

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CAMPUS SÃO CARLOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ANA ELISA LISTA

**CARACTERIZAÇÃO DE MEIOS FILTRANTES ATRAVÉS DO  
ESTUDO DAS NORMAS DE PADRONIZAÇÃO DE TESTES  
EUROPEIA E AMERICANA**

**Orientadora: Prof. Dra. Monica Lopes Aguiar**

**São Carlos –SP**

**2018**

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

Ana Elisa Lista

**CARACTERIZAÇÃO DE MEIOS FILTRANTES ATRAVÉS DO  
ESTUDO DAS NORMAS DE PADRONIZAÇÃO DE TESTES  
EUROPEIA E AMERICANA**

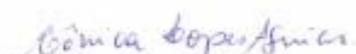
Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Química,  
para obtenção do título de mestre em  
Engenharia Química.

Orientadora: Prof. Dra. Monica Lopes Aguiar

São Carlos  
2018

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE ANA ELISA LISTA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 02 DE MARÇO DE 2018.

BANCA EXAMINADORA:

  
Mônica Lopes Aguiar  
Orientadora, UFSCar

  
Vádila Giovana Guerra Béttega  
UFSCar

  
Rafael Sartim  
UFES

  
Eduardo Hiromitsu Tanabe  
UFSM

“Qualquer coisa que você possa fazer ou sonhar fazer, comece. A ousadia possui gênio, poder e magia em seu interior”.

(Goethe)

À minha família, amigos e Alexandre,

Meus maiores motivadores.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me amparar nos momentos difíceis e por me mostrar sempre o melhor caminho.

Agradeço a meus pais e minha irmã, que mesmo estando distantes me apoiaram incondicionalmente durante essa longa jornada.

Ao Alexandre, por todos esses anos de companheirismo, lealdade e apoio incondicional.

À Rita, que sempre me ajudou nas dificuldades e sempre se fez presente.

À professora Monica Lopes Aguiar pelas correções, sugestões, suporte e orientação na elaboração desse trabalho.

Aos professores: Vadila Guerra, Eduardo Tanabe e Rafael Sartim pela participação na avaliação deste trabalho.

A Universidade Federal de São Carlos, pela oportunidade de realizar o mestrado em Engenharia Química.

Aos técnicos Marcos e Oscar que sempre se mostraram solícitos em todas as dificuldades encontradas.

Ao Departamento de Engenharia Química e seu corpo docente, que me forneceram o conhecimento necessário para conclusão dessa etapa.

Aos meus amigos de graduação, Paula, Jéssica, Fabiana, Rafael e Nathalia que sempre me apoiaram nos momentos difíceis.

Aos meus colegas da pós graduação e do laboratório que sempre me motivaram e compartilharam experiências.

A todos que direta ou indiretamente estiveram presentes ao meu lado nestes anos de pós graduação.

## RESUMO

Nos dias de hoje, as pessoas passam grande parte do seu dia em ambientes fechados com ar condicionados ligados. Ora no trabalho, ou no carro e até mesmo em casa, elas se expõem ao que atualmente se denomina como poluição interna. O mercado oferece uma variedade de filtros com diferentes performances de eficiência, servindo, conseqüentemente, a distintas aplicações. Para saber qual deles é o mais apropriado a determinada situação, deve-se usar normas que descrevam classificações de filtros, as quais são realizadas através de testes padronizados. Todavia, tais normas fornecem diferentes informações com relação a eficiência, capacidade de retenção de pó e perda de carga. Conseqüentemente, a falta de correlação entre elas causa dúvidas e mal uso dos filtros. Perante esse contexto, o presente estudo teve como objetivo principal realizar experimentos seguindo os testes das normas europeia (EN 779/1822) e também americana (ASHRAE 52.2) a fim de compará-las posteriormente. Para o estudo foram utilizados cinco diferentes meios filtrantes. Os mesmos se dividiam em duas classes: filtros HEPA (vidro e quartzo) e filtros industriais (celulose, carvão ativado e poliéster) Para simular a passagem de aerossol pelo filtro foram adaptados aparatos experimentais atendendo às restrições específicas de cada norma. Primeiramente foram realizadas as caracterizações dos filtros (diâmetro de fibras, porosidade e espessura) por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Na seqüência, a eficiência de coleta para a condição de filtração (diferentes aerossóis e procedimento de cálculo) de cada norma (ASHRAE 52.2 e EN1822/779) foi realizada. Comparando-se os resultados obtidos, nota-se que para os filtros HEPA (vidro e quartzo) os resultados de eficiência obtidos através de cada norma são semelhantes (próximos de 100%), porém apenas a norma americana conseguiu classificar o quartzo como o mais eficiente. Dentre os filtros mais grossos, ambas as normas apontaram o meio filtrante de celulose como o mais eficiente, porém obtiveram diferentes valores finais de eficiência de coleta.

Palavras chaves: Nanopartículas. EN 779. ASHRAE 52.2.

## ABSTRACT

Nowadays, people spend considerable part of their time indoors with air conditioners on. Even at work, in a car or at home, they expose themselves to what is known as indoor air pollution. The market offers a variety of filters with different efficiency performances, thus serving for different applications. In order to know which one is most appropriate to a given situation, standards should be used that describe filter ratings, which are performed through standardized tests. However, such standards provide different information regarding efficiency, dust holding capacity and load loss. Consequently, the lack of correlation between them causes doubts and misuse of the filters. Against this background, the main objective of this study is to carry out experiments following the tests of European standards (EN 779/1822) and also American (ASHRAE 52.2) in order to compare them later. Five different filter media were used. They are divided into two categories: HEPA filters (glass and quartz) and industrial filters (cellulose, activated carbon and polyester). In order to simulate the passage of air through the filter, an experimental apparatus was adapted, taking into account the specific restrictions of each standardization. First, the characterization of the filters (fiber diameter, porosity and thickness) were carried out by means of the Scanning Electron Microscope (SEM). Afterwards, efficiency following each standardization condition (different aerosol) was collected. The HEPA filters results when compared are very similar (close to 100%). However, only American standard was able to give a better ranking for the filter media of quartz. Between the coarse filters, American and European showed that cellulose is more efficient. The same filter has shown different efficiency values depending on the standard condition which was chosen.

Keyword: Nanoparticles. EN 779. ASHRAE 52.2

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Filtro metálico viscoso .....	14
Figura 2- Filtro bolsa.....	15
Figura 3- Filtro plissado .....	16
Figura 4- Filtros absolutos.....	17
Figura 5-Gráfico para determinar MPPS.....	25
Figura 6- Mecanismos de coleta de filtração.....	29
Figura 7- Mecanismos de coleta em função do diâmetro da partícula .....	30
Figura 9- Amostras dos meios filtrantes, a-) celulósico; b-) poliéster; c-) carvão ativado.....	42
Figura 10- Amostras dos meios filtrantes absolutos: a-) HEPA de vidro e b-) HEPA de quartzo.....	43
Figura 11- Amostra de carvão ativado analisada pelo MEV Inspect S50 na ampliação de 100x .....	44
Figura 12- Fotografia HEPA de quartzo tirada pelo MEV Inspect S-50 na ampliação de 200x.....	45
Figura 13- Fotografia da amostra de carvão ativado inserido no Image Pro Plus 7.0.....	46
Figura 14- Interface do software Image Pro Plus 7.0 na obtenção dos diâmetros das fibras .....	48
Figura 15- Aparato experimental de filtração da linha 1 utilizado para reproduzir a EN779 e a EN1822 .....	51
Figura 16- Aparato experimental de filtração da linha 1 utilizado para reproduzir a ASHRAE 52.2 ..	51
Figura 17- Unidade experimental com dispersor de pó da linha 2.....	52
Figura 18- Vista lateral e frontal do compressor de ar modelo Schulz MSV 12/175.....	53
Figura 19- Dispositivo de filtração.....	54
Figura 20- Gerador de partículas Modelo 3079 da TSI.....	55
Figura 21- Secador de difusão com sílica .....	56
Figura 22- a-) Neutralizador de Criptônio b-) Caixa preta com neutralizador de amerício .....	57
Figura 23- Rotâmetro Gilmont tamanho 14 .....	57
Figura 24- a- Dispositivo de filtração usado como suporte ao meio filtrante; b- manômetro digital....	58
Figura 25- Posicionamento da sonda de amostragem .....	59
Figura 26-SMPS.....	59
Figura 27- Esquema de funcionamento do Classificador Eletrostático com o DMA acoplado .....	60
Figura 28- Foto frontal do dispersor de pó da TSI.....	62
Figura 29- Esquema de funcionamento do dispersor de pó .....	63
Figura 30- Aerodynamic Particle Size (APS) .....	64
Figura 31- Aparato experimental da linha 2.....	64
Figura 32- Ebuliômetro para a amostragem isocinética.....	67
Figura 33-Número de fibras em função do diâmetro para os cinco meios filtrantes.....	70
Figura 34-Distribuição para uma mesma escala com os cinco meios filtrantes .....	71
Figura 35-Fotografia obtida pelo MEV para o meio filtrante de quartzo.....	72
Figura 36-Fotografia obtida pelo MEV para o meio filtrante de vidro .....	72
Figura 37- Fotografia tirada do MEV para o filtro celulósico .....	74
Figura 38- Fotografia tirada pelo MEV para o filtro de poliéster .....	74
Figura 39-Fotografia tirada pelo MEV para o filtro de carvão ativado.....	75
Figura 40-Porosidade teórica (Ergun) versus Porosidade experimental .....	75
Figura 41-Porosidade teórica (Happel) versus Porosidade experimental.....	76
Figura 42-Porosidade teórica (Kuwabara) versus Porosidade experimental.....	76

Figura 43- Fotografias tiradas pelo MEV com medidas de espessura para o a-) carvão ativado e b-) poliéster .....	77
Figura 44- Fotografias tiradas pelo MEV com medidas de espessura para o celulose .....	78
Figura 45- Fotografia tirada pelo MEV com medidas de espessura para o quartzo.....	78
Figura 46- Fotografias tiradas pelo MEV com medidas de espessura para o vidro .....	79
Figura 47- Gráfico de perda de carga e velocidade para os filtros HEPA .....	80
Figura 48- Gráfico de perda de carga e velocidade para os filtros industriais .....	81
Figura 49- Distribuição de concentração de partículas antes (a-) e após (b-) do carregamento.....	82
Figura 50- Eficiência obtida para o filtro de celulose antes e após o carregamento de pó.....	84
Figura 51- Eficiência obtida para o filtro de carvão ativado antes e após o carregamento de pó .....	86
Figura 52- Eficiência obtida para o filtro de poliéster antes e após o carregamento de pó .....	87
Figura 53- Gráficos de eficiência do filtro HEPA de vidro.....	89
Figura 54- Gráficos de eficiência para o filtro HEPA de quartzo .....	90
Figura 55- Distribuição granulométrica para as medições de eficiência segundo a ASHRAE 52.2 .....	91
Figura 56- Gráficos de eficiência segundo a ASHRAE 52.2 para os filtros grossos .....	93
Figura 57- Distribuição granulométrica do DOP usado para a ASHRAE 52.2 em filtros HEPA.....	94
Figura 58- Gráficos de eficiência segundo a ASHRAE 52.2 para os filtros Hepa.....	95
Figura 59- Comparação eficiência experimental e teórica para os meios filtrantes grossos segundo a norma americana .....	97
Figura 60- Comparação eficiência experimental e teórica para os meios filtrantes grossos segundo a norma europeia.....	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação de filtros usando o MERV pela ASHRAE 52.1/52.2.....	19
Tabela 2- Determinação do MERV com base no PSE.....	20
Tabela 3- Classificação de filtros pela norma EN 779 .....	22
Tabela 4- Eficiência inicial para uma faixa de tamanho $i$ .....	22
Tabela 5- Classificação de filtros pela norma EN 779 .....	23
Tabela 6- Classificação de filtros absolutos pela norma EN 1822 .....	26
Tabela 7- Classificação de filtros absolutos pela norma IEST.....	27
Tabela 8- Classificação de eficiência para os grupos H, U e E.....	28
Tabela 9- Comparação entre as normas com relação as condições de operação.....	68
Tabela 10- Diâmetro de fibras médio ( $D_f$ ) .....	70
Tabela 11- Porosidade experimental e teórica para os cinco meios filtrantes.....	73
Tabela 12- Valores médios de espessura.....	77
Tabela 13- Valores de coeficiente de permeabilidade ( $K_1$ ) para os meios filtrantes .....	79
Tabela 14- Dados para cálculo de eficiência para o filtro de celulose (antes do carregamento) segundo a norma europeia.....	83
Tabela 15- Dados para cálculo de eficiência para o filtro de celulose (após o carregamento) segundo a norma europeia.....	83
Tabela 16- Dados para cálculo de eficiência para o filtro de carvão ativado (antes do carregamento) segundo a norma europeia.....	85
Tabela 17- Dados para cálculo de eficiência para o filtro de carvão ativado (após o carregamento) segundo a norma europeia.....	85

Tabela 18-Dados para cálculo de eficiência para o filtro de poliéster (antes do carregamento) segundo a norma europeia .....	86
Tabela 19-Dados para cálculo de eficiência para o filtro de poliéster (após o carregamento) segundo a norma europeia.....	87
Tabela 20-Classificação de eficiência segundo a ASHRAE 52.2 para o carvão ativado .....	92
Tabela 21-Classificação de eficiência segundo a ASHRAE 52.2 para o poliéster .....	92
Tabela 22-Classificação de eficiência segundo a ASHRAE 52.2 para o celulósico .....	92
Tabela 23-Eficiência segundo ASHRAE 52.2 para filtros HEPA .....	95
Tabela 24-Comparação entre resultados de eficiência segundo as normas.....	96

## 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>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]
$\overline{d}_f$	Diâmetro médio das fibras	[L]
d <sub>fi</sub>	Diâmetro das fibras com determinada faixa de tamanho	[L]
d <sub>p</sub>	Diâmetro da partícula	[L]
d <sub>C</sub>	Variação da concentração de partículas	[-]
d <sub>L</sub>	Elemento diferencial da espessura do filtro	[L]
E	Eficiência de coleta	[-]
E <sub>ii</sub>	Eficiência de coleta em relação a partícula i	[-]
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	[-]
K <sub>u</sub>	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	[-]

$N_C$	Número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo	[-]
$n_i$	Número de fibras com determinado diâmetro	[-]
$n_{i,1}$	Número de partículas em uma faixa i a jusante do filtro	[-]
$N_{i,1}$	Número de partículas em uma faixa i a montante do filtro	[-]
$N_p$	Número de partículas depositadas por unidade de tempo	[-]
$P$	Pressão absoluta	$[ML^{-1}t^{-2}]$
$Pe$	Número de Peclet	[-]
$R$	Parâmetro de interceptação direta	[-]
$S$	Desvio padrão	[-]
$S$	Erro padrão	[-]
$St$	Número de Stokes	[-]
$T$	Temperatura absoluta	[T]
$U_o$	Velocidade do gás	[L/t]
$V$	Velocidade intersticial do gás	$[Lt^{-1}]$
$v_s$	Velocidade superficial do gás	$[Lt^{-1}]$
$\Delta P$	Queda de pressão	$[ML^{-1}t^{-2}]$
$A$	Densidade de empacotamento	[-]
$B$	Volume ocupado pelas fibras	$[L^3]$
$E$	Porosidade do meio filtrante	[-]
$\epsilon_i$	Porosidade de determinada fração de fibras	[-]
$\eta_d$	Eficiência de coleta difusional	[-]
$H_g$	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	$[ML^{-3}]$
$\mu$	Viscosidade do gás	$[ML^{-1}t^{-1}]$
$\Lambda$	Caminho livre médio das moléculas no gás	[L]

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>3</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>4</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2. OBJETIVO</b> .....	<b>11</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1. Tipos de filtros para ambientes internos</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1.1. Filtros painel</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1.2. Filtro bolsa</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1.3. Filtro plissado</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1.4. Filtro HEPA e ULPA</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2. Normas para classificação de filtros</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2.1. Norma ASHRAE 52.1/52.2</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2.2. Norma Europeia EN 779</b> .....	<b>21</b>
<b>2.2.3. Norma ABNT NBR 16101:2012</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.4. Filtros absolutos</b> .....	<b>24</b>
<b>2.3. Mecanismos de coleta de filtração</b> .....	<b>28</b>
<b>2.3.1. Eficiência do mecanismo difusional</b> .....	<b>31</b>
<b>2.3.2. Eficiência do mecanismo interceptação direta</b> .....	<b>33</b>
<b>2.3.3. Eficiência do mecanismo inercial</b> .....	<b>34</b>
<b>2.3.4. Eficiência do mecanismo gravitacional</b> .....	<b>34</b>
<b>2.3.5. Eficiência do mecanismo eletroforético</b> .....	<b>35</b>
<b>2.4. Permeabilidade do meio filtrante</b> .....	<b>35</b>
<b>2.5. Estado da arte de normas de padronização para testes em filtros</b> .....	<b>36</b>
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>39</b>
<b>3.1. Material utilizado</b> .....	<b>39</b>
<b>3.1.1. Aerossol</b> .....	<b>39</b>
<b>3.1.2. Meios Filtrantes</b> .....	<b>41</b>
<b>3.2. Caracterização dos meios filtrantes</b> .....	<b>43</b>
<b>3.2.1. Espessura do meio filtrante</b> .....	<b>43</b>
<b>3.2.2. Porosidade do meio filtrante</b> .....	<b>45</b>
<b>2.1.1. Diâmetro das fibras</b> .....	<b>47</b>

2.1.2.	Permeabilidade do meio filtrante.....	48
3.3.	Linhas de filtração experimental.....	50
3.4.	Equipamentos da linha 1 .....	52
3.4.1.	Compressor de ar .....	52
3.4.2.	Dispositivo de filtração do ar comprimido .....	53
3.4.3.	Gerador de partículas .....	54
3.4.4.	Secador de Difusão .....	55
3.4.5.	Neutralizador .....	56
3.4.6.	Rotâmetro.....	57
3.4.7.	Dispositivo de filtração e manômetro.....	58
3.4.8.	Sonda de amostragem .....	58
3.4.9.	Analisador de Partículas por Mobilidade Elétrica (SMPS) .....	59
3.5.	Equipamentos da linha 2 .....	62
3.5.1.	Dispensor de pó .....	62
3.5.2.	Contador de partículas (APS).....	63
3.6.	Procedimento experimental.....	65
4.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>69</b>
4.1.	Caracterização dos meios filtrantes .....	69
4.1.1.	Diâmetro de fibras.....	69
4.1.2.	Porosidade .....	71
4.1.3.	Espessura .....	77
4.1.4.	Permeabilidade .....	79
4.2.	Eficiência de coleta .....	81
4.2.1.	Norma de padronização europeia (EN 779 e EN 1822).....	81
4.2.2.	Norma de padronização americana (ASHRAE 52.2) .....	90
4.2.3.	Comparação entre as normas.....	96
5.	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>101</b>
6.	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>103</b>
7.	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>104</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A poluição externa está cada vez mais agravante, sendo pauta de preocupação para muitos governantes. Entretanto, há uma poluição ainda mais próxima das pessoas que pode vir a ser ainda mais perigosa do que a externa. Trata-se da poluição interna. A contaminação de ambientes fechados ocorre por meio de: elementos químicos, fumaças produzidas pela combustão de lenhas (principalmente em área rural), uso de pesticidas domésticos, doenças infectológicas, contaminantes externos, materiais de limpeza, dentre outras fontes (PNEUMOLOGIA, 2001).

Por conta da variação climática, temperaturas mais altas vêm produzindo um verão mais intenso. De forma, a minimizar esse desconforto, as pessoas passam cada vez mais parte do seu dia em ambientes fechados com ar condicionados ligados. A falta de ventilação dos ambientes, pode fazer com que a poluição interna chegue até vinte vezes mais do que a externa (PNEUMOLOGIA, 2001).

O uso de filtros de ar, se usado apropriadamente (com limpeza e manutenção adequada dos meios filtrantes), garante a qualidade do ar no interior dos ambientes, através da retenção de materiais particulados e até mesmo fungos, bactérias, dentre outros microrganismos (REVISTA DO SENADO, 2016). A relevância do assunto está cada vez mais crescente a ponto de uma nova lei 13.589/2018 tornar obrigatório a manutenção adequada de aparelhos de ar condicionados (CAMARA DOS DEPUTADOS, 2018).

Todavia para se atingir o efeito desejado, é necessário conhecer a performance e condições de operação do filtro utilizado. Tal tarefa não é fácil, principalmente quando existem um leque vasto de normas de padronização de filtros em vigor no mundo todo.

Em outras palavras, um mesmo filtro pode ser classificado por diversas normas. Consequentemente, mais de um valor de eficiência para um mesmo filtro pode ser encontrado. Isso ocorre devido as diferenças adotadas na metodologia seguida por cada uma delas.

A incompreensão dos procedimentos adotados na metodologia de cada norma faz com que cada país comece a ter a sua própria norma. Por conta disso, a aquisição ou venda de um filtro se torna muito dificultosa. Apesar das normas existirem há mais de cem anos, o assunto ainda traz muita confusão no entendimento da eficiência real do filtro. Como o mercado de filtros se expandindo cada vez mais, a necessidade de uma única norma de padronização global é emergencial.

Um dos primeiros passos para unificar é entender o que cada uma delas propõem. Apesar do grande leque de normas há duas delas que são principais pois inspiraram as demais. Tais são: a norma americana (ASHRAE 52.2) e europeia (EN 1822). Com base nesse contexto, tal trabalho tem como proposta determinar a eficiência de diferentes meios filtrantes tentando se aproximar das condições de operação das principais normas (americana e europeia).

## 2. OBJETIVO

O trabalho tem como objetivo comparar os valores de eficiência, tentando se aproximar do procedimento de acordo com: a norma europeia EN1822/779 (experimental); a norma americana ASHRAE 52.2 (experimental) e os mecanismos de coleta (eficiência teórica).

Como objetivo específico é proposto caracterizar cinco diferentes meios filtrantes representando duas categorias de filtros: filtros grossos (carvão ativado, poliéster e celulose) e filtros absolutos (vidro e quartzo) com relação ao diâmetro de fibra, porosidade (experimental e teórica), espessura e permeabilidade.

A segunda etapa dentro dos objetivos específicos é de obter-se a eficiência dos meios filtrantes utilizando como aerossol o DEHS (representando a norma europeia) e DOP,  $KCl_{(aq)}$  e pó de siderúrgica (representando a norma americana). Por fim, os resultados devem ser comparados e analisados.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No capítulo 2 serão expostos alguns itens nos quais este trabalho se insere como: os tipos de filtros para ambientes internos, as normas para classificação de filtros e os mecanismos de coleta de filtração.

### 2.1. Tipos de filtros para ambientes internos

Em ambientes internos, há duas categorias de filtros usados em ar condicionados, filtro mecânico e precipitador eletrostático. Este último, não usa um meio filtrante para coletar as partículas mas sim um campo de ionização com alta voltagem. Tal campo faz com que as partículas sejam carregadas positiva ou negativamente e depositadas nas placas coletoras. Os precipitadores eletrostáticos costumam ter uma alta eficiência porém são muito caros (HUTTEN, 2016).

Já os filtros mecânicos possuem diversos tipos de arranjos com distintas performances de eficiência em filtração. Por exemplo, para os filtros de ar condicionados residenciais são utilizados filtros grossos, enquanto que em salas limpas devem ser utilizados filtros absolutos. A seguir serão apresentados os principais diferentes tipos de filtros mecânicos: painel, bolsa, plissado e absoluto (HEPA/ULPA).

#### 2.1.1. Filtros painel

Os filtros tipo painel são também denominados *panel filters*. Seu mecanismo de funcionamento é bem mais simples quando comparado aos filtros industriais (filtros manga). São formados por camadas finas de meios filtrantes (fibras de vidro, polipropileno, poliéster, e celulose) que ocupam o mesmo espaço de uma caixa, sendo suportadas por uma moldura muitas vezes metálica. Normalmente são encontrados em formatos retangulares ou quadrados, tendo tamanhos padronizados de fabricação para cada utilização. Estes são os filtros mais comuns quando se fala em filtração de partículas em ventilação (HUTTEN, 2016).

Segundo (SUTHERLAND, 2008) os filtros tipo painel incluem os seguintes objetivos: manter ou fazer com que o espaço de trabalho ou lar seja um lugar saudável; proteger equipamentos de sofrer corrosão por meio da deposição de partículas, proteger pessoas e trabalhadores de contaminação de partículas perigosas à saúde humana e por fim, recuperar partículas que tenham valor agregado.

De acordo com (MELOROSE; PERROY; CAREAS, 2015) estes filtros podem ser classificados em três categorias:

- a-) Descartável, ou usado apenas uma vez
- b-) Semi-permanente
- c-) Permanente

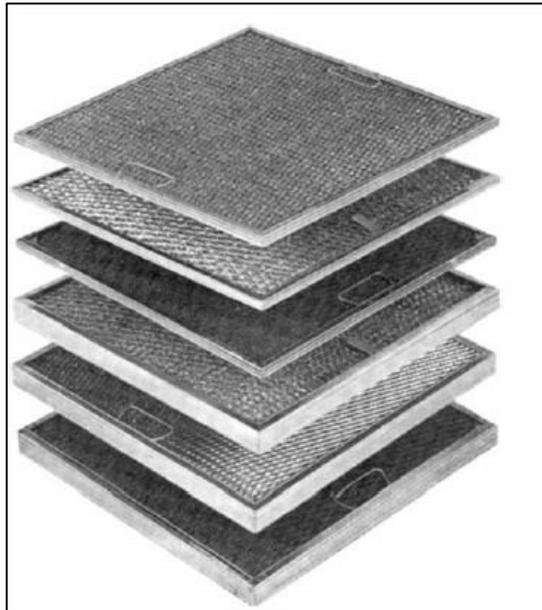
No primeiro caso, o filtro não é possível de ser limpo. Logo, quando é atingida uma perda de carga limite ou um alto nível de partículas penetradas no meio filtrante, este deve ser trocado. O segundo caso trata-se dos filtros semi-permanentes. Estes podem ser limpos e reutilizados, porém serão eficazes apenas por um determinado período de tempo. Ou seja, eles possuem um número limitado de ciclos (MELOROSE; PERROY; CAREAS, 2015).

Diferentemente dos dois últimos, o terceiro caso usa o óleo viscoso ou outro elemento como meio de retenção, e este pode ser facilmente limpo. Os filtros permanentes são também chamados filtros viscosos (metálicos) ou filtros secos (sem óleo porém com um gel adsorvente). Uma de suas grandes vantagens é poder projetar um filtro com que a eficiência não se altere muito com o tempo, e por consequência ele não tenha altos valores de perda de carga. Os filtros permanentes secos podem ser construídos usando diversos meios filtrantes, tais como sintéticos, tecidos e feltros, fibras de vidro e até membranas (MELOROSE; PERROY; CAREAS, 2015).

Os filtros viscosos possuem uma grande área de filtração e esta é toda coberta por óleo. O poder de adesão do óleo faz com que o filtro consiga reter muitas partículas, principalmente partículas gordurosas. A concentração de óleo pode ser controlada e dessa forma controlar a eficiência e a perda de carga.

O filtro metálico é composto por duas camadas de tela metálica (galvanizada, alumínio ou inox) geralmente com pregas (Figura 1). Cada porção de fluxo de ar é direcionado para uma das pregas, ou seja cada porção percorre caminhos diferentes. (MELOROSE; PERROY; CAREAS, 2015). O formato das pregas faz com que o ar carregado de gorduras sofra mudanças de direções bruscas. E por sua vez, através do mecanismo de centrifugação, faz com que as partículas de gorduras sejam coletadas no filtro metálico.

Figura 1-Filtro metálico viscoso



Fonte: (MELOROSE; PERROY; CAREAS, 2015)

Os filtros de painel viscosos são muito utilizados como exaustores para retenção de gorduras, geralmente, ficam em cima de fogões em cozinhas. Também podem ser usados em sistemas de ar condicionado, processos industriais e como filtros primários retardando o tempo de vida de filtros mais caros e eficientes.

Os filtros painel viscosos são normalmente usados como filtros grossos (5- 80  $\mu\text{m}$ ), sendo classificados como G1 (Tabela 5) pela norma NBR 16101:2012 (WANG, 2000). Operam a capacidade máxima de 3000m<sup>3</sup>/h e possuem perda de carga final de 75 Pa (CATALOGO, [s.d.]).

Sintetizando, os filtros viscosos têm uma alta capacidade de retenção de partículas; baixa resistência ao fluxo de ar, suportando vazões altas; são laváveis e permanentes e usam o óleo viscoso como principal elemento de retenção (CATALOGO, [s.d.]) e (WANG, 2000).

### 2.1.2. Filtro bolsa

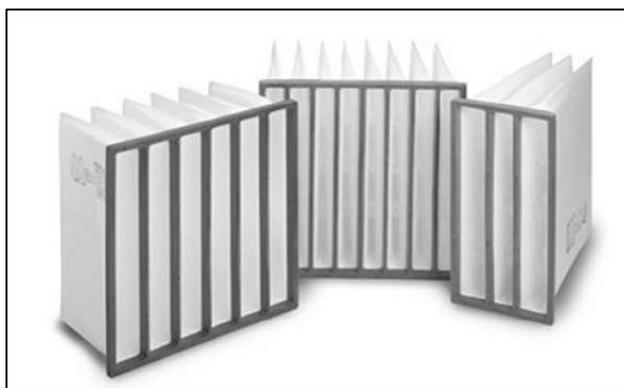
O filtro bolsa como o próprio nome diz é formado por duas folhas retangulares de meio filtrante que são ligadas em dois vértices deixando uma extremidade aberta de modo a formar uma bolsa. As bolsas formadas são sobrepostas lado a lado na parte superior de um painel.

Logo, pode-se dizer que o filtro bolsa (Figura 2) é uma extensão de um filtro painel. Cada bolsa pode ser removida individualmente para limpeza quando é atingido uma determinada quantidade de pó (SUTHERLAND, 2008) e (MELOROSE; PERROY; CAREAS, 2015).

Um filtro bolsa possui geralmente de quatro a oito bolsas, oferecendo uma área de filtração bem maior quando comparado ao filtro painel. O filtro bolsa precisa ser feito de um material mais forte que o filtro painel, entretanto uma variedade de materiais pode ser usada incluindo fibras sintéticas e naturais de não-tecidos. Para o caso de filtros bolsas industriais são muito usadas multicamadas (finas e grossas) de fibras de lã de vidro. As camadas finas com poros largos servem para reter partículas grossas e camadas médias para partículas mais finas (SUTHERLAND, 2008) e (MELOROSE; PERROY; CAREAS, 2015).

Os filtros bolsas são empregados para filtração de partículas finas expostas no meio ambiente. Estão presentes em ventiladores de fábricas, departamentos de lojas, escritórios, escolas, laboratórios e também na proteção de equipamentos (turbinas, compressores e motores) e filtros ultra-finos (HEPA e carvão ativado) (MELOROSE; PERROY; CAREAS, 2015).

Figura 2- Filtro bolsa



Fonte: (MELOROSE; PERROY; CAREAS, 2015)

Segundo a norma da ABNT 16401 (Tabela 5) os filtros bolsas estão disponíveis no mercado com eficiências de filtragem nas classes G3, G4, M5, M6, F7, F8 e F9. Segundo a empresa de filtros Filtrax, a capacidade de retenção de pó gira em torno de 1350gr/m<sup>2</sup>, velocidade de filtração igual a 3,2m/s e perda de carga igual a 45mm de coluna de água (FILTRAX, 2016).

### 2.1.3. Filtro plissado

Os filtros painéis podem usar seus meios filtrantes em forma plissada, o que é muito vantajoso (Figura 3). Nessa forma, a superfície de contato do fluido com o filtro é aumentada e a velocidade de filtração diminuída, e por consequência tem-se uma menor resistência a passagem do fluxo. Além dessas, uma outra vantagem é que o meio filtrante na forma plissada possui uma maior rigidez e são muito permeáveis (SUTHERLAND, 2008).

As fibras sintéticas ou naturais juntamente com telas metálicas e molduras de papelão rígido são usadas na construção dos filtros plissados. São muito utilizados *cotton* e poliéster como fibras sintéticas. As plissas por terem uma menor velocidade de filtração, fazem com que o filtro tenha um tempo de vida superior. Segundo fabricantes, a reposição desses filtros deve ser feita a cada três meses quando em uso normal. (HUTTEN, 2016).

Dentre as suas aplicações, podem ser apontados: ar condicionado, pré-filtros de filtros absolutos, cabines de pinturas e sistemas de ventilação. Segundo o fornecedor da Airlink Filtros, a vazão de operação é na faixa de 2400m<sup>3</sup>/h e a perda de carga igual a 200Pa. A eficiência de filtragem, segundo a norma ABNT NBR 16401 (Tabela 5) engloba as faixas: G3, F5, F6, F7, F8 e F9 (FILTRAX, 2016).

Figura 3- Filtro plissado



Fonte: (FILTRAX, 2016)

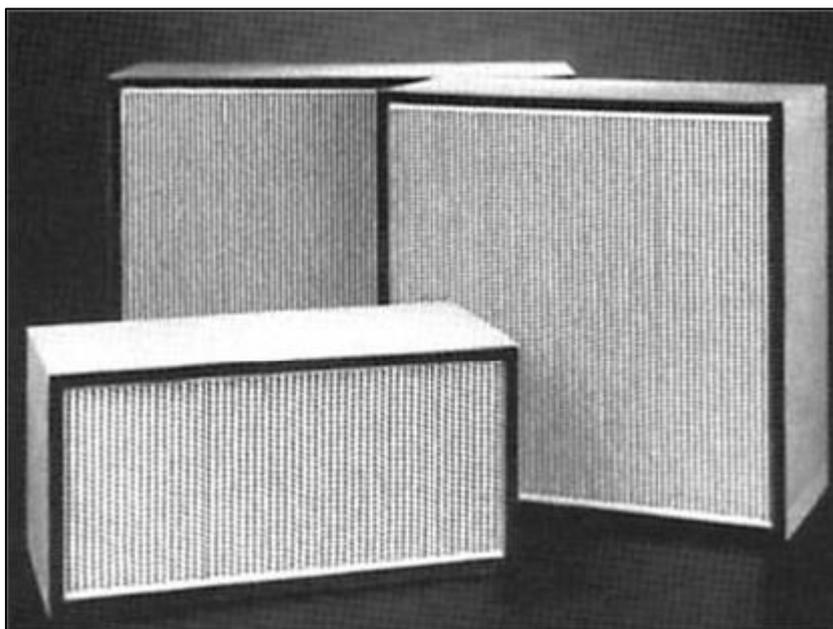
#### 2.1.4. Filtro HEPA e ULPA

Em algumas situações, para se atingir o grau de assepsia adequado, é necessário o uso de filtros absolutos, pois esses oferecem uma maior eficiência. Estes são conhecidos como filtros EPA (*Efficiency Particulate Air Filter*), HEPA (*High Efficiency Particulate Arrestance*) e ULPA (*Ultra Low Penetration Air*).

Os filtros EPA, HEPA e ULPA são classificados pelas suas iniciais E, H e U, respectivamente. Segundo a classificação da norma EN 1822, há nove categorias de filtros absolutos: E10, E11, E12, H13, H14, H15, U15, U16 e U17, em ordem crescente de eficiência indo de 85 a 99,999995% para partículas de 0,1 $\mu$ m a 0,3 $\mu$ m (SPARKS, T. , CHASE, 2015).

Os filtros absolutos também são encontrados no formato painel com plissadas, de forma maximizar a área do meio filtrante para a passagem de ar (Figura 4). O meio filtrante pode ser feito de vários materiais, sendo eles papel de microfibras de vidro ou fibra sintética de polímero (WANG, 2000). As fibras são disponíveis em diversos diâmetros conferindo uma alta eficiência. Apesar da microfibras de vidro suportar altas temperaturas, ela é muito frágil. Para solucionar esta falta de rigidez, há algumas pesquisas para implementar o uso de algumas fibras sintéticas, membranas, microfibras e até nano partículas, no lugar das fibras de vidro (HUTTEN, 2016).

Figura 4- Filtros absolutos



Fonte: (WANG, 2000)

Sabe-se que os filtros absolutos quando usados com uma velocidade de filtração elevada oferece uma perda de carga muito alta. Logo, são adequados para lugares onde a velocidade de filtração é pequena e uma mais alta perda de carga é tolerável (SERVICES, 2003).

Dentre as suas aplicações, os filtros absolutos são utilizados em salas limpas, salas de pintura, indústria nuclear, alimentícia, cosméticos, farmacêutica, dentre outras aplicações. Normalmente operam com velocidade de filtração igual a 1,3 m/s e possuem perda de carga de 120 a 500Pa (ZHANG, 2004).

## **2.2. Normas para classificação de filtros**

O mercado oferece uma variedade de filtros com diferentes eficiência de coleta, servindo, conseqüentemente, a distintas aplicações. Para saber qual filtro é o mais apropriado a determinada situação, devem-se usar normas que descrevam classificações de filtros, as quais são realizadas através de testes padronizados.

Há três propriedades fundamentais dos filtros que devem ser levadas em conta na hora da aquisição: eficiência, resistência à passagem do fluxo e capacidade de retenção de pó. A eficiência mede a capacidade do filtro em remover partículas da corrente de ar. Normalmente, nas aplicações é de grande importância determinar a eficiência mínima durante o tempo de vida do filtro. A resistência do ar mede a diferença de pressão do ar, a uma determinada velocidade de filtração, passando pelo filtro, também chamado de perda de carga. Por fim, a última característica define a habilidade do filtro em reter pó quando operando a uma vazão volumétrica específica (ASHRAE, 2008).

