,32E <sup>-10</sup>	93,30	2,18	0,30	0,07	11,21	0,19	0,49	100	100	100
4,78E <sup>-08</sup>	3,20E <sup>-10</sup>	96,74	2,19	0,29	0,08	10,85	0,20	0,49	100	100	100
4,96E <sup>-08</sup>	3,09E <sup>-10</sup>	100,38	2,21	0,29	0,08	10,49	0,20	0,49	100	100	100
5,14E <sup>-08</sup>	2,98E <sup>-10</sup>	104,02	2,22	0,28	0,08	10,16	0,21	0,49	100	100	100
5,33E <sup>-08</sup>	2,87E <sup>-10</sup>	107,87	2,24	0,28	0,09	9,83	0,22	0,50	100	100	100
5,52E <sup>-08</sup>	2,77E <sup>-10</sup>	111,71	2,25	0,27	0,09	9,53	0,23	0,50	100	100	100
5,73E <sup>-08</sup>	2,67E <sup>-10</sup>	115,96	2,27	0,27	0,09	9,21	0,24	0,50	100	100	100
5,94E <sup>-08</sup>	2,58E <sup>-10</sup>	120,21	2,28	0,26	0,10	8,92	0,24	0,51	100	100	100
6,15E <sup>-08</sup>	2,49E <sup>-10</sup>	124,46	2,30	0,26	0,10	8,65	0,25	0,51	100	100	100
6,38E <sup>-08</sup>	2,40E <sup>-10</sup>	129,12	2,31	0,26	0,10	8,38	0,26	0,52	100	100	100
6,61E <sup>-08</sup>	2,32E <sup>-10</sup>	133,77	2,33	0,25	0,11	8,12	0,27	0,52	100	100	100
6,85E <sup>-08</sup>	2,24E <sup>-10</sup>	138,63	2,34	0,25	0,11	7,87	0,28	0,53	100	100	100
7,1E <sup>-08</sup>	2,16E <sup>-10</sup>	143,69	2,36	0,24	0,11	7,63	0,29	0,54	100	99,99	100
7,37E <sup>-08</sup>	2,08E <sup>-10</sup>	149,16	2,38	0,24	0,12	7,39	0,31	0,54	100	99,99	100
7,64E <sup>-08</sup>	2,00E <sup>-10</sup>	154,62	2,39	0,23	0,12	7,16	0,32	0,55	100	100	100
7,91E <sup>-08</sup>	1,94E <sup>-10</sup>	160,08	2,41	0,23	0,13	6,95	0,33	0,56	100	100	99,95
8,2E <sup>-08</sup>	1,87E <sup>-10</sup>	165,95	2,43	0,23	0,13	6,74	0,34	0,57	100	100	100
8,51E <sup>-08</sup>	1,80E <sup>-10</sup>	172,23	2,45	0,22	0,14	6,53	0,35	0,58	100	100	100
8,82E <sup>-08</sup>	1,74E <sup>-10</sup>	178,50	2,46	0,22	0,14	6,34	0,37	0,59	100	99,99	100
9,14E <sup>-08</sup>	1,68E <sup>-10</sup>	184,98	2,48	0,22	0,15	6,15	0,38	0,60	100	100	100
9,47E <sup>-08</sup>	1,62E <sup>-10</sup>	191,66	2,50	0,21	0,15	5,97	0,40	0,61	100	100	100
9,82E <sup>-08</sup>	1,56E <sup>-10</sup>	198,74	2,52	0,21	0,16	5,79	0,41	0,62	100	99,99	100
1,02E <sup>-07</sup>	1,50E <sup>-10</sup>	206,02	2,53	0,20	0,16	5,62	0,43	0,63	100	100	100
1,06E <sup>-07</sup>	1,45E <sup>-10</sup>	213,51	2,55	0,20	0,17	5,46	0,44	0,64	100	99,99	99,93
1,09E <sup>-07</sup>	1,40E <sup>-10</sup>	221,41	2,57	0,20	0,18	5,30	0,46	0,66	100	100	100
1,13E <sup>-07</sup>	1,35E <sup>-10</sup>	229,50	2,59	0,19	0,18	5,15	0,48	0,67	100	100	100
1,18E <sup>-07</sup>	1,30E <sup>-10</sup>	238,00	2,61	0,19	0,19	5,00	0,50	0,69	100	100	99,91
