

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

BÁRBARA LETICIA PERONI

**AVALIAÇÃO DE MEIOS FILTRANTES COM DIFERENTES  
TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO EM FILTROS DE MANGAS**

SÃO CARLOS - SP

2022

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

**AVALIAÇÃO DE MEIOS FILTRANTES COM DIFERENTES  
TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO EM FILTROS DE MANGAS**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos em 26 de abril de 2022, para obtenção do título de mestre em Engenharia Química.

Orientação: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mônica Lopes Aguiar

SÃO CARLOS - SP

2022



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Bárbara Leticia Peroni, realizada em 26/04/2022.

**Comissão Julgadora:**

Profa. Dra. Mônica Lopes Aguiar (UFSCar)

Profa. Dra. Vádila Giovana Guerra Béttega (UFSCar)

Prof. Dr. Rafael Sartim (UFES)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

*“O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas dificuldades que superou no caminho”.*

*Abraham Lincoln*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus por sempre cuidar de mim, me guiando e cuidando de todos os detalhes, pelas oportunidades, pela força nos momentos difíceis e experiências que foram dadas e proporcionado mais uma etapa concluída em minha vida.

Agradeço a professora Dra. Mônica Lopes Aguiar pela oportunidade, apoio, amizade, paciência, orientação e sabedoria compartilhada.

Aos meus pais, Verônica Peroni e Valdemir Fragoso, por todo apoio desde do início da minha formação, confiança e amor.

Ao meu esposo, Alexandre Nunes, pelo amor, incentivo, compreensão, carinho e por esta sempre ao meu lado.

Ao pessoal da salinha pelo apoio, conhecimento compartilhados, troca de experiência e momentos de descontração.

A Camila Lacerda e Natalia Alvarez pela amizade e por compartilharem um lar comigo, tornando a saudade de casa menor.

Aos técnicos Marcos e Samuel, que sempre estavam dispostos a ajudar quando foi preciso.

Ao Rafael Sartim e a ArcelorMittal, e ao Henrique Sommerfeld e a Solaft pelos materiais fornecidos.

Aos demais membros da banca: Prof<sup>a</sup>. Dra. Vádila Giovana Guerra e Prof. Dr. Rafael Sartim pelas sugestões e contribuições para o trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro e ao Departamento de engenharia química da UFSCar pelo apoio, infraestrutura e equipamentos utilizados para realização dessa pesquisa.

Enfim, a todos que contribuíram de forma direta ou indiretamente para que esse sonho pudesse ser realizado.

## RESUMO

A poluição do ar por material particulado vem sendo objeto de estudo de muitos pesquisadores, onde relatam que essas partículas podem penetrar através da corrente sanguínea causando sérios problemas de saúde. Para reduzir os efeitos negativos desses processos na qualidade do ar, as indústrias precisam buscar algumas alternativas para remover ou reduzir a quantidade de material particulado a ser lançado na atmosfera. O filtro manga é um equipamento composto por elementos filtrantes do tipo não tecido (*nonwoven*), que tem por objetivo controlar a emissão dessas partículas. Esse tecido, que forma o meio filtrante, varia de acordo com o material particulado a ser filtrado, para se ter uma alta eficiência na retenção das partículas junto com um baixo custo operacional. Os meios filtrantes para partículas muito finas possuem um elevado custo, fazendo-se necessário, para reduzir o custo operacional do processo, a escolha do meio filtrante mais adequado para aquela operação. Pensando nisso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar os meios filtrantes 100% meta-aramida com diferentes técnicas de fabricação, um agulhado e outro hidrojateado. A finalidade é identificar o meio filtrante mais adequado para ser empregado no processo de filtração de gases em filtro de mangas na etapa de despoejamento secundário da dessulfuração de gusa de uma indústria siderúrgica. Para isso, inicialmente foi realizada a caracterização do material particulado (distribuição granulométrica, densidade e composição), posteriormente, a caracterização dos meios filtrantes virgens (porosidade, permeabilidade, diâmetro das fibras, permeabilidade e a espessura). Os ensaios de filtração realizados foram de acordo com norma VDI 3926, em que se avaliou a eficiência de coleta para nano e micropartículas, para o primeiro e trinta ciclos de filtração. Com os resultados obtidos, mostra-se que as lacunas deixadas pelas agulhas durante o processo de fabricação do meio filtrante agulhado, torna-se caminhos preferenciais de ar e assim possuindo maior permeabilidade e porosidade. Também se verificou que para os trinta ciclos de filtração o meio filtrante agulhado e hidrojateado virgens apresentaram eficiência de coletas próximas, porém o tempo de filtração do meio filtrante hidrojateado foi menor do que o meio filtrante agulhado, para se atingir a pressão máxima. Após o envelhecimento houve uma redução na permeabilidade e no tempo de filtração de ambos os meios filtrantes. Porém o meio filtrante hidrojateado apresentou maior tempo de filtração e eficiência do que o meio filtrante agulhado.

**Palavras chaves:** Filtração de gases, filtros de mangas, dessulfuração do gusa, jato de ar pulsante, meios filtrantes.

## ABSTRACT

Air pollution by particulate matter has been the subject of study by many researchers, where they report that these particles can penetrate through the bloodstream causing serious health problems. To reduce the negative effects of these processes on air quality, industries need to look for some alternatives to remove or reduce the amount of particulate matter to be released into the atmosphere. The bag filter is an equipment composed of non-woven (nonwven) filter elements, which aims to control the emission of these particles. This fabric, which forms the filter medium, varies according to the particulate material to be filtered, in order to have a high efficiency in the retention of the particles along with a low operating cost. Filter media for very fine particles have a high cost, making it necessary, to reduce the operational cost of the process, to choose the most suitable filter media for that operation. With that in mind, the present work aims to evaluate 100% meta-aramid filter media with different manufacturing techniques, one needled and the other hydroblasted. The purpose is to identify the most suitable filter medium to be used in the process of filtering gases in a bag filter in the secondary dedusting stage of pig iron desulfurization in a steel industry. For this, initially the characterization of the particulate material was carried out (granule distribution, density and composition), later, the characterization of virgin filter media (porosity, permeability, fiber diameter, permeability and thickness). The filtration tests performed were according to the VDI 3926 standard, which evaluated the collection efficiency for nano and microparticles, for the first and thirty filtration cycles. With the results obtained, it is shown that the gaps left by the needles during the fabrication process of the needled filter media, become preferential air paths and thus having greater permeability and porosity. It was also verified that for the thirty filtration cycles the virgin needled and hydroblasted filter media showed efficiency of close collections, but the filtration time of the hydroblasted filter medium was shorter than the needled filter medium, to reach the maximum pressure. After aging, there was a reduction in permeability and filtration time of both filter media. However, the hydroblasted filter media showed longer filtration time and efficiency than the needled filter media.

**Keywords:** Gas filtration, bag filters, pig iron desulfurization, pulse jet fabric filter, filter media.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Representação da deposição de material particulado nas vias aéreas.....	24
<b>Figura 2</b> - Classificação por tamanho e composição do material particulado presente no ar atmosférico.....	24
<b>Figura 3</b> - Esquema de funcionamento do (a) filtro de mangas e (b) meio filtrante. ...	26
<b>Figura 4</b> - Comparação genérica entre mangas adequadas e não adequadas ao processo. ....	27
<b>Figura 5</b> – Estrutura dos meios filtrantes (a) não tecido e (b) tecido. ....	29
<b>Figura 6</b> - Estrutura molecular da meta-aramida. ....	29
<b>Figura 7</b> - Ilustração ampliada da superfície do meio filtrante (a) agulhado e (b) hidrojateado. ....	30
<b>Figura 8</b> - Modelo de desempenho de queda de pressão observado a partir de teste VDI. ....	31
<b>Figura 9</b> - Limpeza por agitação mecânica. ....	33
<b>Figura 10</b> - Limpeza por ar reverso. ....	33
<b>Figura 11</b> - Limpeza por jato de ar pulsante. ....	34
<b>Figura 12</b> - Etapas de filtração. ....	35
<b>Figura 13</b> - Mecanismo de captura por interceptação direta. ....	36
<b>Figura 14</b> - Mecanismo de captura por difusão. ....	36
<b>Figura 15</b> - Mecanismo de captura por impactação inercial.....	37
<b>Figura 16</b> - Mecanismo de captura por gravidade.....	37
<b>Figura 17</b> - Curvas de filtração. ....	38
<b>Figura 18</b> - Ciclo de filtração.....	39
<b>Figura 19</b> - Mecanismos de filtração. ....	45
<b>Figura 20</b> – Amostras de materiais particulados (a) rocha fosfática e (b) pó da dessulfuração.....	49
<b>Figura 21</b> - Distribuição granulométrica em volume da rocha fosfática. ....	52
<b>Figura 22</b> - Distribuição granulométrica em volume do pó da dessulfuração.....	52
<b>Figura 23</b> - Distribuição granulométrica aerodinâmica em massa da rocha fosfática. .	53
<b>Figura 24</b> - Distribuição granulométrica aerodinâmica em massa do pó da dessulfuração. ....	53
<b>Figura 25</b> - Imagens da rocha fosfática, com ampliações 1000x (a), (b) e 500x (c), (d). ....	54

<b>Figura 26</b> - Imagens do pó da dessulfuração, com ampliações 1000x (a), (b) e 500x (c), (d). .....	55
<b>Figura 27</b> – Amostras dos meios filtrantes meta-aramida (a) agulhado e (b) hidrojateado. ....	56
<b>Figura 28</b> - Equipamento para determinação da permeabilidade dos meios filtrantes. 57	
<b>Figura 29</b> - Imagens da superfície do meio filtrante (a) e (b) agulhado e (c) e (d) hidrojateado. ....	59
<b>Figura 30</b> – Esquema para a medição dos diâmetros das fibras dos meios filtrantes. ..	60
<b>Figura 31</b> - Distribuição de diâmetros das fibras do meio filtrante agulhado. ....	61
<b>Figura 32</b> - Distribuição de diâmetros das fibras do meio filtrante hidrojateado. ....	61
<b>Figura 33</b> - Equipamento de filtração para micropartículas. ....	62
<b>Figura 34</b> - Equipamento de filtração de nanopartículas para meios filtrantes virgens. 63	
<b>Figura 35</b> - Caracterização das nanopartículas. ....	64
<b>Figura 36</b> - Equipamento de filtração de acordo com a norma VDI. ....	65
<b>Figura 37</b> - Balança de alimentação.....	66
<b>Figura 38</b> - Equipamento para o pré-endurecimento da amostra. ....	68
<b>Figura 39</b> - Equipamento para o embutimento da amostra.....	68
<b>Figura 40</b> - Ensaio de filtração com a rocha fosfática utilizando o meio filtrante agulhado virgem. ....	72
<b>Figura 41</b> - Ensaio de filtração com a rocha fosfática utilizando o meio filtrante hidrojateado virgem. ....	73
<b>Figura 42</b> - Ensaio de filtração com o pó da dessulfuração utilizando o meio filtrante agulhado virgem. ....	73
<b>Figura 43</b> - Ensaio de filtração com o pó da dessulfuração utilizando o meio filtrante hidrojateado virgem. ....	74
<b>Figura 44</b> - Ensaio de filtração utilizando os meios filtrantes virgens nos momentos iniciais ( $\Delta P_0$ ). ....	75
<b>Figura 45</b> - Ensaio de filtração com nanopartículas utilizando os meios filtrantes virgens. ....	76
<b>Figura 46</b> - Ensaio de filtração para o primeiro ciclo com o pó da dessulfuração para meio filtrante agulhado. ....	77
<b>Figura 47</b> - Ensaio de filtração para o primeiro ciclo com o pó da dessulfuração para meio filtrante hidrojateado. ....	77