Na padronização, os testes devem ser feitos a uma vazão volumétrica constante de forma que a mesma resistência seja garantida em todos os testes. Apesar da dificuldade, pois há grande variação de partículas no ar, os testes devem simular o mais próximo da realidade (ASHRAE,2008).

Em todas as normas, a velocidade de filtração recomendada é de 5cm/s.

### 2.2.1. Norma ASHRAE 52.1/52.2

Em 1968, nos Estados Unidos a junção entre as técnicas dos institutos NIST (Instituto Nacional de Padronização e Tecnologia) e AFI (Instituto de filtros de ar) deram origem ao atual ASHRAE *Standard 52.1-1992* (Associação americana de engenheiros de aquecedores, refrigeradores e ar condicionados) (ASHRAE,2008) .

ASHRAE Standard 52.1 incluía os testes de eficiência gravimétrica e de pontos na atmosfera. Todavia, esta norma tornou-se obsoleta e hoje é usada a norma ASHRAE Standard 52.2. Essa última, desenvolveu um novo critério na hora de determinar a eficiência, chamado MERV (*Minimum efficiency reporting values*) (ASHRAE,2008). Os filtros podem ser classificados de acordo com o MERV. São 20 posições, como mostradas na Tabela 1, sendo as primeiras (MERV1-4), filtros menos eficientes e as últimas (MERV 16-20), os mais eficientes.

Tabela 1- Classificação de filtros usando o MERV pela ASHRAE 52.1/52.2

MERV	Eficiência	Típico contaminante	Aplicações	Classe de filtros
<b>20</b>	n/a	<b>&lt;=0,3µm diâmetro</b>	Salas limpas	<b>HEPA/ULPA</b>
<b>19</b>	n/a	Vírus	Materiais radioativos	Efic. >=99,999%
<b>18</b>	n/a	Sal do mar	Indústrias farmacêuticas	Tipos A, C, D e F
<b>17</b>	n/a	Fumaça de combustão	Centros cirúrgicos	
<b>16</b>	n/a	<b>0,3µm a 1,0µm</b>	Hospitais	<b>Filtros bolsas</b>
<b>15</b>	>95%	Todas bactérias	Cirurgias gerais	
<b>14</b>	90 a 95%	Fumaça de cigarro	Salas de fumantes	
<b>13</b>	80 a 90%	Óleo de cozinha/tinta	Prédios comerciais (superior)	
<b>12</b>	70 a 75%	<b>1,0µm a 3,0µm</b>	Residências (superior)	<b>Filtros bolsas</b>
<b>11</b>	60 a 65%	Legionella	Prédios comerciais (bom)	
<b>10</b>	50 a 55%	Pós de chumbo/carvão	Laboratórios de hospital	
<b>9</b>	40 a 45%	Emissões de carros		
<b>8</b>	30 a 35%	<b>3,0µm a 10,0µm</b>	Prédios comerciais	<b>Filtros plissados</b>
<b>7</b>	25 a 30%	Mofos	Residências (bom)	
<b>6</b>	<20%	Esporos	Lugares industriais	<b>Filtros descartáveis</b>
<b>5</b>	<20%	Leite empó/ cimento	Cabine de pinturas	
<b>4</b>	<20%	<b>&gt;10,0µm</b>	Mínima filtração	<b>Filtros descartáveis</b>
<b>3</b>	<20%	Pólen/musgo espanhol	Residências	<b>Filtros laváveis</b>
<b>2</b>	<20%	Pós de spray de tinta	Ar condicionados de janelas	<b>Eletrostáticos</b>
<b>1</b>	<20%	Pós de lixa		

Fonte: Adaptado (ASHRAE,2008)/ \*n/a- não se aplica

Os filtros de MERV de 1-4 são filtros mais grossos e são determinados pelos testes de eficiência gravimétrica da norma ASHRAE 52.2. Os filtros HEPA/ULPA são iguais a MERV 16-20 e são obtidos pelas práticas do IEST (Instituto de ciência e tecnologia ambiental). Por fim, os filtros classificados em MERV de 5-16 são determinados pelos testes de eficiência fracional da ASHRAE 52.2. (HUTTEN, 2016). Segundo a norma deve ser utilizado um aerossol polidisperso cujo diâmetro aerodinâmico deve incluir partícula na faixa de 0,3-10  $\mu\text{m}$ . A norma cita o uso do KCl como aerossol principal.

A classificação MERV contém testes distribuídos em eficiências para três faixas de tamanho de partículas, também denominado PSE (*Partical Size Removal Efficiency*) que juntas irão auxiliar na classificação MERV. A primeira delas,  $E_1$  (0.3-1.0 $\mu\text{m}$ ), a segunda  $E_2$  (1.0-3.0 $\mu\text{m}$ ) e a terceira  $E_3$  (3.0-10.0 $\mu\text{m}$ ) (HUTTEN, 2016). Um exemplo de como avaliar o filtro usando essa norma é dado a seguir. Um determinado filtro tem como valores de  $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$ , 33.5%, 66.3% e 86.3%, respectivamente. Tais valores quando analisados na Tabela 2 podem determinar o número MERV.

Tabela 2- Determinação do MERV com base no PSE

MERV	$E_1$ 0.3-1.0 $\mu\text{m}$	$E_2$ 1.0-3.0 $\mu\text{m}$	$E_3$ 3.0-10.0 $\mu\text{m}$
1	n/a	n/a	$E < 20$
2	n/a	n/a	$E < 20$
3	n/a	n/a	$E < 20$
4	n/a	n/a	$E < 20$
5	n/a	n/a	$20 \leq E < 35$
6	n/a	n/a	$35 \leq E < 50$
7	n/a	n/a	$50 \leq E < 70$
8	n/a	n/a	$70 \leq E$
9	n/a	$E < 50$	$85 \leq E$
10	n/a	$50 \leq E < 65$	$85 \leq E$
11	n/a	$65 \leq E < 80$	$85 \leq E$
12	n/a	$80 \leq E$	$90 \leq E$
13	$E < 75$	$90 \leq E$	$90 \leq E$
14	$75 \leq E < 85$	$90 \leq E$	$90 \leq E$
15	$85 \leq E < 95$	$90 \leq E$	$90 \leq E$
16	$95 \leq E$	$90 \leq E$	$95 \leq E$
17	$99,97 < E$	n/a	n/a
18	$99,99 < E$	n/a	n/a
19	$99,999 < E$	n/a	n/a
20	$99,999 < E$	n/a	n/a

Fonte: Adaptado (HUTTEN, 2016) / \*n/a- não se aplica.

No caso, o valor de  $E_1$  igual a 33.5% deixa claro que o MERV será 11 ou abaixo. Já o  $E_2$  satisfaz a condição do MERV 11 que é  $E_2$  entre 65 e 80%. Por fim, o  $E_3$  confirma que o MERV é de 11, pois também satisfaz a condição  $E_3$  menor que 85% (HUTTEN, 2016) .

### **2.2.2. Norma Europeia EN 779**

Na Europa, a classificação dos filtros é feita por meio da padronização EN779, cuja versão mais atualizada está em vigor desde abril de 2012. A norma EN779 possui nove categorias dividida em 3 grupos: G1-G4 para filtros grossos, M5-M6 para filtros médios e F7-F9 para filtros finos. Já os filtros absolutos HEPA/ULPA são classificados pela EN1822 (HUTTEN, 2016).

Enquanto a norma americana, mencionada anteriormente, utiliza para os testes de eficiência três faixas de tamanhos de partículas ( $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$ ), a EN 779 efetua os testes para um tamanho de partícula específico igual a  $0,4\mu\text{m}$ . O aerossol a ser utilizado deve ser um quase-monodisperso, ou seja cuja distribuição possua um desvio geométrico entre 1,15 e 1,5. A norma cita a utilização do DEHS (Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat) como aerossol. A informação de qual tipo de diâmetro a norma se refere não foi encontrada, pois a mesma não especifica qual contador de partícula deve ser usado.

O teste é realizado em um tamanho padrão ( $610\text{mm} \times 610\text{mm}$ ) e com uma vazão entre  $0,24 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $850\text{m}^3/\text{h}$ ) e  $1,5\text{m}^3/\text{s}$  ( $5400\text{m}^3/\text{h}$ ). Apesar do intervalo de vazão volumétrica, os testes são realizados para uma vazão especificada. Os filtros da classe G são testados a uma pressão limite de 250 Pa enquanto que os filtros M e F a 450 Pa (HUTTEN, 2016).

Os principal resultado, mostrado na Tabela 3 é de eficiência média correspondente a partículas de  $0,4\mu\text{m}$  (VILEDON, 2016). A mudança mais significativa em relação à antiga norma europeia é a adição de eficiência mínima às classes F7 a F9 e a renomeação das classes F5 e F6 para M5 e M6 (VILEDON,2016).

Tabela 3- Classificação de filtros pela norma EN 779

<b>Grupo</b>	<b>Antiga</b>	<b>Nova</b>	<b>Eficiência</b>
Grossos	EN779	EN779	Média
Grossos	G1	G1	-
Grossos	G2	G2	-
Grossos	G3	G3	-
Grossos	G4	G4	-
Médios	F5	M5	$40 \leq E_m < 60$
Médios	F6	M6	$60 \leq E_m < 80$
Finos	F7	F7	$80 \leq E_m < 90$
Finos	F8	F8	$90 \leq E_m < 95$
Finos	F9	F9	$95 \leq E_m$

Fonte: Adaptado (Viledon, 2016) \* $E_m$  –eficiência média.

A EN779 designada para filtros de grossos a finos, utiliza a Tabela 4 para auxiliar na determinação da eficiência de coleta do filtro. Em cada teste são contabilizadas 13 medições de número de partículas, sendo 7 delas a montante e 6 a jusante do filtro. Após realizadas as medições deve-se usar as Equações (1) e (2) para determinar a eficiência inicial do filtro. Após a determinação da eficiência inicial, os filtros devem ser carregados com pó e a mesma análise deve ser repetida. O número de repetições deve ser feito até o filtro atingir uma perda de pressão de 450Pa. E então, a eficiência após o último carregamento é a utilizada para classificar o filtro segundo a Tabela 3.

Tabela 4- Eficiência inicial para uma faixa de tamanho i

Contagem	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Montante	N1,i		N2,i		N3,i		N4,i		N5,i		N6,i		N7,i
Jusante		n1,i		n2,i		n3,i		n4,i		n5,i		n6,i	

Fonte: Adaptado de ABNT NBR16101 (2012).

$$E_{1,i} = \left( 1 - \frac{n_{1,i}}{\frac{N_{1,i} + N_{2,i}}{2}} \right) 100 \quad (1)$$

$$E_i = (E_{i,1} + E_{i,2} + \dots + E_{i,6})/6 \quad (2)$$

onde

$N_{i,1}$  representa o número de partículas em uma faixa  $i$  a montante do filtro

$n_{i,1}$  representa o número de partículas em uma faixa  $i$  a jusante do filtro

### 2.2.3. Norma ABNT NBR 16101:2012

Há ainda uma terceira norma, ABNT NBR 16101:2012 (Filtros para partículas em suspensão em ar - Determinação da eficiência para filtros grossos, médios e finos). Ela é baseada na norma europeia EN779 (Tabela 5). Logo, a mesma utiliza também testes de eficiência para tamanho de partícula de  $0,4\mu\text{m}$  (ABNT, 2012).

Nessa norma, os filtros são ensaiados a: uma vazão de  $0,944\text{m}^3/\text{s}$  e perda de pressão máxima final a  $250\text{Pa}$  para filtros G e  $450\text{Pa}$  para filtros M e F. Os ensaios podem ser feitos com outros valores para o caso quando houver especificações do fabricante (ABNT, 2012).

Tabela 5- Classificação de filtros pela norma EN 779

Grupo	Classe	Perda de pressão final (Pa)	Eficiência média %	Eficiência mínima %
<b>Grossos</b>	G1	250	-	-
	G2	250	-	-
	G3	250	-	-
	G4	250	-	-
<b>Médios</b>	M5	450	$40 \leq E_f < 60$	-
	M6	450	$60 \leq E_f < 80$	-
<b>Finos</b>	F7	450	$80 \leq E_f < 90$	$\geq 35$
	F8	450	$90 \leq E_f < 95$	$\geq 55$
	F9	450	$95 \leq E_f$	$\geq 70$

Fonte: Adaptado (ABNT, 2012)

#### 2.2.4. Filtros absolutos

Em 1956, a norma MIL STD-286 publicou o primeiro teste de filtros usando DOP, cujo diâmetro médio de partícula é de  $0,3\mu\text{m}$ . Tal norma deu origem a definição do que chamamos hoje de filtros absolutos (HEPA/ULPA). Esses, são definidos por muitas normas (EN1822, IEST e ISO 29463), como sendo aqueles cuja eficiência é superior a 99, 97% para partículas DOP de  $0,3\mu\text{m}$  (HUTTEN, 2016).

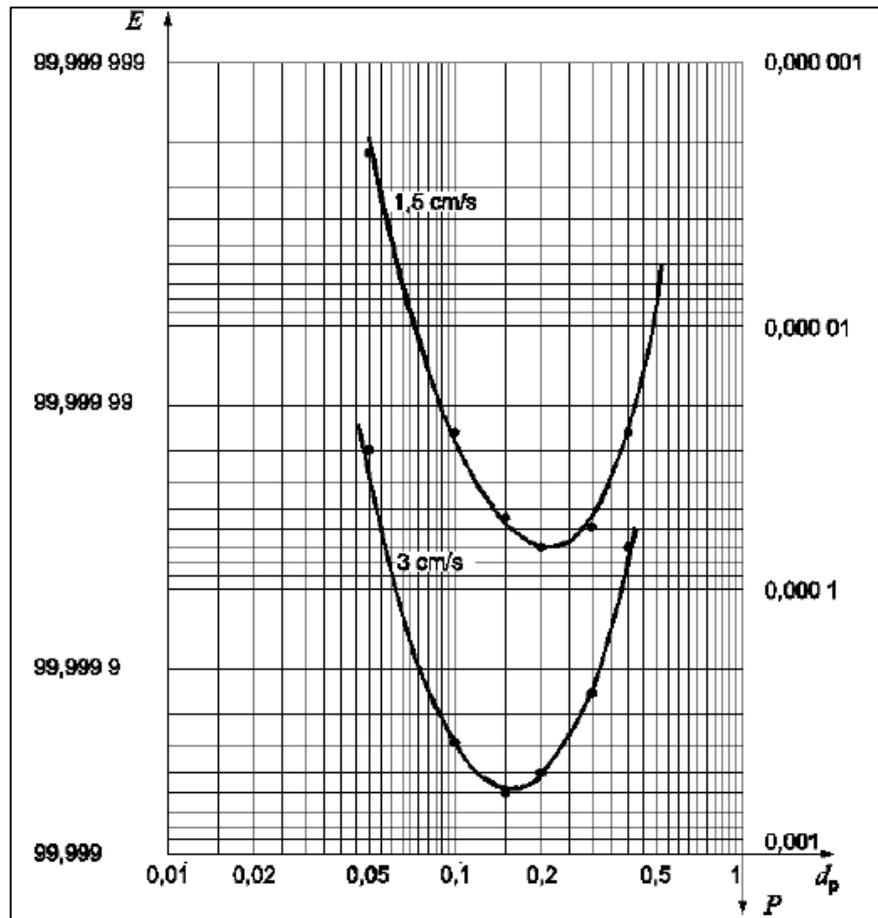
A versão mais atualizada da EN1822 é de 2009. Ela é dividida em 5 partes: classificação, equipamentos, meio filtrante, vazamentos e eficiência. A eficiência na EN1822 é baseada em MPPS (*Most Penetrating Particle Size*) e é determinada por um contador de partículas. As MPPS são partículas de tamanho de  $0,04$  a  $0,4\mu\text{m}$ , por isso, são grandes para ter um efeito difusional e ao mesmo tempo pequenas para ter um efeito inercial. Logo, partículas desse tamanho são difíceis de serem removidas pelo meio filtrante, isso justifica o fato de quando classificado como filtros HEPA/ULPA serem realmente filtros de alta eficiência (HUTTEN, 2016).

Antes de iniciar os cálculos para a determinação da eficiência, a EN 1822 instrui plotar um gráfico de eficiência por tamanho de partícula. A faixa do tamanho de partícula deve conter no mínimo sete pontos, sendo eles uma progressão logarítmica. A Figura 5 exemplifica tal gráfico, sendo o mesmo plotado para duas distintas velocidades  $1,5$  e  $3,0$  cm/s. No caso exemplificado, a faixa de tamanho de partícula foi de  $0,01$  a  $1\mu\text{m}$ . O ponto de mínimo da curva do gráfico permite então determinar o MPPS, ou seja, tamanho de partícula onde houve a menor eficiência e maior penetração.

Quando encontrado o MPPS, a eficiência deverá ser calculada para uma nova faixa de tamanho de partícula, agora com base no MPPS. A nova faixa deverá conter partículas de no mínimo  $\text{MPPS}/2$  até  $1,5$  vezes o valor do MPPS.

Apesar de na norma europeia para filtros grossos, EN779, não se saber qual diâmetro deve ser usado, para a EN1822 a informação é mais clara. Segundo, a EN1822, pode ser utilizado um contador de partículas de mobilidade elétrica.

Figura 5-Gráfico para determinar MPPS



Fonte: EN 1822

Com os valores médios de eficiência na faixa sugerida pelo MPPS, o filtro pode ser então classificado. A Tabela 6 traz as eficiências globais e locais para os filtros absolutos através da norma EN1822. As iniciais E, H e U, significam *eficiency*, *high* e *ultra eficiency*.. Nota-se que há um valor crescente de casas decimais conforme a eficiência do filtro aumenta. Sabendo se que as casas decimais refletem a precisão do equipamento, para classifica-lo necessitaria de diferentes contadores de partículas cuja precisão seria também diferente. No entanto, a norma não cita tais contadores de partículas.

Tabela 6- Classificação de filtros absolutos pela norma EN 1822

Eficiência global	
<b>E10</b>	85
<b>E11</b>	95
<b>E12</b>	99,5
<b>H13</b>	99,95
<b>H14</b>	99,995
<b>U15</b>	99,9995
<b>U16</b>	99,99995
<b>U17</b>	99,999995

Fonte: Adaptado (HUTTEN, 2016).

Como mencionado anteriormente, a classificação dos filtros absolutos (Tabela 7) também segue as práticas recomendadas da IEST (*Institute of Environmental Sciences and Technology*). Dentre as regras desse instituto, há quatro que se aplicam aos filtros HEPA e ULPA, sendo elas:

- a-) IEST RP-CC001.6 “Filtros ULPA e HEPA”: fornece classificação com onze níveis, glossário e instrumentos, a fim de que haja um entendimento entre o fornecedor e o comprador. Os filtros que se encaixam nessa classificação são adequados para salas limpas e possuem eficiência superior a 99,97% para partículas de diâmetro em  $\mu\text{m}$  (IEST, 2016);
- b-) IEST RP-CC007.3 “Testes dos filtros ULPA”: descreve os aparelhos para o ensaio, propriedades do aerossol e a matemática para determinar a eficiência dos filtros ULPA. Nos testes são usadas partículas de aerossol de diâmetro de 0.1 a 0.2 $\mu\text{m}$  e contador de partículas (IEST, 2016);
- c-) IEST RP-CC021.4 “Teste do meio filtrante dos filtros HEPA e ULPA”: levanta algumas questões a respeito de propriedades físicas e de filtração dos meios filtrantes (IEST, 2016);
- d-) IEST RP-CC034.4 “Testes de vazamentos dos filtros HEPA e ULPA”: cobre procedimentos para evitar vazamentos antes e depois da instalação desses filtros em salas limpas (IEST, 2016).

Tabela 7-Classificação de filtros absolutos pela norma IEST

<b>Tipo de filtro</b>	<b>Eficiência</b>
<b>HEPA (Tipo A)</b>	99,97%
<b>HEPA (Tipo B)</b>	99,97%
<b>HEPA (Tipo C)</b>	99,99%
<b>HEPA (Tipo D)</b>	99,999% a 0,3µm
<b>HEPA (Tipo E)</b>	99,97%
<b>ULPA (Tipo F)</b>	99,999% a 0,1-0,2 ou 0,2-0,3µm
<b>Super ULPA (Tipo G)</b>	99,9999% a 0,1-0,2 ou 0,2-0,3µm
<b>HEPA (Tipo H)</b>	99,97% a 0,1-0,2 ou 0,2-0,3µm
<b>HEPA (Tipo I)</b>	99,97% a 0,1-0,2 ou 0,2-0,3µm
<b>HEPA (Tipo J)</b>	99,99% a 0,1-0,2 ou 0,2-0,3µm
<b>HEPA (Tipo K)</b>	99,995% a 0,1-0,2 ou 0,2-0,3µm

Fonte: Adaptado (HUTTEN, 2016)

Apesar das normas europeias (EN 1822) e americana (IEST) serem muito usadas, há uma falta de equivalência entre os métodos e classificação dos filtros de cada uma delas. Levando em conta essa divergência, uma nova proposta de normatização para filtros de alta eficiência (acima de 95%) surgiu em 2011, sendo denominada ISO 29462.

A ISO 29462 tem como base a norma europeia EN 1822, porém também utiliza métodos de outras normas nacionais na tentativa de minimizar a diferença entre elas e propor um caráter mais universal. Ela possui cinco partes: classificação e desempenho de ensaio, equipamentos de medição, ensaio do meio filtrante, vazamento e método para determinar a eficiência do filtro (VIJAYAKUMAR, 2012).

No Brasil, a tradução da ISO 29462 já foi realizada e há duas normas da ABNT referentes a ela. A primeira foi publicada em 2013, ABNT NBR ISO 29463-1 e a segunda em 2014 ABNT NBR ISO 29463-5 (Filtros e meios filtrantes de alta eficiência para remoção de partículas no ar).

A classificação ABNT NBR ISO 29463-1 também possui cinco partes:

- a-) Parte 1: classificação, ensaio de desempenho e identificação;
- b-) Parte 2: Produção de aerossóis, equipamentos de medição, estatísticas de contagem de partículas;

c-) Parte 3: Testando folha plana meio filtrante;

d-) Parte 4: Método de ensaio para determinar o vazamento de elemento filtrante – Método de leitura;

e-) Parte 5: Método de ensaio para elementos filtrantes.

A NBR ISO 29463 estabelece o uso de contador de partículas na determinação da eficiência (local e global) do filtro. A diferença entre essa norma e as outras nacionais é o uso de partículas no menor tamanho de penetração (MPPS) na medição da eficiência global.

Tabela 8 a seguir mostra os treze estágios de classificação de eficiência para os grupos H, U e E. O intervalo de eficiência é de 95% a 99,999995%, sendo o H o grupo de menor eficiência.

Tabela 8- Classificação de eficiência para os grupos H, U e E

<b>Grupos do filtro</b>	<b>Eficiência Global %</b>	<b>Eficiência Local %</b>
<b>ISO 15 E</b>	$\geq 95$	-
<b>ISO 20 E</b>	$\geq 99$	-
<b>ISO 25 E</b>	$\geq 99,5$	-
<b>ISO 30 E</b>	$\geq 99,90$	-
<b>ISO 35H</b>	$\geq 99,95$	$\geq 99,75$
<b>ISO 40Hd</b>	$\geq 99,99$	$\geq 99,95$
<b>ISO 45Hd</b>	$\geq 99,995$	$\geq 99,995$
<b>ISO 50 U</b>	$\geq 99,999$	$\geq 99,9975$
<b>ISO 55 U</b>	$\geq 99,9995$	$\geq 99,9995$
<b>ISO 60 U</b>	$\geq 99,99999$	$\geq 99,9995$
<b>ISO 65 U</b>	$\geq 99,99995$	$\geq 99,99975$
<b>ISO 70 U</b>	$\geq 99,99999$	$\geq 99,9999$
<b>ISO 75 U</b>	$\geq 99,999995$	$\geq 99,9999$

Fonte: ABNT NBR ISO 29463-1, 2013

### 2.3. Mecanismos de coleta de filtração

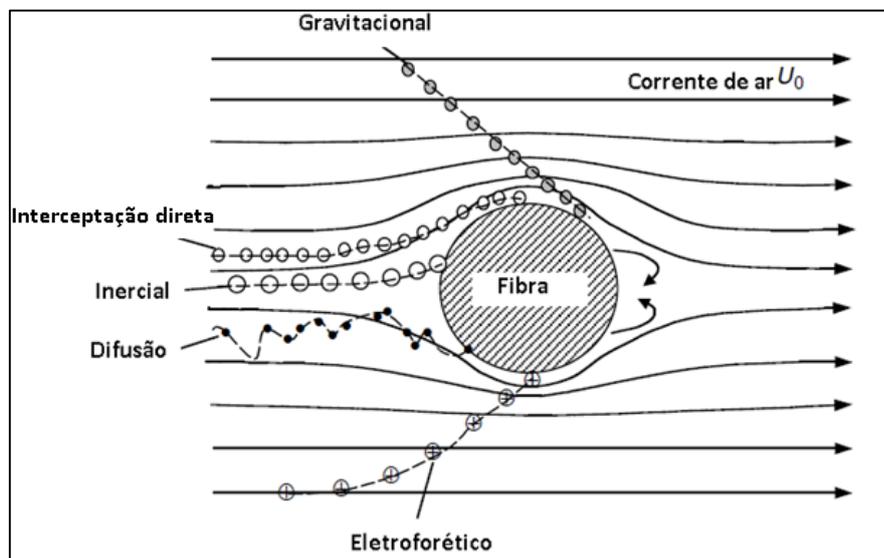
A filtração de uma corrente de ar passando pelo meio filtrante pode seguir dois caminhos diferentes: superficial ou interno. A filtração superficial ocorre quando há a formação de torta, ou seja, as partículas de diâmetro maiores não conseguem atravessar o meio filtrante e vão se

depositando no mesmo. A formação de tortas é muito comum em filtros mangas, ajudando na eficiência do filtro (DULLIEN, 1989 apud SALUSSOGLIA, 2016).

Diferentemente da filtração superficial, a interna ocorre no interior do filtro. Em outras palavras, as partículas cujo tamanho são inferiores acabam penetrando dentro do meio filtrante. Isso ocorre por meio de mecanismos de coleta, cujas performances influenciam a eficiência de filtração (HUTTEN, 2016).

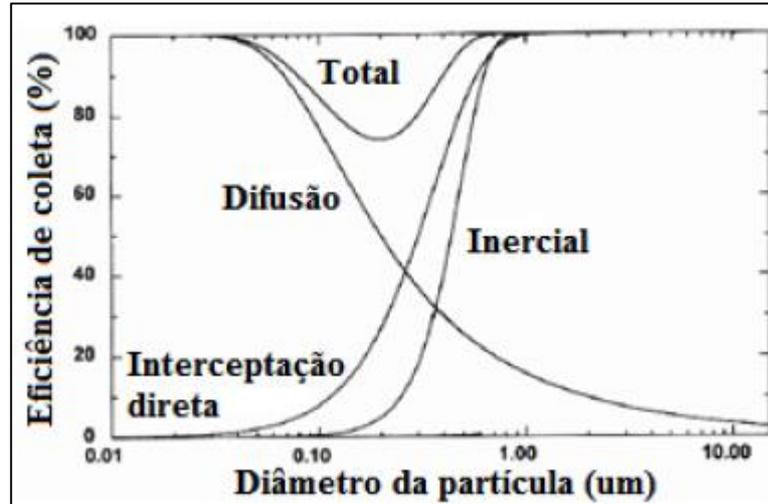
Sabe-se que há mais de um mecanismo, destacando-se: difusional, interceptação direta, inercial, gravitacional e eletroforético. Interações podem ocorrer entre os diferentes mecanismos, pois muitas vezes há competições entre eles para coletar uma mesma partícula, como mostrado na Figura 6. Além disso, o mecanismo predominante na eficiência de coleta depende de alguns fatores, tais como: diâmetro da partícula, diâmetro da fibra, espaçamento da fibra, velocidade, dentre outros. A Figura 7 traz o mecanismo de coleta atuante em função do diâmetro. (ZHANG, 2004), HINDS,1999.

Figura 6- Mecanismos de coleta de filtração



Fonte: Adaptado de(ZHANG, 2004)

Figura 7- Mecanismos de coleta em função do diâmetro da partícula



Fonte: Adaptado de Hinds, 1999

A eficiência do filtro ( $E$ ) é a parte de partículas que são coletadas no filtro a uma determinada seção filtrante, representada pela Equação (3) (DULLIENS 1989 apud STEFFENS, 2007). Para isso, é necessário conhecer a eficiência total de cada fibra ( $\eta_T$ ), a qual é composta pelos mecanismos de coleta descritos a seguir (ZHANG, 2004).

$$E = 1 - P = 1 - \exp\left[-\frac{4L(1 - \varepsilon)\eta_T}{\pi \cdot \varepsilon \cdot d_f}\right] \quad (3)$$

$$E_{f\Sigma} = 1 - (1 - E_{fid}) \cdot (1 - E_{fl}) \cdot (1 - E_{fD}) \cdot (1 - E_{fg}) \cdot (1 - E_{fq}) \quad (4)$$

$$E_{f\Sigma} = (E_{fid}) + (E_{fl}) + (E_{fD}) + (E_{fg}) + (E_{fq}) \quad (5)$$

onde

$P$  é a penetração, ou seja, a fração de partículas que chegam e não são coletadas pelo filtro;  $\varepsilon$  porosidade e  $d_f$  diâmetro da fibra coletora.

A eficiência total ( $E_{f\Sigma}$ ) pode ser ainda determinada pela equação (4) nos casos em que as eficiências individuais para cada mecanismo de coleta são conhecidos. A equação ((5) também pode ser utilizada, sendo mais simples porém teoricamente incorreta. O erro está associado ao fato de que um mesmo mecanismo pode ser contado mais de uma vez, já que há competição entre eles. Ela deve ser usada quando há predomínio de um dos mecanismos (HINDS,1999).

A trajetória da partícula pode ser diferente dependendo do mecanismo que predomina. Como pode ser visto na Figura 6, para partículas de diâmetro superiores ao diâmetro da fibra, não é possível de se depositar dentro do poro, logo, ocorre uma filtração superficial. Enquanto

que nos mecanismos: inercial, intercepção, gravitacional, eletroforético e difusional a filtração é interna.

No mecanismo inercial, a partícula possui alta velocidade e momento, ou seja, não consegue desviar do seu percurso, chocando-se com a parede. Sabe-se que há ainda um diâmetro de partícula não tão pequeno quanto aquelas que prevalecem no mecanismo de difusão, e nem tão grandes quanto aos de intercepção (0,04 - 0,4 $\mu$ m). Trata-se das partículas de máxima penetração (MPPS). Esse comportamento caracteriza os filtros absolutos HEPA (HUTTEN, 2016).

### 2.3.1. Eficiência do mecanismo difusional

A eficiência por meio da difusão também é conhecida como movimento browniano. Como evidenciado na Figura 6, as partículas seguem um movimento aleatório, em zigue-zague. Dessa forma, há um aumento da probabilidade de uma partícula se chocar com a fibra do meio filtrante, elevando a chance de coleta (ZHANG, 2004).

A agitação térmica das moléculas faz com que se choquem e alterem o seu caminho, podendo ser assim melhor coletadas pelas fibras nos casos de menor massa de partícula. Quanto menor a velocidade de filtração, maior a eficiência pois o tempo de permanência de filtração aumenta. Logo, o mecanismo difusional ocorre predominantemente a baixas velocidades de filtrações e partículas submicrômicas (STEFFENS, 2007).

A eficiência difusional ( $\eta_D$ ) depende da relação diâmetro da partícula com fibra e também de dois adimensionais (Pe e Ku) (LEE; LIU, 1982).

Lee e Liu, 1982 propuseram uma relação para a eficiência difusional aproximada pela teoria da camada limite. Após, o ajuste de alguns parâmetros por meio de testes experimentais, a equação (6) foi encontrada.

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

em que  $\alpha$  é a densidade de empacotamento (1- $\epsilon$ ), Ku é o coeficiente hidrodinâmico de Kuwabara e Pe é o número de Peclet, dado pelas equações (7) e (8).

$$Pe = \frac{U_0 \cdot d_f}{D} \quad (7)$$

$$Ku = -\frac{\ln \alpha}{2} - 0,75 + \alpha - 0,25\alpha^2 \quad (8)$$

sendo  $U_0$  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, equação (10), levando em conta o  $C_c$ , fator de escorregamento de Cunningham. Por meio do  $C_c$ , equação (9), a equação de Stokes para baixo valor de  $Re$  pode ser corrigida (STEFFENS, 2007).

$$C_c = 1 + Kn_f \left[ 1,246 \cdot 0,42 \cdot \exp\left(-\frac{0,87}{Kn_f}\right) \right] \quad (9)$$

$$D = \frac{K_B \cdot C_c \cdot T}{3 \cdot \Pi \cdot \mu \cdot d_p} \quad (10)$$

sendo:  $K_B$  a constante de Boltzman,  $T$  a temperatura absoluta,  $Kn_f$  o número de Knudsen e  $\mu$  a viscosidade do gás.

Liu e Rubow, 1990 apud BORTOLASSI,2015 propuseram o acréscimo de um termo de correção ( $C_d$ ), equação (11), levando em conta o escorregamento, que é muito significativo principalmente para fibras finas, como evidencia a equação (12).

$$\eta_D = 1,6 \cdot ((1 - \alpha)/Ku)^{\frac{1}{3}} \cdot Pe^{\frac{-2}{3}} \cdot C_D \quad (11)$$

em que  $C_d$  é obtido por meio de:

$$C_D = 1 + 0,388Kn_f \left[ \frac{(1-\alpha)Pe}{Ku} \right]^{1/3} \quad (12)$$

O número de Knudsen pode ser estimado pela equação (13), sendo  $\lambda$  o caminho livre médio e  $d_f$  o diâmetro da fibra. O adimensional  $Kn_f$  representa a interação entre o gás e a fibra (HINDS,1999).

$$Kn_f = \frac{2\lambda}{d_f} \quad (13)$$

O caminho médio livre pode ser calculado pela equação (14) a seguir sendo usado a pressão em bar, temperatura em Kelvin e viscosidade em Kg/m.s.

$$\lambda = \frac{2,15 \cdot 10^{-4} \cdot \mu \cdot T^{0,5}}{P'} \quad (14)$$

Apesar do termo de correção acrescido por Liu e Rubow, percebeu-se que para baixos valores de  $Pe$ , a eficiência difusiva ( $\eta_D$ ) alcançava valores superiores a 1. Dessa forma, (Payet et. al 1992 apud BORTOLASSI, 2015) propuseram à equação (15) o acréscimo de mais um termo de correção  $C_d'$ , representado pela equação (16).

$$\eta_D = 1,6 \cdot ((1 - \alpha)/Ku)^{\frac{1}{3}} \cdot P_e^{-\frac{2}{3}} \cdot C_D \cdot C_D' \quad (15)$$

onde

$$C_D' = \frac{1}{1 + 1,6 \left(\frac{1 - \alpha}{Ku}\right)^{\frac{1}{3}} P_e^{-2/3} C_d} \quad (16)$$

### 2.3.2. Eficiência do mecanismo interceptação direta

O mecanismo de interceptação direta como o próprio nome diz, é feito por meio da proximidade, contato direto, da partícula ao coletor. Se o seu centro de massa passar a uma distância menor ou igual ao seu raio pela superfície do filtro, ela será coletada. A interceptação direta tem a sua eficiência dependendo da relação ( $R$ ) diâmetro de partícula e diâmetro do coletor (TARDOS et al,197).

A coleta por interceptação direta tem grande significado para partículas de diâmetro grande, ou seja de ordem de grandeza pouco menor que o diâmetro do coletor (TARDOS et al,1978).

A eficiência por interceptação ( $\eta_{id}$ ) pode ser obtida através da equação (17) proposta por Liu e Rubow em 1990, que leva em conta um fator de correção ( $C_r$ ), equação (18). Ele é calculado com base na aproximação da camada limite equação (19), valendo também para baixas porosidades.

$$\eta_{id} = 0,6 \left(\frac{1 - \alpha}{Ku}\right) \frac{R^2}{1 + R} C_r \quad (17)$$

$$R = \frac{d_p}{d_f} \quad (18)$$

$$C_r = 1 + \frac{1,996 \cdot Kn_f}{R} \quad (19)$$

### 2.3.3. Eficiência do mecanismo inercial

O mecanismo inercial ocorre devido a massa da partícula, ou seja o efeito inercial que ela possui. Quando o fluido entra em contato com o coletor são criadas correntes com caminhos desviando do filtro, como mostrado na Figura 6. Todavia, aquelas partículas com maior massa, cujo efeito inercial é maior, não conseguem acompanhar esse desvio e acabam sendo coletadas pelo filtro (HINDS, 1999).

Segundo Landahl e Hermann (1949 apud TANABE,2011) a eficiência pelo mecanismo inercial pode ser obtida pela equação (20).

$$\eta_i = \frac{St^3}{St^3 + 0,77St^2 + 0,22} \quad (20)$$

$$St = \frac{C_C \cdot \rho_P \cdot d_p^2 \cdot U_0}{18 \cdot \mu \cdot d_f} \quad (21)$$

Segundo Willeke e Baron (1993 apud BORTOLASSI, 2015) o número de Stokes é o adimensional mais apropriado para descrever o mecanismo inercial. Ele leva em conta a densidade da partícula juntamente com a velocidade. Para altos valores de St, equação (21) tem-se uma maior eficiência inercial, ocorrendo o oposto para baixos valores de St.

### 2.3.4. Eficiência do mecanismo gravitacional

A coleta desse mecanismo tem grande ajuda da gravidade, ou seja, dependerá do sentido em que o fluido escoar. Quando a corrente de gás escoar de cima para baixo, a gravidade é grande aliada na coleta das partículas. Segundo COURY (1982 apud STEFFENS, 2007) prevalece para baixas velocidades de gás e grandes partículas ( $St > 10$ ).