1,22E <sup>-07</sup>	1,26E <sup>-10</sup>	246,70	2,63	0,19	0,20	4,86	0,51	0,70	100	100	100
1,26E <sup>-07</sup>	1,21E <sup>-10</sup>	255,61	2,65	0,19	0,20	4,73	0,53	0,72	100	100	100
1,31E <sup>-07</sup>	1,17E <sup>-10</sup>	265,12	2,67	0,18	0,21	4,59	0,55	0,74	100	99,98	100
1,36E <sup>-07</sup>	1,13E <sup>-10</sup>	274,83	2,69	0,18	0,22	4,47	0,58	0,75	100	100	100
1,41E <sup>-07</sup>	1,09E <sup>-10</sup>	284,75	2,71	0,18	0,23	4,34	0,60	0,77	100	100	100
1,46E <sup>-07</sup>	1,05E <sup>-10</sup>	295,27	2,73	0,17	0,24	4,23	0,62	0,79	100	100	100
1,51E <sup>-07</sup>	1,01E <sup>-10</sup>	306,00	2,75	0,17	0,24	4,11	0,64	0,81	100	100	100
1,57E <sup>-07</sup>	9,77E <sup>-11</sup>	317,33	2,77	0,17	0,25	4,00	0,67	0,84	100	100	100
1,63E <sup>-07</sup>	9,43E <sup>-11</sup>	328,87	2,79	0,17	0,26	3,90	0,69	0,86	100	99,98	100
1,69E <sup>-07</sup>	9,09E <sup>-11</sup>	341,01	2,82	0,16	0,27	3,79	0,72	0,88	100	100	100
1,75E <sup>-07</sup>	8,77E <sup>-11</sup>	353,56	2,84	0,16	0,28	3,69	0,75	0,91	100	100	100
1,81E <sup>-07</sup>	8,46E <sup>-11</sup>	366,51	2,86	0,16	0,29	3,60	0,78	0,94	100	100	100
1,88E <sup>-07</sup>	8,16E <sup>-11</sup>	379,87	2,88	0,15	0,30	3,51	0,81	0,96	100	100	100
1,95E <sup>-07</sup>	7,87E <sup>-11</sup>	393,83	2,90	0,15	0,31	3,42	0,84	0,99	100	100	100
2,02E <sup>-07</sup>	7,59E <sup>-11</sup>	408,20	2,93	0,15	0,33	3,33	0,87	1,02	100	100	100
2,09E <sup>-07</sup>	7,33E <sup>-11</sup>	423,18	2,95	0,15	0,34	3,25	0,91	1,05	100	99,95	100
2,17E <sup>-07</sup>	7,07E <sup>-11</sup>	438,56	2,97	0,15	0,35	3,17	0,94	1,09	100	100	100
2,25E <sup>-07</sup>	6,82E <sup>-11</sup>	454,75	3,00	0,14	0,36	3,09	0,98	1,12	100	100	100
2,33E <sup>-07</sup>	6,58E <sup>-11</sup>	471,35	3,02	0,14	0,38	3,02	1,01	1,16	100	100	100
2,41E <sup>-07</sup>	6,35E <sup>-11</sup>	488,55	3,05	0,14	0,39	2,95	1,05	1,19	100	100	100
2,5E <sup>-07</sup>	6,12E <sup>-11</sup>	506,56	3,07	0,14	0,40	2,88	1,10	1,23	100	100	100
2,6E <sup>-07</sup>	5,90E <sup>-11</sup>	525,18	3,10	0,13	0,42	2,81	1,14	1,27	100	100	100
2,69E <sup>-07</sup>	5,69E <sup>-11</sup>	544,41	3,12	0,13	0,43	2,75	1,18	1,31	100	100	100



2,79E <sup>-07</sup>	5,49E <sup>-11</sup>	564,24	3,15	0,13	0,45	2,69	1,23	1,36	100	100	100
2,89E <sup>-07</sup>	5,30E <sup>-11</sup>	584,88	3,17	0,13	0,47	2,63	1,28	1,40	100	100	100

Como não foi possível obter o valor da porosidade do filtro de vidro da literatura, também não foi possível calcular a eficiência teórica.