<b>Figura 48</b> – Pó da dessulfuração sobre o meio filtrante e após o primeiro pulso de limpeza (a), (b) agulhado e (c), (d) hidrojateado. ....	79
<b>Figura 49</b> - Imagens da seção transversal dos meios filtrantes submetidos aos ensaios de filtração de um ciclo. Meio filtrante agulhado em (a) e hidrojateado em (b); Aumento de 100x e escala de 200 $\mu\text{m}$ . ....	80
<b>Figura 50</b> – Torta de filtração do meio filtrante (a) agulhado e (b) hidrojateado. ....	82
<b>Figura 51</b> - Trinta ciclos de filtração do meio filtrante agulhado virgem. ....	83
<b>Figura 52</b> - Trinta ciclos de filtração para o meio filtrante hidrojateado virgem. ....	83
<b>Figura 53</b> - Imagens da superfície externa do meio filtrante envelhecido (a) agulhado e (b) hidrojateado. ....	85
<b>Figura 54</b> - Eficiência de coleta de micropartículas para o meio filtrante envelhecidos. ....	87
<b>Figura 55</b> - Ciclos de filtração para o meio filtrante agulhado envelhecido. ....	87
<b>Figura 56</b> - Ciclos de filtração para o meio filtrante hidrojateado envelhecido. ....	88
<b>Figura 57</b> - Imagens da superfície externa do meio filtrante usado (a) e (b) agulhado e (c) e (d) hidrojateado. ....	90

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Materiais comuns de meios filtrantes para filtros mangas. ....	28
<b>Tabela 2</b> - Composição química dos materiais particulados. ....	50
<b>Tabela 3</b> - Distribuição granulométrica dos materiais particulados. ....	51
<b>Tabela 4</b> - Distribuição granulométrica do material particulado em cada câmara. ....	51
<b>Tabela 5</b> - Características dos meios filtrantes virgens. ....	58
<b>Tabela 6</b> - Diâmetro médios dos meios filtrantes virgens. ....	60
<b>Tabela 7</b> – Variáveis utilizadas. ....	63
<b>Tabela 8</b> – Variáveis utilizadas. ....	64
<b>Tabela 9</b> - Valores experimentais dos ensaios de filtração. ....	66
<b>Tabela 10</b> – Metodologia. ....	71
<b>Tabela 11</b> - Resultados para ensaio de filtração para o primeiro ciclo. ....	78
<b>Tabela 12</b> - Eficiência e tempo de filtração para ciclos dos meios filtrantes virgens. ..	84
<b>Tabela 13</b> – Características dos meios filtrantes envelhecidos. ....	86
<b>Tabela 14</b> - Eficiência e tempo de filtração para 30 ciclos do meio filtrante envelhecidos. .....	89
<b>Tabela 15</b> – Características dos meios filtrantes usados. ....	91

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área útil de filtração
$C_i$	Concentração de partículas antes do meio filtrante
$C_f$	Concentração de partículas após o meio filtrante
C	Concentração de pó no filtro
$\bar{D}_f$	Diâmetro médio das fibras
$d_{fi}$	Diâmetro das fibras
df	Diâmetro médio das fibras
dp	Diâmetro médio de Sauter da partícula
$k_1$	Coefficiente de permeabilidade viscosa
$k_2$	Coefficiente de permeabilidade inercial
$k_m$	Resistência específica do meio filtrante
$k_t$	Resistência da torta
L	Espessura do meio filtrante
m	Massa da torta
M	Massa retida no meio filtrante
$M_{FA}$	Massa do material particulado no filtro absoluto
$M_{FT}$	Massa do material particulado retido
$M_{ff}$	Massa final no meio filtrante
$M_{fi}$	Massa inicial no meio filtrante
N	Número total de fibras
$n_i$	Número de fibras com um determinado diâmetro
q	Vazão mássica de pó
Q	Vazão volumétrica
t	Tempo de filtração
V	Velocidade superficial de filtração
$\varepsilon$	Porosidade
$\rho$	Densidade do gás
$\rho_p$	Densidade da partícula
$\mu$	Viscosidade do gás
$\eta$	Eficiência de coleta
$\Delta P$	Queda de pressão no meio filtrante
$\Delta P_0$	Queda de pressão inicial

$\Delta P_{\text{torta}}$  Queda de pressão da torta

## ABREVIACÃO

ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
APS	<i>Aerodynamic Particle Sizer</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CCDM	Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DEMa	Departamento de Engenharia de Materiais
DEQ	Departamento de Engenharia Química
FEG	<i>Field Emission Gun</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
LCA	Laboratório de Controle Ambiental
LCE	Laboratório de Caracterização Estrutural
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MP	Material Particulado
NBR	Norma Brasileira
OMS	Organização Mundial da Saúde
PE P	Poliéster com fibras encapsuladas com Teflon
PM <sub>1.0</sub>	Partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 1.0 µm
PM <sub>2.5</sub>	Partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 2.5 µm
PM <sub>10</sub>	Partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 10 µm
PRONAR	Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar
PTFE	Politetrafluoretileno
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>
SMPS	<i>Scanning Mobility Particle Sizer</i>
XRF	<i>X - Ray Fluorescence</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	19
<b>2.1 Objetivo geral</b> .....	19
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	19
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
<b>3.1 Industria Siderúrgica</b> .....	20
<b>3.1.1 Sustentabilidade da Siderurgia</b> .....	20
<b>3.1.2 Dessulfuração</b> .....	21
<b>3.2 Poluentes atmosféricos</b> .....	22
<b>3.3 Equipamentos de separação gás-sólido</b> .....	25
<b>3.4 Filtro mangas</b> .....	25
<b>3.4.1 Princípio de funcionamento</b> .....	26
<b>3.4.2 Meios filtrantes</b> .....	27
<b>3.4.3 Estrutura dos meios filtrantes</b> .....	28
<b>3.4.4 Meio filtrante Meta-aramida</b> .....	29
<b>3.4.5 Construção dos meios filtrantes</b> .....	30
<b>3.4.6 Tratamento superficial dos tecidos</b> .....	31
<b>3.4.7 Limpeza do filtro mangas</b> .....	32
<b>3.5 Teoria da Filtração</b> .....	34
<b>3.5.1 Etapas da filtração</b> .....	34
<b>3.5.2 Mecanismo de retenção das partículas</b> .....	35
<b>3.5.3 Curva de filtração</b> .....	38
<b>3.5.4 Ciclos de filtração</b> .....	38
<b>3.6 Parâmetros Relevantes de Filtração</b> .....	39
<b>3.6.1 Permeabilidade</b> .....	39
<b>3.6.2 Queda de pressão</b> .....	40
<b>3.6.3 Velocidade</b> .....	41
<b>3.6.4 Porosidade do meio filtrante</b> .....	41
<b>3.6.5 Porosidade da torta de filtração</b> .....	42
<b>3.6.6 Eficiência de coleta</b> .....	43
<b>3.6.7 Umidade e Temperatura</b> .....	44

3.6.8	Forças de coesão e adesão .....	44
3.6.9	Deposição de partículas no meio filtrante .....	45
3.7	Estudo da arte .....	46
4	<b>METODOLOGIA</b> .....	49
4.1	<b>Caracterização do Material Particulado</b> .....	49
4.2	<b>Análise dos meios filtrantes virgens</b> .....	55
4.3	<b>Determinação da eficiência dos meios filtrantes para micropartículas</b> ....	62
4.4	<b>Determinação da eficiência dos meios filtrantes para nanopartículas</b> .....	63
4.5	<b>Ensaio de filtração</b> .....	65
4.6	<b>Preparação das amostras para análise no MEV</b> .....	67
4.7	<b>Determinação da penetração das partículas nos meios filtrantes</b> .....	69
4.8	<b>Ensaio de ciclos de filtração e limpeza</b> .....	69
4.9	<b>Envelhecimento artificial dos meios filtrantes</b> .....	69
4.10	<b>Avaliação da eficiência dos meios filtrantes envelhecidos</b> .....	70
4.11	<b>Avaliação da eficiência dos meios filtrantes usados</b> .....	70
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	72
5.1	<b>Eficiência para micropartículas</b> .....	72
5.2	<b>Eficiência para nanopartículas</b> .....	76
5.3	<b>Ensaio de filtração para o primeiro ciclo</b> .....	77
5.4	<b>Determinação da penetração das partículas no meio filtrante</b> .....	80
5.5	<b>Porosidade da torta</b> .....	81
5.6	<b>Ciclos de filtração e limpeza</b> .....	82
5.7	<b>Eficiência dos meios filtrantes envelhecidos</b> .....	85
5.8	<b>Avaliação dos meios filtrantes usados</b> .....	90
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	92
7	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	94
8	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	95

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e o consumismo refletiram diretamente na alta demanda de matérias primas por setores industriais como aço, que é utilizado em grande escala pelo setor de construção e pela indústria automobilística em vergalhões, barras, automóveis, entre outros.

A produção de aço pela siderurgia tem uma grande geração de resíduos sólidos, líquidos e gasosos. Dentre esses resíduos a geração de material particulado é a mais preocupante. A alta emissão de material particulado pela indústria siderúrgica afeta as pessoas que moram próximas, além de ser perda de matérias e energia que podem ser utilizados.

O aumento da poluição atmosférica por material particulado é proporcional ao crescimento industrial, onde sua composição e tamanho vem sendo a maior preocupação dentre os órgãos ambientais. Isso é decorrente ao aumento de 14% nas mortes por poluição atmosférica em 10 anos no Brasil (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2019).

A preocupação das autoridades é com o tamanho das partículas, pois quanto menor a partícula mais fácil dela penetrar no corpo, oferecendo maiores riscos para a saúde da população. A ingestão ou a penetração na corrente sanguínea, desses materiais particulados pode causar doenças e até levar a morte.

Segundo a Organização Pan-Americana da Saúde (2018), a OMS estima que cerca de sete milhões de pessoas morrem por ano por causa da exposição ao material particulado presente no ar. Essas nanopartículas penetram nos pulmões e no sistema cardiovascular, onde causam doenças vasculares cerebrais, doenças cardíacas, câncer de pulmão, doenças pulmonares crônicas e infecções respiratórias, o que inclui a pneumonia.

Pensando nessa problemática de poluição ambiental no Brasil por materiais particulados foi criada em 1975 a primeira legislação para o controle da emissão de material particulado. O decreto, nº 1413 de 1975, determina que as indústrias tomem medidas necessárias para prevenir ou corrigir os problemas oriundos da poluição do meio ambiente. O documento também estabelece que o Poder Executivo Federal pode suspender o funcionamento do estabelecimento se, os mesmos, não cumprir o que está descrito no decreto.

Mas só em 15 de junho de 1989 que foi criada a resolução CONAMA nº5 e o programa nacional de controle da poluição do ar - PRONAR, em que fixava parâmetros para a emissão de poluentes gasosos e materiais particulados por fontes fixas (CONAMA, 1989).

Em 2011, o CONAMA aprovou uma das medidas de maior impacto ambiental. A resolução CONAMA nº436 de 22 de dezembro de 2011, onde estabelece limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas, restringindo as emissões de poluentes de treze dos principais setores da indústria nacional.

Mais tarde em 2013, seguindo a recomendação da Organização Mundial da Saúde (OMS), os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo emitiram decretos estaduais onde determinam a classificação dos poluentes e para emissão de material particulado, prever valores máximo para diferentes diâmetros de partículas.

Em 2018 o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabeleceu novos critérios de qualidade do ar em relação a poluição ambiental. A Resolução CONAMA nº491/2018, diferencia as emissões de particulados por diâmetros e estabelece fases progressivas e subsequentes de limites com o intuito de alcançar a média anual recomendada pela OMS. Para o material particulado esses limites médios anuais, atualmente em vigor, são de  $10 \mu\text{g.m}^{-3}$  para  $\text{MP}_{2,5}$  e de  $20 \mu\text{g.m}^{-3}$  para  $\text{MP}_{10}$  (CONAMA, 2018).

Para controlar essa emissão de materiais particulados equipamentos como filtro mangas, precipitador eletrostático e ciclones são utilizados pela industrias por serem eficientes. A escolha de qual equipamento utilizar depende do processo, do fluido e do material particulado.