A eficiência pela gravidade ( $\eta_g$ ) é representada pela equação (22), levando em conta: a velocidade terminal ( $v_t$ ) dada pela equação(23); a velocidade do gás ( $U_0$ ); a gravidade ( $g$ ) e a densidade de empacotamento ( $\alpha$ ).

$$\eta_g = \frac{\alpha^{2/3} \cdot v_t}{U_0} \quad (22)$$

$$v_t = \frac{dp^2 \cdot g \cdot \rho_p}{18\mu} \quad (23)$$

### 2.3.5. Eficiência do mecanismo eletroforético

O mecanismo eletroforético é significativo para o caso onde as partículas estão carregadas eletricamente, ora espontaneamente por atrito ou até mesmo induzido por um campo elétrico. Tal mecanismo pode ser muito favorável à etapa de filtração, pois sua eficiência pode ser aumentada e a resistência a passagem de fluxo diminuída (STEFFENS, 2007).

Em 1983, Coury apud STEFFENS, 2007 propôs uma relação, equação (24), para obter-se a eficiência eletroforética.

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

onde  $K_m$  é obtido por meio da equação (25),  $\gamma_c$  é o coeficiente de polarização do coletor;  $q$  é a carga da partícula e  $\epsilon_0$  é a permissividade no vácuo cujo valor é igual a  $8,55 \cdot 10^{-12}$  A.s/V.m.

$$K_m = \frac{\gamma_c \cdot C_c \cdot q^2}{3\pi\epsilon_0 d_p D_f^2 \mu U_0} \quad (25)$$

### 2.4. Permeabilidade do meio filtrante

Além da eficiência, outro parâmetro muito importante na caracterização do meio filtrante é a permeabilidade. Por meio dela, pode-se saber o quanto que o meio filtrante deixa passar o fluido.

Há duas equações que descrevem a permeabilidade em função da viscosidade: a equação de Forchheimer, equação (26), e Darcy, equação (27) (INNOCENTINI et al, 2005).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K_1} \cdot v_s + \frac{\rho}{K_2} v_s^2 \quad (26)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K_1} \cdot v_s \quad (27)$$

A variação de perda de carga é designada por  $\Delta P$ ,  $\mu$  e  $\rho$  são viscosidade e densidade do fluido, respectivamente. A velocidade superficial do gás ( $v_s$ ) é obtida pela vazão volumétrica sobre a área exposta ao escoamento.  $K_1$  é conhecida como constante de permeabilidade Darciana enquanto que  $K_2$  é a constante não-darciana.

O uso de cada equação é relacionado a dependência da perda de carga final com a velocidade do fluido. A equação de Forchheimer leva em conta além dos efeitos viscosos ( $K_1$ ), os efeitos inerciais e turbulentos ( $K_2$ ) (INNOCENTINI et al 2012).

## 2.5. Estado da arte de normas de padronização para testes em filtros

Como descrito anteriormente, há um vasto leque de normas de padronização em vigor no mundo todo. Apesar de todas elas se preocuparem em oferecer uma classificação para os filtros, a metodologia usada por cada uma delas é diferente. Consequentemente, um mesmo filtro pode ter classificações distintas, dependendo a norma utilizada.

Muitos trabalhos vêm buscando entender as diferenças de cada uma das normas e sua compatibilidade com o ambiente real, ou seja, fora dos laboratórios. Apesar do grande leque de normas, há duas principais (americana e a europeia), que servem como base para outras demais espalhadas pelo mundo todo. A seguir serão descritos de forma breve, alguns trabalhos que vem sendo feitos a respeito dessas principais padronizações de testes em filtros.

Zhou et al (2007) fez uma comparação com base nos procedimentos descritos por cada norma e aponta o melhor que cada uma delas oferece. A norma americana (ASHRAE52.2) usa o KCl como aerossol. A classificação é feita com base na mínima eficiência para três faixas de diâmetro de partícula (0,3-10 $\mu$ m) enquanto que a europeia (EN 779) adota apenas 0,4 $\mu$ m.

Em contra partida, a norma europeia faz ainda testes adicionais com o filtro descarregado eletricamente.

Além da eficiência, diferença de pressão, as normas também medem a capacidade de retenção de pó, na tentativa de estimar o tempo de vida do filtro. Tanto para a norma americana (ASHRAE 52.1) quanto a europeia (EN 779) utilizam um pó artificial para carregamento, diferente do pó atmosférico. Tendo em vista, essa diferença Gustavson (2003) realizou experimentos de carregamento com pó artificial e atmosférico. Os resultados mostraram que ao atingirem uma perda de pressão igual a 450 Pa, há um acúmulo de pó dez vezes maior (500g) para o pó artificial em relação ao pó atmosférico (50g).

A norma europeia em seus relatórios fornece informações adicionais de eficiência sob o filtro descarregado eletrostaticamente, a fim de saber se há influências na eficiência final do filtro. Todavia o uso do IPA (álcool isopropílico) no descarregamento dos meios filtrantes tem algumas limitações. Com isso Cagliano, 2012 propôs um novo procedimento de descarga elétrica, usando vapor de IPA. Os resultados se mostraram satisfatórios quando primeiro em contato com o vapor de IPA e o líquido posteriormente, não o contrário. A eficiência obtida após o carregamento do meio filtrante simula uma situação não compatível com a realidade. Logo, tal informação adicional não foi levada em conta quando realizados os testes de eficiência de coleta com relação a norma europeia.

Sabe-se segundo HINDS, 1999 que a eficiência de coleta é influenciada pelo tamanho da partícula. Por mais que a norma americana (ASHRAE 52.2.) leve em conta três faixas de tamanhos, não há uma eficiência calculada para PM<sub>2,5</sub>. Dessa forma, o estudo de Azimi et al (2014) sugere que apenas a classificação MERV não é suficiente para prever a eficiência de PM<sub>2,5</sub> e partículas ultrafinas (<100nm), particularmente para os filtros de MERV 7 e 12.

Na mesma linha de pesquisa, porém com enfoque em penetração, os estudos de Ondráček, j. Zíková, n. Zdímal, 2013 sugerem diferenças de teor de penetração em função do diâmetro de partícula. Os resultados mostram valores máximos de penetração para valores menores de 100nm enquanto que nas normas é utilizado um valor de penetração total utilizando aerossol com partículas de até 300nm.

Na tentativa de atender as sugestões apontadas e também unificar a padronização de testes em filtros, será introduzida uma nova norma a ISO 16890. De acordo com (TELIONIS; ZIVI, 2016), ela atenderá especificações baseadas em três “números de eficiência”: ePM<sub>1</sub>,

ePM2,5 e ePM10. O número ePM1 traz a eficiência para partículas cujo tamanho é inferior a  $1\mu\text{m}$ ; ePM2,5 para partículas menores que  $2,5\mu\text{m}$ ; e ePM10 para menores que  $10\mu\text{m}$ .

### **3. METODOLOGIA**

Neste capítulo será abordada a metodologia utilizada no trabalho de dissertação. Aqui serão apontados os equipamentos, material particulado, filtros e procedimento experimental utilizados.

#### **3.1. Material utilizado**

A seguir serão apresentados os tipos de aerossol juntamente com os pós de carregamento utilizados. Os materiais foram escolhidos com o intuito de se assemelhar o máximo possível para estudar e posteriormente comparar as normas americana (ASHRAE 52.2) e a europeia (EN 779 / EN 1822).

##### **3.1.1. Aerossol**

###### **3.1.1.1. EN 779**

Para a norma europeia (EN 1822 e EN 779), utilizou-se como aerossol o DEHS (DiEthylHexylSebacate) da Aldrich Chemistry cujo valor de densidade é de  $912 \text{ Kg/m}^3$ . Tal composto foi utilizado com o intuito de produzir grande quantidade de concentração (acima de  $10^4$ ) para a faixa de tamanho de partícula igual a  $0,4 \mu\text{m}$ .

A norma acima não tem um valor definido de concentração a ser utilizado de DEHS. Logo, foram realizados testes com 100%, 1% e 0,1% em massa de solução de DEHS diluído em álcool isopropílico. A decisão de fazer uma diluição em álcool isopropílico foi devido a trabalhos na literatura a respeito das normas (SZYMANSKI, 2017) e (SACHINIDOU, 2017). Á uma solução de 100% de DEHS, uma concentração muito alta foi obtida, sendo impedida a leitura de concentração pelo equipamento (contador de partículas). Ainda com 1%, tais valores eram altos. Logo, a concentração de 0,1% foi concentração mais adequada para executar os testes, pois a produção de partículas na faixa de  $0,4 \mu\text{m}$  se manteve ainda acima de  $10^5$  partículas/cm<sup>3</sup>.

Além do aerossol gerado, segundo a norma, ainda é necessário realizar um carregamento de pó para medir a eficiência novamente, agora com o filtro carregado. O pó de carregamento

utilizado foi fuligem de cana de açúcar. Tal pó foi escolhido pois a sua composição é a que mais se assemelhava ao pó sintético utilizado pela norma, que tem em sua composição a fuligem.

Tal pó sintético é composto por: 72% em massa de pó “fino” ISO 12103-A2 (pó do deserto do Arizona); 23% em massa de carvão preto e 5% em massa de fibra de algodão. Não foi possível comprar o pó fino e nem a fibra de algodão a tempo para a realização dos experimentos para o mestrado. Tendo em vista que a massa de carvão preto é 23% em massa do pó sintético, foi escolhido como pó, a fuligem de cana-de-açúcar.

A análise granulométrica feita pelo *Malvern Mastersize MicroPlus*, MAF5001 mostrou uma distribuição de diâmetro volumétrico  $D_{50} = 50\mu\text{m}$ . Em outras palavras, 50% das partículas da amostra analisada possuíam diâmetro igual ou inferior a  $50\mu\text{m}$ . No entanto, vale ressaltar que tal pó serviu apenas para carregar o filtro, ou seja simular um “filtro usado”. Sendo a eficiência de coleta do meio filtrante obtida, antes e após o carregamento, com o aerossol DEHS de solução 0,1%, como dito anteriormente.

### **3.1.1.2. ASHRAE 52.2**

Diferentemente da norma europeia, a americana faz uma análise de eficiência para os filtros grossos em um intervalo de tamanho de partícula. Em outras palavras, a análise é feita com base em um intervalo e não apenas um tamanho único. Todavia, a faixa de tamanho de partícula é bem extensa, indo desde  $0,3\ \mu\text{m}$  até  $10\ \mu\text{m}$ .

Inicialmente optou-se por testar o KCl em pó para realizar os testes como aerossol. Contudo, a análise granulométrica provida pelo Malvern (utilizando álcool em vez de água) foi de um diâmetro volumétrico mediano de  $150\ \mu\text{m}$ , valor muito superior ao intervalo sugerido pela norma. Dessa forma, uma porção de KCl de 500g foi colocada em um moinho de bolas e o resultado não se mostrou satisfatório. Após uma hora e quarenta e cinco minutos (com paradas) o KCl por ser muito higroscópico acabou endurecendo. Como segunda alternativa, ainda tentando reduzir de tamanho os cristais, foi usar um moedor de café da marca Hamilton Beach. Uma pequena quantidade de KCl foi colocada no moedor e processada por um minuto. Após a moagem, a análise no Malvern era feita. O mesmo procedimento foi repetido por sete vezes e o diâmetro volumétrico mediano final foi de  $25,94\ \mu\text{m}$ . Mais uma moagem foi realizada, agora com um tempo de dois minutos e o diâmetro mediano não se reduziu quase nada, ficando

quase igual a 25,82  $\mu\text{m}$ . Em outras palavras, a eficiência máxima do moedor de café já havia sido atingida e ainda assim o diâmetro mediano estava superior ao intervalo de 0,3 a 10,0  $\mu\text{m}$ .

A dificuldade em reproduzir essa faixa (0,3 a 10  $\mu\text{m}$ ) foi de encontrar um único aerossol que gerasse quantidades razoáveis de partículas para toda a faixa. As informações encontradas segundo a norma era o uso do KCl. Devido à falta de clareza nas especificações da norma, buscou-se na literatura estudos sobre a norma americana. Os trabalhos de PECK (2016); MEYERS (2005) contribuíram para moldar a metodologia a ser seguida nesse trabalho.

Na tentativa de solucionar a questão apontada, foram utilizados dois diferentes tipos de particulados. O primeiro foi a solução aquosa de KCl e um pó siderúrgico fornecido pela Arcelor Mittal de Tubarão. O KCl permitia a análise de partículas de 0,3 até 1  $\mu\text{m}$  enquanto que o pó, de 1 a 10  $\mu\text{m}$ .

A análise granulométrica feita pelo Malvern mostrou uma distribuição de tamanho de partícula ampla (0,05-100 $\mu\text{m}$ ) porém com valores de tamanho de partícula na faixa desejada ao estudo. O pó siderúrgico consistia em uma mistura de CaO com  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Cujas densidade era de 341,79Kg/m<sup>3</sup>.

Na literatura encontrou-se valores de 20% e 1% de concentração de KCl aquoso. Ambas concentrações foram testadas. Todavia, a concentração de 1% se mostrou mais adequada à capacidade dos equipamentos da linha utilizada. Para a concentração de 20% a produção de quantidade de partículas era muito alta comparada à capacidade limite do contador de partículas APS.

Dessa forma, foram utilizados dois tipos de particulados: a solução de 1% de solução aquosa de KCl e o pó siderúrgico. Com os dois juntos, pode-se então cobrir a faixa toda de tamanho de partícula, como a norma americana sugere. Consequentemente, foram utilizadas duas linhas de filtração com equipamentos diferentes, que serão explicadas a seguir.

Para os filtros absolutos, foi utilizado um aerossol distinto dos filtros grossos: DOP (Dispersate Oil Particulate), cujas características se assemelham muito ao DEHS utilizado pela norma europeia.

### **3.1.2. Meios Filtrantes**

Os meios filtrantes utilizados foram: vidro, micro quartzo, poliéster, celulósico e manta agulhada de poliéster com carvão ativado. São filtros distintos, podendo ser classificados em

duas classes de filtros. A escolha dos filtros foi devido a doações de meios filtrantes feitas por empresas.

A primeira classe é conhecida como sendo a classe de filtros grossos, médios e finos. São filtros que se enquadram a um valor de eficiência inferior a 95%. Trata-se de uma classe que abrange uma vasta quantidade de filtros. São caracterizados por possuírem baixa resistência a passagem de fluido (baixas perdas de cargas) e distribuição de fibras de tamanhos mais homogêneos. Os meios filtrantes de poliéster, celulósico e carvão ativado utilizados se encaixam nessa categoria. Na Figura 8, pode-se ver as amostras dos três meios filtrantes dessa categoria. Nota-se que o carvão ativado é negro enquanto o poliéster e o celulósico são brancos, porém são diferentes em suas texturas.

Figura 8- Amostras dos meios filtrantes, a-) celulósico; b-) poliéster; c-) carvão ativado



Fonte: Acervo Pessoal

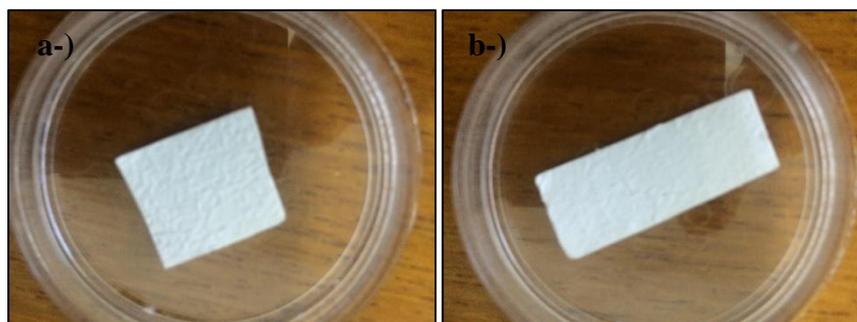
A empresa Filtracom LTDA- Divisão Filtros e Sistemas forneceu os meios filtrantes de celulose, poliéster e manta agulhada de poliéster com carvão ativado. Apenas o carvão ativado possuía o laudo técnico, cuja informação com base na ABNT NBR 16101 o classificava como F8.

De maneira oposta, os filtros com eficiência acima de 95% são classificados como filtros HEPA (*High Efficiency Particulate Air*) ou filtros absolutos. São caracterizados por terem alta porosidade, distribuição de fibras heterogêneas e alta perda de carga. Eles são os filtros de quartzo e vidro. São filtros de estrutura mais delicada quando comparados aos demais filtros. Deve-se tomar um cuidado extra quando manipulados. A fragilidade do meio filtrante pode ocasionar rompimento das fibras e conseqüentemente um dano na performance do filtro.

Os filtros absolutos (quartzo e vidro) foram obtidos pela empresa ENERGÉTICA Indústria e Comércio LTDA. As informações técnicas trazem uma perda de carga de 46,6 cm de H<sub>2</sub>O a uma vazão de 1,13 m<sup>3</sup>/min para o filtro de vidro. Ambos os meios filtrantes, possuem resistência a temperatura máxima de 540°C e eficiência de coleta pela retenção de partículas de

DOP (ftalato de dioctila) com diâmetro de  $0,3\mu\text{m}$  igual a 99,95%. A Figura 9 traz amostras dos filtros absolutos. É fácil de se confundir, pois ambos são brancos e bem delicados para manusear. Entretanto, há como diferenciá-los, pois a diferença do tipo de material faz com que crie uma estrutura visual cujos pequenos detalhes dão um formato distinto.

Figura 9- Amostras dos meios filtrantes absolutos: a-) HEPA de vidro e b-) HEPA de quartzo



Fonte: Acervo pessoal

### 3.2. Caracterização dos meios filtrantes

A primeira etapa do projeto consistiu em caracterizar os cinco tipos de meios filtrantes que serão utilizados nas unidades experimentais. Tal caracterização consistiu em determinar:

- a-) diâmetro e espessura da fibra;
- b-) porosidade;
- c-) permeabilidade;

A seguir serão explicadas as técnicas de caracterização utilizadas na obtenção dos parâmetros acima.

#### 3.2.1. Espessura do meio filtrante

A espessura dos meios filtrantes foi obtida por meio de fotografias tiradas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo FEI Inspect S-50. Tais microscópicos são caracterizados por fornecerem imagens tridimensionais de alta resolução, possibilitando realizar análises de caracterização das estruturas. As análises e também preparação de amostras

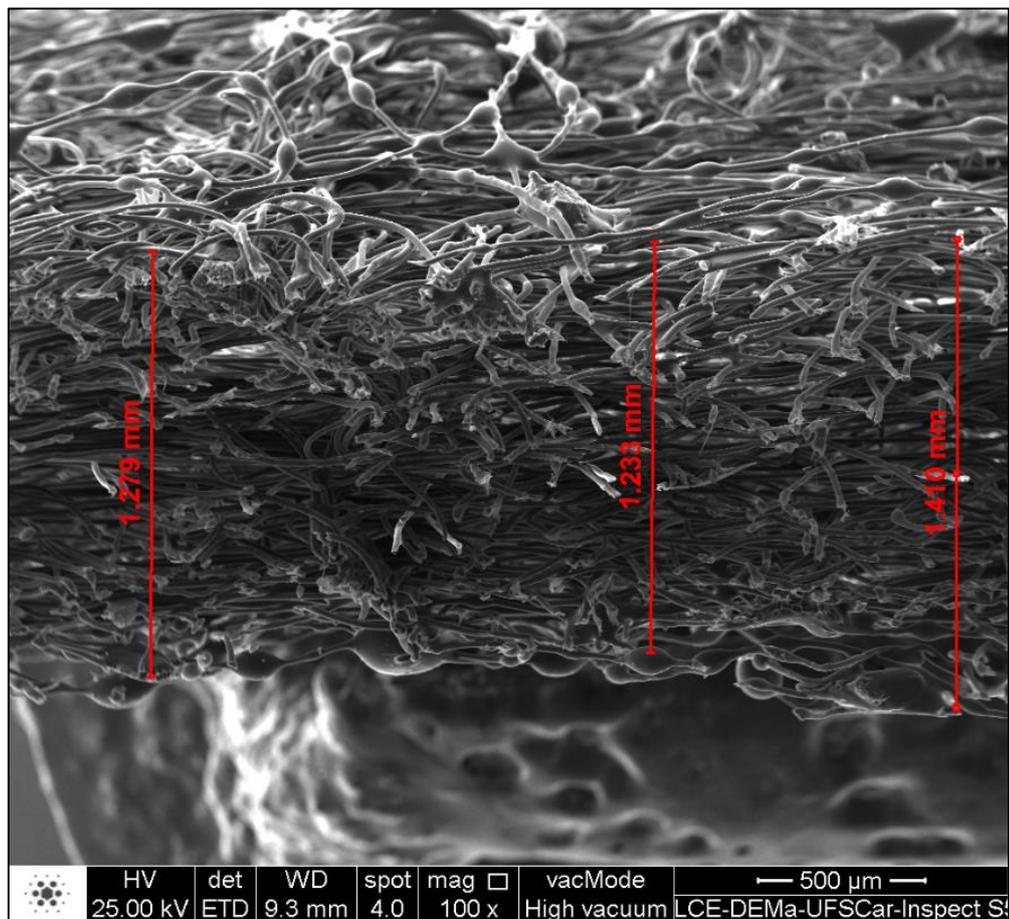
foram realizadas no Laboratório de Caracterização Estrutural da Universidade Federal de São Carlos.

As amostras foram preparadas com recobrimento de ouro puro, pois o funcionamento do MEV se dá por meio de mobilidade dos elétrons. A preparação foi realizada dois dias antes das análises e as amostras enviadas eram de tamanho de 1cm x 1cm para cada meio filtrante.

Sabe-se que a espessura do meio filtrante varia de acordo com o lote produzido pelo fabricante. Cabe ao pesquisador ajustar a melhor ampliação para poder determinar os parâmetros requeridos.

De acordo com a categoria dos filtros (grossos ou absolutos) foi utilizada uma resolução diferente para capturar as imagens. Para os filtros mais grossos (poliéster e carvão ativado) foram tiradas fotografias em ampliação de 100 vezes. Para cada uma das ampliações, capturou-se imagens em três regiões distintas das amostras. A Figura 10 mostra uma das regiões da amostra de carvão ativado, onde foi possível realizar três medições de espessura (vermelho).

Figura 10- Amostra de carvão ativado analisada pelo MEV Inspect S50 na ampliação de 100x

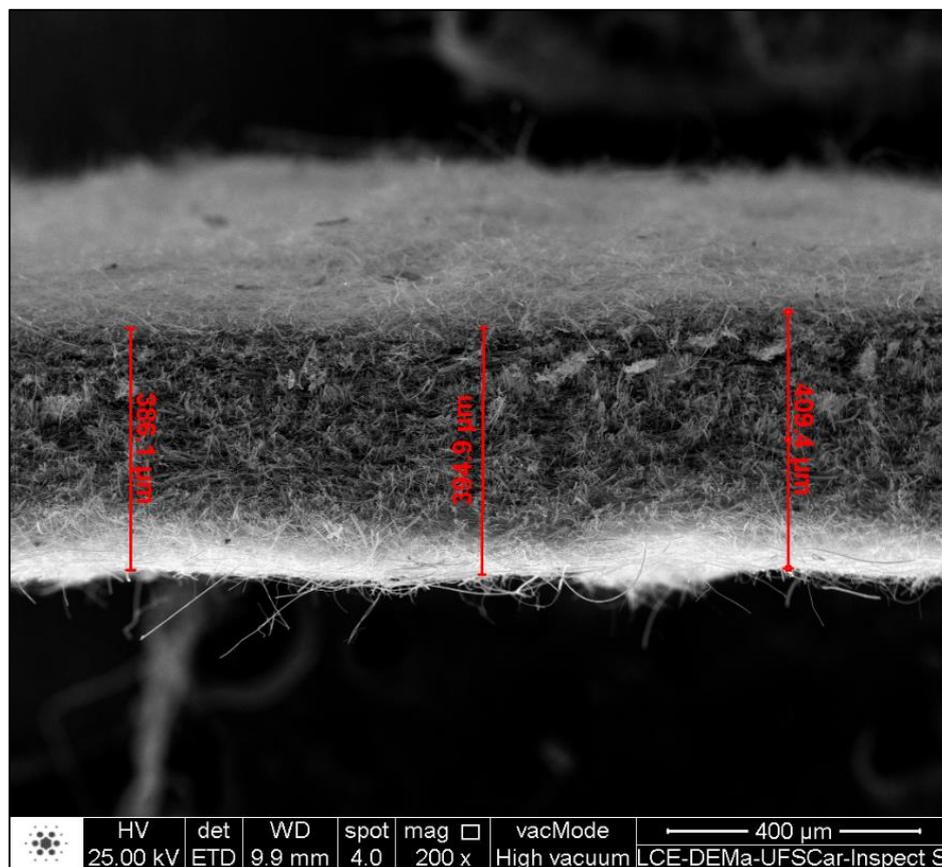


Fonte: Acervo Pessoal

Já para os filtros absolutos e também para o filtro celulósico foi utilizado uma ampliação maior cujo valor foi de 200 vezes. Novamente, a análise foi feita em três regiões distintas da amostra. A Figura 11 traz uma fotografia da amostra do filtro HEPA de vidro tirada na ampliação de 200 vezes.

A espessura final para cada meio filtrante foi determinada por meio de uma média dos valores obtidos nas três regiões distintas.

Figura 11- Fotografia HEPA de quartzo tirada pelo MEV Inspect S-50 na ampliação de 200x



Fonte: Acervo Pessoal

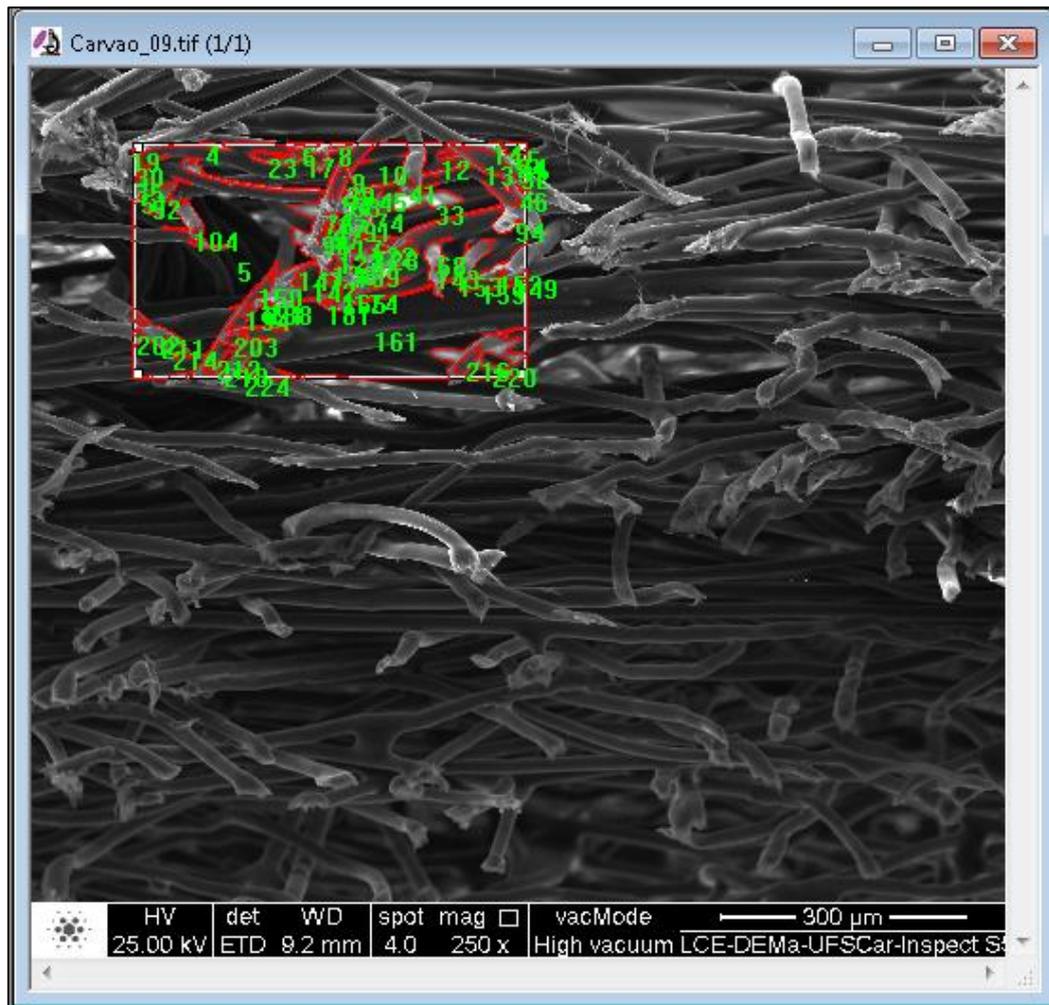
### 3.2.2. Porosidade do meio filtrante

A porosidade do meio filtrante pode ser expressada em termos de volume ou em superfície. Devido a disponibilidade de equipamentos, a porosidade superficial foi obtida e calculada em vez da volumétrica. Há dois caminhos de se obter a porosidade superficial, direta e indiretamente.

O método direto, também conhecido como método experimental, foi obtido utilizando a metodologia de Aguiar (1996). O método consistiu em analisar imagens das amostras na seção

transversal. Dessa forma, as mesmas foram tiradas pelo MEV-FEG Inspect S-50, porém na posição transversal. Utilizando o software Image Pro Plus 7.0, seis diferentes lugares para cada meio filtrante foram analisados. Como mostrado na Figura 12, o software por meio das marcações em vermelho calculava a área vazia de cada demarcação. Um arquivo em formato txt era extraído do Image Pro Plus e aberto no Excel. E por fim, no Excel era possível calcular a razão entre a soma de área de vazios pela área total. Steffens and Coury (2007) também utilizaram tal método direto.

Figura 12- Fotografia da amostra de carvão ativado inserido no Image Pro Plus 7.0



Fonte: Acervo Pessoal

O método indireto também aqui foi usado, trata-se das porosidades calculadas com base em equações teóricas. Agora, a porosidade foi estimada por meio das equações (28), (29) e (30), representando os modelos de Happel (1954), Kuwabara (1959) e Ergun (1952), respectivamente.

$$\frac{\Delta P \cdot d_f^2 \cdot A}{\mu \cdot Q \cdot L} = \frac{32 \cdot (1 - \varepsilon)}{-\ln(1 - \varepsilon) - \frac{(1 - (1 - \varepsilon)^2)}{(1 + (1 - \varepsilon)^2)}} \quad (28)$$

$$\frac{\Delta P \cdot d_f^2 \cdot A}{\mu \cdot Q \cdot L} = \frac{32 \cdot (1 - \varepsilon)}{-\ln(1 - \varepsilon) + 2 \cdot (1 - \varepsilon) - \frac{(1 - \varepsilon)^2}{2} - \frac{3}{2}} \quad (29)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot \mu \cdot v_s}{\varepsilon^3 \cdot d_f^2} + \frac{1,75(1 - \varepsilon)\rho_g \cdot v_s^2}{\varepsilon^3 \cdot d_f} \quad (30)$$

Onde L representa a espessura do meio filtrante, A área perpendicular ao fluxo, Q a vazão volumétrica,  $d_f$  o diâmetro da fibra,  $\mu$  viscosidade,  $\rho_g$  densidade do gás e  $\varepsilon$  porosidade. A diferença entre a pressão na entrada e saída é representada pelo  $\Delta P$ .

### 2.1.1. Diâmetro das fibras

O diâmetro das fibras foi obtido usando o método encontrado em artigos, tais como Bortolassi (2017) e Podgorski (2006). Ambos utilizaram a equação (31) para estimar um diâmetro médio de fibras levando em conta a heterogeneidade do meio filtrante.

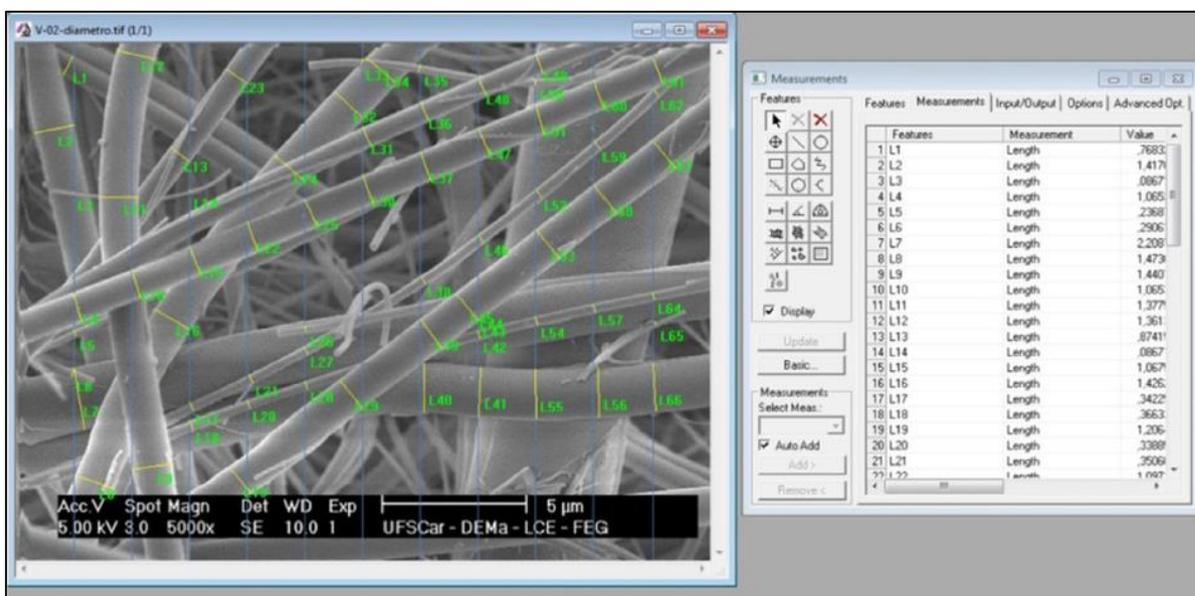
$$\overline{D}_f = \frac{\sum n_i \cdot d_{fi}}{N} \quad (31)$$

Mais uma vez, as amostras foram recobertas com ouro para posteriormente serem analisadas no MEV FEI Inspect S-50. Pelo fato dos filtros absolutos terem diâmetros de fibras menores quando comparados aos demais filtros, uma ampliação maior foi necessária. No caso, os filtros absolutos (quartzo e vidro) usaram uma ampliação de 5000 vezes enquanto os demais filtros (celulose, poliéster e carvão) apenas 500 vezes.

Para cada meio filtrante, foram analisadas 6 imagens, sendo que para cada uma delas em média 60 medidas de diâmetros eram contabilizados. Como mostra a Figura 13, as imagens eram inseridas no programa Image Pro Plus 7.0, onde manualmente era possível fazer marcações de tamanho de diâmetro na figura. Então, feita a calibração no programa de acordo com a escala da imagem, os valores de diâmetros eram plotados em uma tabela. Após os valores

serem salvos em txt e abertos no excel, por meio da equação (31) obtinham-se os diâmetros médios.

Figura 13- Interface do software Image Pro Plus 7.0 na obtenção dos diâmetros das fibras



Fonte: Acervo Pessoal

### 2.1.2. Permeabilidade do meio filtrante

A permeabilidade foi estabelecida por meio do aparato experimental de filtração linha 1 (Figura 14), porém sem o uso do SMPS. O contador de partículas não foi necessário pois a permeabilidade representa apenas a resistência à passagem de fluido. Em outras palavras, a velocidade e a perda de carga foram os fatores mais relevantes a serem contabilizados.

Para o teste, três amostras de filtros limpos (sem serem usados) para cada tipo de meio filtrante foram providenciadas. A área circular fixada em todos os testes foi de 17,42 cm<sup>2</sup> com diâmetro igual a 4,71 cm.

Antes de dar início, a temperatura e a umidade eram sempre checadas e anotadas, para posteriormente serem usadas nos cálculos. Outro cuidado tomado era de conter vazamentos na linha. Isso era checado por meio de uma solução de água com detergente. Pequenas gotas da solução eram pingadas nos pontos de conexão da linha. O vazamento era detectado por meio da formação de bolhas. Quando sinalizado, o mesmo era corrigido através de fitas adesivas ou até mesmo pequenos pedaços de mangueira de borracha. Após, então o teste se iniciava.

O princípio do teste de permeabilidade era constatar a variação da perda de carga quando a velocidade aumentava. A variação na vazão do ar foi de 5 a 35 L/min, limites inferior e

superior da escala do rotâmetro utilizado (GF 2460 tamanho 14 da marca Gilmont). Tal faixa de vazão volumétrica operando na área de 17,42 cm<sup>2</sup>, fez com que se trabalhasse a uma velocidade de 4,5 a 31,5 cm/s. Sabe-se que ambas as normas (europeia e americana) adotam como velocidade superficial 5 cm/s. Partindo do pressuposto que a velocidade das normas está na faixa oferecida pelo rotâmetro, o mesmo se mostrou adequado para trabalhar no trabalho presente. Por fim, a perda de pressão foi medida para cada velocidade usando o manômetro digital Velocicalc da marca TSI 9555-P.