Tabela B.3 – Resultados das eficiências difusional e por interceptação direta para o filtro de Poliéster

dp(m)	D	Pe	Cd	$\eta_d$	R	Cr	$\eta_{id}$	$\eta_t$	$\eta_{teórica}$	$\eta_{exper}$ Area menor	$\eta_{exper}$ Area maior
7,37E <sup>-09</sup>	2,04E <sup>-09</sup>	512,71	1,04	0,03	3,53E <sup>-04</sup>	64,86	9,73E <sup>-06</sup>	0,03	80,99	100	100
7,64E <sup>-09</sup>	1,97E <sup>-09</sup>	531,49	1,04	0,03	3,66E <sup>-04</sup>	62,60	1,01E <sup>-05</sup>	0,03	80,24	93,35	100
7,91E <sup>-09</sup>	1,90E <sup>-09</sup>	550,27	1,05	0,03	3,79E <sup>-04</sup>	60,50	1,05E <sup>-05</sup>	0,03	79,51	89,94	100
8,20E <sup>-09</sup>	1,83E <sup>-09</sup>	570,45	1,05	0,03	3,93E <sup>-04</sup>	58,39	1,08E <sup>-05</sup>	0,03	78,74	87,58	100
8,51E <sup>-09</sup>	1,76E <sup>-09</sup>	592,01	1,05	0,03	4,07E <sup>-04</sup>	56,30	1,13E <sup>-05</sup>	0,03	77,94	93,31	100
8,82E <sup>-09</sup>	1,70E <sup>-09</sup>	613,58	1,05	0,03	4,22E <sup>-04</sup>	54,36	1,17E <sup>-05</sup>	0,03	77,16	86,39	100
9,14E <sup>-09</sup>	1,64E <sup>-09</sup>	635,84	1,05	0,03	4,38E <sup>-04</sup>	52,49	1,21E <sup>-05</sup>	0,03	76,37	82,20	96,51
9,47E <sup>-09</sup>	1,59E <sup>-09</sup>	658,80	1,05	0,03	4,53E <sup>-04</sup>	50,70	1,26E <sup>-05</sup>	0,03	75,58	87,52	93,03
9,82E <sup>-09</sup>	1,53E <sup>-09</sup>	683,15	1,05	0,03	4,70E <sup>-04</sup>	48,92	1,30E <sup>-05</sup>	0,03	74,77	87,05	100
1,02E <sup>-08</sup>	1,47E <sup>-09</sup>	709,58	1,05	0,03	4,88E <sup>-04</sup>	47,14	1,35E <sup>-05</sup>	0,03	73,90	90,69	91,40
1,06E <sup>-08</sup>	1,42E <sup>-09</sup>	737,41	1,05	0,03	5,07E <sup>-04</sup>	45,40	1,41E <sup>-05</sup>	0,03	73,02	86,27	93,59
1,09E <sup>-08</sup>	1,38E <sup>-09</sup>	758,28	1,05	0,03	5,22E <sup>-04</sup>	44,18	1,45E <sup>-05</sup>	0,03	72,38	82,29	80,63
1,13E <sup>-08</sup>	1,33E <sup>-09</sup>	786,11	1,05	0,02	5,41E <sup>-04</sup>	42,65	1,50E <sup>-05</sup>	0,02	71,55	84,24	92,64
1,18E <sup>-08</sup>	1,27E <sup>-09</sup>	820,89	1,05	0,02	5,65E <sup>-04</sup>	40,88	1,57E <sup>-05</sup>	0,02	70,54	80,62	92,31
1,22E <sup>-08</sup>	1,23E <sup>-09</sup>	848,72	1,05	0,02	5,84E <sup>-04</sup>	39,58	1,63E <sup>-05</sup>	0,02	69,76	78,53	88,33
1,26E <sup>-08</sup>	1,19E <sup>-09</sup>	876,54	1,05	0,02	6,03E <sup>-04</sup>	38,35	1,68E <sup>-05</sup>	0,02	69,00	74,73	88,60