O filtro de mangas é um equipamento com alta eficiência de filtração de gases contendo material particulado. As mangas desses filtros, são meios filtrantes que podem ser constituídas de vários materiais que recebem tratamentos para aumentar sua eficiência. Para melhorar a vida útil e a eficiência também é necessário escolher o material do meio filtrante de acordo com gás e o material particulado, pois isso torna o processo relativamente caro.

Diante desse cenário, o objetivo do presente trabalho é investigar e comparar o desempenho de meios filtrantes de meta aramida de diferentes técnicas de fabricação, meio filtrante agulhado e meio filtrante hidrojateado. Com a finalidade de realizar um protocolo de ensaios de filtração de acordo com norma VDI 3926, para avaliar a eficiência dos meios filtrantes no processo de despoeiramento da dessulfuração com sistema de limpeza de jato de ar pulsante.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o desempenho de meios filtrantes com diferentes técnicas de fabricação aplicados no processo de despoejamento de uma unidade de dessulfuração do gusa de uma indústria siderúrgica com sistema de limpeza de jato de ar pulsante.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Analisar a permeabilidade, porosidade, penetração e a queda de pressão dos meios filtrantes virgens no processo e compara-los;
- Avaliar a eficiência de coleta dos meios filtrantes para nano e micropartículas;
- Avaliar o desempenho dos meios filtrantes virgens em ensaios de filtração baseado na norma alemã VDI 3926 para um ciclo;
- Avaliar o desempenho dos meios filtrantes virgens e envelhecido em ensaios com ciclos de filtração e limpeza;

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo é abordado uma revisão da literatura dos principais assuntos que estão relacionados a filtração de gases e que se mostraram relevantes para o entendimento do contexto e desenvolvimento desse trabalho.

#### **3.1 Indústria Siderúrgica**

A indústria siderúrgica vem contribuindo com a geração empregos, desenvolvimento econômico, social e tecnológico. Sendo considerada uma importante fornecedora de insumos para diversas indústrias e principalmente para construção civil. Formada por empresas que operam diversas fases do processo produtivo, da transformação do minério em ferro primário até a produção de bobinas laminadas a quente, a frio ou galvanizada e laminados longos. Outro seguimento é a produção de tubos de aço com ou sem costura (CARVALHO, MESQUITA, ARAÚJO, 2015).

Segundo o Instituto Aço Brasil, no ano 2020, o setor de siderurgia brasileiro produziu 31,4 milhões de toneladas de aço bruto levando o Brasil a ocupar a nona posição no ranking mundial e 29,7 milhões de toneladas de produtos siderúrgico. Já no ano de 2021, a produção de aço bruto teve um aumento de 14,7%, apresentando um valor médio de 36,0 milhões de toneladas para o mesmo período do ano anterior.

Uma importante tarefa que a indústria siderúrgica deve estar atenta, é manter um padrão de desenvolvimento sustentável que segue fatores com aspectos políticos e institucionais da gestão ambiental na atualidade (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2010).

##### **3.1.1 Sustentabilidade da Siderurgia**

As siderúrgicas, assim como outros setores industriais, estão sendo pressionados para redução de impactos ambientais e maior qualidade de vida, que se mostraram desafio de médio e longo prazo.

Um desafio ambiental é a utilização de água no processo siderúrgico, essa utilização é na ordem de 100 a 200 m<sup>3</sup> por tonelada de aço produzido. As águas são utilizadas no resfriamento dos equipados, na limpeza dos gases e outras atividades secundárias (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2010). Como alternativas algumas empresas melhoram os equipamentos para evitar a perda por evaporação e

aumentar a recirculação e outras tem sua localização estrategicamente posicionadas próximos à costa para se utilizar a água salgada ou salobra.

Outro desafio é o consumo de energia, onde a siderurgia é responsável por 5 a 9% da energia consumida no país. Sendo considerado o segundo maior consumidor industrial de energia do Brasil. Os enérgicos mais utilizados na siderurgia brasileira são o coque, o carvão vegetal, carvão mineral, gás de alto-forno, calcário, alcatrão, eletricidade, gás natural e gás de coqueria (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2010; CARVALHO, MESQUITA, ARAÚJO, 2015).

O desafio de maior impacto no processo siderúrgico é as emissões atmosféricas, como ainda não é possível evitar a geração de emissões atmosféricas, então a melhor forma é minimizar seus impactos ao ambiente. Esse setor é considerado o maior emissor industrial de gases de efeito estufa (CARVALHO, MESQUITA, ARAÚJO, 2015). As emissões significam perda de materiais e energia que poderiam estar sendo aproveitados de outra forma. A siderurgia é um dos setores que mais emitem CO<sub>2</sub> na atmosfera, mas nos últimos 50 anos reduziram suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) em 55% (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2010).

### **3.1.2 Dessulfuração**

O controle de emissão de óxido de enxofre (SO<sub>x</sub>) varia de acordo com o teor de enxofre no carvão, minério de ferro e outros combustíveis utilizados no processo de combustão da indústria siderúrgica. O controle dessas emissões se dá através da dessulfuração, para evitar a violação dos padrões de qualidade do ar (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2020).

Os métodos mais comuns utilizado na dessulfuração são: a dessulfuração com óxidos de magnésio, com cal hidratada ou calcário, com sulfeto de sódio e com bissulfeto de amônia. A dessulfuração por cal hidratada ou calcário é a mais utilizada pela indústria siderúrgica, por causa da sua alta eficiência e seu baixo custo (LORA, 2002).

O processo de dessulfuração de gases pode ser feita por diferentes rotas, sendo elas por via úmida, seca e semi-seca.

No processo por via úmida com calcário, é muito utilizado em termelétricas e caldeiras de grande porte, possui uma eficiência de remoção de aproximadamente 98%. Os gases ácidos reagem com a suspensão de calcário, formando sulfato de cálcio, que em seguida são oxidados a sulfato por meio de aeração. Após o desaguamento, há uma

formação de um resíduo sólido que possui um valor comercial e pode ser utilizado na fabricação de placas de gesso (ENFIL, 2000).

O processo por via úmida com água do mar, utiliza a água do mar como reagente para absorção do  $SO_x$ , ou seja, a alcalinidade natural da água é responsável por eliminar o  $SO_x$  da fase gasosa, essa rota apresenta eficiência de remoção de até 98%. O sulfito gerado nessa reação de absorção é oxidado a sulfato através de aeração. Uma grande vantagem dessa rota é que não há a geração de subprodutos, assim a água pode ser descartada no mar (ENFIL, 2000).

Já no processo de dessulfuração por via semi-seca com cal, apresenta uma eficiência de remoção de até 92%. Neste processo, é injetado no absorvedor uma suspensão de cal hidratada, onde ocorre a reação de absorção de  $SO_x$  ao mesmo tempo em que há evaporação da água da suspensão. Após passar pelo absorvedor, os gases são mandados para um filtro de mangas ou precipitador eletrostático, para que o subproduto seja seco e removido. Este subproduto não possui um valor comercial (ENFIL, 2000).

O processo por via seca com cal hidratada possui eficiência de remoção de até 95%. Neste processo, a cal é injetada no absorvedor, onde reage com o  $SO_x$  da fase gasosa. Os gases são levados ao precipitador eletrostático ou para um filtros mangas para remoção de subprodutos. Parte do material pode ser recirculada e a outra parte é descartada (ENFIL, 2000).

### **3.2 Poluentes atmosféricos**

Segundo a resolução do CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018, poluente atmosférico pode ser definido como qualquer forma de matéria que possa se tornar prejudicial à saúde humana, fauna e flora ou a segurança e as atividades da comunidade.

O nível de poluição atmosférica é medido através da quantidade de uma determinada substância poluente que se encontra presente no ar. Porém a classificação dos poluentes é difícil de se estabelecer, pois há uma grande variedade de substâncias que podem ser encontradas na atmosfera (CETESB, 2022).

Um dos poluentes que mais vem sendo estudado é o material particulado por causa do aumento da emissão devido ao crescimento industrial.

O material particulado (MP) pode ser definido como conjunto de poluentes constituído de fuligem, pó e material suspenso na atmosfera com diâmetro pequenos.

Sendo resultante da queima de materiais como combustíveis fósseis, biomassa vegetal ou ainda processos industriais e desgastes de pneus e freios (CONCEIÇÃO, 2017).

Os materiais particulados são partículas finas de sólidos ou líquidos que estão suspensas no ar, em que são invisíveis a olho nu quando estão separadas e quando se agrupam formam uma neblina que reduz a visibilidade (BAIRD, 2002).

Esses materiais são provenientes de processos como a combustão incompleta de hidrocarbonetos ou a decomposição térmica que pode ocorrer durante os processos industriais. A combustão incompleta pode tanto gerar fuligem quanto gases tóxicos, que ao serem liberados se transformam em partículas devido as reações químicas presentes no ar.

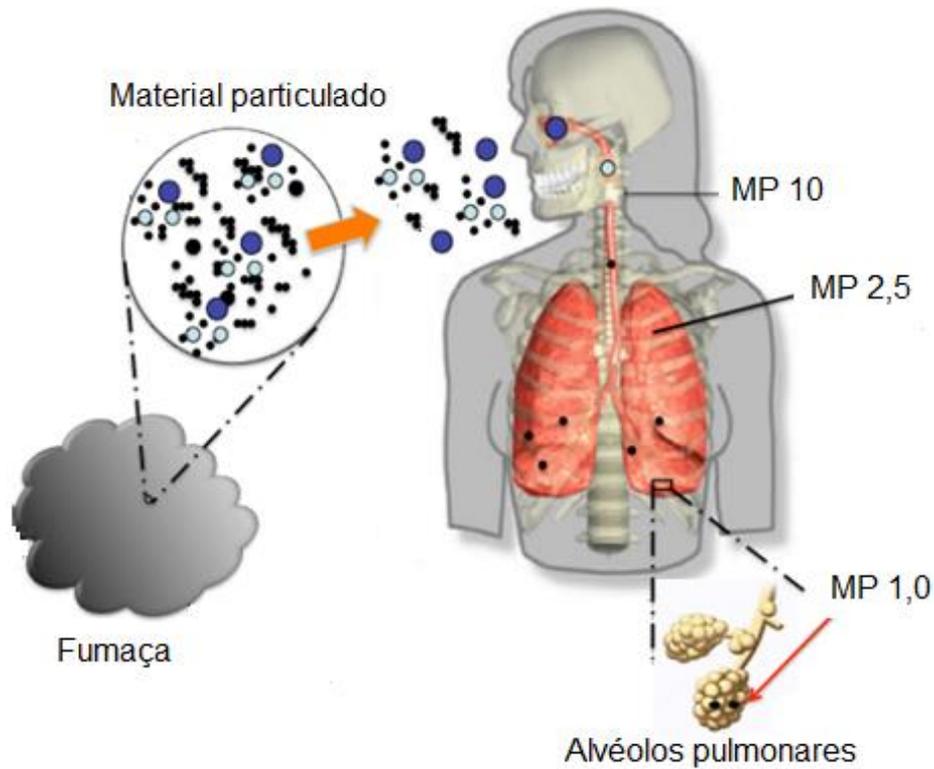
O aumento considerável da emissão de materiais particulados na atmosfera causa consequências na saúde da sociedade, modificando seu habitat. O ar poluído afeta diretamente o funcionamento do metabolismo celular do organismo, e consequentemente a saúde do indivíduo. O material particulado presente no ar adentra no organismo dos seres vivos pelo sistema respiratório, como apresentado na Figura 1, causando distúrbios tanto no sistema respiratório quanto no sistema circulatório, afetando várias funções fisiológicas (SILVA, 2008).

Uma classificação muito utilizada para os materiais particulados é o uso de um subscrito numérico para se referir a partículas com diâmetros inferiores a um determinado tamanho. As partículas denominadas  $MP_{1.0}$  é um conjunto de partículas com diâmetro aerodinâmico inferior a  $1,0 \mu m$ , ao passo que  $MP_{2.5}$  é para partículas menores que  $2,5 \mu m$  e  $MP_{10}$  para partículas menores que  $10 \mu m$  (BAIRD, CANN, 2011).