Os resultados de velocidade e perda de carga em trélicas foram então inseridos no Excel para serem tratados por meio da Equação (26) e equação(25). O número de Reynolds (Re) e Forcheimer (Fo) foram checados através das equações (32) e (33). Ambos valores foram menores que 1 para todas as trélicas, logo foi possível usar a Equação (27) de Darcy para obter o coeficiente de permeabilidade (K1).

$$Re_f = \frac{\rho_g \cdot v_s \cdot d_f}{\varepsilon \cdot \mu} \quad (32)$$

$$Fo = \frac{\rho_g \cdot v_s \cdot (k1/k2)}{\varepsilon \cdot \mu} \quad (33)$$

Ainda assim, a velocidade precisava ser corrigida em função da temperatura e pressão calibrada pelo rotâmetro utilizado. Com a ajuda da Equação (34), onde a T calibrada era 70°F e a P calibrada 760mm Hg, a vazão corrigida foi calculada.

$$Vazão\ corrigida = Vazão\ medida \cdot \sqrt{\frac{T\ calibrada}{T\ operação}} \sqrt{\frac{P\ operação}{P\ calibrada}} \quad (34)$$

A Equação (27) de Darcy trabalha com  $\Delta P/L$  em função de velocidade, logo a vazão volumétrica corrigida teve que ser convertida em velocidade através da Equação (35).

$$v_s = \frac{Q}{A} \quad (35)$$

Os valores de  $\Delta P$  divididos pela espessura em função da velocidade eram plotados em um gráfico cujo coeficiente angular permitia obter o valor do K1. O coeficiente de permeabilidade obtido era a razão entre a viscosidade do gás pelo coeficiente angular do gráfico.

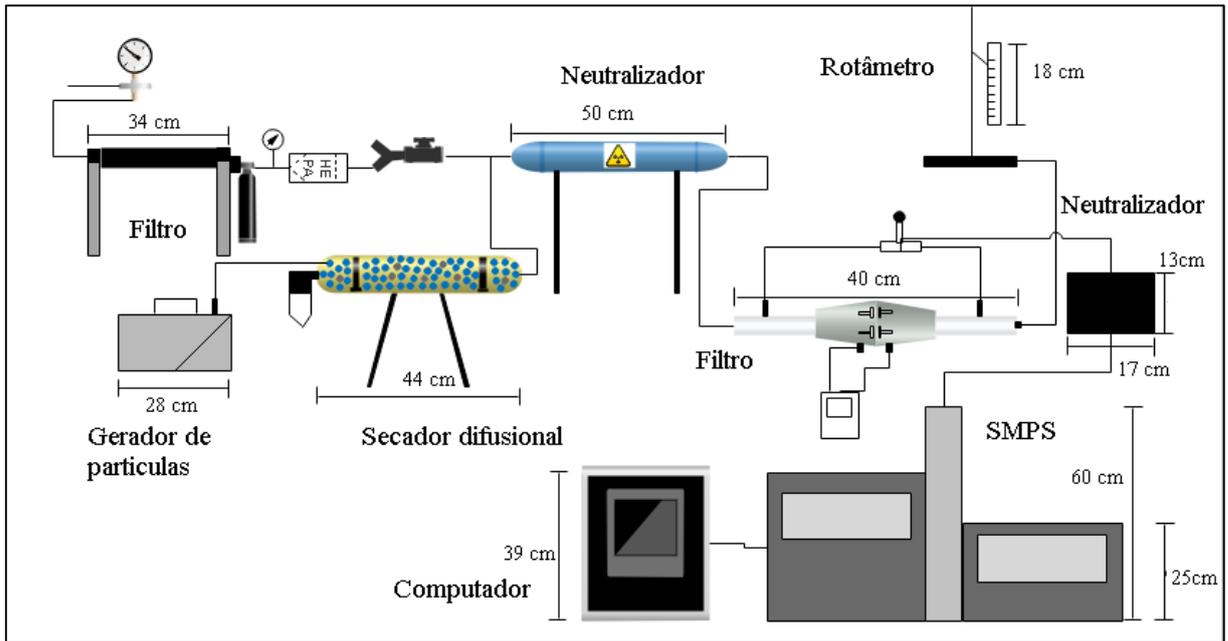
### 3.3. Linhas de filtração experimental

O estudo das normas envolveu duas unidades experimentais (linhas 1 e 2), sendo necessárias algumas adaptações das mesmas dependendo a norma reproduzida.

Nas Figura 14 e Figura 15, encontram-se um esquema da linha de filtração (linha 1) utilizada para medir eficiência e permeabilidade dos meios filtrantes. A mesma linha foi adaptada e utilizada por cada uma das normas. Para a norma europeia (Figura 14), foi utilizado o contador de mobilidade elétrica, SMPS. Já para a ASHRAE 52.2 a linha teve que ser adaptada. Em outras palavras, foi utilizado um contador de partículas APS (*Aerodynamic Particle Sizer*) da marca TSI modelo 3433. Tal contador foi utilizado pois possibilitava contar partículas de tamanho maior (até 50 $\mu\text{m}$ ). Todavia, o APS tem como tolerância uma concentração de partículas limite e para que essa exigência fosse atendida foi necessário diluir a corrente de aerossol com ar. Para assegurar que tal diluição não estaria contaminando a linha com impurezas do ar atmosférico, foi utilizado um conjunto de filtros em um mesmo suporte seguidos de um filtro HEPA, como mostra a Figura 15.

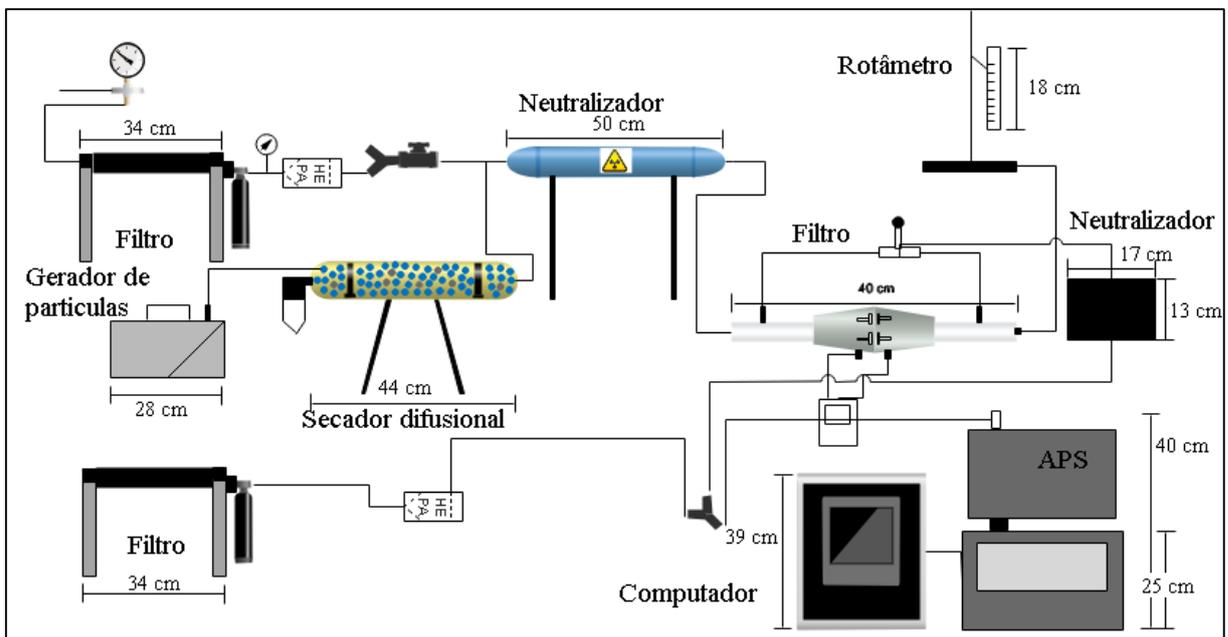
O esquema da segunda unidade experimental (linha 2) é representado na Figura 16. Tal unidade foi utilizada na execução de ambas as normas. Quando reproduzido a EN 779, o utilizou para um carregamento de pó nos meios filtrantes, com um dispersor de pó *Small-Scale Powder Disperser* porém sem o uso do contador de partículas. Depois de algumas adaptações, para a ASHRAE 52.2 mediu-se eficiência do meio filtrante para um pó de diâmetro entre 1-10 $\mu\text{m}$ , utilizando o APS acoplado a linha.

Figura 14- Aparato experimental de filtração da linha 1 utilizado para reproduzir a EN779 e a EN1822



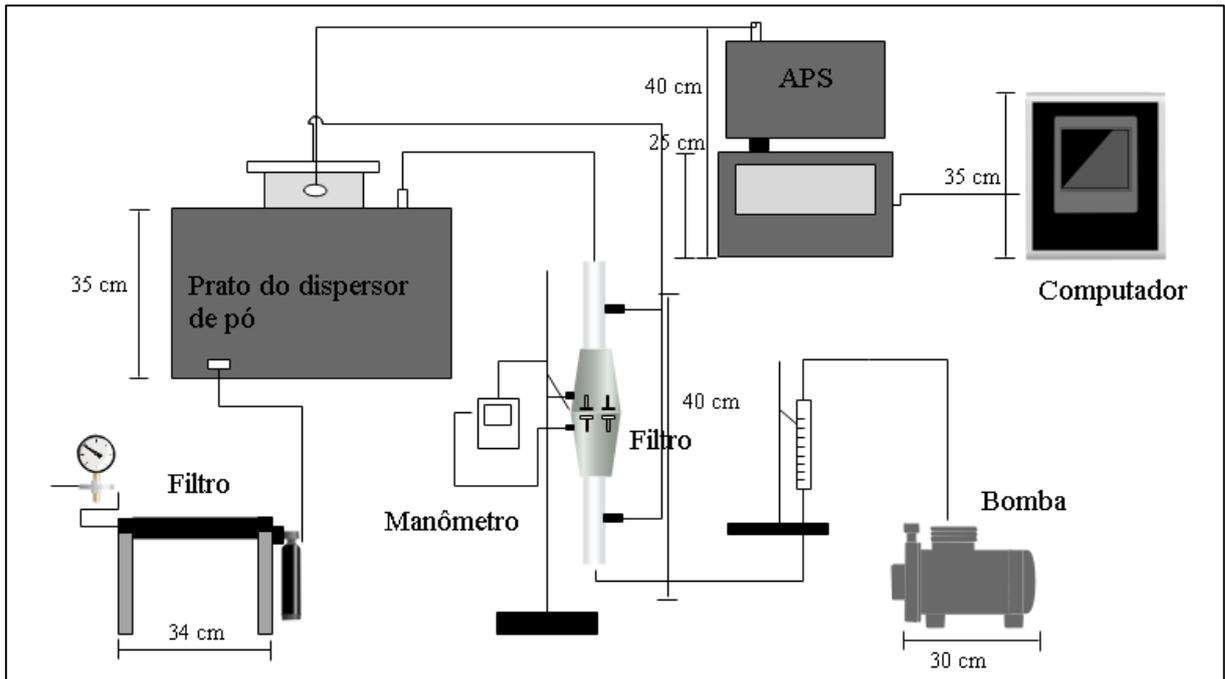
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 15- Aparato experimental de filtração da linha 1 utilizado para reproduzir a ASHRAE 52.2



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 16- Unidade experimental com dispersor de pó da linha 2



Fonte: Acervo Pessoal

### 3.4. Equipamentos da linha 1

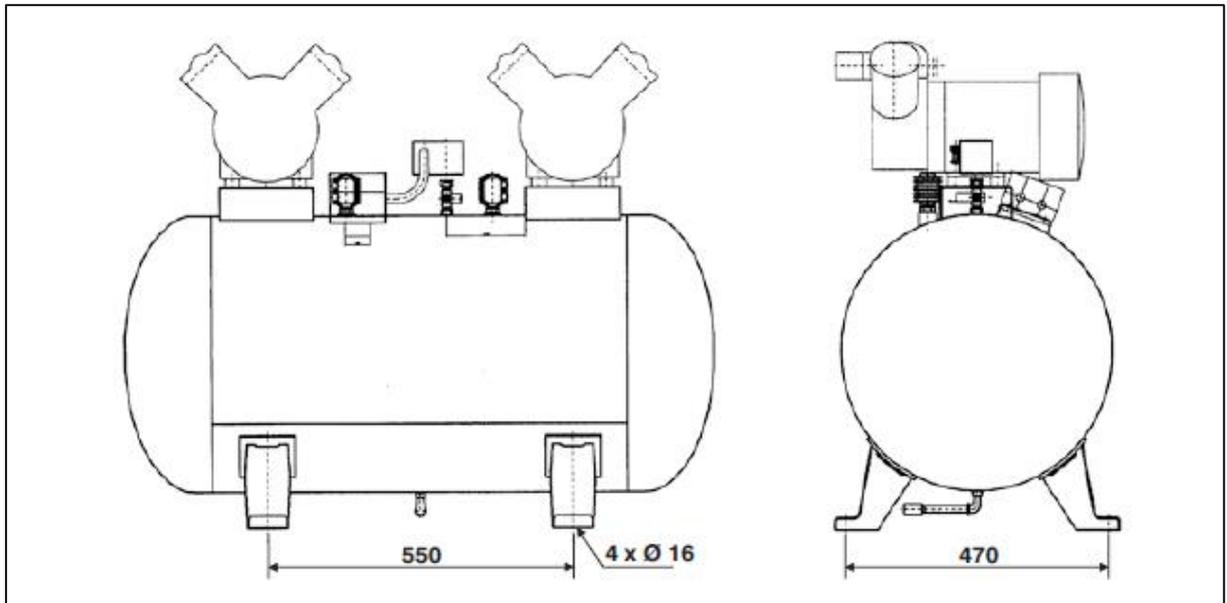
O detalhamento dos equipamentos que compõem a linha de filtração utilizando aerossol será descrito a seguir.

#### 3.4.1. Compressor de ar

O ar comprimido utilizado nas linhas de filtração foi fornecido por um compressor de ar tipo pistão isento de óleo da marca Schulz modelo MSV 12/175. O compressor por ter dimensões (880x520x1080) mm se localizava na parte externa do laboratório. Tal modelo possuía capacidade máxima de 120 psi ou 8,4 bar e capacidade de 340L/min. O ar atmosférico entrava no compressor através da válvula de admissão no cilindro de baixa pressão. Enquanto o pistão descia o ar era sugado para dentro. Em seguida, a válvula de admissão se fechava e o pistão empurrava o ar para cima, comprimindo o ar. Após a compressão, a válvula de escape abria e o ar era forçado a sair, sendo direcionado para o cilindro de alta pressão. O mesmo processo ocorria, agora no cilindro de alta pressão. Era necessário que o ar fosse comprimido duas vezes a fim de se atingir uma pressão final maior. A umidade presente no ar atmosférico fazia com que eventualmente se retirasse água existente no tanque do compressor.

A Figura 17 traz as dimensões do compressor de ar dadas em milímetros cuja pressão de operação era em torno de 160 psi.

Figura 17- Vista lateral e frontal do compressor de ar modelo Schulz MSV 12/175

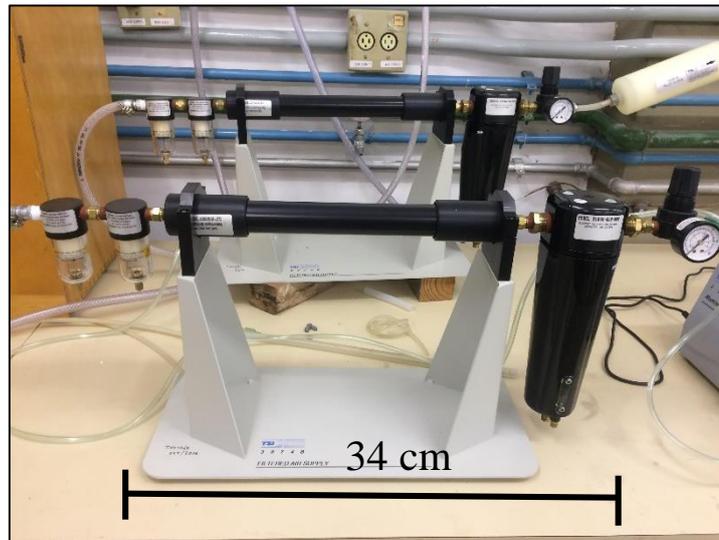


Fonte: Schulz, 1999

### 3.4.2. Dispositivo de filtração do ar comprimido

Todo o ar comprimido que entrava no sistema era purificado por um dispositivo de filtração modelo 3074 B da marca TSI Incorporated (*Trust Science Innovation*), representado na Figura 18. Essa etapa era essencial para evitar contaminação da corrente de ar comprimido na linha. O dispositivo possuía três filtros e uma membrana. Na entrada do dispositivo, a corrente de ar passava por dois filtros cuja função era remover qualquer gotícula de óleo ou líquido. Após os pré-filtros, o ar passava por uma membrana cuja função era retirar a umidade da corrente. Já as partículas mais finas eram removidas quando a corrente de ar passava por um filtro de alta eficiência localizado na saída do dispositivo de filtração.

Figura 18- Dispositivo de filtração



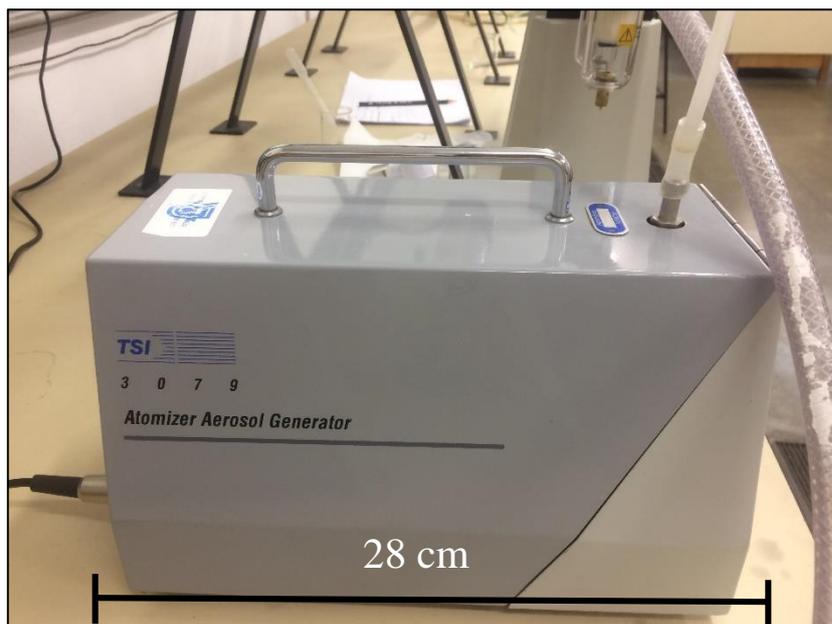
Fonte: Acervo Pessoal

### 3.4.3. Gerador de partículas

O gerador de partículas utilizado foi o gerador da TSI modelo 3079, como mostrado na Figura 19. A formação do aerossol ocorria pelo processo de atomização. A transformação da solução em uma névoa de gotas ocorria devido à alta velocidade relativa entre o gás e o líquido (solução) (AMARAL,2010). As gotas maiores eram removidas pelo bocal por impactação inercial e retornavam ao vidro de solução. Já a névoa de gotas menores seguia adiante em direção ao secador (BARROS,2014). Dessa forma, as partículas geradas encontravam-se abaixo de 1  $\mu\text{m}$ , sendo então partículas nanométricas.

O equipamento era composto por um recipiente de vidro de ocupação máxima de 80 mL (lugar onde a solução era adicionada); compressor (fornecia o ar comprimido necessário para o processo de atomização); filtro HEPA (o ar é filtrado pelo filtro antes de ser expandido pelo bocal atomizador); rotâmetro e uma válvula agulha, onde era possível ajustar e monitorar a vazão de aerossol produzido. A máxima vazão em que o equipamento podia operar era de 250L/h gerando uma concentração de partículas máxima igual a  $10^8$  partículas por  $\text{cm}^3$  (TRUST SCIENCE INNOVATION,2006). A vazão de operação utilizada era em torno de 190 Litros por hora.

Figura 19- Gerador de partículas Modelo 3079 da TSI



Fonte: Acervo Pessoal

#### 3.4.4. Secador de Difusão

O aerossol formado saía do gerador de partículas com vapor de água remanescente. Para retirar a umidade das partículas era utilizado o secador modelo 3062 da marca TSI, mostrado na Figura 20. O equipamento consistia em dois tubos cilíndricos concêntricos, sendo o externo de acrílico e o interno formado por uma tela de fio metálico. O espaço entre os dois cilindros era preenchido por sílica-gel, responsável por absorver a umidade da corrente de aerossol que passava dentro do tubo metálico (cilindro interno).

Conforme a quantidade de aerossol, a sílica de coloração azul passava para coloração mais acinzentada. Quando a mudança de coloração ocorria era necessário trocar a sílica entre os cilindros. A sílica acinzentada era colocada em uma bandeja em uma estufa de 80°C onde a umidade era removida, voltando a coloração azul. Dessa forma, não havia desperdícios de sílica durante os experimentos.

Figura 20- Secador de difusão com sílica



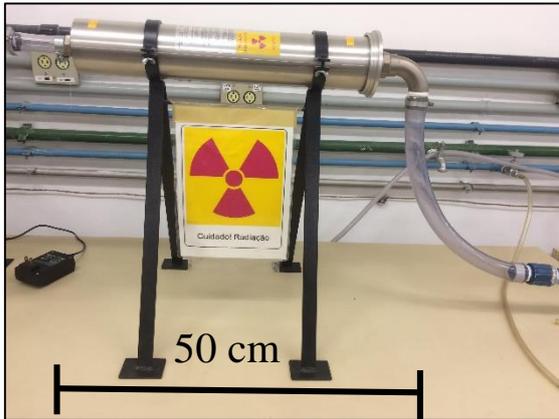
Fonte: Acervo Pessoal

### 3.4.5. Neutralizador

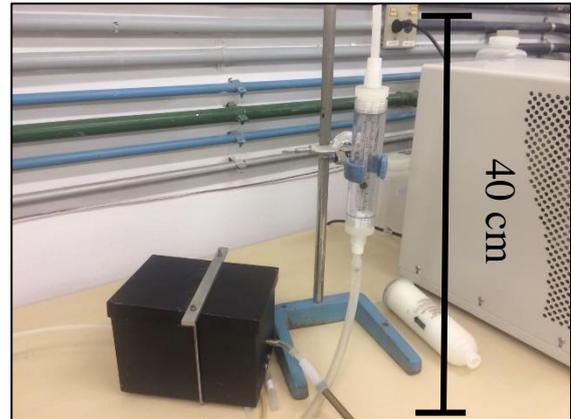
As partículas após o secador estavam sem umidade porém com cargas eletrostáticas, as quais podem comprometer os resultados de eficiência do meio filtrante. Um dos mecanismos de coleta de partícula pelo meio filtrante é eletrostático, logo uma partícula carregada poderia acarretar em uma eficiência superior a realidade. Para assegurar resultados mais precisos foram utilizadas duas fontes de neutralizador. A primeira delas de Criptônio (Kr) foi colocada logo após o secador, antes do aparato onde estava o meio filtrante. Uma vez que o equipamento de contar partículas (SMPS) usa o método de mobilidade elétrica que será descrito a seguir, foi necessário adicionar outro neutralizador. Posicionado após o dispositivo onde o meio filtrante estava, a fonte neutralizadora de Amerício 241. A mesma, por sua vez, descarregava as partículas antes de entrarem na sonda de amostragem.

Ambas as fontes neutralizadoras são altamente radioativas e por isso foram sempre manuseadas com cuidado. A Figura 21 mostra as duas fontes neutralizadores.

Figura 21- a-) Neutralizador de Criptônio b-) Caixa preta com neutralizador de amerício



a-)



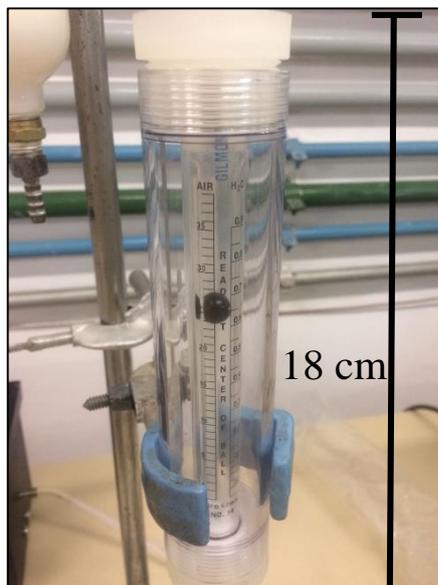
b-)

Fonte: Acervo Pessoal

### 3.4.6. Rotômetro

A vazão de ar era monitorada por um rotômetro da marca *Gilmont Instruments Inc* modelo GF 2460 tamanho 14, mostrado na Figura 22. O rotômetro estava posicionado no final da linha e a vazão era controlada por meio de uma válvula agulha. A precisão do rotômetro era de 0,05% ou um erro de 2 mm na leitura da vazão. Havia duas escalas no mesmo, porém foi apenas utilizada a escala para ar em vez de água. A leitura no aparelho era dada em litros por minuto.

Figura 22- Rotômetro Gilmont tamanho 14



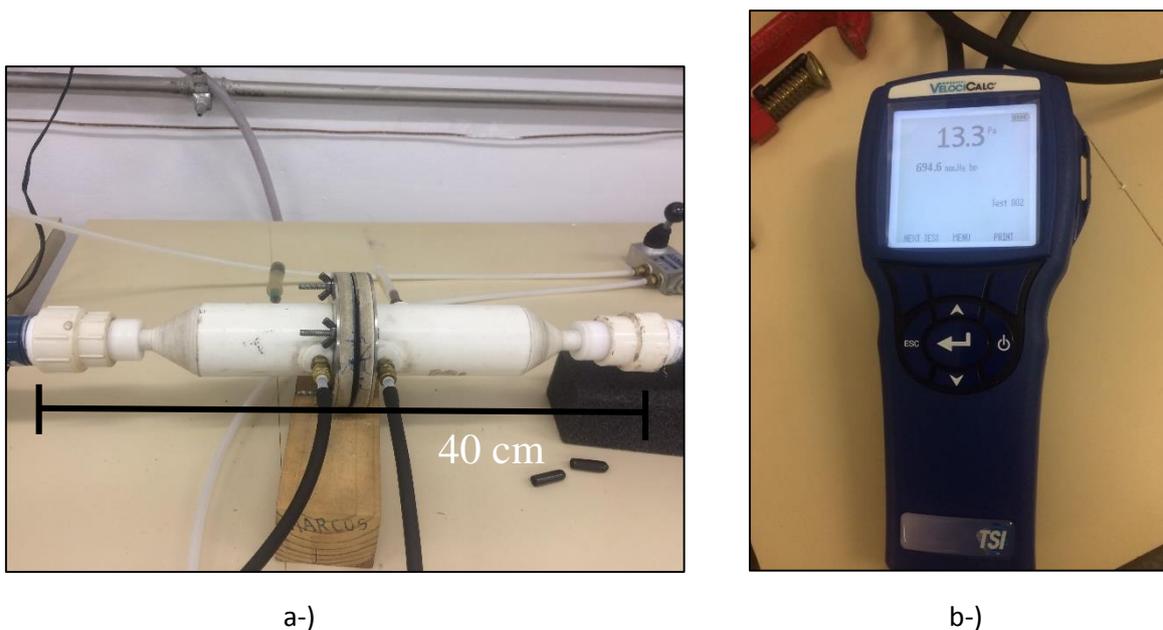
Fonte: Acervo Pessoal

### 3.4.7. Dispositivo de filtração e manômetro

O dispositivo de filtração trazia como principal função dar suporte ao meio filtrante. O dispositivo era composto por duas partes desmontáveis. O meio filtrante era inserido entre as duas partes e parafusado por quatro pregos. O material do dispositivo era PVC. A área de filtração era de geometria circular sendo o diâmetro e área igual a 4,71 cm e 17,42 cm<sup>2</sup>, respectivamente.

A Figura 23a-) mostra a fotografia do dispositivo de filtração utilizado nos ensaios com aerossol e também com carregamento de pó. Ainda no dispositivo, havia duas entradas onde podiam-se monitorar a variação de pressão, a qual foi obtida usando o manômetro digital da Velocicalc da marca TSI 9555-P. A fotografia do manômetro utilizado está na Figura 23b).

Figura 23- a- Dispositivo de filtração usado como suporte ao meio filtrante; b- manômetro digital



Fonte: Acervo Pessoal

### 3.4.8. Sonda de amostragem

A contagem de partículas foi realizada por meio de duas sondas de amostragem de diâmetro de 2 mm, posicionadas na posição jusante e montante do meio filtrante. Dependendo do posicionamento da válvula de três vias (Figura 23 a), os dados de jusante ou montante eram computados. Ambas as sondas se distanciavam a 26 cm antes e após o meio filtrante. Para uma melhor precisão dos resultados o posicionamento da sonda era crucial. O mesmo deveria estar

posicionado bem ao centro da tubulação apontado para a esquerda (de onde o fluxo de aerossol provinha), como representado na Figura 24.

Figura 24- Posicionamento da sonda de amostragem

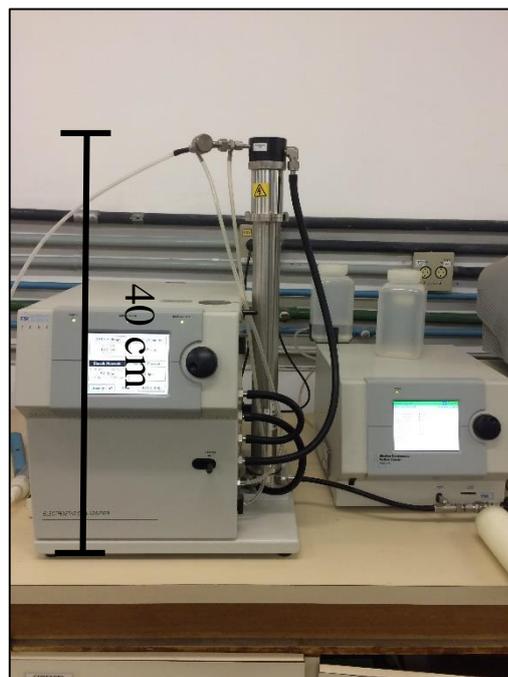


Fonte: Acervo Pessoal

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

O analisador de partículas promovia a concentração de partículas a jusante e montante do filtro através do princípio de mobilidade elétrica. Era constituído por quatro partes: o impactador, classificador eletrostático (Modelo 3080), analisador de mobilidade diferencial (DMA) e o contador de partículas ultrafinas (Modelo 3776) da marca TSI como mostrado na Figura 25.

Figura 25-SMPS



Fonte: Acervo Pessoal

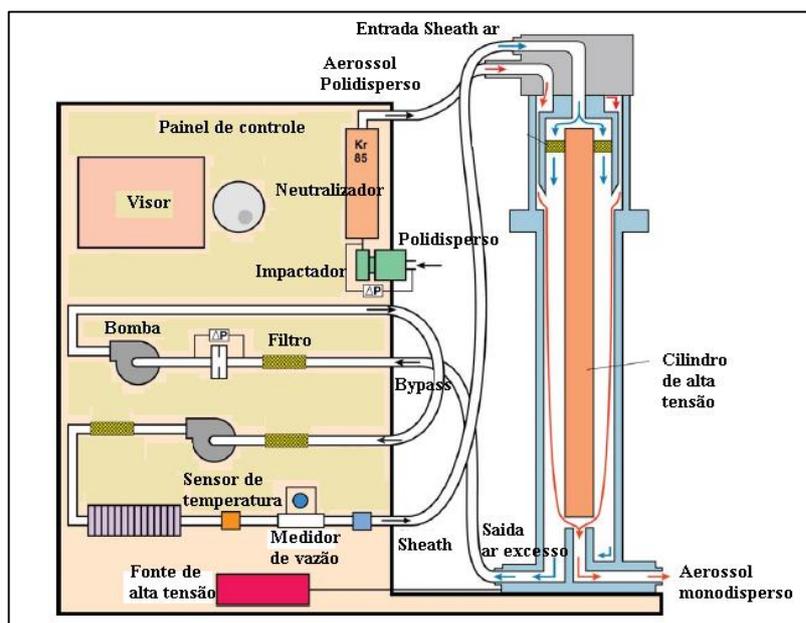
Logo na entrada do SMPS, encontrava-se o impactador cujo tamanho devia ser escolhido de acordo com a vazão (L/min) a ser trabalhada. No trabalho foi utilizado o impactador de diâmetro de bocal igual a 0,071 cm, o qual é utilizado para vazão de aerossol no intervalo de 0,6-2,1 L/min. Quando o aerossol entrava no impactador, o mesmo removia partículas de tamanho superior a um valor conhecido através do mecanismo de impactação inercial.

Em seguida o aerossol passava pelo sistema formado pelo classificador. Ele consistia em alguns subsistemas, os quais juntos ao DMA faziam com que o aerossol polidisperso fosse processado e entregue como monodisperso. Os principais subsistemas incluíam: o controle de fluxo de ar (sheath air flow), neutralizador, controlador de alta voltagem e o DMA.

A Figura 26 mostra o trajeto percorrido pela corrente de aerossol. Primeiramente, o aerossol polidisperso entrava pelo impactador como explicado anteriormente. Em seguida, passava por um neutralizador Kr 85 o qual promovia uma distribuição de carga nas partículas antes de entrarem no DMA.

O DMA pode ser encontrado em duas formas de configuração: Long-DMA e Nano-DMA. A principal diferença entre as duas formas é com relação à faixa de diâmetro de partículas que se faz a varredura. No trabalho foi utilizado a configuração Long-DMA cujo intervalo de tamanho de partícula era entre 6 a 800nm.

Figura 26- Esquema de funcionamento do Classificador Eletrostático com o DMA acoplado



Fonte: Manual Series 3080 Electrostatic Classifiers, 2008

Após submetidas a diferentes cargas, as partículas positivas e negativas se aderiam à parte exterior do cilindro de alta tensão, enquanto que as neutras eram removidas junto com a corrente de ar em excesso. Todavia, aquelas partículas com baixa carga de mobilidade elétrica conseguiam percorrer todo o DMA sem se aderir ao cilindro de alta tensão, podendo sair como partículas monodispersas.

Havia ainda uma corrente de ar de diluição também chamada *sheath flow*. Era alimentada pela corrente de ar em excesso que saía do DMA, a mesma retornava para o classificador. Lá passava por três filtros e um trocador de calor e por meio de duas bombas a corrente de *sheath flow* retornava ao DMA. O monitoramento da temperatura e vazão da corrente de diluição era feito dentro do próprio classificador.

Apesar de o classificador já ter feito uma conversão das partículas em monodispersas, uma pequena fração das monodispersas seguia para o contador de partículas modelo 3776. A pequena amostra de aerossol era sugada para dentro do equipamento por meio de um tubo capilar e misturada com o fluxo de ar de diluição. Inicialmente, o ar de diluição passava por um aquecedor onde o butanol era vaporizado e depois se difundia na corrente de ar. Juntos, o aerossol e o vapor de butanol passavam por um condensador onde o butanol tornava-se supersaturado e pronto para condensar. Uma vez que a condensação começava, as partículas maiores cresciam em gotas maiores e passavam por um detector óptico onde as mesmas eram contabilizadas facilmente.

Na parte de trás do contador de partículas ultrafinas encontrava-se um tubo de plástico com butanol. Segundo orientações do manual, o nível de butanol deveria ser mantido de pelo menos um terço para o funcionamento adequado do equipamento.

Segundo o manual de instruções, a vazão de *sheath flow* deveria ser dez vezes maior que a de *sample flow* (vazão do aerossol). Logo, foram adotadas uma vazão de 5 e 0,5 L/min para o *sheath* e *sample flow*, respectivamente.

Além do tipo de impactador e DMA, há outras opções de escolha quando se opera o SMPS, tais como: viscosidade do gás, densidade da partícula, vazão de aerossol amostrada, vazão de ar de diluição e os tempos de amostragem (*scan up* e *retrace*). O *scan up* significa o tempo em que as amostras de partículas estão sendo computadas, tal valor pode ir de 20 a 300 segundos. Após o *scan up* se encerrar, tem-se o tempo de *retrace* para a voltagem do classificador retornar ao valor inicial, cujos valores podem ir de 10 a 300 segundos.

### 3.5. Equipamentos da linha 2

O detalhamento dos equipamentos que compõem a linha de filtração utilizando pó será descrito a seguir. A segunda linha foi utilizada tanto para a norma europeia quanto à norma americana. Todavia, algumas modificações foram realizadas enquanto se utilizava cada uma delas. No primeiro caso, a norma europeia apenas necessitou o carregamento de pó, fazendo o uso apenas do dispersor de pó enquanto que a norma americana usufruiu do sistema completo (dispersor e o APS).

#### 3.5.1. Dispersor de pó

O dispersor de pó utilizado era o modelo 3433 da TSI, também é conhecido como *Small Scale Powder Disperser* (SSPD). O equipamento foi projetado para dispersar de maneira bem eficiente pequenas quantidades de pó seco de diâmetro entre 1 a 50 micrômetro. Por meio da técnica de Venturi, o SSPD dispersava pequenas quantidade de pó, na casa de miligramas. O dispersor podia operar sozinho ou acoplado ao APS (*Aerodynamic Particle Size*). Os dois modos foram utilizados no trabalho e serão descritos mais adiante. Na Figura 27 pode-se ver uma fotografia da parte frontal do SSPD onde são depositados os pós secos.