1,31E <sup>-08</sup>	1,15E <sup>-09</sup>	911,33	1,05	0,02	6,27E <sup>-04</sup>	36,93	1,75E <sup>-05</sup>	0,02	68,08	72,15	85,62
1,36E <sup>-08</sup>	1,10E <sup>-09</sup>	946,11	1,05	0,02	6,51E <sup>-04</sup>	35,60	1,82E <sup>-05</sup>	0,02	67,19	68,51	88,07
1,41E <sup>-08</sup>	1,06E <sup>-09</sup>	980,89	1,05	0,02	6,75E <sup>-04</sup>	34,38	1,89E <sup>-05</sup>	0,02	66,34	67,61	85,00
1,46E <sup>-08</sup>	1,03E <sup>-09</sup>	1015,68	1,06	0,02	6,99E <sup>-04</sup>	33,23	1,96E <sup>-05</sup>	0,02	65,51	67,30	84,95
1,51E <sup>-08</sup>	9,94E <sup>-10</sup>	1050,46	1,06	0,02	7,23E <sup>-04</sup>	32,17	2,03E <sup>-05</sup>	0,02	64,71	67,21	82,99
1,57E <sup>-08</sup>	9,56E <sup>-10</sup>	1092,20	1,06	0,02	7,52E <sup>-04</sup>	30,98	2,11E <sup>-05</sup>	0,02	63,78	63,70	84,92
1,63E <sup>-08</sup>	9,21E <sup>-10</sup>	1133,94	1,06	0,02	7,80E <sup>-04</sup>	29,87	2,19E <sup>-05</sup>	0,02	62,89	61,64	85,83
1,68E <sup>-08</sup>	8,94E <sup>-10</sup>	1168,72	1,06	0,02	8,04E <sup>-04</sup>	29,01	2,26E <sup>-05</sup>	0,02	62,17	60,82	76,97
1,75E <sup>-08</sup>	8,58E <sup>-10</sup>	1217,42	1,06	0,02	8,38E <sup>-04</sup>	27,89	2,36E <sup>-05</sup>	0,02	61,20	60,41	78,63
1,81E <sup>-08</sup>	8,30E <sup>-10</sup>	1259,16	1,06	0,02	8,66E <sup>-04</sup>	27,00	2,44E <sup>-05</sup>	0,02	60,40	59,38	76,03
1,88E <sup>-08</sup>	7,99E <sup>-10</sup>	1307,86	1,06	0,02	9,00E <sup>-04</sup>	26,03	2,54E <sup>-05</sup>	0,02	59,50	58,31	75,81
1,95E <sup>-08</sup>	7,70E <sup>-10</sup>	1356,55	1,06	0,02	9,33E <sup>-04</sup>	25,13	2,64E <sup>-05</sup>	0,02	58,64	56,38	69,04
2,02E <sup>-08</sup>	7,43E <sup>-10</sup>	1405,25	1,06	0,02	9,67E <sup>-04</sup>	24,30	2,74E <sup>-05</sup>	0,02	57,81	55,00	70,37
2,09E <sup>-08</sup>	7,18E <sup>-10</sup>	1453,95	1,06	0,02	1,00E <sup>-03</sup>	23,52	2,84E <sup>-05</sup>	0,02	57,01	53,50	67,26
2,17E <sup>-08</sup>	6,92E <sup>-10</sup>	1509,60	1,06	0,02	1,04E <sup>-03</sup>	22,69	2,95E <sup>-05</sup>	0,02	56,14	49,43	65,26
2,25E <sup>-08</sup>	6,67E <sup>-10</sup>	1565,25	1,06	0,02	1,08E <sup>-03</sup>	21,92	3,06E <sup>-05</sup>	0,02	55,30	50,74	63,15
2,33E <sup>-08</sup>	6,44E <sup>-10</sup>	1620,91	1,06	0,02	1,12E <sup>-03</sup>	21,20	3,18E <sup>-05</sup>	0,02	54,49	47,71	61,97