A Figura 2 mostra a faixa de tamanho de diferentes tipos de partículas que podem ser encontrados na atmosfera com alguns critérios de classificação do material particulado com base em seus diâmetros aerodinâmicos.

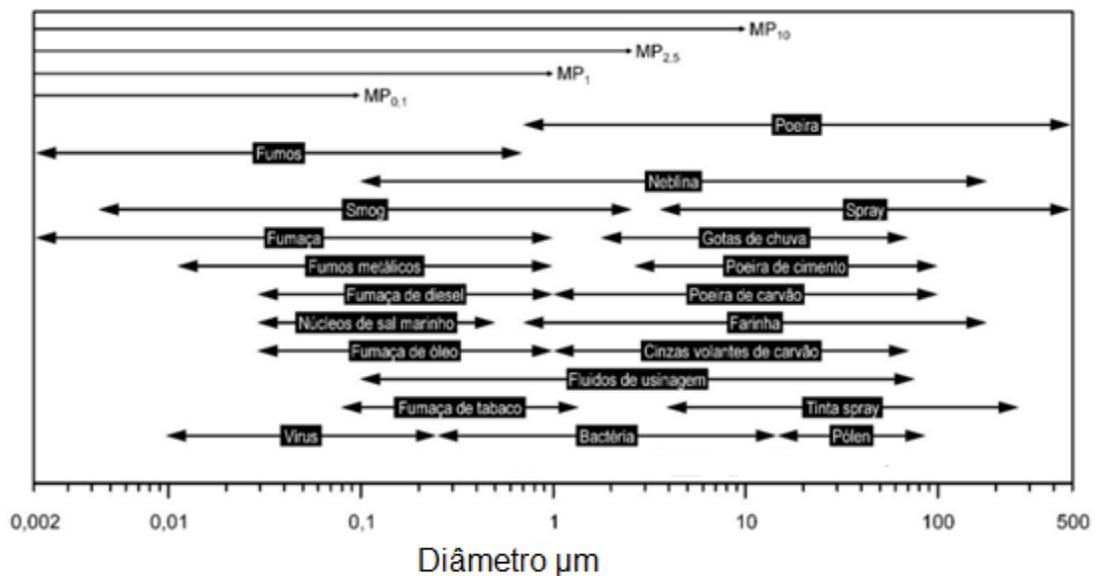
A remoção desse material particulado no ar ocorre pelo processo de separação gás-sólido que se dá pela filtração em filtro mangas, ciclones, precipitadores eletrostáticos ou ainda filtros híbridos dependendo do processo, sendo o filtro de mangas o processo mais eficaz e utilizado pelas indústrias.

**Figura 1** – Representação da deposição de material particulado nas vias aéreas.



Fonte: Adaptado de Guarieiro, Vasconcellos, Solci (2011).

**Figura 2** - Classificação por tamanho e composição do material particulado presente no ar atmosférico.



Fonte: Adaptado de Brito, Sodré, Almeida (2018).

### **3.3 Equipamentos de separação gás-sólido**

Os equipamentos de separação gás-sólido, como o nome já diz, são utilizados para remover por filtração os poluentes sólidos de uma corrente de gás. Os equipamentos mais conhecidos são: Precipitador eletroestático, ciclones e filtro mangas.

Os precipitadores eletrostáticos fazem a separação através de uma descarga de alta voltagem no eletrodo de descarga, assim as partículas são carregadas eletricamente. Onde por influência do campo elétrico existente entre o eletrodo de descarga e o eletrodo de coleta faz com que a partícula carregada migre para o eletrodo de coleta. Com tempo há formação de uma camada de partícula que é removida pelo sistema de limpeza e se deposita na tremonha de recolhimento (LISBOA, SCHIRMER, 2007).

Os ciclones são formados por um cilindro vertical com fundo cônico, onde, o gás juntamente com o material particulado entra através de uma entrada tangencial. As partículas são sujeitas a uma força centrífuga em que são empurradas para parede e depois descem para o fundo do ciclone. Porém são mais eficientes em partículas com o diâmetro superior a 5 $\mu$ m (LISBOA, SCHIRMER, 2007).

Os filtros de mangas assim como os outros equipamentos citados a cima, tem por finalidade a remoção de partículas dos gases usando um elemento filtrante, onde fica retido o pó. São os sistemas mais utilizados pela industrias por possuir uma boa relação custo-benefício. Por este ser o objeto de estudo, ele será melhor detalhado a seguir.

### **3.4 Filtro mangas**

O filtro de mangas, está dentro da categoria dos equipamentos de filtração gás-sólido, de alta eficiência de coleta, podendo chegar a valores superiores a 99,99%, dependendo do tamanho da partícula a ser coletada. Os mecanismos que estão geralmente envolvidos durante a filtração em filtro de mangas são a difusão, a força gravitacional, impactação inercial e a atração eletrostática (LISBOA, SCHIRMER, 2007). Sendo útil tanto para recuperação de um produto industrial quanto para a purificação do gás. Indicados para reter partículas de pó de cimento, gesso, negro de fumo, carvão, cal, silicato, borracha, entre outros.

Além da relação custo-benefício e da alta eficiência também possui outras vantagens como a possibilidade de recuperação fácil do material e a versatilidade, podendo ser adaptados para vários tipos de industrias e materiais particulados. Mas esse

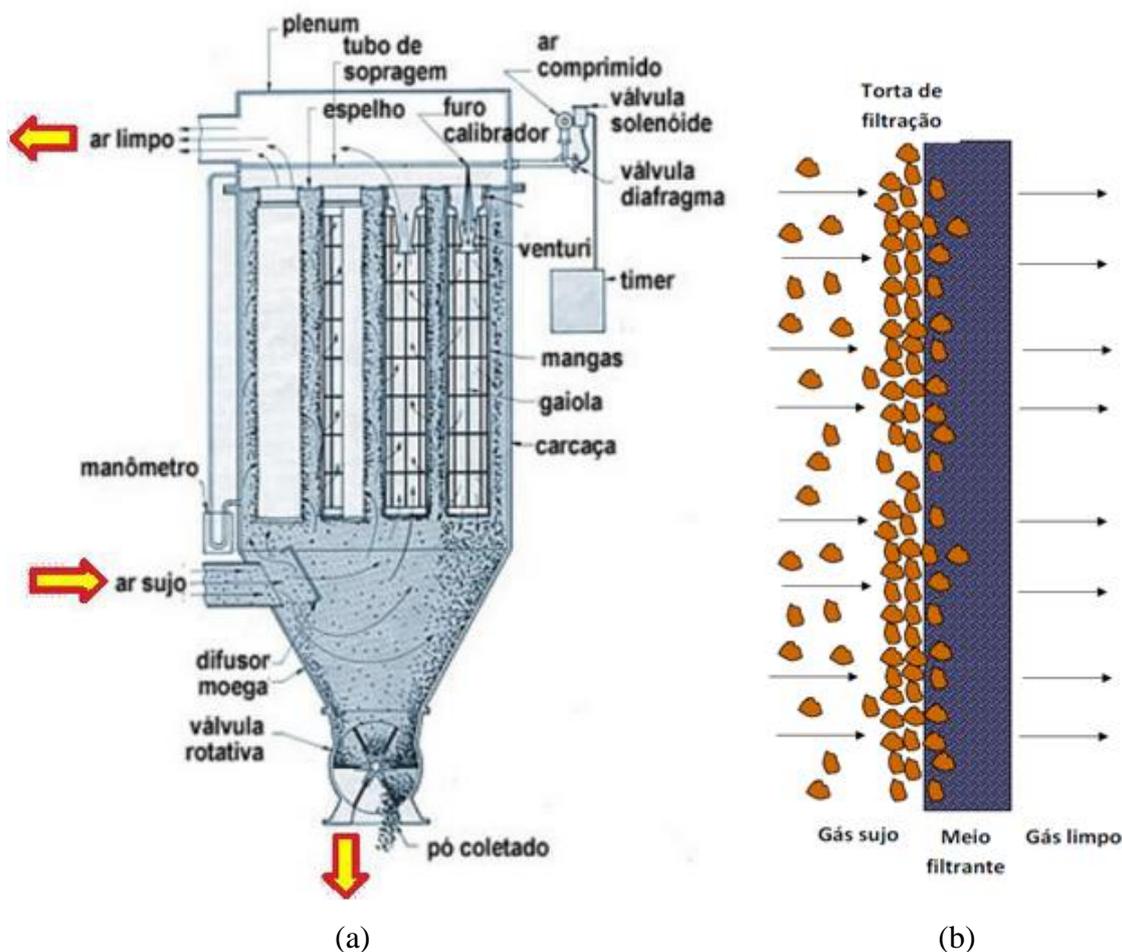
equipamento também possui desvantagens, como a necessidade de uma grande área, o alto custo de manutenção e operação (PACHECO, BERNARDINI, 2013).

### 3.4.1 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento é visto na Figura 3 (a), o ar sujo entra pela moega, que devido ao aumento de área sofre uma enorme queda de velocidade, assim as partículas maiores se depositam no fundo por causa da gravidade. As partículas menores são arrastadas pelo gás, que ao passar pelas mangas ficam retidas na superfície e nos poros, como visto na Figura 3 (b), formando a torta de filtração, passando apenas o gás limpo que é liberado pela parte superior.

As mangas são presas a suportes de metais, denominados gaiolas, que servem para a sustentação e evitar que se dobrem ou se choquem durante os processos de filtração e limpeza.

**Figura 3** - Esquema de funcionamento do (a) filtro de mangas e (b) meio filtrante.



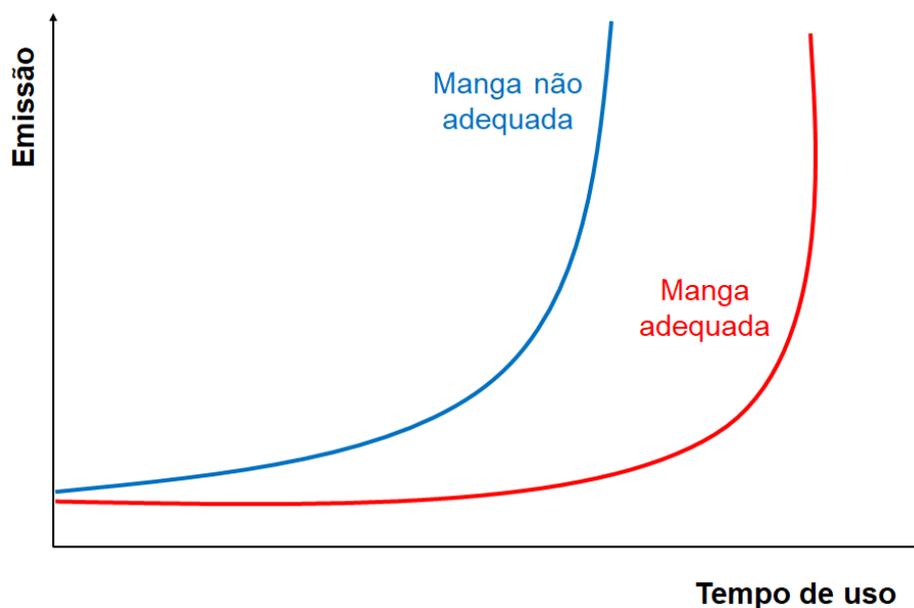
Fonte: Catálogo da Enfil (2000) e adaptado de Tanabe (2011).

### 3.4.2 Meios filtrantes

O meio filtrante, também chamado de magas filtrantes, a ser utilizado varia de acordo com as características do gás a ser filtrado como umidade, acidez, temperatura, e com o material particulado a ser retido, como tamanho e concentração das partículas.