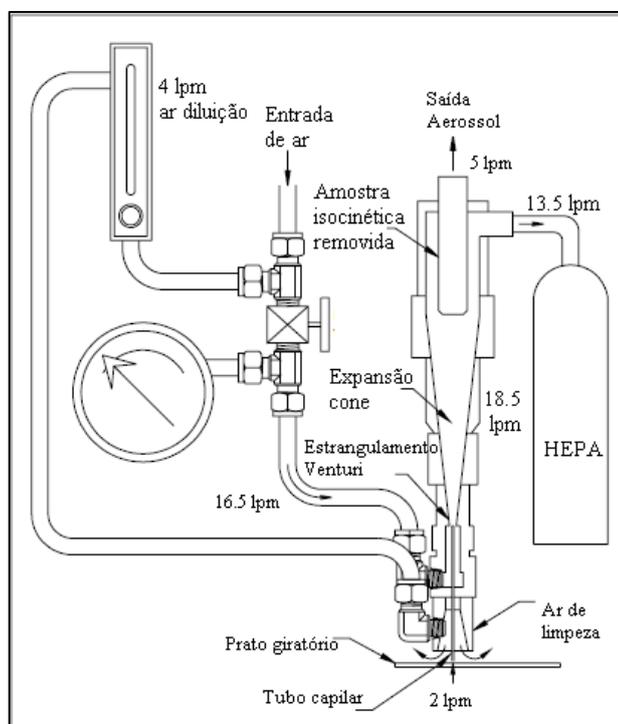
Figura 27- Foto frontal do dispersor de pó da TSI



Fonte: Acervo pessoal

O funcionamento do dispersor é esquematizado na Figura 28. O pó a ser dispersado era depositado em um dos três anéis do prato giratório. O pó era então sugado por um tubo capilar e pelo efeito de estrangulamento de Venturi. O tubo capilar interligava o prato giratório com o estrangulamento de Venturi. Uma região de alta pressão era criada pelo aumento da velocidade do ar através da garganta de Venturi o que fazia com que a partícula subisse no tubo capilar. Esse, por sua vez, atuava como um pequeno vácuo enquanto o prato giratório sob ele rotacionava.

Figura 28- Esquema de funcionamento do dispersor de pó



Fonte: Manual Small Scale Powder Disperser, 2003

Além do pó dispersado, havia ainda uma corrente de ar (*sheath flow*), cuja função era quebrar as aglomerações de pó e ainda evitar perdas de partículas nas paredes. Havia uma entrada na parte de trás do dispersor de pó, onde entrava uma mangueira de ar comprimido. O mesmo era inicialmente filtrado a fim de evitar contaminações.

### 3.5.2. Contador de partículas (APS)

O APS (*Aerodynamic Particle Sizer*) era modelo 3320, também da TSI, mostrado na Figura 29. O equipamento funcionava como um espectrofotômetro, identificando partículas

cujos diâmetros aerodinâmicos se encontravam na faixa de 0,5 a 20 $\mu$ m. O mesmo media a velocidade das partículas em um fluxo de ar acelerado passando por uma fenda. A aceleração do fluxo de ar fazia com que as partículas menores do aerossol obtivessem maiores velocidades, comparadas às maiores partículas, devido à inercia das mesmas.

Quando juntos, a corrente de ar e o aerossol passavam por dois feixes de laser focalizados, espalhando luz. A luz era coletada por um espelho elíptico que focava a mesma sobre um fotodetector de estado sólido. O último convertia a luz em pulsos elétricos. Cada pulso representava a presença de uma partícula.

Por meio dos tempo entre os picos e de curvas de calibração logarítmica, o APS obtinha distribuição de velocidade e de tamanho de partícula (diâmetro aerodinâmico).

Figura 29- Aerodynamic Particle Size (APS)



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 30- Aparato experimental da linha 2



Fonte: Acervo Pessoal

A Figura 30 traz a linha 2 completa com o dispersor de pó e o APS. Em cima do APS encontra-se um manômetro digital da marca CAPSUELIC cujo valor de pressão era dado em polegada de H<sub>2</sub>O. Ainda na figura, encontram-se o suporte do meio filtrante (o mesmo utilizado em todos os experimentos), o rotâmetro e a bomba.

Todas as interligações entre os equipamentos (linhas 1 e 2) foram feitas através de mangueira de borracha, por onde o aerossol passava. Atentou-se para os pontos que pudessem haver vazamentos. Sendo em algumas situações necessário passar uma fita isolante para conter vazamentos.

### **3.6. Procedimento experimental**

A etapa de caracterização dos meios filtrantes antecedeu as etapas de eficiência. As amostras de cada meio filtrante foram analisadas no Laboratório de caracterização estrutural e puderam-se obter valores de diâmetro de fibra; espessura e porosidade. Ainda fazendo parte da etapa de caracterização, a permeabilidade foi aferida. Para todos os meios filtrantes, foram usados três diferentes amostras.

Após a caracterização de todos os meios filtrantes, deu-se início a etapa de eficiência. Tendo em vista que o propósito do trabalho é comparar as duas normas vigentes, tal etapa foi dividida em duas partes. Ambas as partes serão descritas a seguir. Em todos os testes foram realizadas medições em três amostras distintas de área 17,42 cm<sup>2</sup> para cada meio filtrante.

#### **3.6.1. EN 779 e EN 1822**

A norma europeia se divide em duas normas, uma para os filtros absolutos (EN 1822) e outra para os demais filtros (EN 779). Ambas as normas utilizaram, inicialmente, o aparato da Figura 14. Aqui foi usado como aerossol a solução de DEHS de 0,1% diluído em álcool isopropílico. A velocidade de filtração foi a mesma utilizada pela norma igual a 5 cm/s.

Os parâmetros inseridos no SMPS foram: *sheath*, *aerosol flow rate*, *scan time up* e *retrace* iguais a 5; 0,5; 60 e 15, respectivamente. Como descrito anteriormente, todos os pontos de vazamento foram checados e corrigidos antes de iniciar os testes.

As leituras de eficiência a montante e a jusante do filtros foram feitas de acordo com as instruções da norma europeia. Logo, foram feitas intercaladamente, seis medidas a jusante e sete medidas a montante do filtro. Juntamente a eficiência, a pressão era monitorada. A pressão inicial e a pressão final após as treze medidas de eficiência, foram computadas. É importante

ressaltar que toda vez que o filtro era trocado pelo próximo filtro a ser medido, a limpeza da linha era feita antes de proceder com os testes.

Para os filtros absolutos, os testes de eficiência se encerravam nessa primeira etapa. Todavia, segunda a norma EN 779, os demais filtros deveriam ser submetidos a um carregamento de pó para então a etapa anterior com DEHS 0,1% ser repetida. Dessa forma, as mesmas amostras usadas na etapa anterior de celulose, carvão e poliéster, foram carregadas com pó. O carregamento do pó de fuligem foi realizado através do dispersor de pó da Figura 27. Por meio do sistema da Figura 30, operava a velocidade de 5cm/s e podia-se medir o aumento de pressão conforme o pó era carregado. Estabeleceu-se um tempo de 30 minutos de carregamento de pó para cada amostra. Tal tempo foi determinado com base nas condições operacionais do equipamento, visto que depois de 30 minutos a perda de pressão não sofria grandes mudanças.

Já com as amostras carregadas, as mesmas eram retornadas a linha da Figura 14 onde era medido a eficiência novamente como descrito na etapa inicial (antes do carregamento). Podendo assim, analisar os resultados de eficiência para os filtros grossos, antes e após o carregamento.

### **3.6.2. ASHRAE 52.2**

Para a norma americana, a distinção na execução dos testes de eficiência se difere da europeia apenas para os filtros mais grossos. Em outras palavras, para os filtros absolutos, a execução dos testes em ambas as normas é igual. Ambos utilizam o SMPS, mudando apenas o aerossol utilizado, ou seja o DOP em vez de DEHS.

Levando em conta a diferença de execução dos testes para filtros grossos, uma nova etapa de teste de filtro foi realizada.

Diferentemente da norma anterior, a americana analisa os filtros em um intervalo de partículas mais abrangente de (0,3 a 10,0  $\mu\text{m}$ ). Com o intuito de cumprir com os requisitos da norma, foram usados dois aerossóis: 1% de solução aquosa de KCl e pó de siderúrgica.

A linha da Figura 15, juntamente com o KCl permitiu produzir partículas de 0,3 a 1  $\mu\text{m}$ . A falta de clareza na ASHRAE 52.2 com respeito a quantidade de medidas a montante e a jusante do filtro, fez com que se adotasse como repetições um número de três vezes.

Para cobrir o tamanho de partículas de 1 a 10  $\mu\text{m}$ , foi usado o dispersor de pó, acoplado na linha da Figura 30. Antes de iniciar os testes, foi checado se a amostragem feita pelo contador era isocinética. Em outras palavras, foi checado se a velocidade de filtração era a mesma

velocidade que estava sendo amostrada. A velocidade de filtração na linha, definida pela norma, era de 5 cm/s. A mesma velocidade porém com uma área de amostragem muito menor do que a da linha, fazia com que a vazão fosse muito pequena, não podendo então ser medida por um rotômetro.

O contador de partículas APS foi acoplado em ambas as situações, tanto para a contagem de partículas usando o KCl na linha 1 quanto o pó siderúrgico na linha 2.

A solução encontrada para medir a vazão da amostragem foi utilizar um ebuliômetro e um cronometro. A corrente de ar da amostragem era colocada no ebuliômetro (na parte verde) e uma solução de água com detergente era colocada na entrada curvilínea, como mostra a Figura 31.

Com o teste do ebuliômetro, percebeu-se que operar com uma velocidade de filtração de 5 cm/s não era possível. Tendo-se então que mudar a velocidade de filtração da linha para 11 cm/s e então uma vazão de 11,35 L/min

Em ambas as linhas, tanto para os teste com KCl para com pó, foi utilizado o APS como contador de partículas.

Figura 31- Ebuliômetro para a amostragem isocinética



Fonte: Acervo Pessoal

As condições de operação segundo as normas de padronização de filtros estão resumidas na Tabela 9. A velocidade de filtração e a área são mantidas em todos os testes. Ambas as normas, americana e europeia fazem um tratamento diferenciado quando trata-se de filtros absolutos (HEPA). As principais diferenças notáveis são com relação ao tipo de aerossol e a forma no tratamento dos dados a fim de se obter os resultados de eficiência.

Tabela 9-Comparação entre as normas com relação as condições de operação

Normas	EN779	EN1822	ASHRAE 52.2	
Meios filtrantes	Filtros grossos	HEPA	Filtros grossos	HEPA
Aerossol	DEHS + fuligem	DEHS 0.1%	1% KCl <sub>(aq)</sub> e pó	DOP
Velocidade de filtração	5cm/s		5cm/s	
Área de filtração	17.42 cm <sup>2</sup>		17.42 cm <sup>2</sup>	
Equipamento	SMPS	SMPS	APS+prato/APS	SMPS
Tamanho de partícula	0.4µm	MPPS	(0.3-1); (1.0-3.0); (3.0-10.0) µm	0.3µm
Carregamento	SIM	NÃO	NÃO	NÃO

Fonte: Acervo Pessoal

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seção a seguir está subdividida em resultados de: caracterização dos meios filtrantes e eficiência de coleta do meio filtrante segundo cada norma. Na primeira parte, serão encontrados os resultados de diâmetro de fibras, porosidade (experimental e teórica), espessura e permeabilidade para os cinco meios filtrantes. Já os valores de eficiência de coleta de partículas segundo as normas europeia e americana serão apresentados na segunda parte da seção.

### 4.1. Caracterização dos meios filtrantes

#### 4.1.1. Diâmetro de fibras

Os resultados de diâmetro de fibras após o procedimento da seção 2.1.1 encontram-se na *Figura 32*, onde pode-se avaliar a distribuição das fibras com relação ao seu respectivo tamanho.

Pode-se notar que os filtros HEPA (quartzo e vidro) possuem comportamento semelhante, ou seja possuem uma concentração maior numa faixa menor de diâmetro (até  $1,5\mu\text{m}$ ), possuindo valores de fibras de no máximo  $3,5\mu\text{m}$ . Os demais filtros também se assemelham entre si. Diferentemente dos filtros HEPA, tais meios filtrantes possuem valores maiores de diâmetro de fibra.

Plotando-se os mesmos valores da *Figura 32* para uma mesma escala, tem-se o gráfico da *Figura 33*. O novo gráfico deixa ainda mais claro a percepção anterior. Os filtros HEPA, em preto e vermelho, concentram-se em uma faixa de diâmetro menor. Já os demais filtros possuem perfil semelhante se espalhando por diâmetros de faixas maiores.

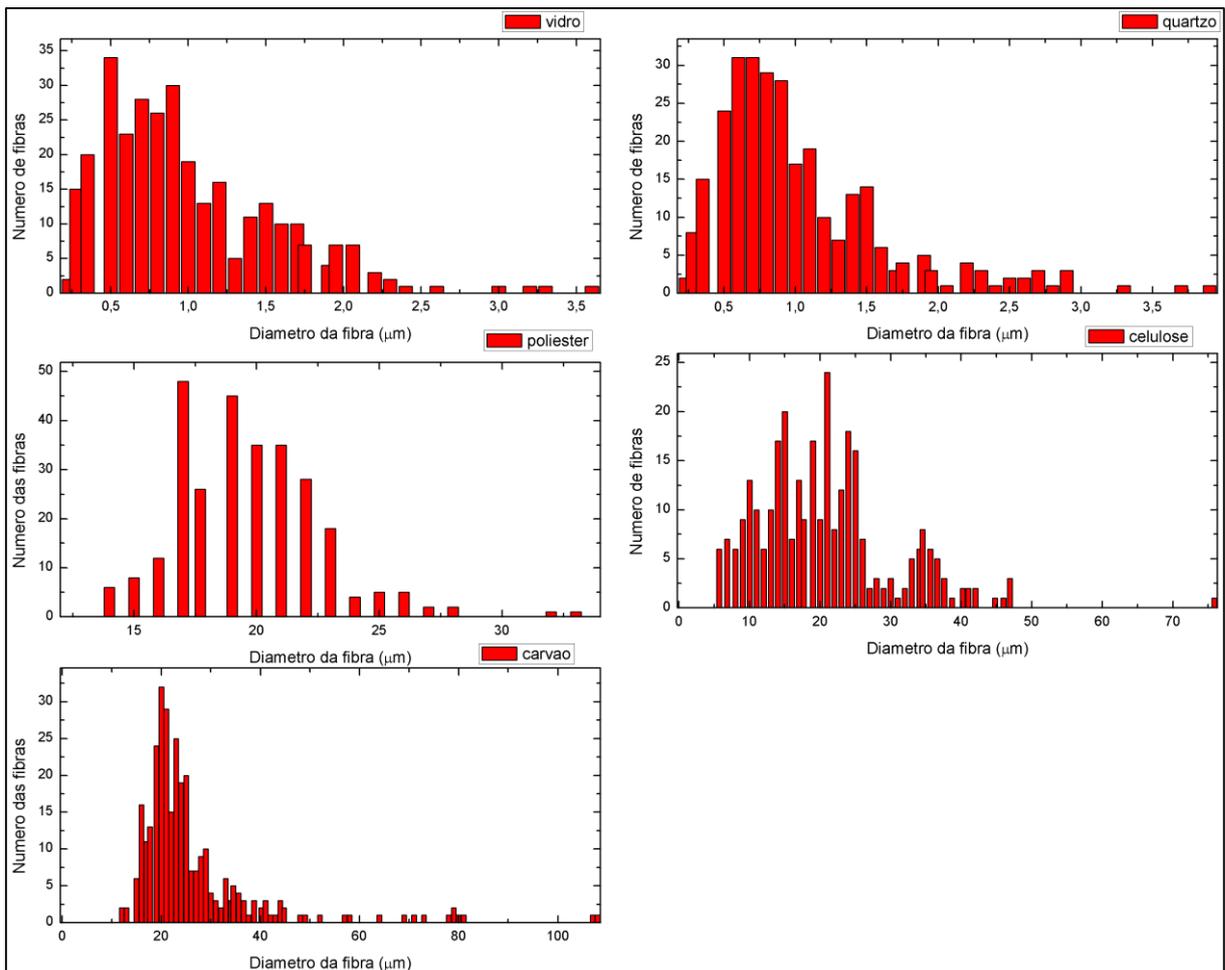
Os valores de diâmetro de fibra médio para os meios filtrantes com seus respectivos desvios encontram-se na *Tabela 10*. O valor máximo e mínimo de diâmetro de fibra médio encontrado foi para o carvão ativado ( $26,25\mu\text{m}$ ) e para o vidro ( $1,01\mu\text{m}$ ), respectivamente. Todavia, o maior valor de diâmetro de fibra absoluto foi de  $108,10\mu\text{m}$ , sendo novamente do carvão ativado. Entretanto, o menor valor absoluto ( $0,22\mu\text{m}$ ) não foi do vidro, mas sim do quartzo.

Tabela 10- Diâmetro de fibras médio ( $\overline{D_f}$ )

Meio Filtrante	Vidro	Quartzo	Poliéster	Celulose	Carvão Ativado
<b>Diâmetro da fibra [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	1,01	1,04	19,55	21,04	26,25
<b>Coefficiente de variação</b>	0,57	0,59	0,15	0,50	0,50

Fonte: Acervo Pessoal

Figura 32-Número de fibras em função do diâmetro para os cinco meios filtrantes

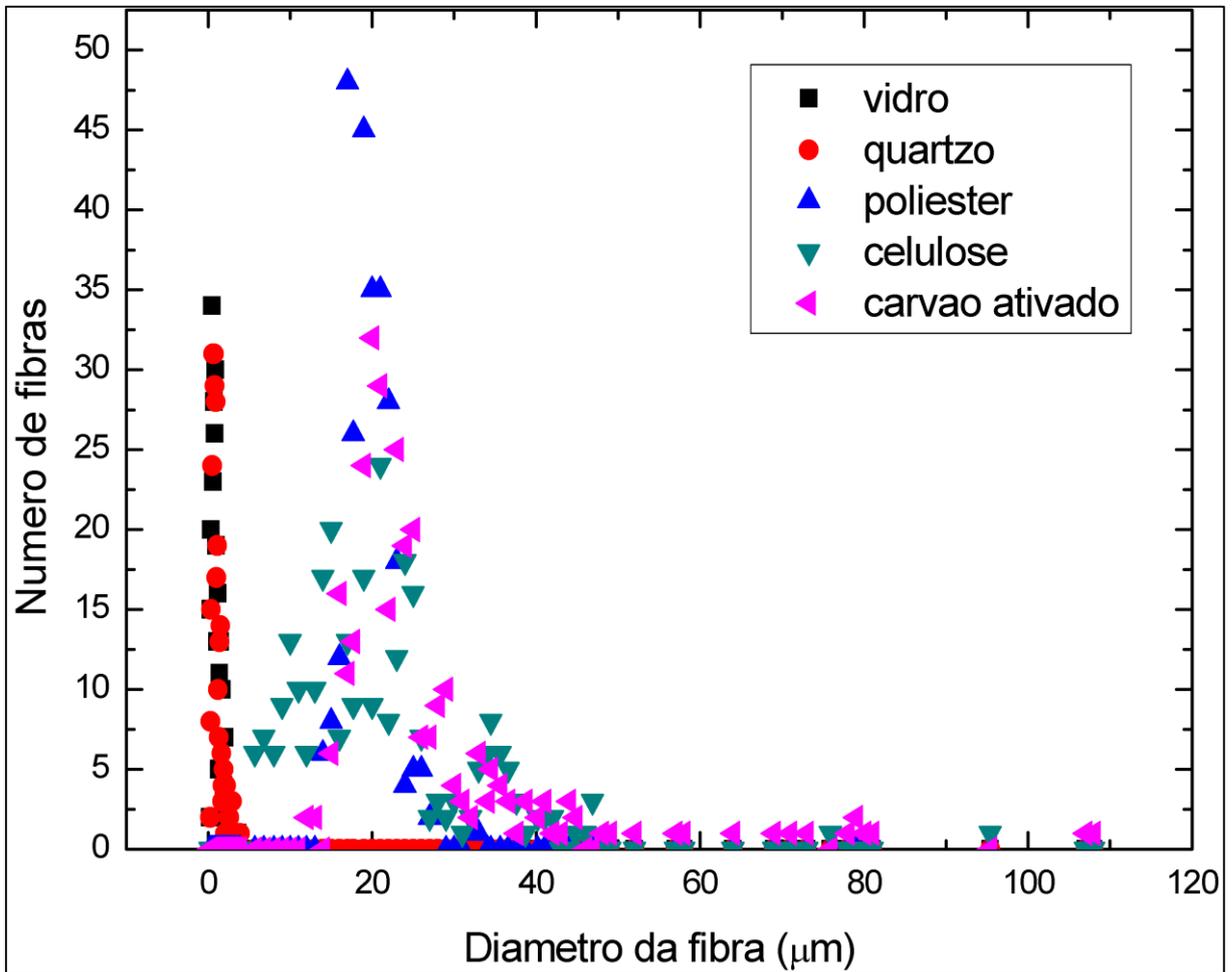


Fonte: Acervo Pessoal

Com relação ao coeficiente de variação, os meios filtrante HEPA possuíram os maiores valores (0,57 e 0,59). Tal resultado é coerente, visto que tais filtros são conhecidos por serem altamente eficientes devido à heterogeneidade de seus diâmetros de fibras. Por outro lado, o menor coeficiente de variação (0,15) é do poliéster. Sabe-se que há muitos tipos de poliéster no

mercado de filtros. O diâmetro de fibras para cada tipo de poliéster depende do processo de fabricação, tais mudanças no processo podem justificar o baixo coeficiente de variação.

Figura 33-Distribuição para uma mesma escala com os cinco meios filtrantes



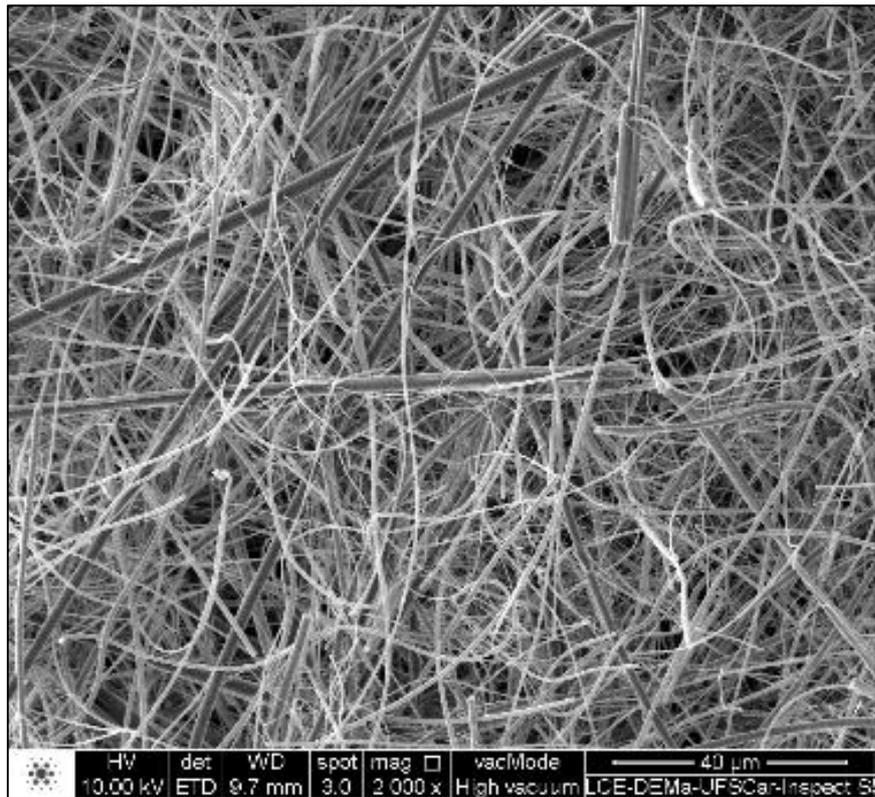
Fonte: Acervo Pessoal

#### 4.1.2. Porosidade

Na Tabela 11, encontram-se todos os valores de porosidade teórica e experimentalmente para os cinco meios filtrantes. Nota-se que os filtros de vidro e quartzo são os que possuem maior valor de porosidade teórica e experimentalmente, 0,95-0,92 e 0,94-0,92, respectivamente. De acordo com a classificação de Donovan (1985), tais meios filtrantes por terem valores de porosidade superior a 0,90, são classificados como filtros fibrosos.

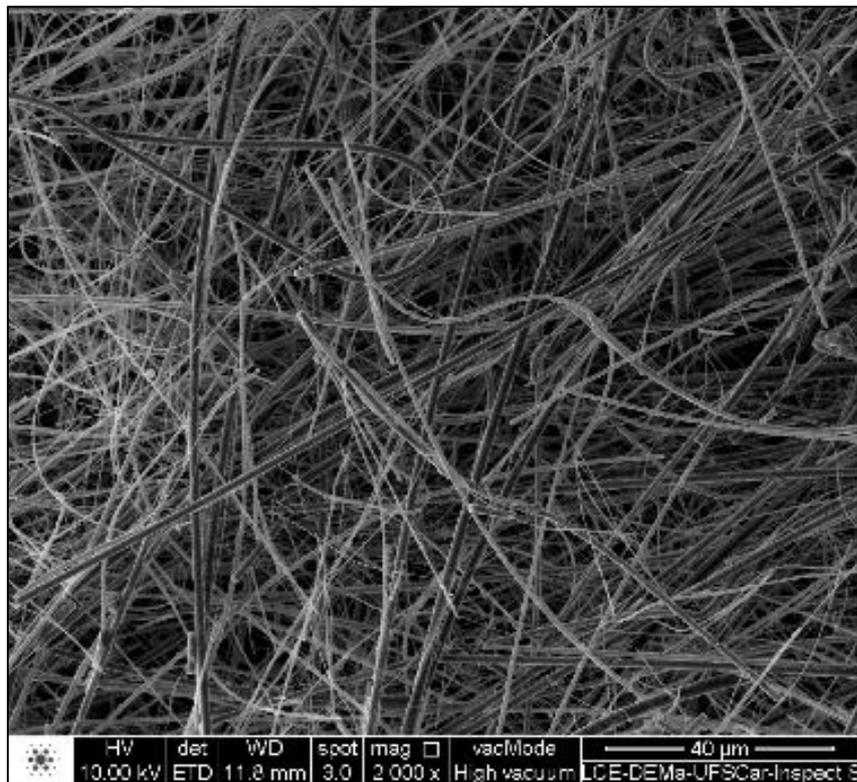
As Figura 34 e a Figura 35 confirmam a aleatoriedade do arranjo das fibras e também o pequeno diâmetro das fibras o que contribuem para uma estrutura mais porosa.

Figura 34-Fotografia obtida pelo MEV para o meio filtrante de quartzo



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 35-Fotografia obtida pelo MEV para o meio filtrante de vidro



Fonte: Acervo Pessoal

Tabela 11- Porosidade experimental e teórica para os cinco meios filtrantes

Meio Filtrante	Vidro	Quartzo	Celulose	Poliéster	Carvão Ativado
<b><math>\epsilon</math> Ergun</b>	0,93± 3,44·10 <sup>-4</sup>	0,93± 2,92·10 <sup>-4</sup>	0,66± 1,08·10 <sup>-4</sup>	0,90± 4,66·10 <sup>-4</sup>	0,89± 7,23·10 <sup>-4</sup>
<b><math>\epsilon</math> Happel</b>	0,94± 4,02·10 <sup>-4</sup>	0,93± 3,55·10 <sup>-4</sup>	0,61± 1,24·10 <sup>-3</sup>	0,91± 5,97·10 <sup>-4</sup>	0,84± 1,11·10 <sup>-4</sup>
<b><math>\epsilon</math> Kuwabara</b>	0,95± 3,38·10 <sup>-4</sup>	0,94± 2,99·10 <sup>-4</sup>	0,64± 1,24·10 <sup>-3</sup>	0,92± 5,97·10 <sup>-4</sup>	0,89± 3,44·10 <sup>-3</sup>
<b><math>\epsilon</math> Experimental</b>	0,92± 3,46·10 <sup>-2</sup>	0,92± 3,07·10 <sup>-2</sup>	0,65± 1,03·10 <sup>-2</sup>	0,84± 2,20·10 <sup>-2</sup>	0,79± 8,15·10 <sup>-3</sup>

Fonte: Acervo Pessoal

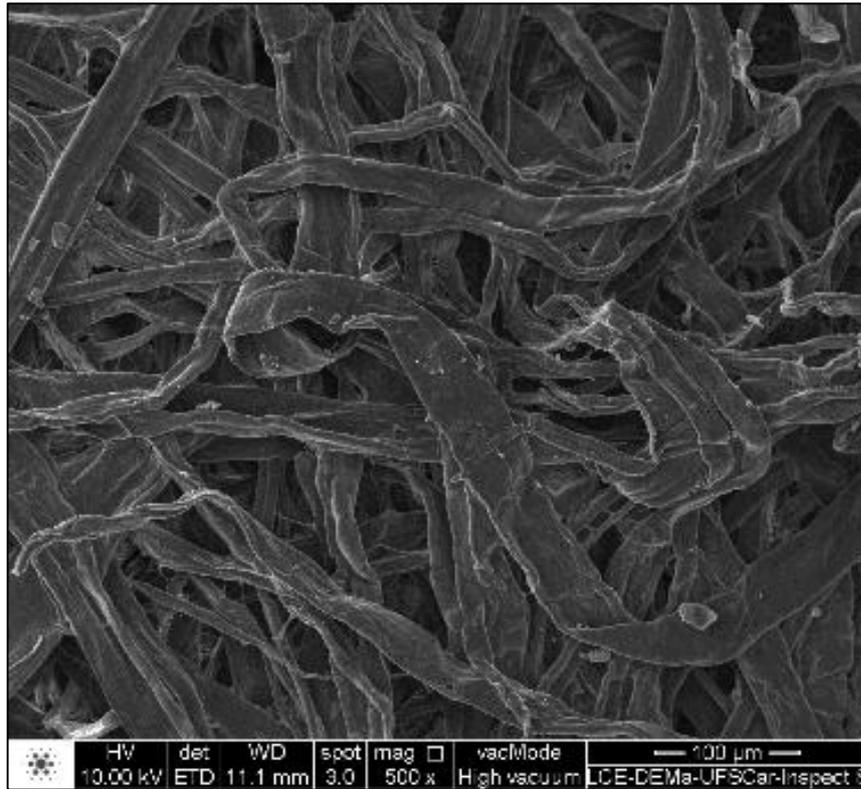
O carvão ativado, poliéster e a celulose são também filtros fibrosos, já que seus valores de porosidade estão entre 0,60 e 0,90. É interessante notar o quão próximo a porosidade do poliéster é do carvão ativado. Tal semelhança se deve ao fato do carvão ativado ser uma mistura de poliéster com carvão adicionado.

De acordo com Donovan (1985), filtros industriais possuem um processo de finalização a fim de melhorar a eficiência de coleta dos filtros. Tal acabamento pode ser químico ou mecânico. Nas Figura 36, Figura 37 e Figura 38 é possível identificar alguns pontos de acabamento nos meios filtrantes.

Todas as porosidades teóricas representadas no trabalho fazem parte da teoria clássica de filtração (*depth filtration*). Elas são estimadas usando as equações de Kuwabara, Ergun e Happel. Os valores das porosidades podem ser encontrados na Tabela 11. Os maiores valores de porosidade são de 0,94 e 0,95, sendo quartzo e vidro, respectivamente. O menor valor de porosidade foi encontrado para a celulose, sendo de 0,61-0,66. De maneira geral, os três modelos convergiram para a mesma porosidade, representando um coeficiente de variação menor de 2%.

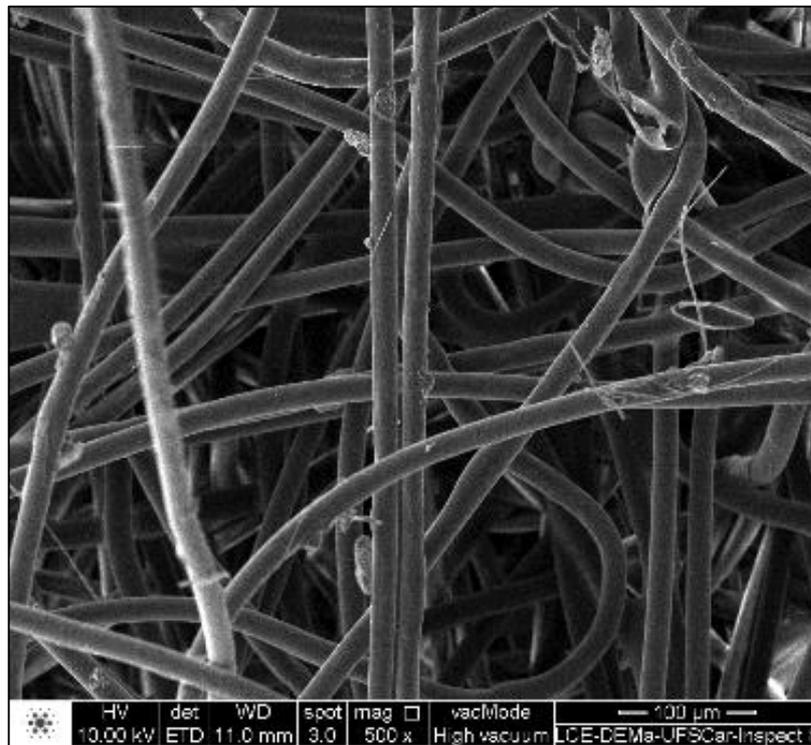
Por meio dos gráficos das Figura 39, Figura 40 e Figura 41 pode-se comparar os dados experimentais de porosidade com os modelos de Ergun, Happel e Kuwabara, respectivamente. Para os três modelos, os valores de porosidade se ajustaram bem quando comparados com os valores experimentais. Em todos os casos, o erro obtido ficou entre 5 e 15%. Considerando que para dados de engenharia, erros até 20% são plausíveis, tem-se bons resultados.

Figura 36- Fotografia tirada do MEV para o filtro celulósico



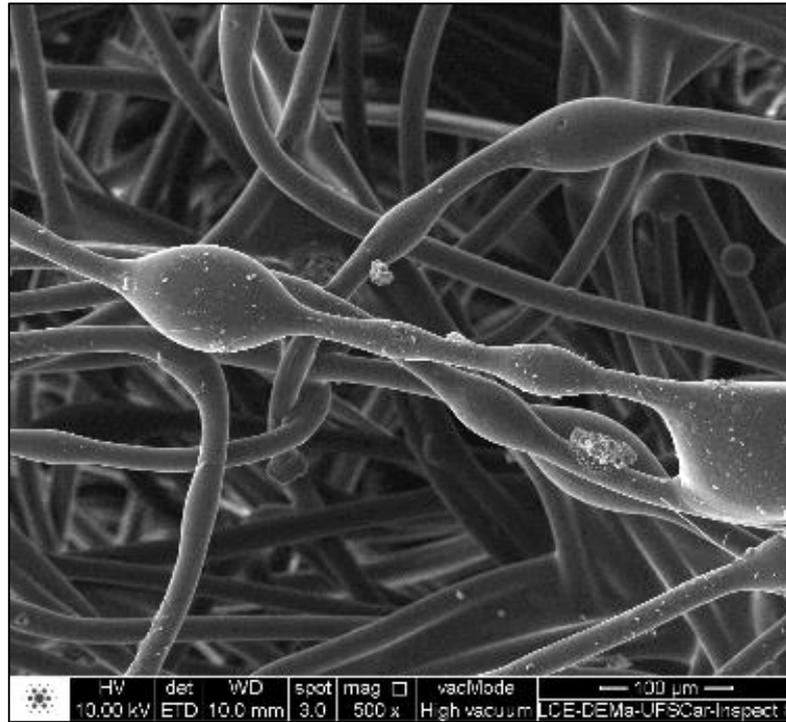
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 37- Fotografia tirada pelo MEV para o filtro de poliéster



Fonte: Acervo Pessoal

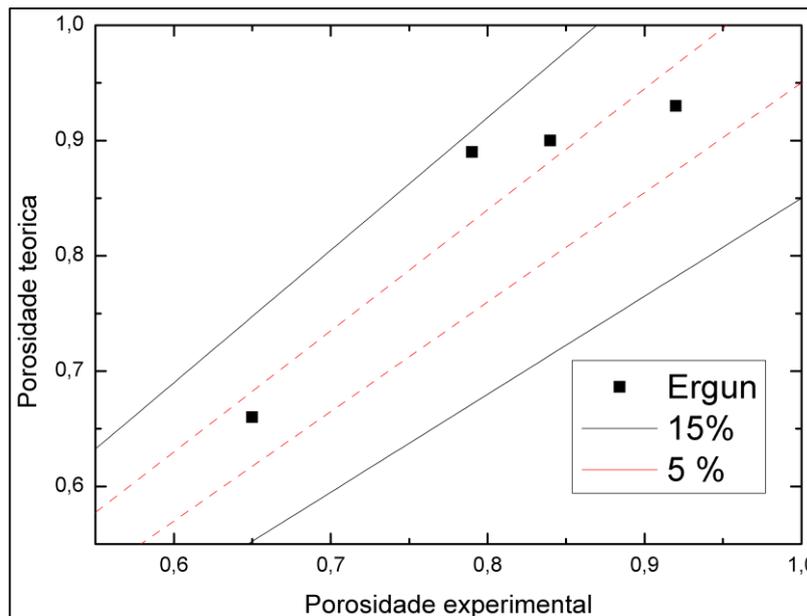
Figura 38-Fotografia tirada pelo MEV para o filtro de carvão ativado



Fonte: Acervo Pessoal

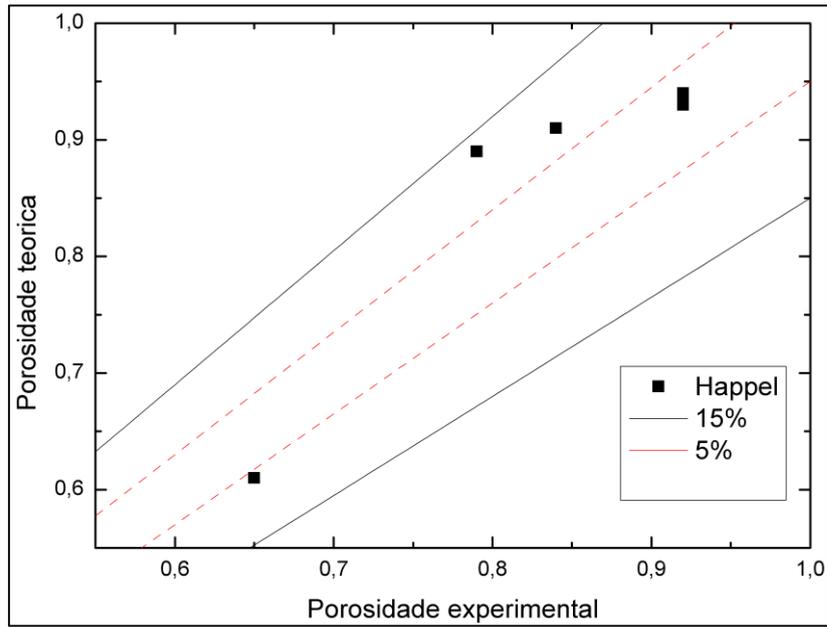
Nos anexos A e B, podem ser encontrados os resultados de porosidade experimental e teoricamente.