2,41E <sup>-08</sup>	6,23E <sup>-10</sup>	1676,56	1,07	0,02	1,15E <sup>-03</sup>	20,53	3,29E <sup>-05</sup>	0,02	53,72	47,07	59,56
2,50E <sup>-08</sup>	6,01E <sup>-10</sup>	1739,17	1,07	0,01	1,20E <sup>-03</sup>	19,82	3,42E <sup>-05</sup>	0,01	52,88	43,27	56,65
2,59E <sup>-08</sup>	5,80E <sup>-10</sup>	1801,78	1,07	0,01	1,24E <sup>-03</sup>	19,17	3,55E <sup>-05</sup>	0,01	52,08	43,30	56,82
2,69E <sup>-08</sup>	5,58E <sup>-10</sup>	1871,35	1,07	0,01	1,29E <sup>-03</sup>	18,50	3,69E <sup>-05</sup>	0,01	51,22	42,81	53,24
2,79E <sup>-08</sup>	5,38E <sup>-10</sup>	1940,92	1,07	0,01	1,34E <sup>-03</sup>	17,87	3,84E <sup>-05</sup>	0,01	50,41	41,67	58,31
2,89E <sup>-08</sup>	5,20E <sup>-10</sup>	2010,48	1,07	0,01	1,38E <sup>-03</sup>	17,28	3,98E <sup>-05</sup>	0,01	49,62	39,60	54,06
3,00E <sup>-08</sup>	5,00E <sup>-10</sup>	2087,01	1,07	0,01	1,44E <sup>-03</sup>	16,69	4,15E <sup>-05</sup>	0,01	48,80	38,47	51,09
3,11E <sup>-08</sup>	4,83E <sup>-10</sup>	2163,53	1,07	0,01	1,49E <sup>-03</sup>	16,13	4,31E <sup>-05</sup>	0,01	48,02	37,73	48,96
3,22E <sup>-08</sup>	4,66E <sup>-10</sup>	2240,05	1,07	0,01	1,54E <sup>-03</sup>	15,62	4,47E <sup>-05</sup>	0,01	47,26	36,39	51,45
3,34E <sup>-08</sup>	4,50E <sup>-10</sup>	2323,53	1,07	0,01	1,60E <sup>-03</sup>	15,09	4,65E <sup>-05</sup>	0,01	46,48	34,18	48,83

3,46E <sup>-08</sup>	4,34E <sup>-10</sup>	2407,01	1,07	0,01	1,66E <sup>-03</sup>	14,60	4,82E <sup>-05</sup>	0,01	45,73	32,14	48,62
3,59E <sup>-08</sup>	4,18E <sup>-10</sup>	2497,45	1,07	0,01	1,72E <sup>-03</sup>	14,11	5,02E <sup>-05</sup>	0,01	44,96	31,59	46,22
3,72E <sup>-08</sup>	4,04E <sup>-10</sup>	2587,89	1,08	0,01	1,78E <sup>-03</sup>	13,65	5,21E <sup>-05</sup>	0,01	44,22	30,70	47,51
3,85E <sup>-08</sup>	3,90E <sup>-10</sup>	2678,32	1,08	0,01	1,84E <sup>-03</sup>	13,22	5,41E <sup>-05</sup>	0,01	43,51	29,45	45,09
4,00E <sup>-08</sup>	3,75E <sup>-10</sup>	2782,67	1,08	0,01	1,91E <sup>-03</sup>	12,77	5,63E <sup>-05</sup>	0,01	42,73	27,85	41,09
4,14E <sup>-08</sup>	3,63E <sup>-10</sup>	2880,07	1,08	0,01	1,98E <sup>-03</sup>	12,37	5,85E <sup>-05</sup>	0,01	42,04	26,67	38,17
4,29E <sup>-08</sup>	3,50E <sup>-10</sup>	2984,42	1,08	0,01	2,05E <sup>-03</sup>	11,97	6,08E <sup>-05</sup>	0,01	41,33	26,74	40,70