A escolha mais adequada das mangas filtrantes para o processo fará com que tenha uma maximização da vida útil, assim o tempo de uso até a troca será maior. A vida útil é definida como o tempo econômico da manga, em que ela atende as exigências técnicas de emissão e eficiência de limpeza (SANTINI, 2011). Na Figura 4 apresenta-se uma comparação genérica entre a escolha da manga adequada e não adequada para o processo.

**Figura 4** - Comparação genérica entre mangas adequadas e não adequadas ao processo.



Fonte: Arquivo pessoal.

Na Tabela 1 é possível ver alguns exemplos de matérias mais comuns de meios filtrantes para filtros mangas com suas respectivas resistências a ácidos, bases e abrasão.

**Tabela 1** - Materiais comuns de meios filtrantes para filtros mangas.

Nome genérico	Nome comercial	Resistência à ácidos	Resistência à bases	Resistência à abrasão
Fibra vegetal	Algodão	Ruim	Excelente	Média
Poli-olefinas	Poli-propileno	Excelente	Excelente	Boa
Fibra animal	Lã	Boa	Ruim	Média
Poliamida	Náilon	Ruim a Razoável	Excelente	Excelente
Acrílico	Orlon®	Muito boa	Razoável	Média
Poliéster	Dacron®	Boa	Razoável	Excelente
Poliamida aromática	Nomex®	Razoável	Muito boa	Muito boa
Fluoro-carbono	Teflon®	Excelente, mas ruim para fluoretos	Excelente, mas ruim para tri-fluoretos, cloretos e metais alcalinos fundidos	Razoável
Vidro	Fibra de vidro®	Boa	Ruim	Ruim a Razoável
Polímero	P84®	Boa	Razoável	Razoável
Polímero	Ryton®	Excelente	Excelente	Boa

Fonte: Adaptado de McKenna, Turner (1989).

### 3.4.3 Estrutura dos meios filtrantes

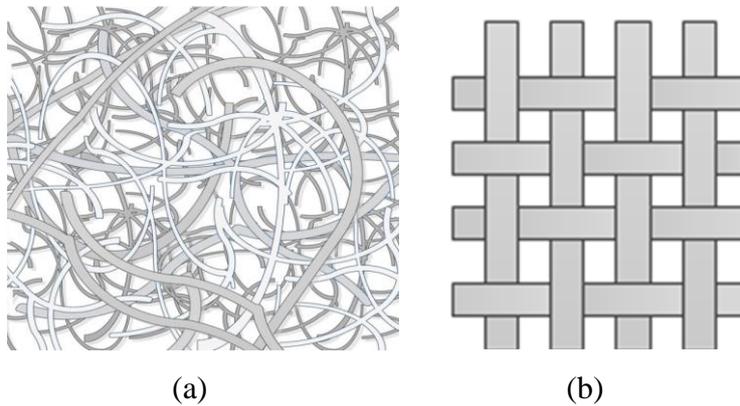
Os meios filtrantes podem ser classificados de duas maneiras de acordo com a função da sua estrutura, que são tecidos (*woven*) ou não tecidos (*nowoven*) como apresenta a Figura 5.

Os não tecidos é composta de uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída a partir de véu ou manta de fibras, ao acaso ou direccionalmente orientados, consolidado por processos mecânicos, químicos, térmicos ou ainda combinações destes (MARONI *et al.*, 1999; NORMA ABNT NBR 13370:2017).

Os tecidos são compostos por uma estrutura produzida a partir do entrelaçamento de um conjunto de fios disposto na direção longitudinal do tecido (*urdume*) e outro conjunto de fios dispostos na direção transversal do tecido (*trama*), com ângulos de aproximadamente 90° (MARONI *et al.*, 1999; NORMA ABNT NBR 12546:2017).

Os não-tecidos são mais utilizados na filtração de ar contendo material particulado pois possuem uma alta eficiência de coleta e permitem uma alta permeabilidade (MUKHOPADHYAY, 2009).

**Figura 5** – Estrutura dos meios filtrantes (a) não tecido e (b) tecido.



Fonte: Adaptado de Cirqueira (2017).

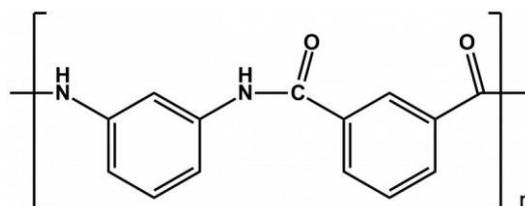
#### 3.4.4 Meio filtrante Meta-aramida

A meta aramida é uma poliamida que possui como característica principal a alta resistência ao calor, resistência à abrasão e resistência a degradação química (YAO, KIM, KIM, 2012). A alta resistência ao calor permite que a mesma seja usada em sistemas de filtração que pode atingir uma alta temperatura. A manga meta aramida é conhecida como Nomex®. A fibra de aramida nomex é baseada em uma poli(m-fenileno isoftalamida), a qual contém segmentos de cadeia meta-orientados (YANG, 1993).

As mangas meta-aramidas não são produzidas em larga escala como as fibras convencionais, como nylon e poliéster, por causa de seu elevado preço. São utilizadas principalmente em sistemas de filtragem de ar, freios, materiais de segurança, isolamento térmico e elétrico, vestuário ignífugos para bombeiros, cintos e mangueiras de automóveis (WIEBECK, HARADA, 2005; BLASCT, 2000).

O nomex possui grupos meta-fenileno, assim os grupos de amida estão ligados no anel fenila nas posições 1 e 3, como apresentado na Figura 6.

**Figura 6** - Estrutura molecular da meta-aramida.



Fonte: Fiber Line® (2021).

### 3.4.5 Construção dos meios filtrantes

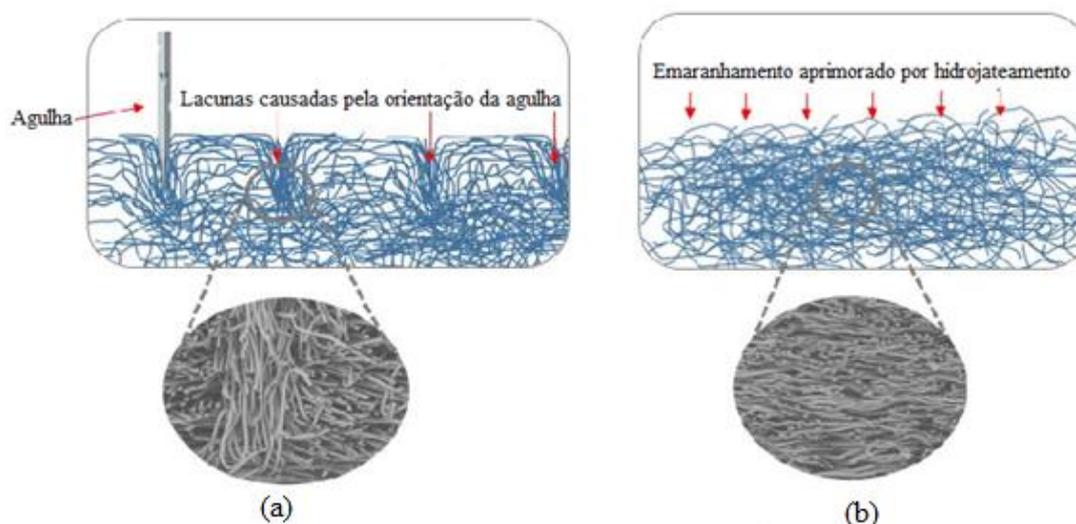
O método utilizado na fabricação dos meios filtrantes, pode influenciar nas características da manga de resistência física e química. Os métodos mecânicos são três, sendo eles a costura, o agulhamento e hidrojateamento.

O meio filtrante costurado, é produzido introduzindo fios de costuras na manta (MARONI *et al.*, 1999).

O meio filtrante agulhado, é produzido com fibras sintéticas confeccionadas por processos de agulhamento, onde há o entrelaçamento das fibras pela penetração alternada da agulha (MARONI *et al.*, 1999). O ato da agulha orientar-se de novo, formam pequenas lacunas que resulta em caminhos preferencias do ar, na penetração de sólidos e consequentemente perda da eficiência como mostra a Figura 7 (a).

Já o meio filtrante hidrojateado, também conhecido como hidro entrelaçamento, é produzido por fibras separadas pelo processo de hidrojateamento, onde um jato de água de alta pressão penetra e entrelaça as fibras numa distribuição mais uniforme do diâmetro dos poros (MARONI *et al.*, 1999). Possuindo um emaranhamento aprimorado, ou seja, o diâmetro médio das fibras é menor aumentando a eficiência de coleta, apresentado na Figura 7 (b).

**Figura 7** - Ilustração ampliada da superfície do meio filtrante (a) agulhado e (b) hidrojateado.



Fonte: Adaptado de Bondex (2019).

O método de hidrojateamento é exclusivo de emaranhamento de fibra, que produz um meio filtrante que oferece uma poderosa combinação de tamanho médios de poros

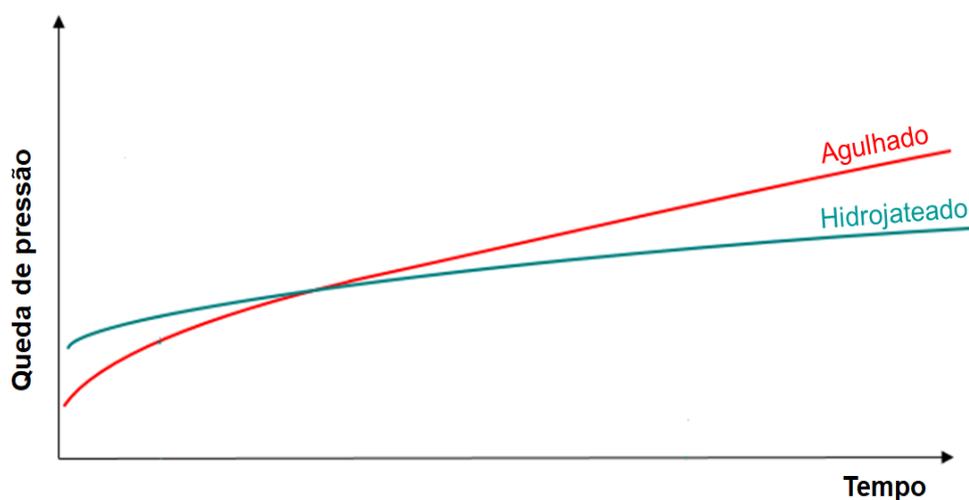
pequenos e um feltro forte. Esse menor tamanho médio de poros é resultado da melhora no emaranhamento das fibra (BONDEX, 2019).

O meio filtrante hidrojateado (540 g/cm<sup>2</sup>) para mangas filtrantes é uma nova tecnologia no mercado, em que promete realizar a coleta do material particulado de forma mais eficaz e que ao receber o pulso de limpeza, sua superfície fica muito mais limpa do que o meio filtrante agulhado (BONDEX, 2019). Uma limpeza mais eficiente faz com que aumente o tempo de filtração até a próxima limpeza.

Outra promessa, é que o hidrojateamento forma um feltro mais robusto que possa suportar a fadiga mecânica associada aos frequentes ciclos de limpeza por pulso, o que emprega maior durabilidade mecânica, ou seja, prolonga a vida útil do meio filtrante (BONDEX, 2019).

Na Figura 8 tem-se a comparação da queda de pressão ao longo do tempo do meio filtrante hidrojateado e agulhado, onde demonstra a melhoria da queda de pressão ao longo do tempo, apresentando baixos custos operacionais para os usuários.

**Figura 8** - Modelo de desempenho de queda de pressão observado a partir de teste VDI.



Fonte: Adaptado de Bondex (2019).

### 3.4.6 Tratamento superficial dos tecidos

O tecido que compõem o meio filtrante, costuma ser tratados para melhorar a durabilidade, facilidade de limpeza, entre outros. Esses tratamentos podem ser físicos, químicos e térmicos, como os processos descritos a baixo.