Figura 39-Porosidade teórica (Ergun) versus Porosidade experimental



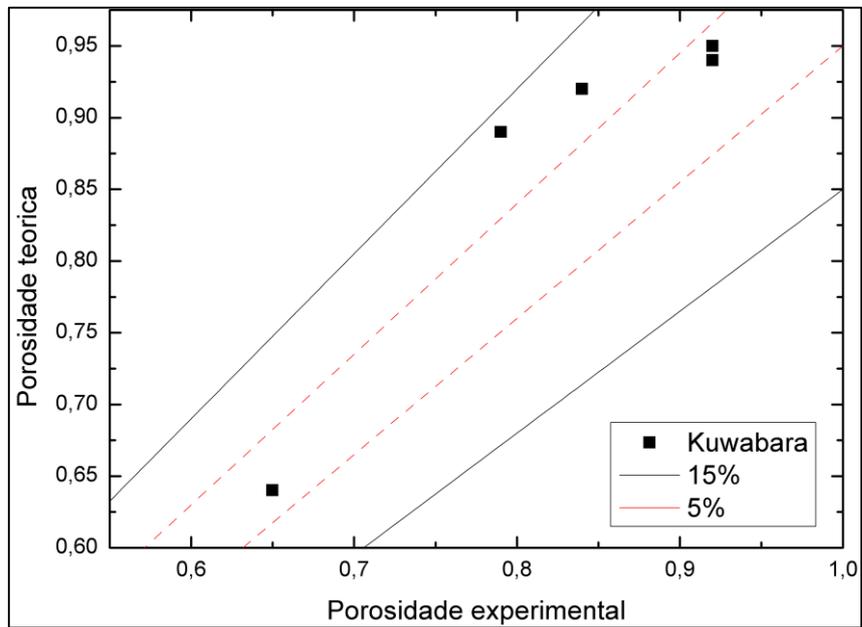
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 40-Porosidade teórica (Happel) versus Porosidade experimental



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 41-Porosidade teórica (Kuwabara) versus Porosidade experimental



Fonte: Acervo Pessoal

### 4.1.3. Espessura

Como descrito na seção 3.2.1, a espessura foi determinada por meio da média aritmética dos valores de espessura obtidos nas fotografias tiradas pelo MEV, mostradas na Figura 42, Figura 43, Figura 44 e Figura 45.

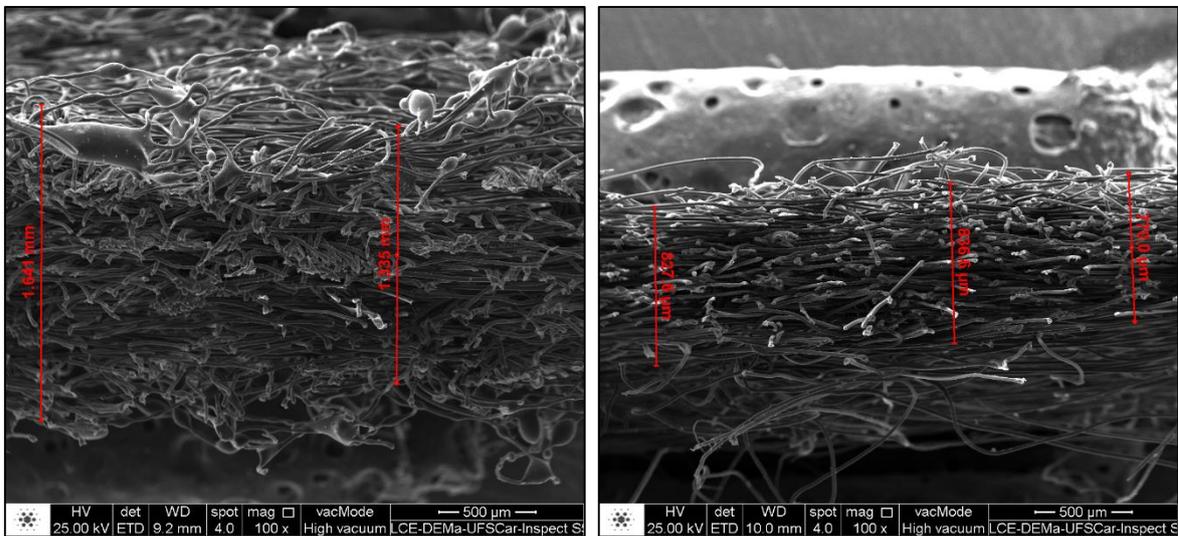
O maior valor encontrado de espessura foi para o carvão ativado (1387,7 $\mu\text{m}$ ) enquanto que o menor foi para o celulose (331,5 $\mu\text{m}$ ). Todos os valores médios de espessura encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12- Valores médios de espessura

Meio Filtrante	Vidro	Quartzo	Celulose	Poliéster	Carvão Ativado
$\bar{L}$ ( $\mu\text{m}$ )	409,9	394,2	331,5	972,6	1387,7
	$\pm 28,44$	$\pm 17,91$	$\pm 7,33$	$\pm 60,53$	$\pm 51,69$

Fonte: Acervo Pessoal

Figura 42- Fotografias tiradas pelo MEV com medidas de espessura para o a-) carvão ativado e b-) poliéster

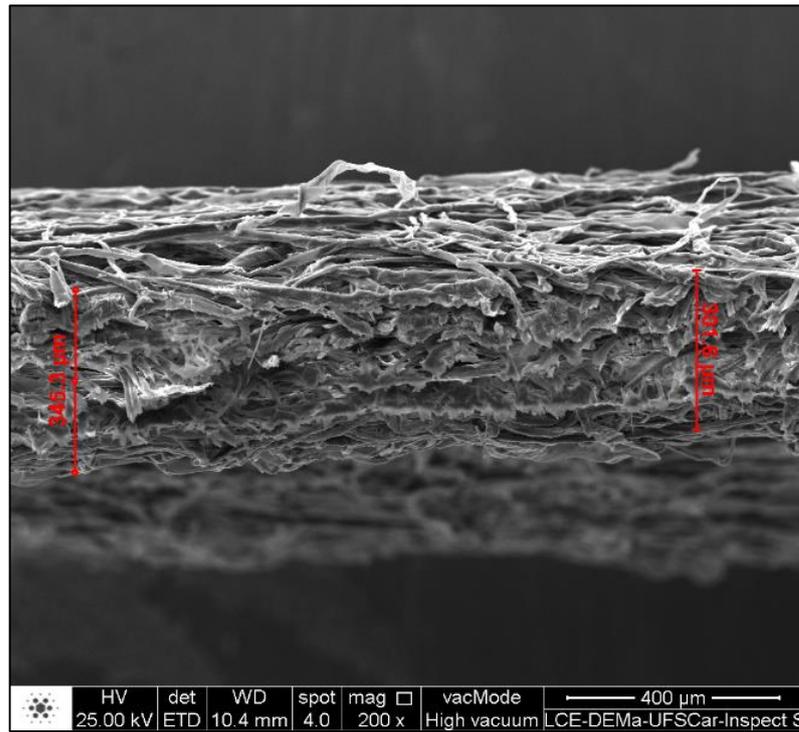


a-)

b-)

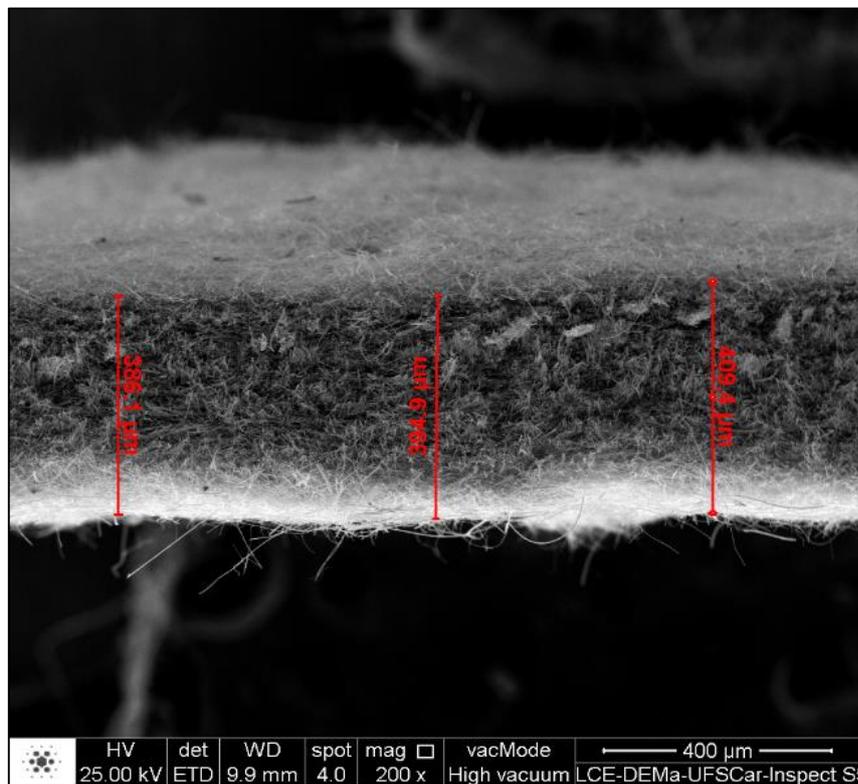
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 43- Fotografias tiradas pelo MEV com medidas de espessura para o celulose



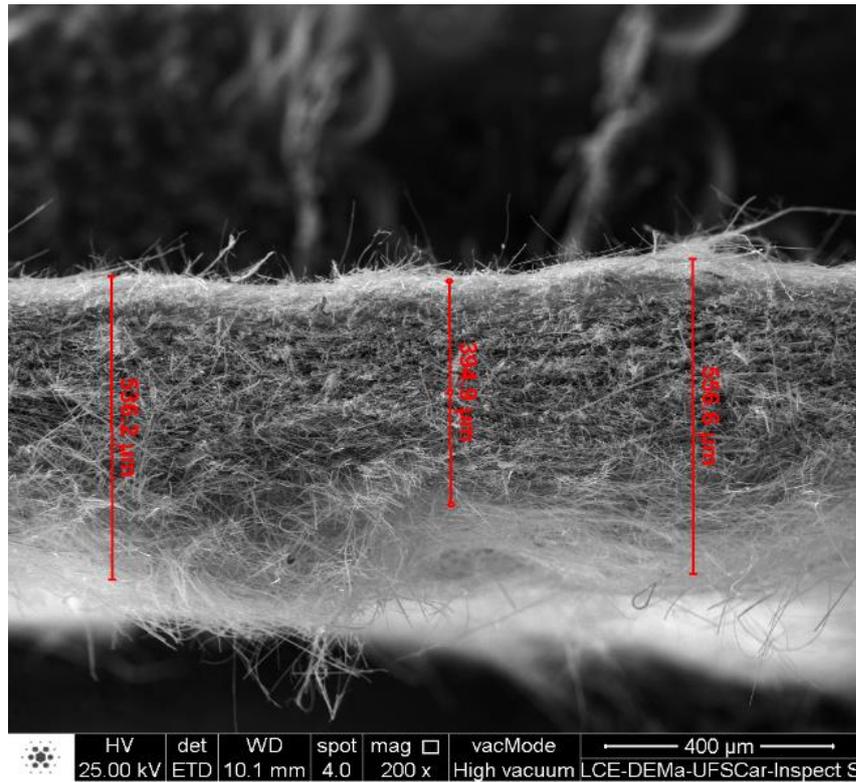
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 44-Fotografia tirada pelo MEV com medidas de espessura para o quartzo



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 45- Fotografias tiradas pelo MEV com medidas de espessura para o vidro



Fonte: Acervo Pessoal

#### 4.1.4. Permeabilidade

Na *Figura 46* e *Figura 47*, é possível notar o comportamento linear da função de perda de carga e velocidade, o que confirma o uso da Lei de Darcy. Os filtros HEPA são os que possuem maiores valores de perda de carga (70000 Pa/cm) enquanto que o carvão ativado e poliéster possuem o inverso (350 Pa/cm).

Os valores de coeficiente de permeabilidade encontram-se na *Tabela 13*. É fácil notar que a perda de carga é inversamente proporcional ao coeficiente Darcyano ( $K_1$ ). Dessa forma, o maior valor de  $K_1$  agora é para o carvão ativado ( $4,176 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$ ) enquanto que o menor valor é para o quartzo ( $9,41 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2$ ).

Tabela 13- Valores de coeficiente de permeabilidade ( $K_1$ ) para os meios filtrantes

Meio Filtrante	Vidro	Quartzo	Celulose	Poliéster	Carvão Ativado
$K_1 \text{ (cm}^2\text{)}$	$1,02 \cdot 10^{-8}$ $\pm 4,16 \cdot 10^{-10}$	$9,41 \cdot 10^{-9}$ $\pm 5,05 \cdot 10^{-10}$	$8,39 \cdot 10^{-8}$ $\pm 2,52 \cdot 10^{-9}$	$2,31 \cdot 10^{-6}$ $\pm 8,14 \cdot 10^{-8}$	$4,17 \cdot 10^{-6}$ $\pm 3,45 \cdot 10^{-7}$

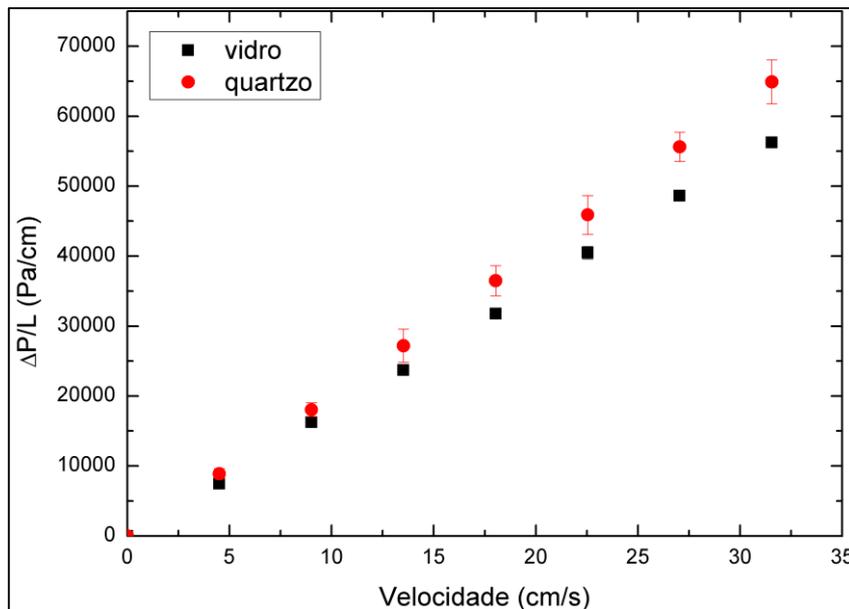
Fonte: Acervo Pessoal

Permeabilidade e porosidade não andam lado a lado, pelo contrário. Elas são características totalmente distintas uma da outra e por isso devem ser analisadas separadamente. Os meios filtrantes com alta porosidade (quartzo e vidro) mostraram pequenos valores de K1. Embora a celulose apresentou a menor porosidade (~0,66), seu K1 foi intermediário. Tanto o carvão ativado como o poliéster obtiverem alta porosidade (~0,90) e alto K1.

De acordo com Hutten (2016), o tamanho do poro se relaciona com o tamanho da partícula, a qual é capaz de penetrar dentro do meio filtrante, aumentando a eficiência de coleta. Os filtros HEPA com diâmetros mais finos faz com que tenham uma eficiência maior. Por outro lado, quando os primeiros estágios de formação de torta são atingidos, a resistência aerodinâmica do meio é tão alta que faz com que a perda de carga também aumente.

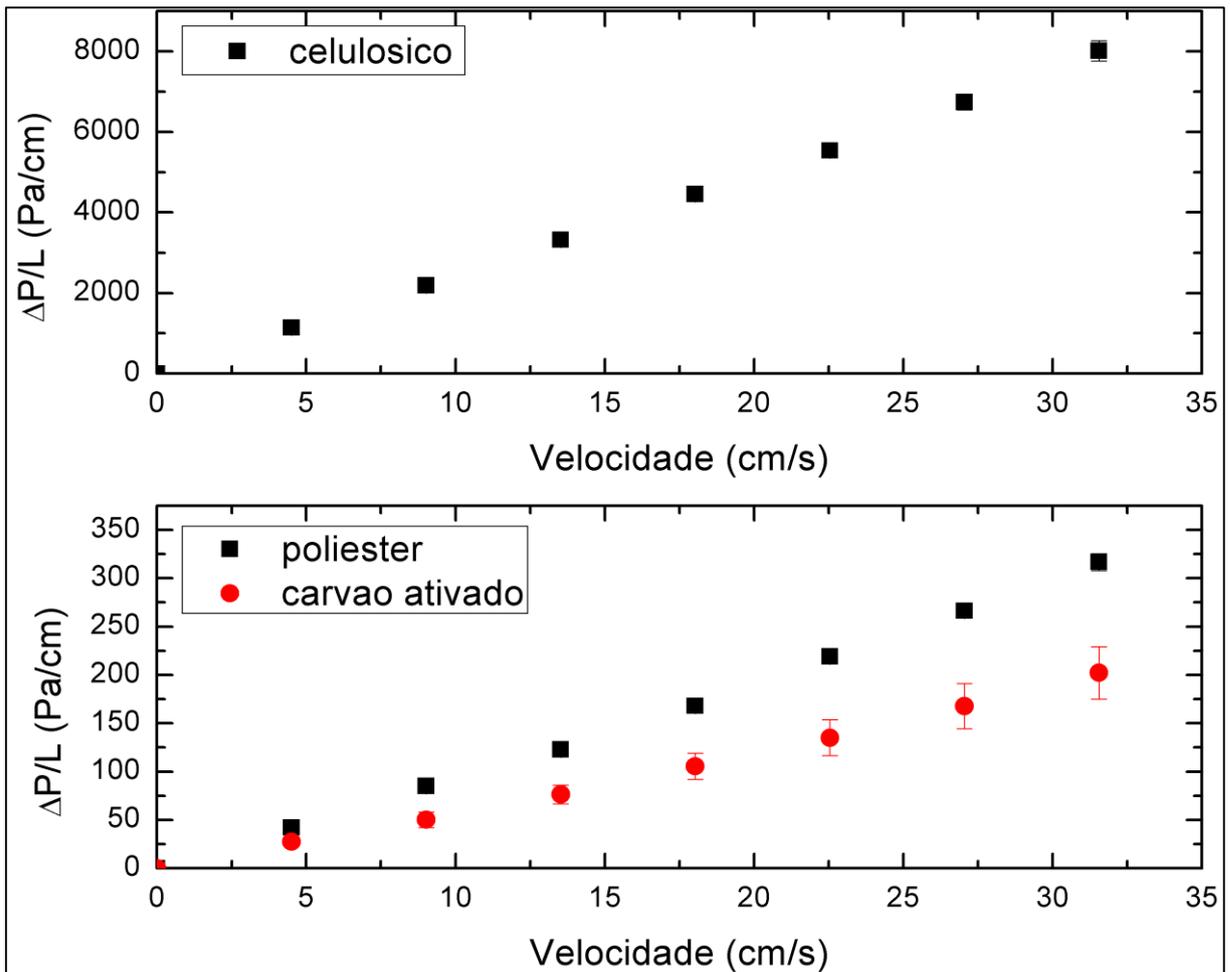
Os resultados aqui mostraram que os filtros HEPA tiveram menores valores de diâmetro médio de fibra ( $\overline{D_f}$ ) e K1. Já os filtros industriais tiveram os maiores valores de  $\overline{D_f}$  e K1. Os resultados confirmam o que a literatura previa.

Figura 46- Perda de carga e velocidade para os filtros HEPA



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 47- Perda de carga e velocidade para os filtros industriais



Fonte: Acervo Pessoal

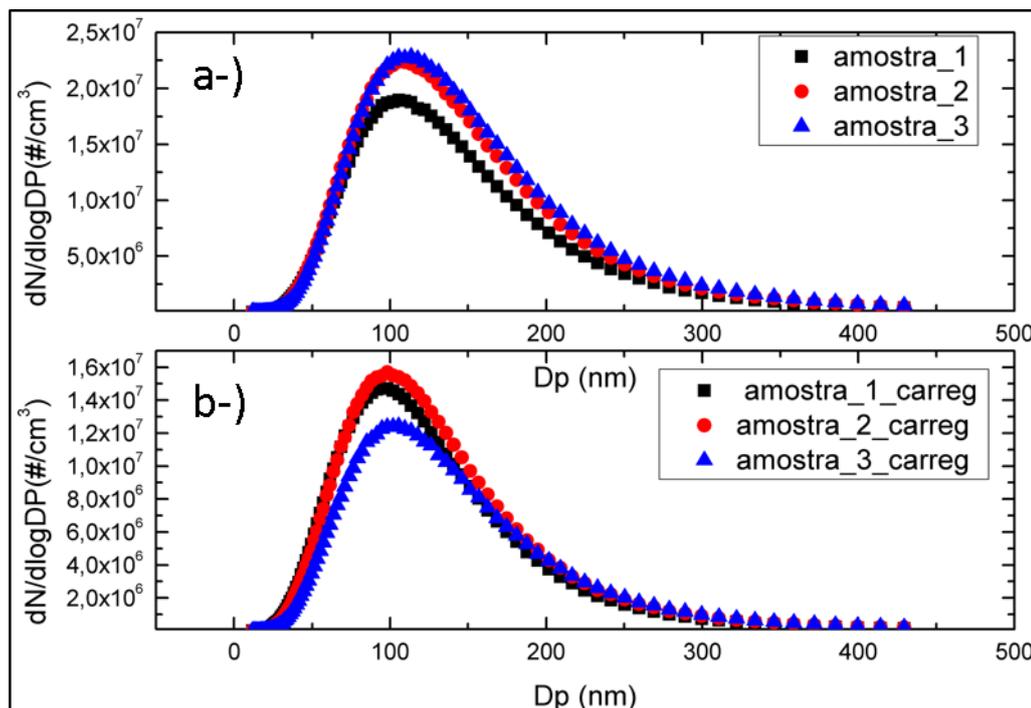
## 4.2. Eficiência de coleta

A eficiência de coleta foi realizada com base nas normas europeia (EN 779 e EN 1822) e americana (ASHRAE 52.2). Os resultados para cada uma delas serão reportados nas seções a seguir.

### 4.2.1. Norma de padronização europeia (EN 779 e EN 1822)

Conforme a norma europeia, foi utilizado a solução de DEHS 0,1% cuja distribuição granulométrica obtida durante todos os testes, antes e após o carregamento encontra-se na Figura 48.

Figura 48-Distribuição de concentração de partículas antes (a-) e após (b-) do carregamento



Fonte: Acervo Pessoal

É notável uma geração de partículas em quantidade expressivas na faixa de 300 a 400nm. Isso se deve às limitações do SMPS e gerador de partículas em analisar e produzir partículas próximo a 400nm, respectivamente. Tal fato somado a falta de informação a respeito da real concentração de DEHS que deveria ser utilizada dificultou ainda mais a obter uma maior quantidade de partículas na faixa de 400 nm.

Apesar da baixa concentração de partículas na faixa de 400nm quando comparada a faixa de 100nm, a mesma foi suficiente para realizar os cálculos de eficiência. Visto que a concentração de partículas para a faixa de 400nm foi superior a  $10^4$ , o que segundo a norma europeia é um valor válido.

Conforme descrito na seção 2.2.2, os filtros são classificados com base na Tabela 4. Logo os 13 pontos de número de partículas coletados a um diâmetro de partícula 400nm foram coletados.

Em ambas situações, para todos os pontos (de 1 a 13), o número de partículas analisado foi superior a  $10^4$ , mostrando coerência com aquilo proposto pelas normas. A Tabela 14 traz os resultados para o filtro de celulose antes do carregamento de pó enquanto a Tabela 15 após o carregamento.

A eficiência atingida pelo filtro de celulose antes do carregamento foi de 25%. Tal eficiência, segundo a EN799, denomina-se eficiência inicial. De fato, como previsto pela norma, após o uso do filtro a eficiência aumenta consideravelmente. No caso do meio filtrante celulósico, a eficiência aumentou de 25 para 37%.

Apesar da eficiência ter sido calculada com base nos preceitos na EN779, a classificação do meio filtrante segundo a Tabela 3 não pode ser feita. A classificação do filtro deve ser feita para o valor de eficiência quando se atinge a perda de carga limite. Devido às limitações do dispersor de pó em fornecer uma quantidade muito baixa de pó, não foi possível que se atingisse a perda de carga limite e consequentemente impediu que o filtro fosse classificado.

Tabela 14-Dados para cálculo de eficiência para o filtro de celulose (antes do carregamento) segundo a norma europeia

Antes do carregamento													
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>Antes</b>	1·10 <sup>5</sup>		1·10 <sup>5</sup>		1·10 <sup>5</sup>								
<b>Depois</b>	1·10 <sup>5</sup>		1·10 <sup>5</sup>										
<b>E<sub>f</sub></b>	E <sub>1</sub>		E <sub>2</sub>		E <sub>3</sub>		E <sub>4</sub>		E <sub>5</sub>		E <sub>6</sub>		
	29,05		32,25		26,25		17,17		23,69		21,76		
<b>E<sub>médio</sub>(%)</b>									25,03				
<b>Desvio (%)</b>									2,97				

Fonte: Acervo Pessoal

Tabela 15- Dados para cálculo de eficiência para o filtro de celulose (após o carregamento) segundo a norma europeia

Após o carregamento													
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>Antes</b>	4·10 <sup>5</sup>		6·10 <sup>5</sup>		6·10 <sup>5</sup>		6·10 <sup>5</sup>		2·10 <sup>5</sup>		2·10 <sup>5</sup>		2·10 <sup>5</sup>
<b>Depois</b>	3·10 <sup>5</sup>		4·10 <sup>5</sup>		4·10 <sup>5</sup>		3·10 <sup>5</sup>		2·10 <sup>5</sup>		1·10 <sup>5</sup>		
<b>E<sub>f</sub></b>	E <sub>1</sub>		E <sub>2</sub>		E <sub>3</sub>		E <sub>4</sub>		E <sub>5</sub>		E <sub>6</sub>		
	39,21		36,69		36,79		33,74		37,92		37,06		
<b>E<sub>médio</sub>(%)</b>									36,90				
<b>Desvio (%)</b>									3,66				

Fonte: Acervo Pessoal

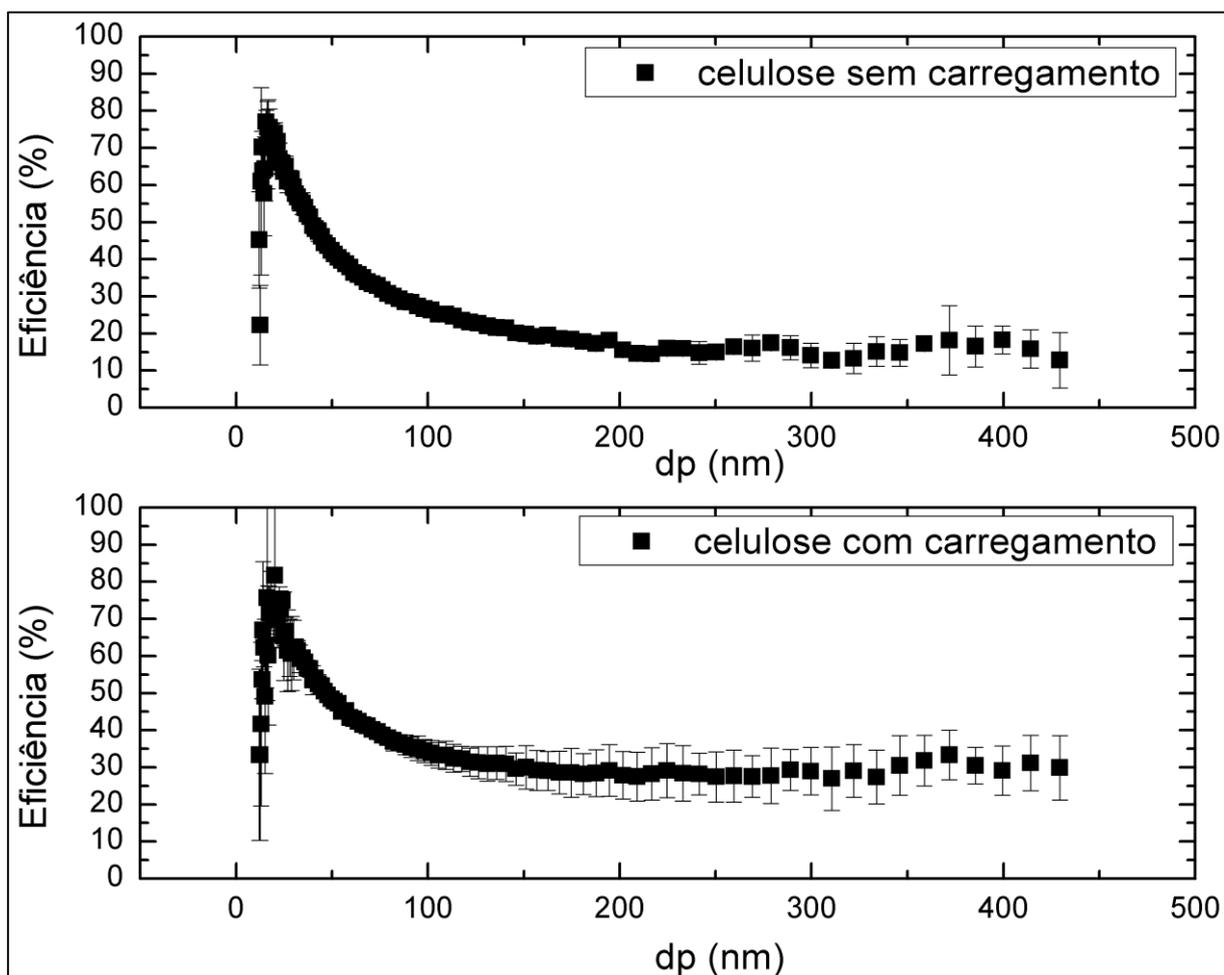
A EN779 tem como parâmetro o diâmetro de partícula para 400nm, todavia avaliar o perfil de eficiência em função do diâmetro da partícula é interessante principalmente para

entender os mecanismos de coleta referentes ao meio filtrante e o aerossol. Os gráficos antes e após o carregamento da Figura 49 trazem o perfil de eficiência para uma faixa de 50 até 500nm.

O mecanismo de coleta predominante é o difusional, isso pode ser facilmente constatado quando os gráficos da Figura 49 são comparados com a da Figura 7 de mecanismos de coleta. Isso explica o motivo de que em ambas situações, o meio filtrante mostrou-se mais eficiente para valores menores de partículas, ou seja, partículas menores que 100nm.

Além disso comparando-se os dois gráficos, o perfil de eficiência da celulose com carregamento teve uma elevação, conferindo valores maiores de eficiência do que a situação anterior ao carregamento.

Figura 49- Eficiência obtida para o filtro de celulose antes e após o carregamento de pó



Fonte: Acervo Pessoal

As mesmas observações podem ser notadas para os meios filtrantes de carvão ativado e poliéster. Os valores da Tabela 16 e Tabela 17, trazem uma eficiência para o carvão de 10 e 27%,

antes e após o carregamento, respectivamente. Semelhante ao carvão ativado, o poliéster teve sua eficiência aumentada de 13 a 29%, os quais encontram-se na Tabela 18 e Tabela 19.

Com um comportamento semelhante ao meio filtrante celulósico, os gráficos da Figura 50 e Figura 51 apontam para uma maior eficiência em valores de faixa menor que 100nm, evidenciando o mecanismo difusional.