4,45E <sup>-08</sup>	3,37E <sup>-10</sup>	3095,73	1,08	0,01	2,13E <sup>-03</sup>	11,58	6,32E <sup>-05</sup>	0,01	40,61	24,00	39,84
4,61E <sup>-08</sup>	3,26E <sup>-10</sup>	3207,03	1,08	0,01	2,21E <sup>-03</sup>	11,21	6,57E <sup>-05</sup>	0,01	39,93	22,64	37,44
4,78E <sup>-08</sup>	3,14E <sup>-10</sup>	3325,30	1,08	0,01	2,29E <sup>-03</sup>	10,85	6,83E <sup>-05</sup>	0,01	39,23	21,81	33,66
4,96E <sup>-08</sup>	3,03E <sup>-10</sup>	3450,52	1,08	0,01	2,37E <sup>-03</sup>	10,49	7,12E <sup>-05</sup>	0,01	38,53	21,06	31,21
5,14E <sup>-08</sup>	2,92E <sup>-10</sup>	3575,74	1,08	0,01	2,46E <sup>-03</sup>	10,16	7,40E <sup>-05</sup>	0,01	37,87	21,39	30,44
5,33E <sup>-08</sup>	2,82E <sup>-10</sup>	3707,91	1,09	0,01	2,55E <sup>-03</sup>	9,83	7,70E <sup>-05</sup>	0,01	37,20	22,10	30,88
5,52E <sup>-08</sup>	2,72E <sup>-10</sup>	3840,09	1,09	0,01	2,64E <sup>-03</sup>	9,53	8,00E <sup>-05</sup>	0,01	36,56	19,51	26,25
5,73E <sup>-08</sup>	2,62E <sup>-10</sup>	3986,18	1,09	0,01	2,74E <sup>-03</sup>	9,21	8,34E <sup>-05</sup>	0,01	35,89	20,13	29,71
5,94E <sup>-08</sup>	2,53E <sup>-10</sup>	4132,27	1,09	0,01	2,84E <sup>-03</sup>	8,92	8,68E <sup>-05</sup>	0,01	35,26	17,72	28,63
6,15E <sup>-08</sup>	2,44E <sup>-10</sup>	4278,36	1,09	0,01	2,94E <sup>-03</sup>	8,65	9,02E <sup>-05</sup>	0,01	34,65	17,98	29,50
6,38E <sup>-08</sup>	2,35E <sup>-10</sup>	4438,37	1,09	0,01	3,05E <sup>-03</sup>	8,38	9,40E <sup>-05</sup>	0,01	34,03	17,83	30,00
6,61E <sup>-08</sup>	2,27E <sup>-10</sup>	4598,37	1,09	0,01	3,16E <sup>-03</sup>	8,12	9,78E <sup>-05</sup>	0,01	33,43	17,17	25,48
6,85E <sup>-08</sup>	2,19E <sup>-10</sup>	4765,33	1,09	0,01	3,28E <sup>-03</sup>	7,87	1,02E <sup>-04</sup>	0,01	32,84	14,86	25,17
7,10E <sup>-08</sup>	2,11E <sup>-10</sup>	4939,25	1,09	0,01	3,40E <sup>-03</sup>	7,63	1,06E <sup>-04</sup>	0,01	32,25	13,78	25,93
7,37E <sup>-08</sup>	2,04E <sup>-10</sup>	5127,08	1,10	0,01	3,53E <sup>-03</sup>	7,39	1,10E <sup>-04</sup>	0,01	31,65	14,99	28,32
7,64E <sup>-08</sup>	1,97E <sup>-10</sup>	5314,91	1,10	0,01	3,66E <sup>-03</sup>	7,16	1,15E <sup>-04</sup>	0,01	31,09	13,80	20,19
7,91E <sup>-08</sup>	1,90E <sup>-10</sup>	5502,74	1,10	0,01	3,79E <sup>-03</sup>	6,95	1,20E <sup>-04</sup>	0,01	30,55	14,28	24,47
8,20E <sup>-08</sup>	1,83E <sup>-10</sup>	5704,48	1,10	0,01	3,93E <sup>-03</sup>	6,74	1,25E <sup>-04</sup>	0,01	30,00	14,85	17,46