No processo de calandragem (*calendering*), as fibras são passadas por rolos com determinadas temperaturas e pressões para deixar o tecido plano ou liso, com o intuito se

ter uma superfície mais uniforme possível (DONOVAN, 1985). O processo de chamuscagem (*singering*), as fibras que se sobressai do tecido em que se assenta são queimadas por uma chama, para que não atrapalhe durante o processo de filtração ou limpeza e tenha uma superfície mais lisa.

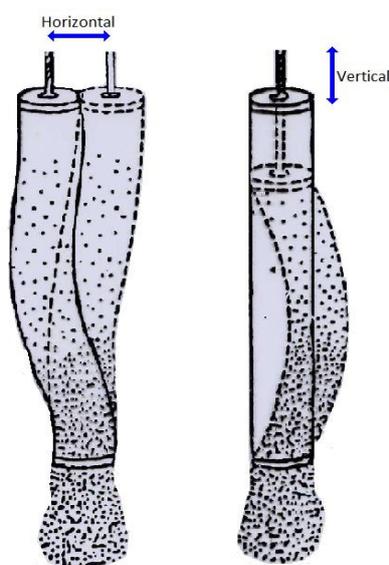
No processo de escovação (*napping*), ocorre a raspagem das fibras do tecido para se obter uma maior superfície de coleta (ROTHWELL, 1989). Já no processo de envidramento (*glazing*), as fibras são submetidas a altas temperaturas e pressões para fundir as fibras. Fibras essas que são revestidas por resinas naturais ou sintéticas (DONOVAN, 1985).

### **3.4.7 Limpeza do filtro mangas**

Após um determinado tempo de utilização, as partículas se depositam na parede externa das mangas formando uma torta e para que as mangas não entupam, é necessário fazer a limpeza, os mecanismos de limpeza dos filtros mangas são: agitação mecânica, ar reverso e jato de ar pulsante.

A técnica de limpeza por agitação mecânica é considerada a mais antiga, e apresenta uma estrutura de montagem simples e com manutenção de baixo custo, sendo indicada para sistema de pequeno e médio porte (MOREIRA, 1998). A agitação mecânica precisa de grandes áreas de filtração, pois acontece em batelada e deve conter mais de dois compartimentos de filtração, enquanto um está fazendo a filtração o outro está fazendo a limpeza. Na limpeza por agitação mecânica, a estrutura interna do equipamento que segura as mangas, se agita por meio de mecanismo mecânico. Isso faz com que a torta de particulado que está fixada na parede da manga se desprenda e regenere a permeabilidade da manga, permitindo assim, a passagem do gás para filtração como apresentado na Figura 9. A filtração acontece de dentro da manga para fora.

**Figura 9 - Limpeza por agitação mecânica.**



Fonte: Lisboa, Schirmer (2007).

A limpeza por ar reverso demonstrada pela Figura 10, é utilizado em equipamento compartimentados, pois é necessário interromper o gás que escoar em uma câmara para que seja enviado um fluxo de ar reverso ao sentido da filtração. Nessa reversão a torta de particulados se solta da superfície da manga e caia regenerando a permeabilidade das mangas dessa câmara. Para que a manga não se solte durante o jato de ar reverso, são compostas por anéis metálicos intermediários que prende as mangas (PACHECO, BERNARDINI, 2013). A limpeza por ar reverso, assim como a agitação mecânica, também precisa de grandes áreas pois acontece em batelada e é necessário parar o processo de filtração para realização da limpeza o que se faz necessário mais de dois compartimentos. Assim como no processo de limpeza por agitação a filtração acontece de dentro para fora.

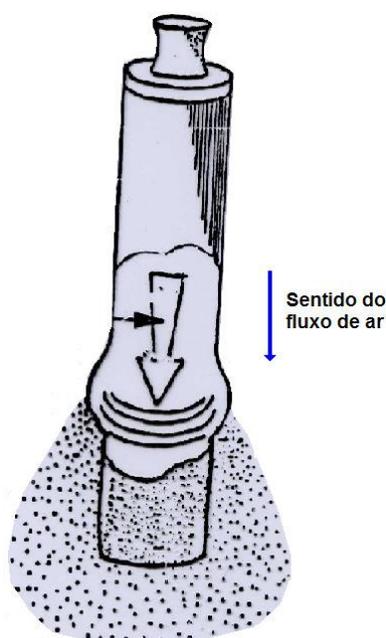
**Figura 10 - Limpeza por ar reverso.**



Fonte: Adaptado de Theodore, Buonicore (1988).

Já para o jato de ar pulsante, um pulso de ar de comprimido passa causando uma expansão das mangas e removendo o pó como mostra a Figura 11. As vantagens são duração do tempo de limpeza menor do que dos outros métodos, e não é necessário a interrupção do processo de filtração, ou seja, a limpeza acontece ao mesmo tempo da filtração. Mas como desvantagem é possível que danifique o meio filtrante, reduzindo o tempo de vida útil das mangas. É o mais utilizados pelas indústrias devido a maiores taxas de filtração e ser um equipamento mais compacto e econômico (TOZETTI, 2008). Neste método a filtração acontece de fora para dentro.

**Figura 11** - Limpeza por jato de ar pulsante.



Fonte: Lisboa, Schirmer (2007).

### 3.5 Teoria da Filtração

A filtração em filtros mangas é utilizada no setor industrial para limpeza do ar contendo altas concentrações de material particulado. O processo de filtração de gases ocorre em três etapas, começando a partir de um filtro virgem, onde cada etapa apresenta comportamentos e durações diferentes.

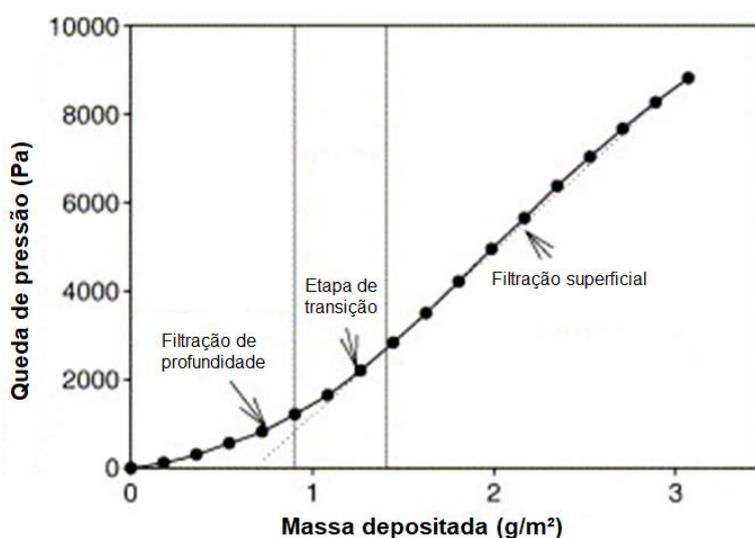
#### 3.5.1 Etapas da filtração

A primeira etapa de filtração chamada de filtração de profundidade, a captura das partículas se dá pelas fibras. No início, a penetração das partículas é intensa no interior

da manga, sendo retidas nos interstícios das fibras e a queda de pressão, aumenta proporcionalmente ao número de partículas coletadas (BARBOSA, 2014).

Como se trata de um processo contínuo a etapa de transição, marca a segunda etapa, sendo o processo de filtração que ocorre entre a primeira e terceira etapa. E a terceira etapa, denominada filtração superficial é quando há a formação de uma fina camada de partículas na superfície do meio filtrante. Essa fina camada é denominada de torta de filtração, pois a partir de sua formação, ela age como um novo meio filtrante, capturando o material particulado (BARBOSA, 2014). O momento em há a formação da fina camada, ou seja, da torta de filtração é denominado ponto de colmatação. Todas as etapas de filtração estão apresentadas na Figura 12.

**Figura 12** - Etapas de filtração.



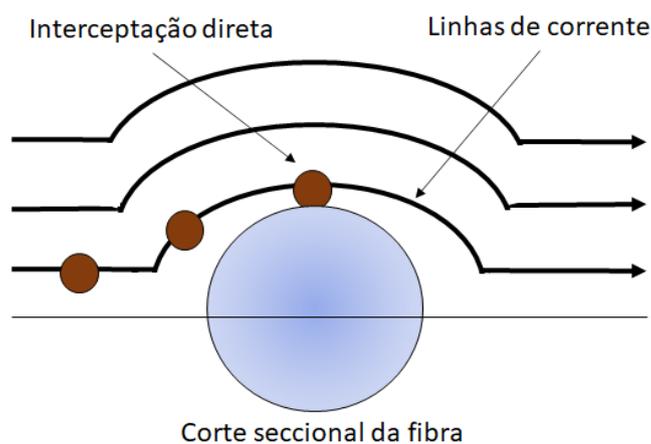
Fonte: Adaptado de Song, Park, Lee (2006).

### 3.5.2 Mecanismo de retenção das partículas

As partículas presentes no gás podem ser retidas pelas fibras das mangas por diferentes mecanismos, que estão descrito a seguir:

Interceptação direta ocorre quando as partículas de tamanho finito seguem as linhas de corrente do gás e por estar bem próxima da fibra, se choca e é coletada, como apresenta a Figura 13.

**Figura 13** - Mecanismo de captura por interceptação direta.

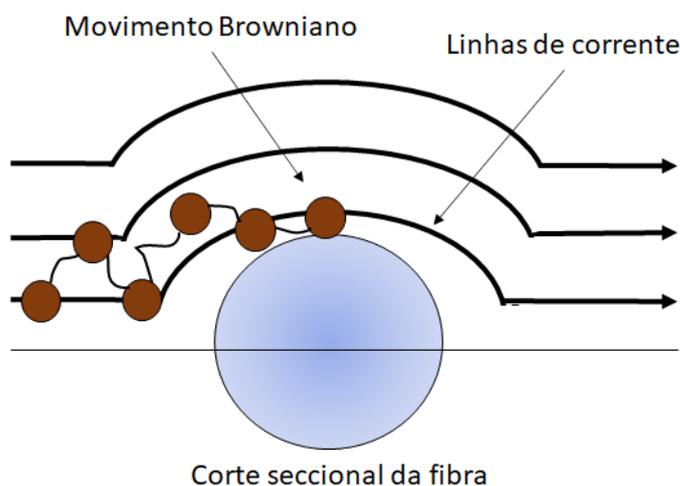


Fonte: Arquivo pessoal.

O mecanismo de captura por difusão, ocorre quando as partículas são tão pequenas que são influenciados pelos bombardeamentos de moléculas de gases que estão ao redor, assim a partícula tem sua rota alterada até atingir a fibra (HINDS, 1982).

A Figura 14 demonstra a alteração da rota da partícula devido á difusão ou movimento Browniano.

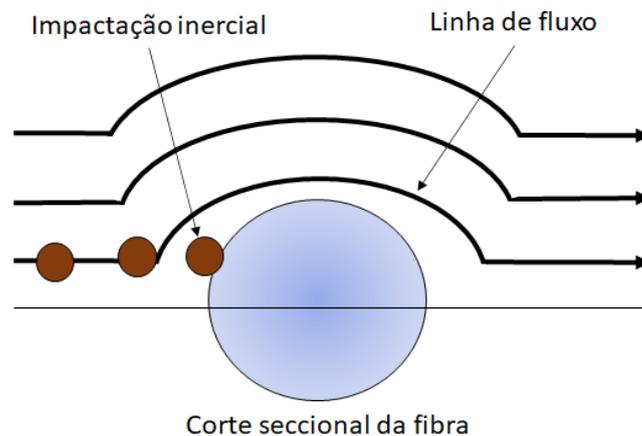
**Figura 14** - Mecanismo de captura por difusão.



Fonte: Arquivo pessoal.

No mecanismo de captura por impactação inercial, considera-se que a partícula tem massa e por consequência inercia, assim o gás ao escoar não passa pela fibra, ou seja, passa ao redor. Então se a partícula tem massa, ela segue reto na direção do escoamento do gás sendo interceptada pela fibra (HINDS, 1982) demonstrado na Figura 15.