Tabela 16-Dados para cálculo de eficiência para o filtro de carvão ativado (antes do carregamento) segundo a norma europeia

Antes do carregamento													
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>Antes</b>	$6 \cdot 10^5$		$7 \cdot 10^5$		$7 \cdot 10^5$		$7 \cdot 10^5$						
<b>Depois</b>	$6 \cdot 10^5$		$7 \cdot 10^5$										
<b>E<sub>f</sub></b>	E <sub>1</sub>		E <sub>2</sub>		E <sub>3</sub>		E <sub>4</sub>		E <sub>5</sub>		E <sub>6</sub>		
	7,76		8,75		11,36		13,77		10,34		8,44		
<b>E<sub>médio</sub>(%)</b>									10,07				
<b>Desvio (%)</b>									0,98				

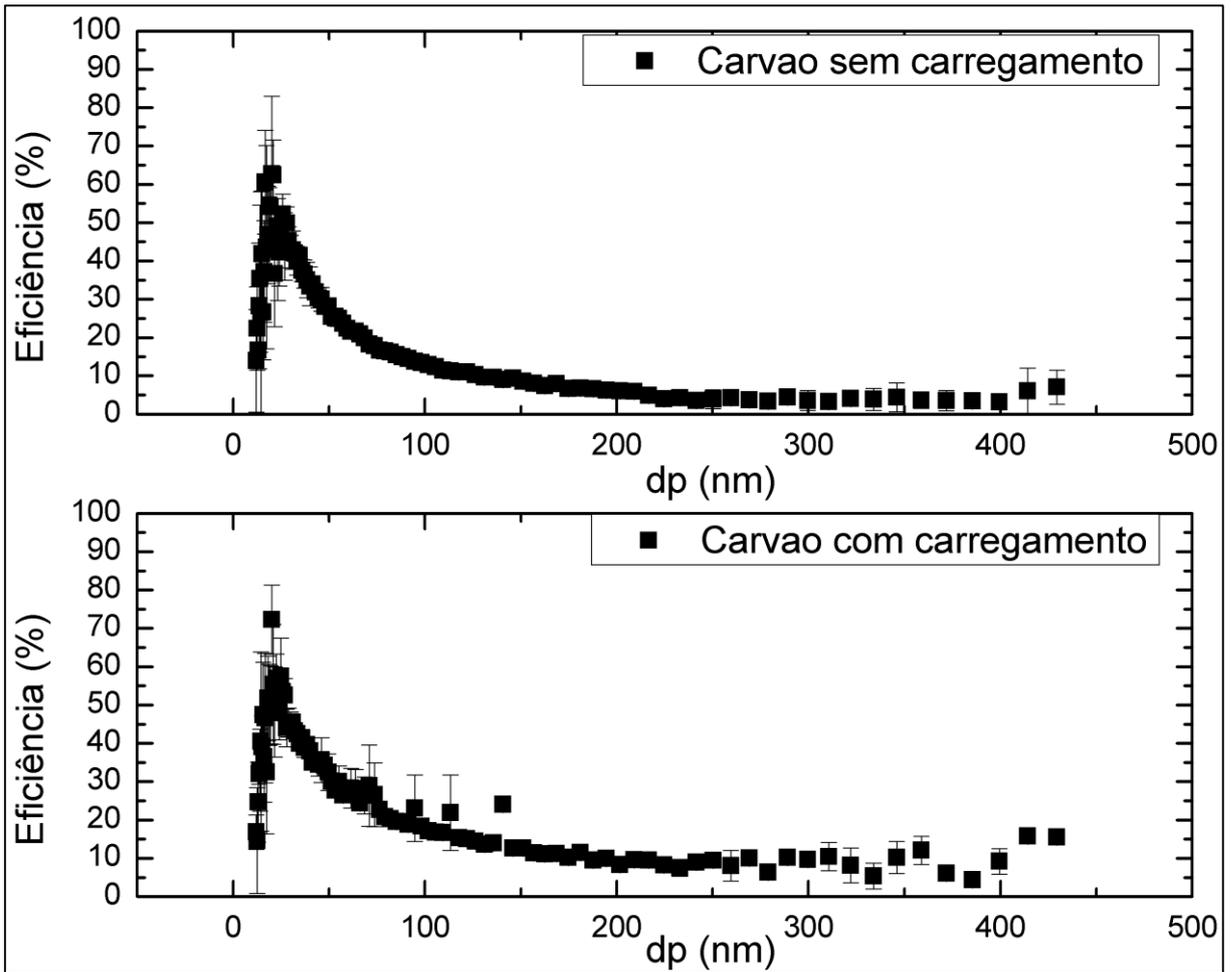
Fonte: Acervo Pessoal

Tabela 17-Dados para cálculo de eficiência para o filtro de carvão ativado (após o carregamento) segundo a norma europeia

Após o carregamento													
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>Antes</b>	$2 \cdot 10^5$		$1 \cdot 10^5$		$2 \cdot 10^5$		$3 \cdot 10^5$		$3 \cdot 10^5$		$3 \cdot 10^5$		$4 \cdot 10^5$
<b>Depois</b>	$1 \cdot 10^5$		$1 \cdot 10^5$		$1 \cdot 10^5$		$3 \cdot 10^5$		$2 \cdot 10^5$		$3 \cdot 10^5$		
<b>E<sub>f</sub></b>	E <sub>1</sub>		E <sub>2</sub>		E <sub>3</sub>		E <sub>4</sub>		E <sub>5</sub>		E <sub>6</sub>		
	47,11		5,51		53,79		14,17		23,19		21,26		
<b>E<sub>médio</sub>(%)</b>									27,51				
<b>Desvio (%)</b>									14,65				

Fonte: Acervo Pessoal

Figura 50-Eficiência obtida para o filtro de carvão ativado antes e após o carregamento de pó



Fonte: Acervo Pessoal

Tabela 18-Dados para cálculo de eficiência para o filtro de poliéster (antes do carregamento) segundo a norma europeia

Antes do carregamento													
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Antes	$1 \cdot 10^6$		$1 \cdot 10^6$		$1 \cdot 10^6$		$1 \cdot 10^6$		$1 \cdot 10^6$		$1 \cdot 10^6$		$1 \cdot 10^6$
Depois		$1 \cdot 10^6$		$1 \cdot 10^6$		$1 \cdot 10^6$		$1 \cdot 10^6$		$1 \cdot 10^6$		$1 \cdot 10^6$	
$E_f$	$E_1$		$E_2$		$E_3$		$E_4$		$E_5$		$E_6$		
	55,72		24,38		19,06		32,55		17,28		25,04		
	$E_{\text{médio}}(\%)$									12,47			
	$\text{Desvio}(\%)$									8,63			

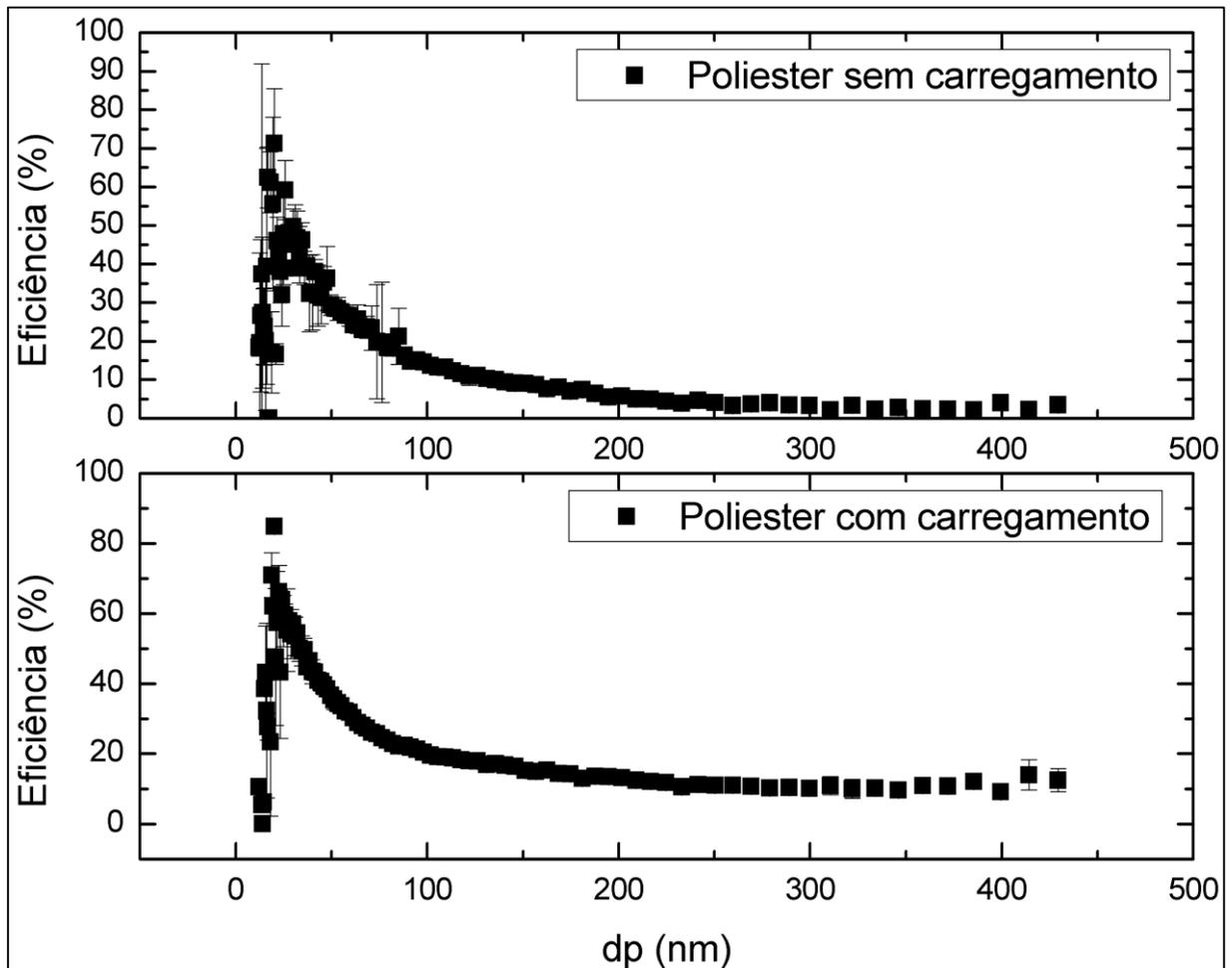
Fonte: Acervo Pessoal

Tabela 19-Dados para cálculo de eficiência para o filtro de poliéster (após o carregamento) segundo a norma europeia

Após o carregamento													
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Antes	$8 \cdot 10^5$		$9 \cdot 10^5$		$1 \cdot 10^6$		$9 \cdot 10^5$		$1 \cdot 10^6$		$9 \cdot 10^5$		$1 \cdot 10^6$
Depois	$4 \cdot 10^5$		$8 \cdot 10^5$		$8 \cdot 10^5$								
$E_f$	$E_1$		$E_2$		$E_3$		$E_4$		$E_5$		$E_6$		
	8,51		14,66		17,71		12,88		9,40		11,68		
$E_{\text{médio}}(\%)$									29,00				
$\text{Desvio}(\%)$									1,68				

Fonte: Acervo Pessoal

Figura 51-Eficiência obtida para o filtro de poliéster antes e após o carregamento de pó



Fonte: Acervo Pessoal

Diferentemente dos filtros industriais, os resultados de eficiência para os filtros HEPA quartzo e vidro seguem a norma EN1822, ou seja, a norma europeia para filtros absolutos.

Conforme descrito na seção 2.2.4, a análise da eficiência é feita com base no MPPS (Tamanho de partícula de menor penetração).

Antes de iniciar os cálculos para a determinação da eficiência, segundo a norma EN1822 deve se encontrar o MPPS, tamanho de partícula de menor eficiência. A análise deve conter no mínimo sete pontos de tamanho de partícula a serem analisados, sendo eles uma progressão logarítmica. No caso do trabalho, foram encontrados dois MPPS, um deles para uma faixa micro (sugerida pela norma) e para uma faixa nano.

Os resultados de MPPS para o vidro na faixa micro são 50-400nm e também na faixa nano são 30-120nm, como mostrado nas partes a-) e c-) da Figura 52, respectivamente. Já para o quartzo, a faixa micro de 50-400nm e a faixa nano 40-110nm nas partes a-) e c-) da Figura 53, respectivamente.

Para a EN1822, que tem como base o MPPS na faixa micro, o tamanho de menor eficiência foi próximo a 130 e 330 nm, para o vidro e quartzo, respectivamente.

A análise também feita na faixa de nano é interessante porque evidencia mais um ponto de diâmetro onde ocorre a maior penetração (menor eficiência). No caso do vidro e do quartzo, esse valor é de 37 e 92nm, respectivamente.

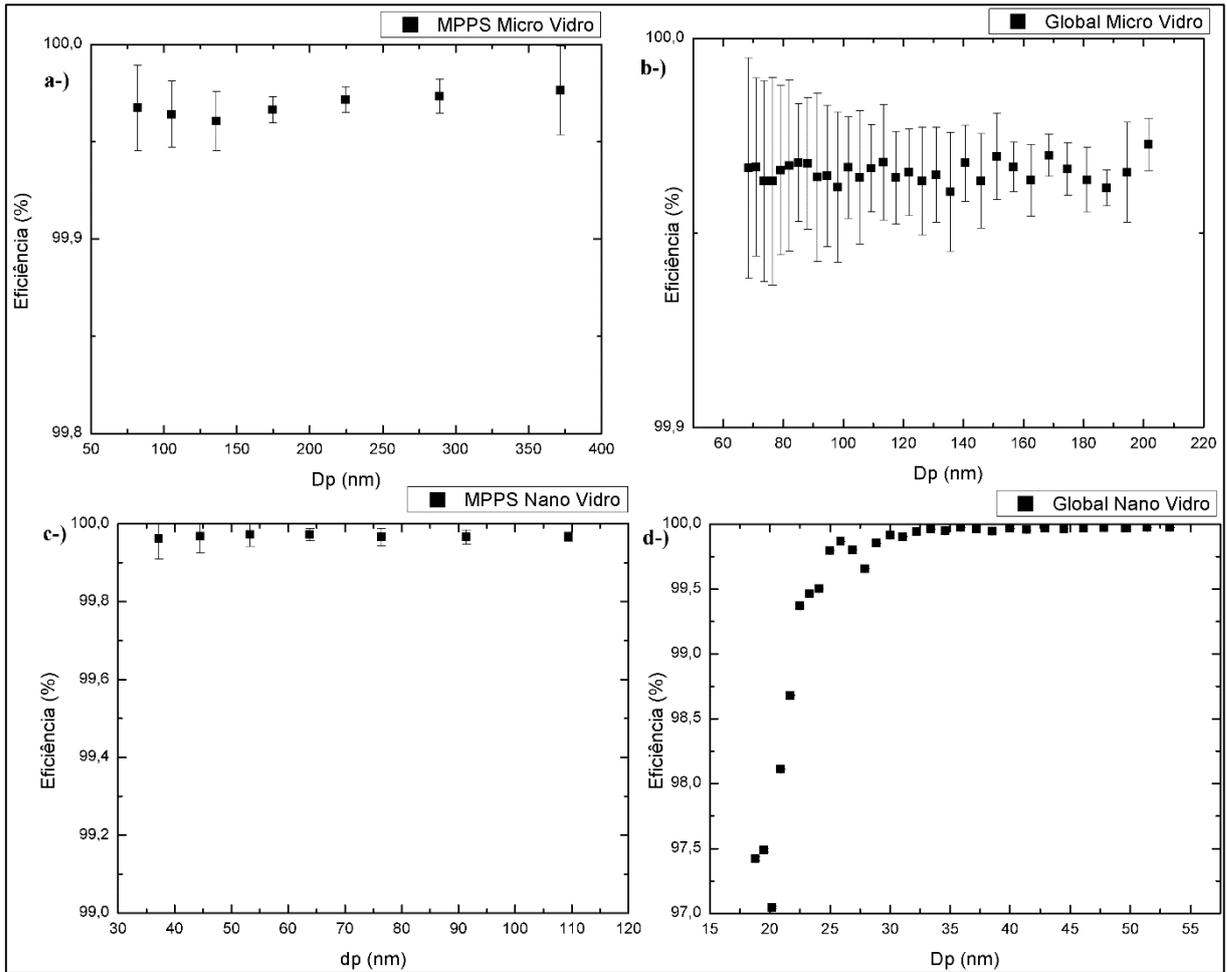
Após encontrado o MPPS, os gráficos de eficiência considerando a faixa de diâmetro de partícula em um intervalo mais próximo ao MPPS é construída. Em outras palavras a nova faixa de diâmetro de partículas deverá conter partículas de no mínimo  $MPPS/2$  até 1,5 vezes o valor do MPPS, como mostrado nas partes b-) e d-) da Figura 52 para o vidro e nas partes b-) e d-) da Figura 53 para o quartzo.

Os resultados encontram-se nos gráficos nas partes b-) e d-) da Figura 52 e Figura 53. Para o meio filtrante de quartzo, a eficiência de coleta global na faixa de micro e nano, foram iguais a 99,979% e 99,986%, respectivamente. Para ambos os valores, o filtro segundo a Tabela 6, foi classificado como H13.

Apesar de se notar uma sutil diferença para o quartzo entre os valores de eficiência de coleta calculados na faixa nano e micro, o mesmo não ocorre para o filtro de vidro. Os resultados de eficiência global encontrados para micro e nano foram 99,966% e 99,524%, respectivamente. Tais valores permitiram classificar, segundo a Tabela 2, o mesmo filtro para micro e nano como H13 e E12, respectivamente. Em outras palavras, para tamanhos de diâmetros menores (faixa nano) o filtro de vidro teria uma classificação inferior ao previsto pela norma.

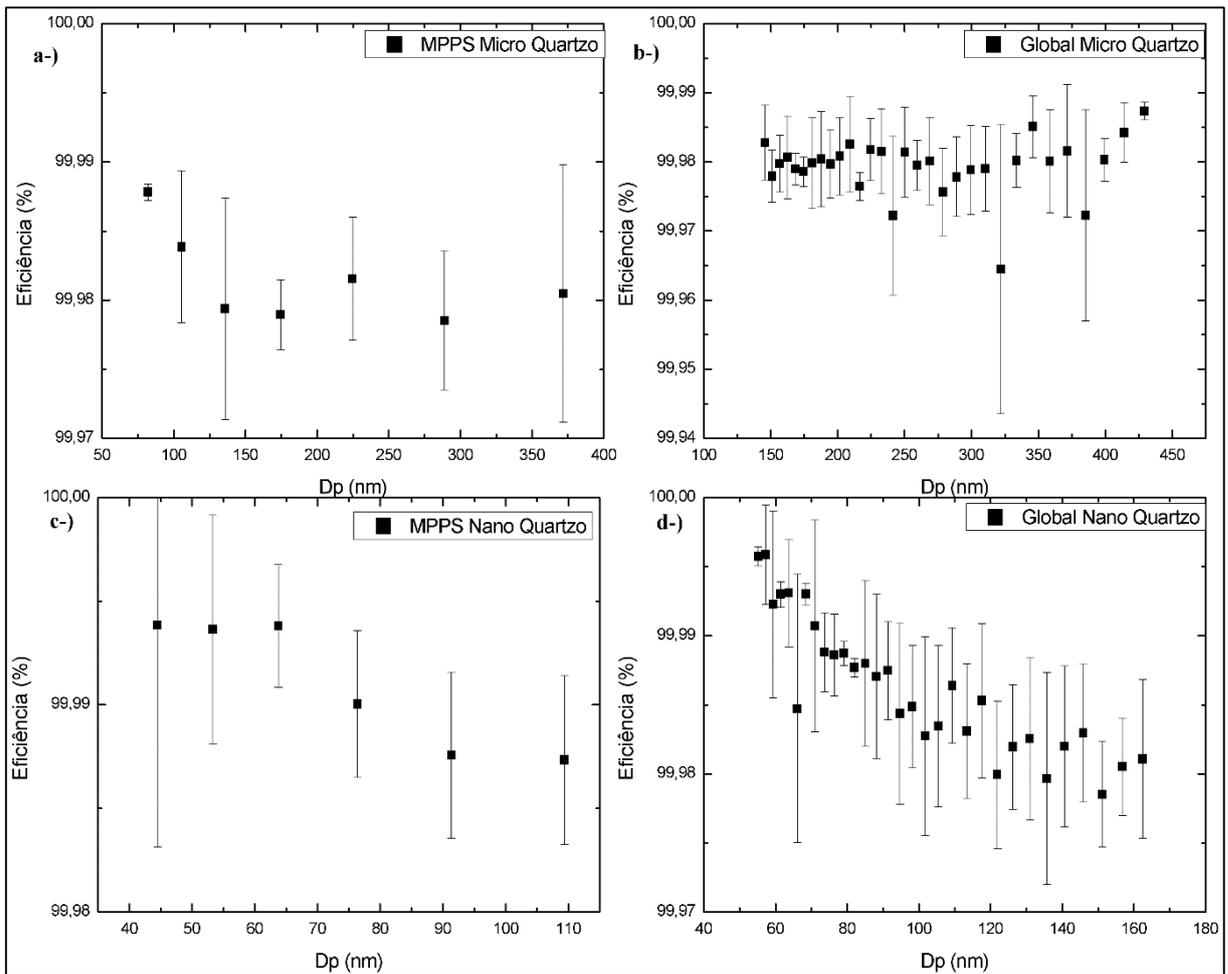
Vale ressaltar que apesar da diferença em algarismos significativos nas escalas dos gráficos dos filtros de vidro e quartzo, os resultados de eficiência de coleta possuíam para ambos o mesmo numero significativo. A diferença no gráfico é devido ao melhor ajuste utilizando o softare Origin.

Figura 52- Gráficos de eficiência do filtro HEPA de vidro



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 53- Gráficos de eficiência para o filtro HEPA de quartzo

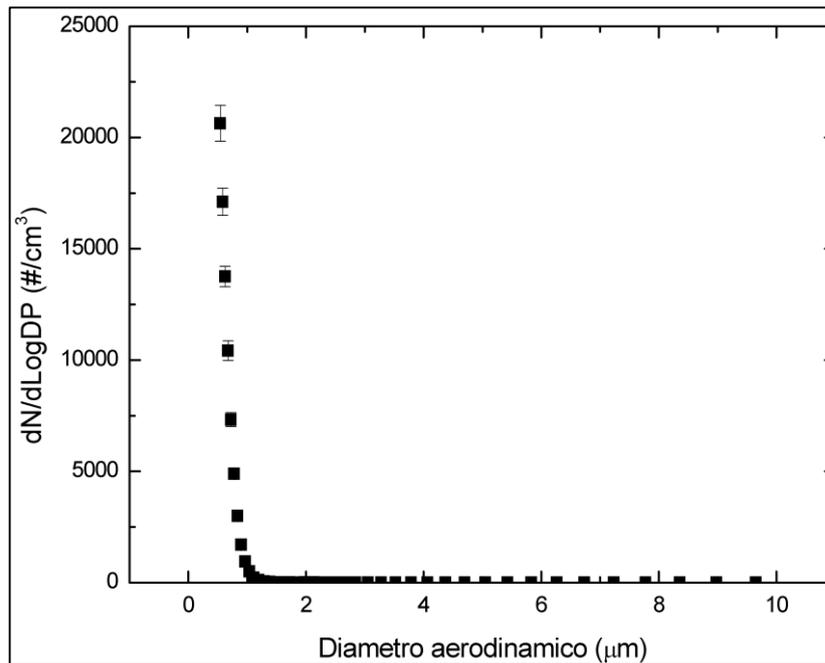


Fonte: Acervo Pessoal

#### 4.2.2. Norma de padronização americana (ASHRAE 52.2)

Conforme descrito na seção 3.5.2, os testes realizados segundo a norma ASHRAE 52.2 utilizaram o APS como contador de partículas. Tal escolha é justificada pelo fato do mesmo tolerar análise de partículas maiores (até  $50\mu\text{m}$ ). Em contra partida, o mesmo equipamento é limitado pela quantidade de partículas que passa pelo equipamento. Logo, como ilustrado na Figura 54, o número de partículas analisado é muito inferior quando comparado a geração de partículas da norma europeia.

Figura 54-Distribuição granulométrica para as medições de eficiência segundo a ASHRAE 52.2



Fonte: Acervo Pessoal

Os resultados para os filtros grossos (carvão ativado, poliéster e celulose) encontram-se na Tabela 20, Tabela 21 e Tabela 22, respectivamente. Nelas, encontram-se os resultados de eficiência em tréplica para os três intervalos de tamanho de partícula ( $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$ ).

É interessante notar que nitidamente os valores de eficiência para o mesmo filtro em três diferentes faixas de tamanho de partícula são muito diferentes. Enquanto  $E_1$  se mantém inferior a 60%, os valores de  $E_3$  são superiores a 90%.

Os três meios filtrantes possuem eficiência  $E_3$  superior a 90%. Todavia, quando se trata de faixas menores de tamanho de partícula ( $E_1$ ) os valores são bem distintos. O filtro de celulose se mostrou o menos eficiente com  $E_1$  igual a 35% enquanto o carvão ativado teve o maior valor igual a 59%.

Tabela 20-Classificação de eficiência segundo a ASHRAE 52.2 para o carvão ativado

	E <sub>1</sub> (0.3-1.0μ)	E <sub>2</sub> (1.0-3.0 μ)	E <sub>3</sub> (3.0_10.0 μ)
Amostra 1	0,7069	0,7985	0,9471
Amostra 2	0,5351	0,6328	0,9467
Amostra 3	0,5310	0,5841	0,8393
Média	59,14%	67,18%	91,12%
Desvio	1,915%	9,177%	5,082%
<b>Classificação:</b>	<b>MERV 11</b>		

Fonte: Acervo Pessoal

Tabela 21-Classificação de eficiência segundo a ASHRAE 52.2 para o poliéster

	E <sub>1</sub> (0.3-1.0μ)	E <sub>2</sub> (1.0-3.0 μ)	E <sub>3</sub> (3.0_10.0 μ)
Amostra 1	0,6227	0,7078	0,9439
Amostra 2	0,4529	0,5475	0,8770
Amostra 3	-	0,6063	0,8906
Média	53,78%	62,05%	90,38%
Desvio	6,443%	7,298%	2,889%
<b>Classificação:</b>	<b>MERV 10</b>		

Fonte: Acervo Pessoal

Tabela 22-Classificação de eficiência segundo a ASHRAE 52.2 para o celulósico

	E <sub>1</sub> (0.3-1.0μ)	E <sub>2</sub> (1.0-3.0 μ)	E <sub>3</sub> (3.0_10.0 μ)
Amostra 1	0,3357	0,8668	0,9993
Amostra 2	0,3621	0,8525	0,9999
Amostra 3	0,2259	0,7434	1,0000
Média	30,79%	82,09%	99,97%
Desvio	1,320%	0,014%	0,032%
<b>Classificação:</b>	<b>MERV 12</b>		

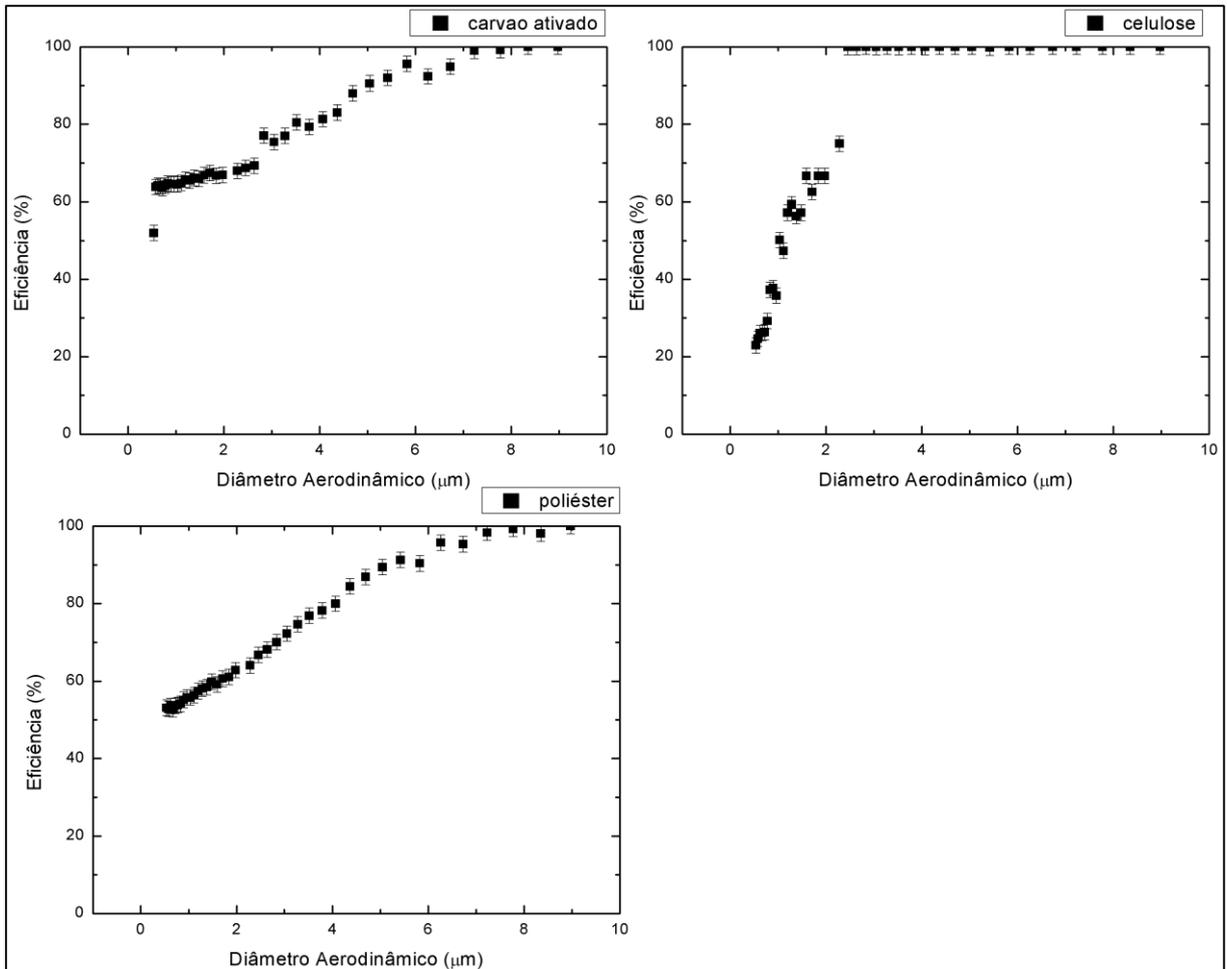
Fonte: Acervo Pessoal

No caso da norma ASHRAE 52.2, é possível realizar uma classificação do filtro segundo a Tabela 2. O filtro celulose obteve o maior MERV (12). O segundo MERV foi o carvão ativado o qual foi classificado como MERV (11) e em terceiro como MERV (10), o poliéster. Apesar do carvão ativado ter tido a E<sub>1</sub> inferior ao poliéster, sua E<sub>2</sub> foi maior, conferindo-lhe uma classificação melhor.

Os gráficos da Figura 55 permitem enxergar o comportamento do filtro de tamanhos de partículas variando desde 0,1 a 10μm. Os três meios filtrantes tiveram comportamentos semelhantes, ou seja, obtiveram valores maiores de eficiência para maiores tamanhos de

partículas. Se atentando as curvas dos gráficos, pode-se notar que os meios filtrantes de poliéster e carvão ativado se assemelham mais. Já o meio filtrante de celulose tem maiores valores de eficiência para valores maiores de tamanho de partícula.

Figura 55- Gráficos de eficiência segundo a ASHRAE 52.2 para os filtros grossos

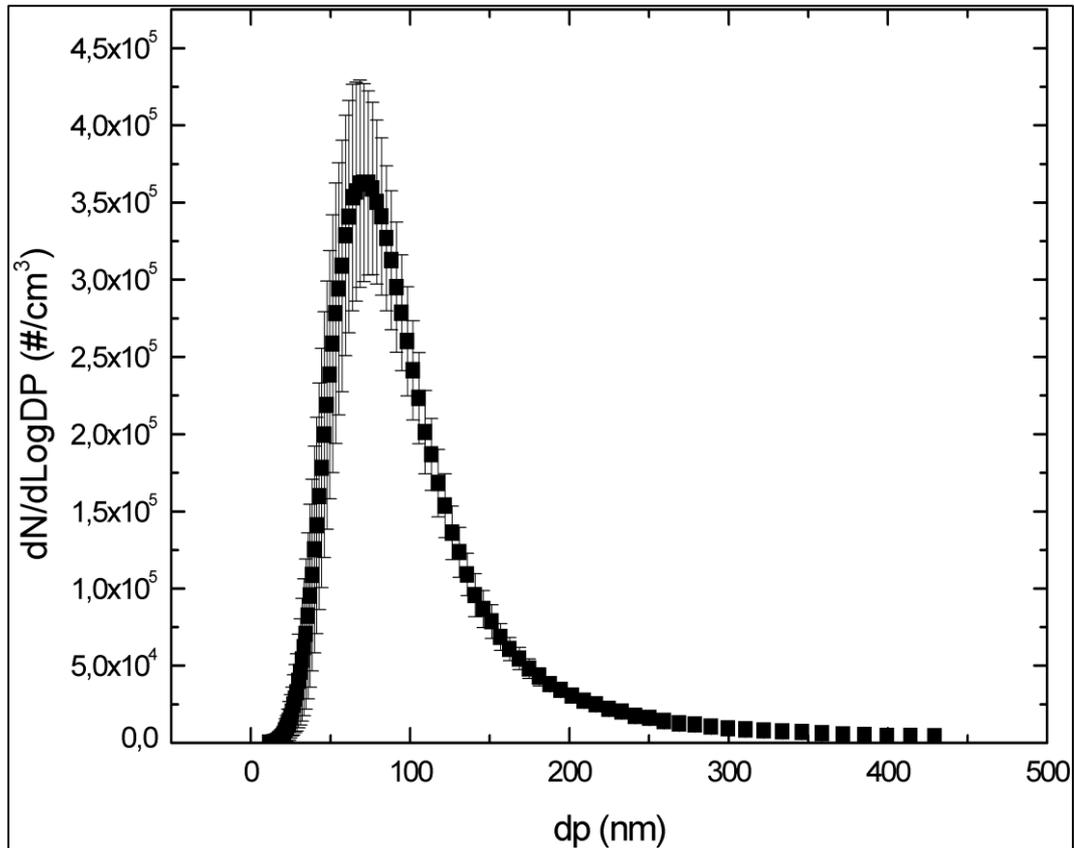


Fonte: Acervo Pessoal

Como mencionando anteriormente, os perfis de eficiência em função de diâmetro de partícula para os filtros grossos segundo a norma europeia tinham comportamento descendente, prevalecendo o mecanismo difusional. Isso não ocorre quando analisado segundo a norma americana. Os gráficos da Figura 55 mostram o comportamento ascendente, ou seja a eficiência aumenta com o aumento do tamanho de partícula. Quando comparado com o gráfico da Figura 7 fica evidente que os mecanismos que aqui prevalecem são: impactação direta ou inercial.

Os meios filtrantes HEPA, vidro e quartzo, também foram analisados segundo a norma americana ASHRAE 52.2. O aerossol aqui utilizado foi o DOP e o perfil de distribuição de tamanho de partícula é encontrado na Figura 56.

Figura 56- Distribuição granulométrica do DOP usado para a ASHRAE 52.2 em filtros HEPA



Fonte: Acervo Pessoal

Os resultados de eficiência segundo a ASHRAE 52.2 são analisados para o tamanho de partícula de  $0,3\mu\text{m}$  ou  $300\text{nm}$ . A Tabela 23 traz os resultados para os meios filtrantes de vidro e quartzo. Como era esperado, os resultados de eficiência são bem altos, próximos de 1, sendo para o quartzo (99,997%) e para o vidro (99,960%). De posse desses valores foi possível, por meio da Tabela 2, classificar os filtros de vidro e quartzo como sendo MERV 18 e MERV 16, respectivamente.

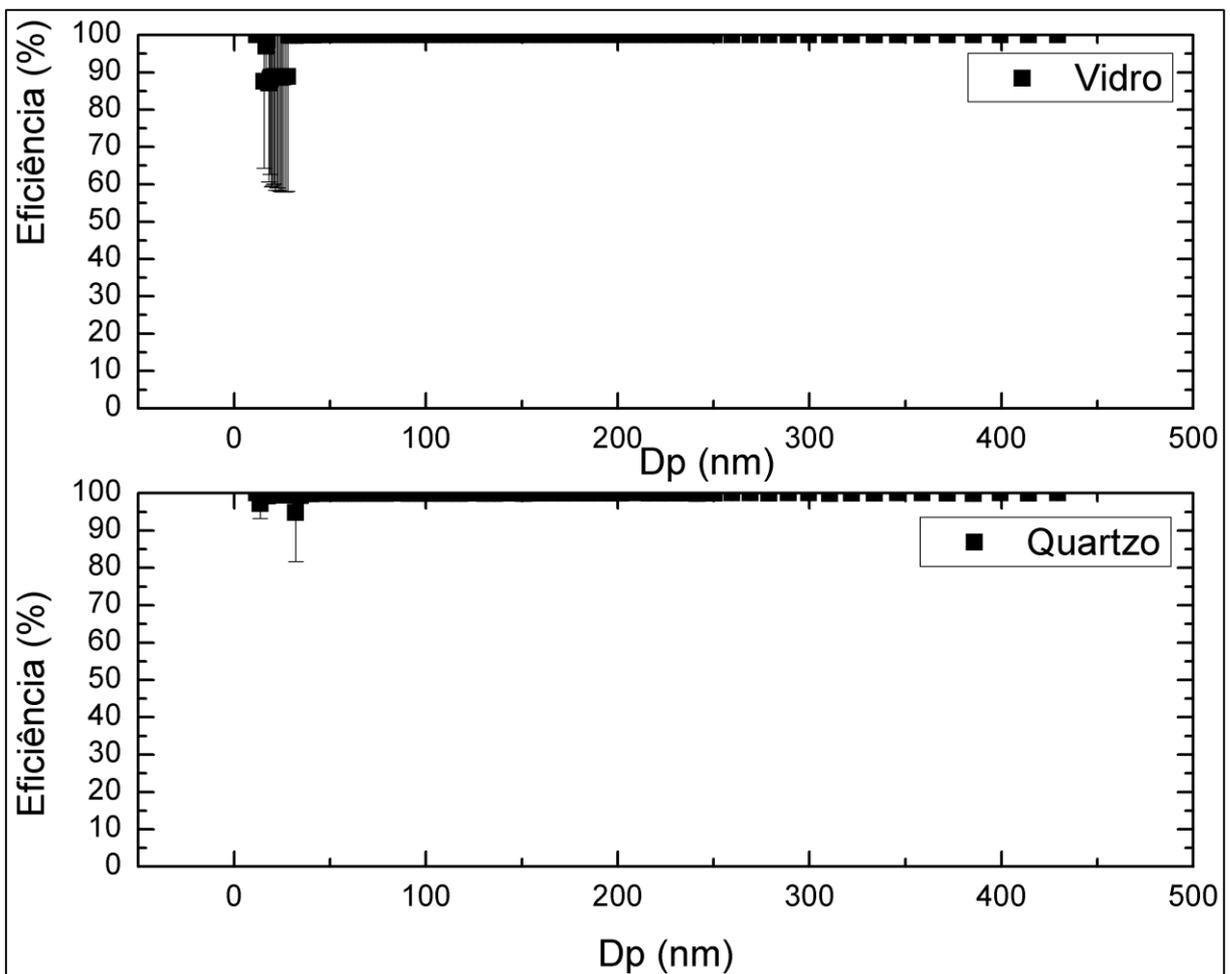
Tabela 23-Eficiência segundo ASHRAE 52.2 para filtros HEPA

	$E_1$ (%)	Desvio (%)
Quartzo	99,997%	0,01%
Vidro	99,960%	0,06%

Fonte: Acervo Pessoal

Uma visão mais ampla de eficiência é encontrada na *Figura 57*, onde encontram-se os perfis de eficiência em função do tamanho de partícula. A partir dos gráficos, nota-se que os filtros HEPA possuem valores de eficiência próximo de 1 para todo o intervalo de partícula analisado.

Figura 57-Gráficos de eficiência segundo a ASHRAE 52.2 para os filtros Hepa



Fonte: Acervo Pessoal

#### 4.2.3. Comparação entre as normas

De posse dos resultados, a Tabela 24 mostra os valores de eficiência média obtidos para os cinco meios filtrantes segundo ambas normas. Para o carvão ativado, foram encontrados 5 valores completamente distintos de eficiência média, ou seja, dependendo o aerossol e tamanho de partícula obtém-se uma eficiência diferente. O mesmo procede para o poliéster e o meio filtrante de celulose.