8,51E <sup>-08</sup>	1,76E <sup>-10</sup>	5920,14	1,10	0,01	4,07E <sup>-03</sup>	6,53	1,30E <sup>-04</sup>	0,01	29,44	11,81	19,08
8,82E <sup>-08</sup>	1,70E <sup>-10</sup>	6135,80	1,10	0,01	4,22E <sup>-03</sup>	6,34	1,36E <sup>-04</sup>	0,01	28,92	11,80	19,73
9,14E <sup>-08</sup>	1,64E <sup>-10</sup>	6358,41	1,10	0,01	4,38E <sup>-03</sup>	6,15	1,41E <sup>-04</sup>	0,01	28,40	11,16	22,02
9,47E <sup>-08</sup>	1,59E <sup>-10</sup>	6587,98	1,10	0,01	4,53E <sup>-03</sup>	5,97	1,47E <sup>-04</sup>	0,01	27,90	10,18	14,89
9,82E <sup>-08</sup>	1,53E <sup>-10</sup>	6831,47	1,10	0,01	4,70E <sup>-03</sup>	5,79	1,54E <sup>-04</sup>	0,01	27,40	11,41	13,55
1,02E <sup>-07</sup>	1,47E <sup>-10</sup>	7081,91	1,11	0,01	4,87E <sup>-03</sup>	5,62	1,60E <sup>-04</sup>	0,01	26,91	12,14	13,23
1,06E <sup>-07</sup>	1,42E <sup>-10</sup>	7339,30	1,11	0,01	5,05E <sup>-03</sup>	5,46	1,67E <sup>-04</sup>	0,01	26,43	9,93	9,76
1,09E <sup>-07</sup>	1,37E <sup>-10</sup>	7610,62	1,11	0,01	5,24E <sup>-03</sup>	5,30	1,74E <sup>-04</sup>	0,01	25,96	7,11	10,19
1,13E <sup>-07</sup>	1,32E <sup>-10</sup>	7888,88	1,11	0,01	5,43E <sup>-03</sup>	5,15	1,82E <sup>-04</sup>	0,01	25,50	8,63	13,77
1,18E <sup>-07</sup>	1,28E <sup>-10</sup>	8181,06	1,11	0,01	5,63E <sup>-03</sup>	5,00	1,90E <sup>-04</sup>	0,01	25,04	6,49	15,04
1,22E <sup>-07</sup>	1,23E <sup>-10</sup>	8480,20	1,11	0,01	5,84E <sup>-03</sup>	4,86	1,98E <sup>-04</sup>	0,01	24,60	7,44	13,25
1,26E <sup>-07</sup>	1,19E <sup>-10</sup>	8786,30	1,11	0,01	6,05E <sup>-03</sup>	4,73	2,07E <sup>-04</sup>	0,01	24,18	9,67	21,99
1,31E <sup>-07</sup>	1,15E <sup>-10</sup>	9113,26	1,12	0,01	6,27E <sup>-03</sup>	4,59	2,16E <sup>-04</sup>	0,01	23,75	8,39	17,89
1,36E <sup>-07</sup>	1,11E <sup>-10</sup>	9447,18	1,12	0,01	6,50E <sup>-03</sup>	4,47	2,26E <sup>-04</sup>	0,01	23,34	5,87	5,60
1,41E <sup>-07</sup>	1,07E <sup>-10</sup>	9788,06	1,12	0,00	6,74E <sup>-03</sup>	4,34	2,36E <sup>-04</sup>	0,01	22,95	5,99	11,53
1,46E <sup>-07</sup>	1,03E <sup>-10</sup>	10149,8	1,12	0,00	6,98E <sup>-03</sup>	4,23	2,47E <sup>-04</sup>	0,01	22,55	6,54	14,66
1,51E <sup>-07</sup>	9,93E <sup>-11</sup>	10518,5	1,12	0,00	7,24E <sup>-03</sup>	4,11	2,58E <sup>-04</sup>	0,00	22,18	8,98	11,93