**Figura 15** - Mecanismo de captura por impactação inercial.

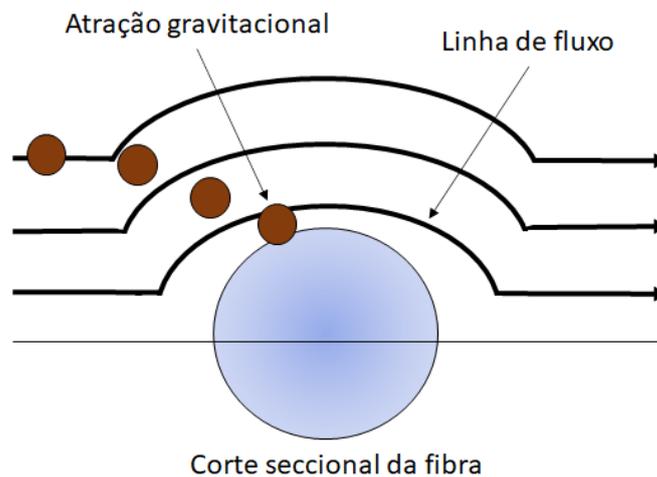


Fonte: Arquivo pessoal.

Na atração eletrostática, as partículas e o meio filtrante são atraídos pelas cargas elétricas, influenciando no aumento da eficiência e proporcionar a formação de tortas mais compactas o que facilita a passagem de gás (AGUIAR, 1995).

Já a atração gravitacional ocorre por causa da gravidade que atua sobre a partícula, que altera a trajetória normal, como é possível ver na Figura 16. Esse mecanismo decorre de grandes diâmetros de partículas e da baixa velocidade do gás.

**Figura 16** - Mecanismo de captura por gravidade.



Fonte: Arquivo pessoal.

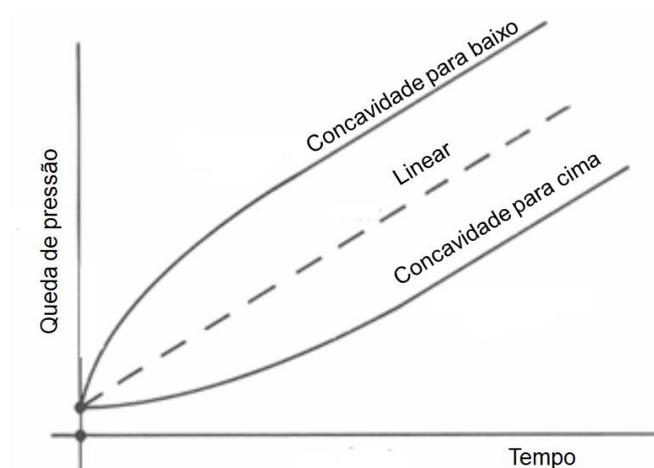
Estes mecanismos só são predominantes nos instantes iniciais da filtração, quando a torta de filtração ainda não está totalmente formada na superfície do meio filtrante.

### 3.5.3 Curva de filtração

A curva de filtração obtida através do gráfico de queda de pressão por tempo, pode apresentar três formas: curva com concavidade para baixo, curva linear e curva com concavidade para cima como apresentado na Figura 17. Esses comportamentos só podem ser vistos no primeiro ciclo de filtração, quando o meio filtrante ainda está limpo.

A curva com a concavidade para baixo é a mais comum observada nos meios filtrantes, ocorre quando há um aumento rápido da queda de pressão devido a formação rápida da torta. Já o curva linear ocorre quando não há a penetração do material particulado no tecido e a deposição do material particulado acontece só na superfície. A curva com concavidade par acima ocorre quando a torta já foi formada e a limpeza foi incompleta (DENNIS, WILDER, HARMON, 1981; DONOVAN, 1985).

**Figura 17** - Curvas de filtração.

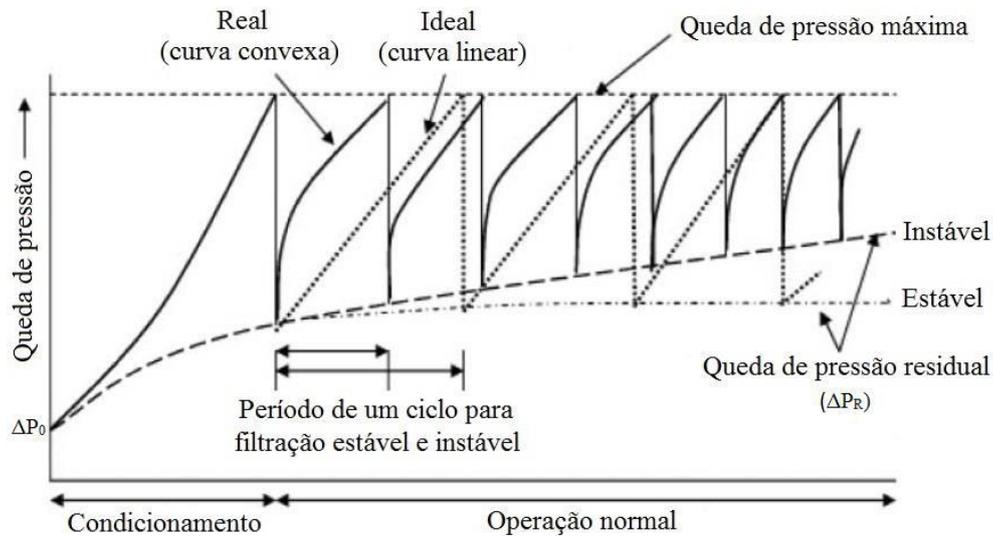


Fonte: Adaptado de Tieni (2005).

### 3.5.4 Ciclos de filtração

Com o andamento da filtração há o aumento da formação da torta e consequentemente o aumento da pressão sendo necessário a realização de limpeza dos meios filtrantes. O ciclo é determinado do início da filtração até a queda de pressão máxima, onde é realizado a limpeza, como apresenta a Figura 18. O tempo de vida útil de um meio filtrante pode ser definido pelo número de ciclos de filtração.

**Figura 18 - Ciclo de filtração.**



Fonte: Adaptado de Mukhopadhyay (2009).

O comportamento ideal para o processo de filtração é que a queda de pressão seja linear ao tempo de filtração, assim o tempo de filtração de um ciclo seria o mesmo para todos os ciclos (VDI 3926, 2003). Porém no comportamento real, isso não acontece, pois o tempo de filtração reduz quando comparado ao comportamento ideal. Tal fato, pode ocorrer devido a quantidade de material particulado retido no meio filtrante após a limpeza (MUKHOPADHYAY, 2009).

### 3.6 Parâmetros Relevantes de Filtração

Os parâmetros de filtração são importantes e necessário para a realização correta da filtração. Alguns parâmetros mais relevantes neste estudo de filtros de mangas estão descritos nos próximos itens.

#### 3.6.1 Permeabilidade

A permeabilidade do meio filtrante é a propriedade que determina o grau de facilidade com que um fluido submetido a uma diferença de pressão percola o meio poroso (BARBOSA, 2014). Sendo influenciada pela quantidade e formação dos poros que há no meio filtrante, levando em consideração as características do fluido e a interação com o meio filtrante (BARROS, 2014).

A permeabilidade pode ser obtida através da equação de Forcheimer, que é utilizada para escoamento de fluidos incompressíveis através de meios sólidos granulares e que também pode ser aplicado para os meios filtrantes:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K_1} V + \frac{\rho}{K_2} V^2 \quad Eq. (01)$$

Sendo que  $\Delta P$  é a queda de pressão,  $L$  é a espessura do meio filtrante,  $V$  é a velocidade de filtração,  $\mu$  é a viscosidade do gás,  $K_1$  é a constante de permeabilidade viscosa,  $K_2$  é a constante de permeabilidade inercial e  $\rho$  é a massa específica do gás.

Para escoamento laminares puramente viscosos, com baixas velocidades, o termo inercial da equação anterior pode ser desprezado, sendo assim o coeficiente de permeabilidade do meio poroso, pode ser descrito pela equação de Darcy:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K_1} V \quad Eq. (02)$$

A permeabilidade é, geralmente, informada pelo fabricante na ficha técnica do produto como a vazão volumétrica que atravessa a área útil do meio filtrante e que resulta em determinada queda de pressão no filtro. Como por exemplo, pode ter as seguintes unidades:  $(\text{m}^3/\text{min})/\text{m}^2@125\text{Pa}$ ,  $(\text{L}/\text{min})/\text{dm}^2@20\text{mmH}_2\text{O}$  ou  $\text{cfm}/\text{ft}^2@1/2''\text{H}_2\text{O}$  (CARVALHO, 2018).

### 3.6.2 Queda de pressão

A queda de pressão é definida como o trabalho necessário para o escoamento de um fluido prevalecer sobre as forças de atrito durante um escoamento interno. Esse valor é determinado pela diferença entre as pressões na entrada e saída do equipamento, onde passa pelo meio filtrante (ROCHA, 2010; GEANKOPLIS, 2003).

A queda de pressão em um filtro é considerada tão importante quanto a eficiência do mesmo, e as vezes até mais. Para o filtro de mangas não é difícil obter uma eficiência superior à 99,9%, porém, pressões muito altas podem inviabilizar totalmente o processo (MATTESON, 1987).

E a queda de pressão total pode ser determinada pela soma da queda de pressão do meio filtrante e da torta:

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_{\text{torta}} \quad Eq. (03)$$

As quedas de pressão do meio filtrante ( $\Delta P_0$ ) e da torta ( $\Delta P_{\text{torta}}$ ) são, respectivamente:

$$\Delta P_0 = K_m \cdot V \quad Eq. (04)$$

$$\Delta P_{\text{torta}} = \frac{K_T \cdot V \cdot M}{A} \quad Eq. (05)$$

Em que  $V$  é a velocidade de filtração,  $M$  é a massa que foi retida no meio filtrante,  $A$  é a área de filtração,  $K_t$  é a resistência da torta e  $K_m$  é a resistência específica do meio filtrante virgem.

### 3.6.3 Velocidade

A velocidade de filtração é a velocidade do gás na interface do meio filtrante é um fator fundamental na filtração de filtros mangas. A velocidade é que determina a área total de filtração do meio filtrante, que é necessário para realização da limpeza de um fluxo volumétrico de gás contendo material particulado (DUO *et al.*, 1997).

A velocidade superficial, também chamada de razão ar-pano, é a razão entre a vazão volumétrica e a área de filtração, como mostra a Equação 06 e pode ser expressa por m/mim ou cm/s.

$$V = \frac{Q}{A} \quad \text{Eq. (06)}$$

Em que  $V$  é a velocidade de filtração,  $Q$  é a vazão volumétrica do processo e  $A$  é área útil de filtração.

Os fatores que influenciam na velocidade são as características do pó, tamanhos do material particulado, temperatura dos gases, concentração do pó, método de limpeza e o tipo de tecido (BARBOSA, 2014).

Silva *et al.* (1999) estudaram a influência da velocidade de filtração na formação e na remoção das tortas de filtração, utilizando a rocha fosfática como material particulado. Durante os ensaios notaram o aumento da força de adesão com o ampliação da velocidade de filtração.

### 3.6.4 Porosidade do meio filtrante

A porosidade é definida como a razão entre o volume de espaços vazios e o volume total presentes no meio filtrante. Como passar do tempo de filtração, as partículas ficam retidas nos poros do meio filtrante, diminuindo a porosidade do meio e aumentando a queda de pressão (CARVALHO, 2018). Os meios filtrantes devem apresentar uma porosidade que não se sucede em uma alta resistência ao fluido, mas também que evite a penetração do material particulado no tecido (SALVINI, INNOCENTINI, PANDOLFELLI, 2000).