Tabela 24-Comparação entre resultados de eficiência segundo as normas

	Meios filtrantes	Carvão	Poliéster	Celulose	Vidro	Quartzo
Eficiência média (%)	EN779 antes carregamento	10,07	12,47	25,03	-	-
	EN779 após carregamento	27,51	29,03	36,90	-	-
	EN1822 (micro)				99,966	99,979
	EN1822 (nano)				99,524	99,986
	ASHRAE 52.2 E <sub>1</sub> (0.3-1.0) µm	59,14	53,78	30,79	-	-
	ASHRAE 52.2 E <sub>2</sub> (1.0-3.0) µm	67,18	62,05	82,09	-	-
	ASHRAE 52.2 E <sub>3</sub> (3.0-10.0) µm	91,12	90,38	99,97	-	-
	ASHRAE 52.2 E (0.3) µm	-	-	-	99,960	99,997

Fonte: Acervo Pessoal

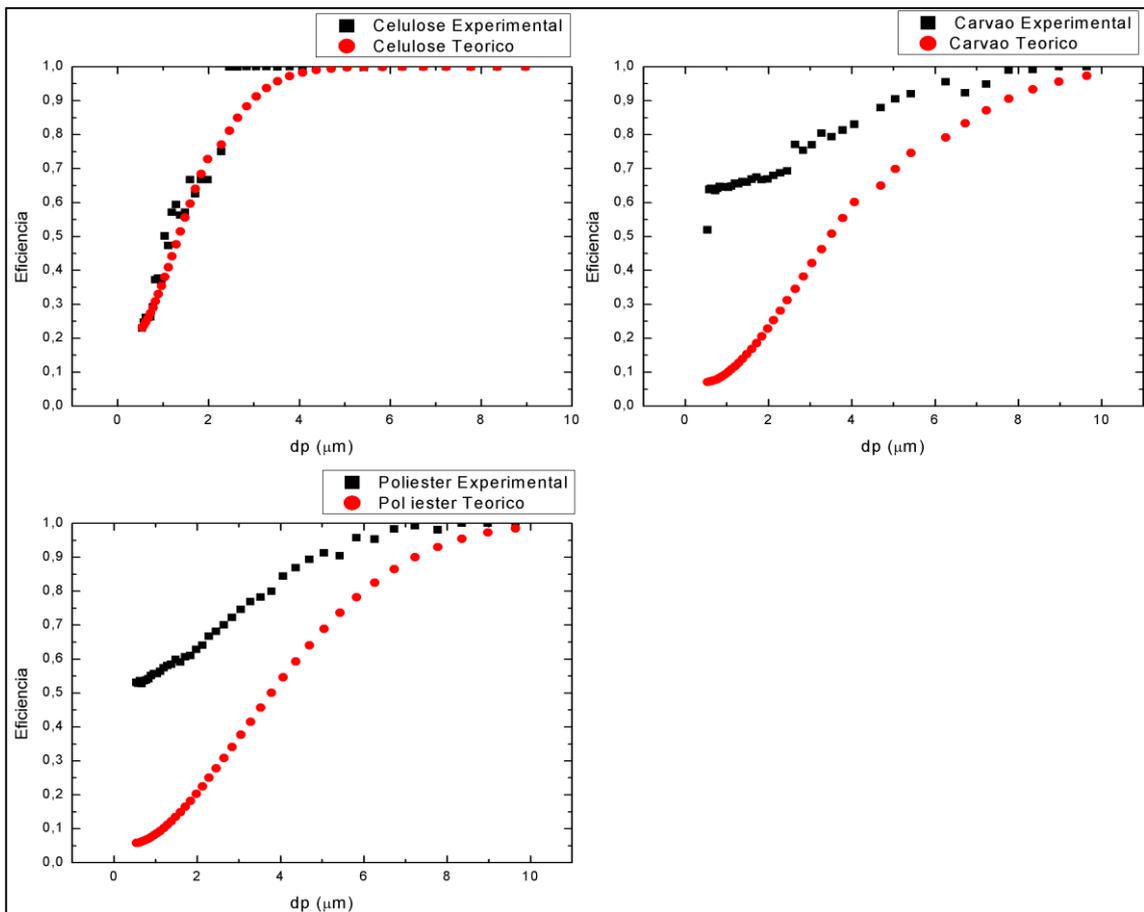
A norma europeia EN779 por tratar os dados de eficiência para apenas diâmetro de 0,4µm obtém como resultados de eficiência valores mais baixos. A falta de informação com relação a eficiência para diâmetros maiores faz com que se opte, a fim de atingir maiores valores de eficiência, por usar filtros mais caros ou até mesmo inadequado à situação de uso, podendo até reduzir o tempo de vida do mesmo.

Já a norma americana ASHRAE 52.2 com eficiência para três intervalos de tamanhos de partículas, traz uma maior segurança com relação ao comportamento de eficiência do meio filtrante.

Ambas as normas avaliam como tamanho de partículas mínimo por volta de 0,4 µm. Tal escolha parece ser coerente para apenas os filtros grossos visto que para esse tamanho o que predomina é o mecanismo de coleta difusional. Em outras palavras, o filtro terá uma eficiência maior para partículas de tamanho inferior a 0,4 µm. Todavia, para filtros absolutos com aplicações específicas como filtração de nano partículas, a avaliação da eficiência para partículas menores pode ser interessante, visto que o filtro de vidro na escala nano obteve uma classificação inferior (E12) quando analisado na escala micro (H13).

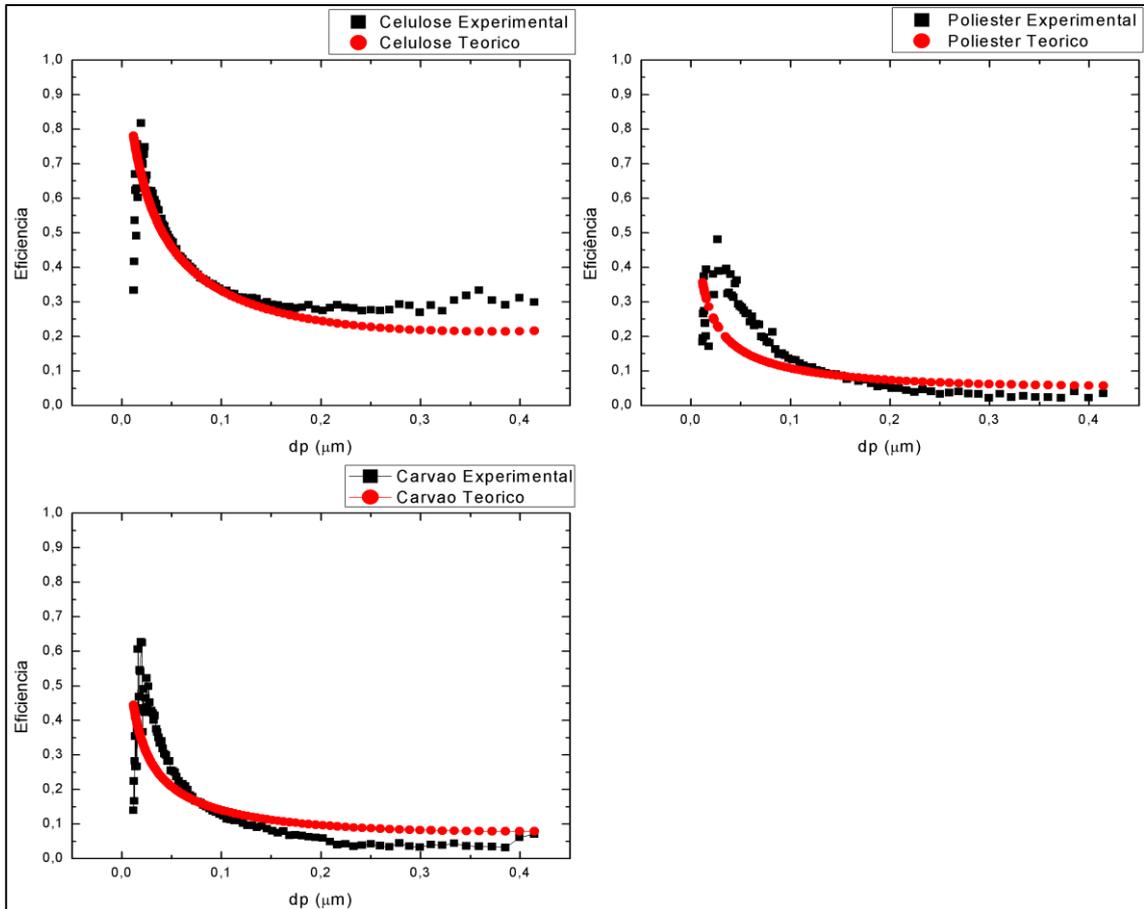
Os gráficos da Figura 58 e Figura 59 trazem um comparativo de eficiência experimental e teórico para as normas americana e europeia, respectivamente. Nota-se que a norma europeia possui valores mais aproximados entre os valores teóricos e experimentais, isso se deve ao fato de que as equações dos modelos teóricos se aplicam melhor a tamanhos de partículas menores.

Figura 58- Comparação eficiência experimental e teórica para os meios filtrantes grossos segundo a norma americana



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 59-Comparação eficiência experimental e teórica para os meios filtrantes grossos segundo a norma europeia



Fonte: Acervo Pessoal

Segundo a EN779, o filtro cuja eficiência inicial é maior é o filtro de celulose (25,03%). Em segundo e terceiro lugar tem se o poliéster (12,47%) e o carvão ativado (10,07%), respectivamente. Para a norma ASHRAE 52., o filtro de celulose (MERV 12) também é o filtro mais eficiente. Porém, o segundo mais eficiente é o carvão ativado (MERV 11) e em terceiro o poliéster (MERV 10).

A etapa de caracterização dos meios filtrantes ajuda a entender o motivo pelo qual isso ocorre. Os meios filtrantes possuem tamanhos de diâmetros de fibras próximos porém com coeficiente de variação diferentes. Em outras palavras, o filtro celulose (21,04μm) é o filtro cujo valor de diâmetro de fibra é o mais próximo ao do poliéster (19,55μm) porém o grau de variação do celulose (0,50) é maior que o poliéster (0,15), representando a heterogeneidade do filtro. Dessa forma, a maior quantidade de fibras heterogêneas faz com que o filtro de celulose seja o mais eficiente dentre eles. Os filtros de poliéster e carvão ativado, por sua vez, se

equilibram com relação ao quesito diâmetro de fibras e coeficiente de variação. O poliéster possui menor diâmetro mas também menor heterogeneidade e o oposto ocorre com o carvão ativado, conferindo a ambos valores próximos de eficiência de coleta.

Em trabalhos na literatura pode-se encontrar alguns resultados de eficiência de coleta para os meios filtrantes. Dentre eles, a dissertação de mestrado de (BORTOLASSI,2015) cujos valores de eficiência experimental e teórico para o poliéster são de aproximadamente 17% para um diâmetro de 0,4 $\mu$ m, usando como aerossol o NaCl. Tal valor se aproxima do valor encontrado para a norma EN779 (12,47%).

O trabalho de (TANABE,2011) compara a eficiência dos meios filtrantes de celulose e poliéster, também constatando que o filtro de celulose é mais eficiente. A faixa de tamanho de partícula analisada é de (~2 a 20 $\mu$ m), sendo semelhante a utilizada pela norma ASHRAE 52.2. Os valores mínimos de eficiência para o celulose e o poliéster são 87% e 70%, respectivamente. Tais valores são superiores aos encontrados segundo a ASHRAE 52.2 para o celulose (82,09%) e poliéster (62,05%). Tal sutil diferença pode ser explicada através das caracterizações dos meios filtrantes. Apesar do material do meio filtrante (celulose e poliéster) ser o mesmo, as porosidades e espessuras do trabalho de (TANABE,2011) são diferentes das obtidas no trabalho aqui apresentado, evidenciando que não fazem parte de um mesmo meio filtrante.

O meio filtrante de carvão ativado por ser um filtro mais específico (manta de poliéster agulhada impregnada com carvão ativado) não foi possível encontrar valores de eficiência na literatura. Entretanto, foi possível obter o laudo técnico do meio filtrante, o qual por sua vez classificava o mesmo como sendo um filtro F8 segundo a ABNT NBR 16101 ou EN779. Buscando os valores de eficiência para um filtro F8 na Tabela 5, nota-se que ele deveria ter uma eficiência mínima de 55%, o que difere do valor obtido no trabalho presente segundo a EN779 (10,07%). A eficiência mínima de 55% se aproxima do valor encontrado de E1(59,14%) para a ASHRAE 52.2, o qual foi obtido para uma faixa de tamanho de partícula de (0,3 a 1.0 $\mu$ ) e não para 0,4 $\mu$ , como previsto pela EN779.

Quando comparados os filtros absolutos, segundo a norma europeia ambos foram classificados como H13. Todavia, fazendo uma análise na faixa manométrica, nota-se uma inferioridade de eficiência para o filtro de vidro. Já a norma ASHRAE 52.2, deixa claro que o filtro mais eficiente é o quartzo. Outro ponto interessante, é com relação a precisão dos resultados de eficiência obtidos. No trabalho presente, o contador de partículas oferecia uma precisão de até três casa decimais após a vírgula, a mesma precisão utilizada pela norma

ASHRAE 52.2, como pode ser constatado na Tabela 2. Entretanto, a EN1822, por meio da Tabela 6, traz diferentes valores de precisão, ou seja, quanto maior a eficiência do filtro maior a precisão do equipamento utilizado.

## 5. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados encontrados, foi possível considerar os seguintes pontos:

### *Caracterização dos meios filtrantes*

- Os filtros industriais (carvão ativado, poliéster e celulose) obtiveram os maiores valores de diâmetro de fibra enquanto que o filtros HEPA tiveram diâmetros de ordem de vinte vezes menor.
- Apesar do diâmetro de partícula menor, os filtros HEPA foram os que tiveram o maior coeficiente de variabilidade de tamanhos de fibras, o que lhes conferem uma maior heterogeneidade.
- Os modelos teóricos de porosidade quando comparados aos valores experimentais se mostraram bem semelhantes, tendo uma variabilidade menor que 2%.
- Os filtros HEPA (vidro e quartzo) foram os que tiveram valores de porosidade mais alto, acima de 0,90.
- A espessura do meio filtrante de carvão ativado foi a maior, enquanto que a do celulose a menor.
- O coeficiente de permeabilidade (K1) foi maior para o carvão ativado e os menores valores de K1 foram para os filtros HEPA.

### *Eficiência obtida pelas normas*

- Para ambas as normas, o filtro grosso mais eficiente é o celulósico.
- A norma europeia EN779 por tratar os dados de eficiência para apenas diâmetro de 0,4 $\mu$ m obtém como resultados de eficiência valores mais baixos. A falta de informação com relação a eficiência para diâmetros maiores faz com que se opte por usar filtros mais caros ou até mesmo inadequado a situação de uso, podendo até reduzir o tempo de vida do mesmo.
- A norma americana trouxe como valores de eficiência (E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> e E<sub>3</sub>), ou seja três eficiências para três faixas de diâmetros de partículas. Cada filtro industrial, obteve valores de E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> e E<sub>3</sub> completamente diferentes.

- Logo, a avaliação da ASHRAE 52.2 para três faixas de tamanho de partícula traz uma maior segurança com relação ao comportamento de performance do meio filtrante.

- Ambas as normas avaliam como tamanho de partículas mínimo por volta de 0,4  $\mu\text{m}$  para filtros grossos. Tal escolha parece ser coerente visto que para esse tamanho o que predomina é o mecanismo de coleta difusional. Em outras palavras, o filtro terá uma eficiência maior para partículas de tamanho inferior a 0,4  $\mu\text{m}$ . Todavia, para aplicações específicas como filtração de nano partículas por filtros absolutos, a avaliação da eficiência para partículas (faixa nanométrica) menores é interessante.

- Os filtros absolutos (Vidro e quartzo) tanto para a norma americana como para a norma europeia tiveram valores de eficiência bem próximos de 1. Porém, apenas a norma americana conseguiu deixar claro que o filtro de quartzo era mais eficiente. Os valores de casa de precisão para a norma ASHRAE 52.2 são constantes, independentemente da classificação do filtro, o mesmo não ocorre para a norma europeia EN1822.

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

Sugere-se como trabalhos futuros:

- Montar uma linha de filtração com capacidade mais semelhante à norma europeia, com capacidade de carregar alta quantidade de pó no filtro afim de poder classificar os filtros.
- Repetir os teste da norma americana com um contador de partículas cujos limites de capacidade permitam a análise de um número maior de partículas.
- Testar diferentes meios filtrantes comparando as normas.
- Testar outros aerossóis e pós comparando com ambas normas.

## 7. REFERÊNCIAS

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **RE N°176:Determina a publicação de Orientação Técnica elaborada por Grupo Técnico Assessor, sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior, em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo.** Brasília, 2000.13p.

AGUIAR, M L; COURY J R. Cake Formation in Fabric Filtration of Gases. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, São Carlos, v.35, n.10, p. 3673-3679, 1996.

AMARAL, D C. **Estudo da geração de nanopartículas a partir da atomização de soluções de cloreto de sódio.** 2010. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)- Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2010.

EUA. American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers (ASHRAE). **Handbook- Heating, ventilating and Air conditioning systems.** Atlanta, 2008. 853p.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 16101: Filtros para partículas em suspensão no ar – Determinação da eficiência de filtros grossos, finos e médios.** Rio de Janeiro, 2012. 61 p.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR ISO 29463-1: Filtros e meios filtrantes de alta eficiência para a remoção de partículas no ar Parte 1: Classificação, ensaio de desempenho e identificação.** Rio de Janeiro, 2013. 16 p.

AZIMI, P.; ZHAO, D; STEPHENS, B. Estimates of HVAC filtration efficiency for fine and ultrafine particles of outdoor origin. **Atmospheric Environment**, Chicago, v.98, p.337–346, 2014.

BARROS, P.M. **Avaliação do desempenho de meios filtrantes fibrosos na remoção de partículas nanométricas.** 2014. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)- Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2014.

BORTOLASSI, A.C. **Filtrantes fibrosos na remoção de nanopartículas.** p.123. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) 2015. 123 f.- Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2015.

BORTOLASSI, A C C; GUERRA, V. G; AGUIAR, M L. Characterization and evaluate the efficiency of different filter media in removing nanoparticles. **Separation and Purification Technology**, São Carlos, v.175, p.79-86, 2017.

CAMFIL. **Catálogo de Produtos.** Disponível em: <[http://www.camfil.com.br/FileArchive/Brochures/Camfil information/CAMFIL-CATALOGO- 2014.pdf](http://www.camfil.com.br/FileArchive/Brochures/Camfil%20information/CAMFIL-CATALOGO-2014.pdf)>.

CATALOGO. **Filtro Metálico.** Disponível em: <<http://www.tropicalrio.com.br/catalogos/dif-filtro.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2016.

CAMARA DOS DEPUTADOS. Legislação Informatizada - Dados da Norma. **Disponível em:** < <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2018/lei-13589-4-janeiro-2018-786057-norma-pl.html>>. **Acesso em: jan.2018**

COPENHAGEN CONSENSUS. **Brazil perspectives:air pollution.** Disponível em: < <http://www.copenhagenconsensus.com/publication/brazil-perspectives-air-pollution>>. Acesso em: out.2017.

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

DONOVAN R. P. Fabric filtration for combustion sources. Marcel Dekker, Inc; 1985.426p.

DULLIEN, F. A. L. **Introduction to Industrial Gas Cleaning.** San Diego: Academic Press, 1989. 285 p.

ERGUN S. Fluid Flow through Packed Columns. **Chemical Engineering Progress.** v 48, n 2, p 889-894,1952.

FILTRACOM. **Filtro de carvão ativado e químico.** Disponível em : < <http://filtracom.com.br/portfolio/filtro-de-carvao-ativado-e-quimico/>>. Acessado em: set. 2016.

FILTRAXBRASIL. **Filtros multibolsas.** Disponível em : < <http://www.filtraxbrasil.com.br/catalogos/002.pdf>>. Acessado em: set. 2016.

FILTRAXBRASIL. **Filtros plissados.** Disponível em : < <http://www.filtraxbrasil.com.br/catalogos/001.pdf>>. Acessado em: set. 2016.

GUSTAVSSON, J. EN779:2002—New European test method for air filters. **Filtration & Separation,** v 3, p 22–26, 2003.

HAPPEL J. Viscous flow relative to Arrays of Cilynders. **A.I.Ch.E.Journal.** v 5, n 2, p174-177, 1958.

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

HUTTEN, I. M. **Handbook of Nonwoven Filter Medium.**1. ed.UK: Elsevier, 2016, 660p.

IEST. **IEST-RP-CC001: Hepa and ulpa filters.** Disponível em: <<http://www.iest.org/Standards-RPs/Recommended-Practices/IEST-RP-CC001>>. Acessado em: set 2016.

IEST. **IEST-RP-CC007: Testing ulpa filters.** Disponível em: <<http://www.iest.org/Standards-RPs/Recommended-Practices/IEST-RP-CC007>>. Acessado em: set 2016.

IEST. **IEST-RP-CC021: Testing hepa and ulpa filter media.** Disponível em: <  
<http://www.iest.org/Standards-RPs/Recommended-Practices/IEST-RP-CC021>  
>. Acessado em: set 2016.

IEST. **IEST-RP-CC034: Hepa and ulpa filter leak tests.** Disponível em: <  
<http://www.iest.org/Standards-RPs/Recommended-Practices/IEST-RP-CC034>>. Acessado  
em: set 2016.

INNOCENTINI, M. D. M et al. Filtration of gases at high pressures: Permeation behaviour of  
fiber based media used for natural gas cleaning. **Chemical Engineering Science**, Ribeirão  
Preto, v 74, p38-48, 2012.

INNOCENTINI, M.D.M. et al. Permeability, in. M. Sheffler,P.Colombo (Eds.), Cellular  
ceramics: Estructure, Manufacturing, Properties and Applications. **Journal of American  
Ceramic Society**, v 81 p.313-340, 2005.

KUWABARA S. The Forces Expressed by Ramdonly Distributed Parallel Circular Cilynders.  
**Journal of the physical society of Japan.** v14, n 4, p 527-53, 1959.

LEE, K. W.; LIU, B. Y. H. Theoretical Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters  
Theoretical **Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters.** v. 1, p. 147–161, 1982.

MELOROSE, J.; PERROY, R.; CAREAS, S. **Filters and Filtration Handbook.** 6. ed. UK:  
Joe Hayton, 2015. v. 1

MEYERS D et al.Lab testing and field performance head to head.**Filtration and  
Separation.**44-49p, 2005.

ONDRÁČEK, J. ZÍKOVÁ, N. ŽDÍMAL, V. Advanced filter tester for size resolved  
penetration measurements. **Nanocon**, Czech Republic, 2013.

PECK R.L et al. Efficiency of portable HEPA air purifiers against traffic related combustion  
particles.**Building and Enviornment** v 98, p:21-29, 2016.

PNEUMOLOGIA ambiental: II congresso de pneumologia e fisiologia do centro oeste.  
Cuiabá: Jornal Brasileiro de Pneumologia, 2001. 536p.

PODGORSKI A, BATAZY A, GRADO’N L. Application of nanofibers to improve the  
filtration efficiency of the most penetrating particles in fibrous filters. **Chemical Engineering  
Science.** v 61, p6804-6815, 2006.

REVISTA DO SENADO. **Ar condicionado exige limpeza cuidadosa.** Disponível em:<  
<http://www.senado.gov.br/noticias/jornal/cidadania/limpeza/>>. Acesso em out 2016.

SACHINIDOU P. Inter-Laboratory Validation of the Method to Determine the Filtration  
Efficiency for Airborne Particles in the 3-500 nm Range and Results Sensitive Analysis.  
**Aerosol and Air Quality Research.**p1-12, 2017.

SALUSSOGLIA, A.I.P. **Métodos para caracterização de meios filtrantes contendo nanofibras.** p. 93. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2016.

SERVICES, H. Filtration and Air-Cleaning Systems. n. April, 2003.

SCHULZ.Compressor MSV 12/175,1999.5P.Catálogo técnico.

SPARKS, T. , CHASE, G. **Filters and Filtration Handbook.** 6. ed. v. 1

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

STEFFENS J, COURY J R. Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles: I. Homogeneous fibers. **Separation and Purification Technology.**v 58, n 1, p 99-105, 2007.

SUTHERLAND, K. **Filters and Filtration Handbook.** 5. ed, 2008, v. 53.

SZYMANSKI W W, MAJEROWICZ A, WAGNER P E. Measurement of Brownian Coagulation in Monodispersed and Bidispersed Liquid Aerosols. **Aerosol Science Technology.** v11,n 1,p1-10, 2017.

TANABE, E.H. **Desempenho de meios filtrantes na filtração de gases a altas pressões.** p.167. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2011.

TARDOS, G.I., ABUAF,N. e GUTFINGER,C.Dust deposition in granular bed filters:theories and experiments. **Journal Air pollution Assoc.,** Vol.28,p354,1978..

TELIONIS, D. P.; ZIVI, E. L. New method for testing air filter performance. **ASHRAE Journal,** n. 5, p. 164–165, 2016.

USA.TRUST SCIENCE INNOVATION.**Operation and service manual-Model 3079 Portable Atomizer Aerosol Generator.**RevisionC,2006,29p.

TSI. Electrostatic Classifiers Series 3080,2008.145P.Catálogo técnico.

TSI. Small Scale Powder Dispenser,2003.75P.Catálogo técnico.

VIJAYAKUMAR, R. A. M. **Norma mundial para testes e classificação de filtros HEPA e ULPA,** 2012.

VILEDOM. **EN 779: 2012.** Disponível em :< file:///D:/Meus%20Documentos/Backup%20Ana/Meus%20Documentos/Documentos/P%C3%B3s%20Gradua%C3%A7%C3%A3o/Mestrado/HEPA/EN779\_CI\_02\_IN\_126\_October\_2012\_EN\_low.pdf>. Acessado em: set.2016.

WANG, S. K. **Handbook of Air Conditioning and Refrigeration.** 2. ed. [s.l.] R. R.

Donnelley & Sons Company., 2000.

ZHANG, Y. **INDOOR AIR QUALITY**. [s.l: s.n.].

WORLD FILTRATION CONGRESS,11 ,2012, Austria. **Looking for thr minimum efficiency of fibrous air filters during their service life**. Turin: EQS, 2012, p.7.

WORLD FILTRATION CONGRESS,5, 1990, Nice. **Efficiency, pressure drop and figure of merit of high efficiency fibrous and membrane filter media**. Nice: 1990, p.112.

ZHOU, B. AND SHEN, J. (2007) Comparison of General Ventilation Air Filter Test Standards Between America and Europe, Proceedings of IAQVEC 2007—6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings, Vol. 2, 639–646, Sendai, Japan.

## Apêndice A

### Porosidade Experimental

As tabelas abaixo representam os valores encontrados de porosidade obtidos através de análise de imagens.

TABELA A.1- Porosidade experimental para o quartzo

Amostras	Área vazia	Área total	Porosidade
1	2616	2750	0,95
2	3539	3618	0,98
3	2852	2970	0,96
4	2375	2684	0,88
5	2268	2829	0,80
6	3444	3550	0,97
Porosidade média		0,92	
Desvio		0,06	

Fonte: Acervo Pessoal

TABELA A.2- Porosidade experimental para o quartzo

Amostras	Área vazia	Área total	Porosidade
1	6619	8296	0,80
2	7574	7820	0,97
3	7989	9350	0,85
4	8846	9000	0,98
5	11911	12060	0,99
6	8193	8910	0,92
Porosidade média		0,92	
Desvio		0,07	

Fonte: Acervo Pessoal

TABELA A.3- Porosidade experimental para o celulósico

Amostras	Área vazia	Área total	Porosidade
1	15891	24426	0,65
2	10831	16600	0,65
3	11534	17934	0,64
4	10750	17110	0,63
5	11277	18212	0,62
6	7274	10620	0,68
Porosidade média		0,65	
Desvio		0,02	

Fonte: Acervo Pessoal

TABELA A.4- Porosidade experimental para o poliéster

Amostras	Área vazia	Área total	Porosidade
1	8869	11560	0,77
2	3500	4425	0,79
3	5684	6572	0,86
4	4164	4794	0,87
5	4339	4860	0,89
6	4377	5130	0,85
Porosidade média		0,84	
Desvio		0,04	

Fonte: Acervo Pessoal

TABELA A.5- Porosidade experimental para o carvão ativado

Amostras	Área vazia	Área total	Porosidade
1	227011	280790	0,81
2	349534	446055	0,78
3	454906	577710	0,79
4	25968	32606	0,80
5	26275	32058	0,82
6	27983	36400	0,77
Porosidade média		0,79	
Desvio		0,02	

Fonte: Acervo Pessoal

## Apêndice B

### Porosidade Teórica

TABELA B.1- Porosidade segundo o modelo teórico de Kuwabara

Vidro						
Amostra	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$v_s$ (m/s)	$\mu$ (Pa.s)	$d_f$ (m)	E
1	1,08	7,55E+05	0,05	1,87E-05	1E-06	0,95
2	1,08	1,65E+06	0,09	1,87E-05	1E-06	0,95
3	1,08	2,31E+06	0,14	1,87E-05	1E-06	0,95
4	1,08	3,14E+06	0,18	1,87E-05	1E-06	0,95
5	1,08	3,97E+06	0,23	1,87E-05	1E-06	0,95
6	1,08	4,83E+06	0,27	1,87E-05	1E-06	0,95
7	1,08	5,60E+06	0,32	1,87E-05	1E-06	0,95
Quartzo						
Amostra	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$v_s$ (m/s)	$\mu$ (Pa.s)	$d_f$ (m)	E
1	0,89965	8,37E+05	0,05	1,87E-05	1E-06	0,95
2	0,89965	1,72E+06	0,09	1,87E-05	1E-06	0,95
3	0,89965	2,57E+06	0,14	1,87E-05	1E-06	0,95
4	0,89965	3,49E+06	0,18	1,87E-05	1E-06	0,95
5	0,89965	4,39E+06	0,23	1,87E-05	1E-06	0,95
6	0,89965	5,37E+06	0,27	1,87E-05	1E-06	0,95
7	0,89965	6,21E+06	0,32	1,87E-05	1E-06	0,95
Celulósico						
Amostra	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$v_s$ (m/s)	$\mu$ (Pa.s)	$d_f$ (m)	E
1	1,07	1,17E+05	0,05	1,87E-05	2E-05	0,65
2	1,07	2,18E+05	0,09	1,87E-05	2E-05	0,65
3	1,07	3,23E+05	0,14	1,87E-05	2E-05	0,66
4	1,07	4,48E+05	0,18	1,87E-05	2E-05	0,65
5	1,07	5,56E+05	0,23	1,87E-05	2E-05	0,65
6	1,07	6,82E+05	0,27	1,87E-05	2E-05	0,65
7	1,07	8,10E+05	0,32	1,87E-05	2E-05	0,65
Poliéster						
Amostra	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$v_s$ (m/s)	$\mu$ (Pa.s)	$d_f$ (m)	E
1	1,07	4,42E+03	0,05	1,86E-05	2E-05	0,92
2	1,07	8,84E+03	0,09	1,86E-05	2E-05	0,92
3	1,07	1,25E+04	0,14	1,86E-05	2E-05	0,93
4	1,07	1,73E+04	0,18	1,86E-05	2E-05	0,92
5	1,07	2,24E+04	0,23	1,86E-05	2E-05	0,92
6	1,07	2,71E+04	0,27	1,86E-05	2E-05	0,92
7	1,07	3,27E+04	0,32	1,86E-05	2E-05	0,92

Carvão Ativado						
Amostra	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$v_s$ (m/s)	$\mu$ (Pa.s)	$d_f$ (m)	$\epsilon$
1	1,05	3,03E+03	0,05	1,87E-05	3E-05	0,90
2	1,05	5,62E+03	0,09	1,87E-05	3E-05	0,90
3	1,05	8,36E+03	0,14	1,87E-05	3E-05	0,90
4	1,05	1,17E+04	0,18	1,87E-05	3E-05	0,90
5	1,05	1,48E+04	0,23	1,87E-05	3E-05	0,90
6	1,05	1,85E+04	0,27	1,87E-05	3E-05	0,90
7	1,05	2,25E+04	0,32	1,87E-05	3E-05	0,90

Fonte: Acervo Pessoal

TABELA B.2- Porosidade segundo o modelo teórico de Ergun

Vidro						
Amostra	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$v_s$ (m/s)	$\mu$ (Pa.s)	$d_f$ (m)	$\epsilon$
1	1,08	7,55E+05	0,05	1,87E-05	1,01E-06	0,93
2	1,08	1,65E+06	0,09	1,87E-05	1,01E-06	0,93
3	1,08	2,31E+06	0,14	1,87E-05	1,01E-06	0,93
4	1,08	3,14E+06	0,18	1,87E-05	1,01E-06	0,93
5	1,08	3,97E+06	0,23	1,87E-05	1,01E-06	0,93
6	1,08	4,83E+06	0,27	1,87E-05	1,01E-06	0,93
7	1,08	5,60E+06	0,32	1,87E-05	1,01E-06	0,93
Quartzo						
Amostra	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$v_s$ (m/s)	$\mu$ (Pa.s)	$d_f$ (m)	$\epsilon$
1	0,90	8,37E+05	0,05	1,87E-05	1,01E-06	0,92
2	0,90	1,72E+06	0,09	1,87E-05	1,01E-06	0,92
3	0,90	2,57E+06	0,14	1,87E-05	1,01E-06	0,92
4	0,90	3,49E+06	0,18	1,87E-05	1,01E-06	0,92
5	0,90	4,39E+06	0,23	1,87E-05	1,01E-06	0,92
6	0,90	5,37E+06	0,27	1,87E-05	1,01E-06	0,92
7	0,90	6,21E+06	0,32	1,87E-05	1,01E-06	0,92
Celulósico						
Amostra	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$v_s$ (m/s)	$\mu$ (Pa.s)	$d_f$ (m)	$\epsilon$
1	1,07	1,17E+05	0,05	1,87E-05	2,1E-05	0,66
2	1,07	2,18E+05	0,09	1,87E-05	2,1E-05	0,67
3	1,07	3,23E+05	0,14	1,87E-05	2,1E-05	0,67
4	1,07	4,48E+05	0,18	1,87E-05	2,1E-05	0,66
5	1,07	5,56E+05	0,23	1,87E-05	2,1E-05	0,66
6	1,07	6,82E+05	0,27	1,87E-05	2,1E-05	0,66
7	1,07	8,10E+05	0,32	1,87E-05	2,1E-05	0,66

Poliéster						
Amostra	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$v_s$ (m/s)	$\mu$ (Pa.s)	$d_f$ (m)	$\epsilon$
1	1,07	4,42E+03	0,05	1,86E-05	1,96E-05	0,90
2	1,07	8,84E+03	0,09	1,86E-05	1,96E-05	0,90
3	1,07	1,25E+04	0,14	1,86E-05	1,96E-05	0,90
4	1,07	1,73E+04	0,18	1,86E-05	1,96E-05	0,90
5	1,07	2,24E+04	0,23	1,86E-05	1,96E-05	0,90
6	1,07	2,71E+04	0,27	1,86E-05	1,96E-05	0,90
7	1,07	3,27E+04	0,32	1,86E-05	1,96E-05	0,90
Carvão Ativado						
Amostra	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$v_s$ (m/s)	$\mu$ (Pa.s)	$d_f$ (m)	$\epsilon$
1	1,05	3,03E+03	0,05	1,87E-05	2,63E-05	0,89
2	1,05	5,62E+03	0,09	1,87E-05	2,63E-05	0,90
3	1,05	8,36E+03	0,14	1,87E-05	2,63E-05	0,90
4	1,05	1,17E+04	0,18	1,87E-05	2,63E-05	0,89
5	1,05	1,48E+04	0,23	1,87E-05	2,63E-05	0,89
6	1,05	1,85E+04	0,27	1,87E-05	2,63E-05	0,89
7	1,05	2,25E+04	0,32	1,87E-05	2,63E-05	0,89

Fonte: Acervo Pessoal

TABELA B.3- Porosidade segundo o modelo teórico de Happel

Vidro						
Amostra	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$v_s$ (m/s)	$\mu$ (Pa.s)	$d_f$ (m)	$\epsilon$
1	1,08	7,55E+05	0,05	1,87E-05	1,01E-06	0,95
2	1,08	1,65E+06	0,09	1,87E-05	1,01E-06	0,94
3	1,08	2,31E+06	0,14	1,87E-05	1,01E-06	0,94
4	1,08	3,14E+06	0,18	1,87E-05	1,01E-06	0,94
5	1,08	3,97E+06	0,23	1,87E-05	1,01E-06	0,94
6	1,08	4,83E+06	0,27	1,87E-05	1,01E-06	0,94
7	1,08	5,60E+06	0,32	1,87E-05	1,01E-06	0,94
Quartzo						
Amostra	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$v_s$ (m/s)	$\mu$ (Pa.s)	$d_f$ (m)	$\epsilon$
1	0,90	8,37E+05	0,05	1,87E-05	1,01E-06	0,94
2	0,90	1,72E+06	0,09	1,87E-05	1,01E-06	0,94
3	0,90	2,57E+06	0,14	1,87E-05	1,01E-06	0,94
4	0,90	3,49E+06	0,18	1,87E-05	1,01E-06	0,94
5	0,90	4,39E+06	0,23	1,87E-05	1,01E-06	0,94
6	0,90	5,37E+06	0,27	1,87E-05	1,01E-06	0,94
7	0,90	6,21E+06	0,32	1,87E-05	1,01E-06	0,94

Celulósico						
Amostra	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$v_s$ (m/s)	$\mu$ (Pa.s)	$d_f$ (m)	$\epsilon$
1	1,07	1,17E+05	0,05	1,87E-05	2,1E-05	0,61
2	1,07	2,18E+05	0,09	1,87E-05	2,1E-05	0,62
3	1,07	3,23E+05	0,14	1,87E-05	2,1E-05	0,62
4	1,07	4,48E+05	0,18	1,87E-05	2,1E-05	0,61
5	1,07	5,56E+05	0,23	1,87E-05	2,1E-05	0,61
6	1,07	6,82E+05	0,27	1,87E-05	2,1E-05	0,61
7	1,07	8,10E+05	0,32	1,87E-05	2,1E-05	0,61
Poliéster						
Amostra	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$v_s$ (m/s)	$\mu$ (Pa.s)	$d_f$ (m)	E
1	1,07	4,42E+03	0,05	1,86E-05	1,96E-05	0,91
2	1,07	8,84E+03	0,09	1,86E-05	1,96E-05	0,91
3	1,07	1,25E+04	0,14	1,86E-05	1,96E-05	0,91
4	1,07	1,73E+04	0,18	1,86E-05	1,96E-05	0,91
5	1,07	2,24E+04	0,23	1,86E-05	1,96E-05	0,91
6	1,07	2,71E+04	0,27	1,86E-05	1,96E-05	0,91
7	1,07	3,27E+04	0,32	1,86E-05	1,96E-05	0,91
Carvão Ativado						
Amostra	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P/L$ (Pa/m)	$v_s$ (m/s)	$\mu$ (Pa.s)	$d_f$ (m)	E
1	1,05	3,03E+03	0,05	1,87E-05	2,63E-05	0,90
2	1,05	5,62E+03	0,09	1,87E-05	2,63E-05	0,90
3	1,05	8,36E+03	0,14	1,87E-05	2,63E-05	0,90
4	1,05	1,17E+04	0,18	1,87E-05	2,63E-05	0,90
5	1,05	1,48E+04	0,23	1,87E-05	2,63E-05	0,90
6	1,05	1,85E+04	0,27	1,87E-05	2,63E-05	0,90
7	1,05	2,25E+04	0,32	1,87E-05	2,63E-05	0,90

Fonte: Acervo Pessoal