1,57E <sup>-07</sup>	9,58E <sup>-11</sup>	10908,0	1,12	0,00	7,51E <sup>-03</sup>	4,00	2,70E <sup>-04</sup>	0,00	21,80	7,50	11,82
1,63E <sup>-07</sup>	9,24E <sup>-11</sup>	11304,6	1,12	0,00	7,78E <sup>-03</sup>	3,90	2,82E <sup>-04</sup>	0,00	21,45	4,21	9,03
1,69E <sup>-07</sup>	8,91E <sup>-11</sup>	11722,0	1,13	0,00	8,07E <sup>-03</sup>	3,79	2,95E <sup>-04</sup>	0,00	21,10	4,84	9,45
1,75E <sup>-07</sup>	8,59E <sup>-11</sup>	12153,3	1,13	0,00	8,36E <sup>-03</sup>	3,69	3,09E <sup>-04</sup>	0,00	20,76	9,21	15,16
1,81E <sup>-07</sup>	8,29E <sup>-11</sup>	12598,5	1,13	0,00	8,67E <sup>-03</sup>	3,60	3,23E <sup>-04</sup>	0,00	20,43	7,59	8,41
1,88E <sup>-07</sup>	8,00E <sup>-11</sup>	13057,7	1,13	0,00	8,99E <sup>-03</sup>	3,51	3,39E <sup>-04</sup>	0,00	20,11	2,67	11,21
1,95E <sup>-07</sup>	7,72E <sup>-11</sup>	13537,7	1,13	0,00	9,32E <sup>-03</sup>	3,42	3,55E <sup>-04</sup>	0,00	19,80	5,38	-
2,02E <sup>-07</sup>	7,44E <sup>-11</sup>	14031,6	1,13	0,00	9,66E <sup>-03</sup>	3,33	3,71E <sup>-04</sup>	0,00	19,51	3,84	15,96
2,09E <sup>-07</sup>	7,18E <sup>-11</sup>	14546,4	1,13	0,00	1,00E <sup>-02</sup>	3,25	3,89E <sup>-04</sup>	0,00	19,22	1,21	8,63
2,17E <sup>-07</sup>	6,93E <sup>-11</sup>	15075,1	1,14	0,00	1,04E <sup>-02</sup>	3,17	4,07E <sup>-04</sup>	0,00	18,95	3,08	16,01
2,25E <sup>-07</sup>	6,68E <sup>-11</sup>	15631,6	1,14	0,00	1,08E <sup>-02</sup>	3,09	4,27E <sup>-04</sup>	0,00	18,69	9,43	9,69
2,33E <sup>-07</sup>	6,45E <sup>-11</sup>	16202,1	1,14	0,00	1,11E <sup>-02</sup>	3,02	4,48E <sup>-04</sup>	0,00	18,44	3,11	8,11
2,41E <sup>-07</sup>	6,22E <sup>-11</sup>	16793,4	1,14	0,00	1,16E <sup>-02</sup>	2,95	4,70E <sup>-04</sup>	0,00	18,20	5,51	8,97
2,50E <sup>-07</sup>	6,00E <sup>-11</sup>	17412,5	1,14	0,00	1,20E <sup>-02</sup>	2,88	4,93E <sup>-04</sup>	0,00	17,97	16,45	12,17
2,60E <sup>-07</sup>	5,79E <sup>-11</sup>	18052,6	1,14	0,00	1,24E <sup>-02</sup>	2,81	5,17E <sup>-04</sup>	0,00	17,75	1,78	4,18

2,69E <sup>-07</sup>	5,58E <sup>-11</sup>	18713,4	1,15	0,00	1,29E <sup>-02</sup>	2,75	5,43E <sup>-04</sup>	0,00	17,55	4,05	3,73
2,79E <sup>-07</sup>	5,39E <sup>-11</sup>	19395,2	1,15	0,00	1,33E <sup>-02</sup>	2,69	5,70E <sup>-04</sup>	0,00	17,36	13,74	1,08
2,89E <sup>-07</sup>	5,20E <sup>-11</sup>	20104,8	1,15	0,00	1,38E <sup>-02</sup>	2,63	5,99E <sup>-04</sup>	0,00	17,18	2,01	15,44