O método indireto baseia-se em equações que podem ser encontradas na literatura. A equação de Ergun (1952) é a uma das mais utilizadas para determinar a porosidade de um meio filtrante:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150(1 - \varepsilon)^2 \mu \cdot V}{\varepsilon^3 \cdot df^2} + \frac{1,75(1 - \varepsilon) \rho \cdot V^2}{\varepsilon^3 \cdot df} \quad Eq. (07)$$

Sendo  $\Delta P$  a diferença de pressão,  $L$  a espessura da camada porosa,  $\varepsilon$  é a porosidade do meio poroso,  $\mu$  é a viscosidade do gás,  $V$  é a velocidade de filtração,  $df$  o diâmetro médio das fibras do meio filtrante e  $\rho$  é a densidade do gás.

MacDonald *et al.* modificou a as constantes empíricas de Ergun levando em consideração a rugosidade da partículas:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{A(1 - \varepsilon)^2 \mu \cdot V}{\varepsilon^3 \cdot df^2} + \frac{B(1 - \varepsilon) \rho \cdot V^2}{\varepsilon^3 \cdot df} \quad Eq. (08)$$

Onde, para partículas lisas e regulares,  $A$  é 180 e  $B$  é 1,8, para partículas rugosas e irregulares  $A$  é 180 e  $B$  é 4.

Langmuir (1942, apud DAVIES, 1973) desenvolveu um correlação de fluxo viscoso através de um leito de cilindros com raio  $R$  paralelo a direção do fluxo de gás e incluiu o fator 1,4 para incluir cilindros dispostos em diferentes ângulos em relação ao fluxo de gás:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{V \cdot \mu \cdot g}{df^2} \cdot \left( \frac{1,4 \cdot 4(1 - \varepsilon)}{-\ln(1 - \varepsilon) + 2(1 - \varepsilon) - (1 - \varepsilon)^2/2 - 3/2} \right) \quad Eq. (09)$$

A equação obtida por Davies (1953) é oriunda de uma combinação de dados experimentais de densidade de empacotamento das fibras de diferentes materiais:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{V \cdot \mu \cdot g}{df^2} \cdot 16(1 - \varepsilon)^{1,5} \cdot (1 + 56(1 - \varepsilon)^3) \quad Eq. (10)$$

Onde  $\Delta P$  a diferença de pressão,  $L$  a espessura da camada porosa,  $\varepsilon$  é a porosidade do meio poroso,  $\mu$  é a viscosidade do gás,  $V$  é a velocidade de filtração,  $g$  é a aceleração gravitacional e  $df$  o diâmetro médio das fibras do meio filtrante.

### 3.6.5 Porosidade da torta de filtração

No processo de filtração, uma camada de pó é formada na superfície do meio filtrante que pode sofrer compactação, que reduz a porosidade e aumenta a queda de pressão. A porosidade da torta experimental direta é difícil de ser determinada, pois a torta de filtração é muito frágil. Porém essa porosidade pode ser obtida de forma indireta

através da resistência de um meio poroso ao escoamento do fluido (TANABE, 2011 apud COURY, 1983).

Coury (1983) desenvolveu um método de determinar a porosidade, denominada método indireto, onde se modificou a Equação de Ergun. Considerando a espessura como a espessura da torta de filtração, que pode ser obtido através da Equação abaixo:

$$m = q \cdot t = L \cdot A \cdot \rho_p \cdot (1 - \varepsilon) \quad Eq. (11)$$

Onde  $m$  é a massa da torta,  $q$  é a vazão mássica de pó,  $A$  é a área útil de filtração,  $\rho_p$  é a densidade da partícula e  $t$  é o tempo de filtração.

Substituindo a Equação 11 na Equação 7, tem-se a Equação 12:

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{150(1 - \varepsilon) \cdot \mu \cdot q \cdot v}{\varepsilon^3 \cdot A \cdot \rho_p \cdot dp^2} + \frac{1,75 \cdot q \cdot \rho \cdot V^2}{\varepsilon^3 \cdot A \cdot \rho_p \cdot dp} \quad Eq. (12)$$

Em que  $\Delta P$  é a queda de pressão no meio filtrante com a torta,  $t$  é o tempo de duração de um ciclo,  $\varepsilon$  é a porosidade da torta,  $\rho$  é a densidade do ar,  $\mu$  é a viscosidade do ar,  $\rho_p$  é a densidade da partícula,  $q$  é a vazão mássica de pó,  $v$  é a velocidade superficial,  $dp$  é o diâmetro médio de Sauter da partícula ( $D[3,2]$ ),  $A$  é a área útil de filtração.

Modificando também a equação de MacDonald et al., substituindo a Equação 11, tem-se a Equação 13:

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{A(1 - \varepsilon) \cdot \mu \cdot q \cdot v}{\varepsilon^3 \cdot A \cdot \rho_p \cdot dp^2} + \frac{B \cdot q \cdot \rho \cdot V^2}{\varepsilon^3 \cdot A \cdot \rho_p \cdot dp} \quad Eq. (13)$$

Já o método direto baseia-se na determinação experimental da porosidade através da análise de imagens obtidas por microscópio em um software como foi realizado por Aguiar (1995).

Segundo Tanabe (2011) os meios filtrantes com características de filtração superficial apresentam tortas de filtração mais compactas e resistentes ao escoamento do gás.

### 3.6.6 Eficiência de coleta

O fator mais importante na operação de filtros de mangas é a eficiência de coleta do meio filtrante. A eficiência de coleta é representada em porcentagem, e descreve a quantidade de partículas que foram retidas no meio filtrante (HINDS, 1982).

A eficiência de coleta ( $\eta$ ) refere-se à fração de partículas que ficaram retidas no meio filtrante após o processo de filtração:

$$\eta(\%) = \left( \frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \times 100 \quad Eq. (14)$$

Sendo que  $C_i$  e  $C_f$  representam as concentrações das partículas no início e no final da filtração. Com as informações das concentrações antes e após o meio filtrante é possível calcular o valor de eficiência para cada diâmetro da partícula.

Quando se possui um filtro absoluto na jusante do equipamento do filtro em teste é possível calcular a eficiência gravimétrica:

$$\eta(\%) = \left( \frac{M_{FT}}{M_{FT} + M_{FA}} \right) \times 100 \quad Eq. (15)$$

Sendo  $M_{FT}$  a massa do material particulado retido no filtro em teste e  $M_{FA}$  a massa do material particulado no filtro absoluto.

### 3.6.7 Umidade e Temperatura

Com a umidade, as partículas do material particulado ficam mais unidas por causa das pontes líquidas, formando aglomerações. E as forças de coesão e adesão são proporcionais a essas pontes líquidas, ou seja, quanto mais pontes líquidas tiver mais forte são as forças de coesão e adesão. Com baixa umidade, essas forças são fracas e assim o material particulado fica mais disperso e se adere mais facilmente as fibras do meio filtrante.

Boudhan *et al.* (2019) notaram durante a avaliação a influência da umidade do ar no meio filtrante, que a queda de pressão do filtro de mangas aumentou e a eficiência de limpeza da manga reduziu.

A temperatura exerce grande influência em parâmetros de filtração, como queda de pressão, resistência específica da torta e/ou emissão do material particulado.

Mukhopadhyay, Pandit, Dhawan (2016) verificou os efeitos das altas temperaturas na filtração com meios filtrantes de poliimida aromática com tela de teflon e poliimida aromática com tela de poliimida aromática. Os autores concluíram que houve a diminuição de emissão de material particulado com o aumento da temperatura, porém a queda de pressão aumentou com o aumento da temperatura.

### 3.6.8 Forças de coesão e adesão

A força de adesão pode ser definida como a força que exercida para que a partícula se adere a superfície do meio filtrante, enquanto a força de coesão é a força exercida para que uma partícula se adere a outra.

A determinação da força de adesão entre as partículas é de grande interesse para o setor industrial. Durante os procedimentos industriais essas forças são responsáveis pela aglomeração formada nos processos, que em alguns casos são desejáveis e em outros indesejáveis (AGUIAR, 1995).

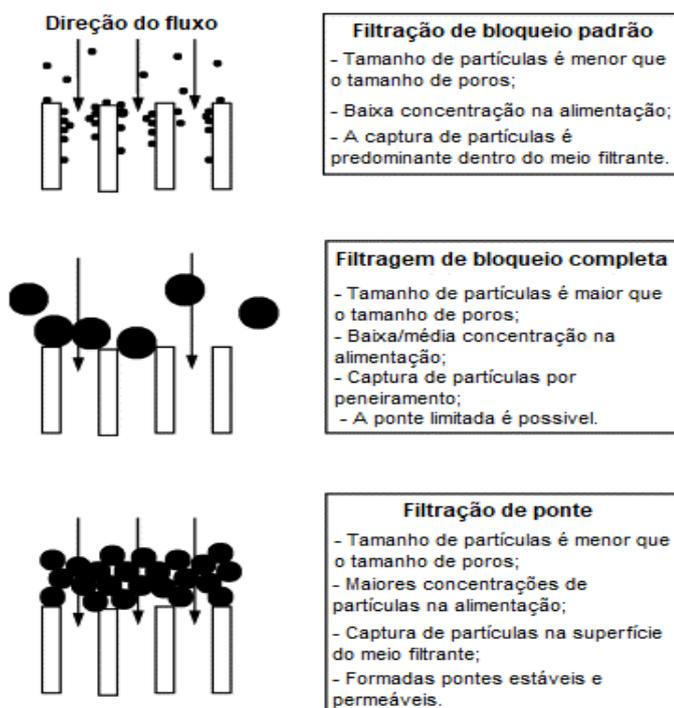
Existe alguns fatores que que pode influenciar nessas forças, tornando-as mais forte ou mais fracas, como por exemplo a umidade e a velocidade de filtração, visto anteriormente.

### 3.6.9 Deposição de partículas no meio filtrante

A deposição das partículas no meio filtrante é uma consequência do processo de filtração, onde a quantidade de material particulado depositado varia de acordo com o meio filtrante, material particulado e a interação entre ambos.

As partículas que são maiores que os poros do meio filtrante se depositam na superfície do meio filtrante, formando a torta. Já quando as partículas são menores que os poros do meio filtrante, essa deposição das partículas ocorre dentro dos poros do meio filtrantes e a torta se forma devido a acumulação gradual das partículas no meio filtrante conforme apresentado na Figura 19 (WAKEMAN, 2007).

**Figura 19** - Mecanismos de filtração.



Fonte: Adaptado Wakeman, 2007.

Durante a filtração, há a formação da camada de pó na superfície do meio filtrante e essa camada pode sofrer compactação, que resulta na redução da porosidade da torta de filtração e conseqüentemente um aumento na queda de pressão (TANABE, 2011).

Tanabe *et al.* (2011) investigou a deposição de partículas em três tipos de meios filtrantes sintéticos utilizando o microscópio eletrônico de varredura. Os resultados mostraram que a deposição de partículas no meio filtrante de polipropileno apresentou menor profundidade que os meios filtrantes de poliéster e acrílico.

Aguiar (1995) determinou a porosidade da torta de filtração através de imagens da seção transversal torta/meio filtrante, obtidas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV). As análises das imagens se deram através do software Imagem Pro Plus e foi denominado como método direto.

### **3.7 Estudo da arte**

Os estudos sobre filtração de gases contendo materiais particulados são realizados, em sua maioria, com tecidos como poliéster, polipropileno, nylon e acrílico, pois possuem o custo relativamente inferior (PACHECO, 2002) e são fáceis de ser encontrados quando comparados com os outros tecidos e também são avaliados apenas os parâmetros como umidade, velocidade de filtração, temperatura e outros. Em relação, as condições operacionais, existem poucos trabalhos em que as condições são de operação industrial.

Ceron (2016) avaliou os parâmetros de emissão, perda de carga, permeabilidade e tração das mangas de poliéster e de poliéster com membrana de PTFE virgens e com até 6 meses de uso no processo de filtração de carvão com granulometria média entre 1 a 5  $\mu\text{m}$ . Os testes de amostragem de emissão de particulados foram realizados de forma direta e contínua em dutos de chaminé do filtro, de acordo com a norma NBR12019:1990, nas condições plenas de carga do filtro. Os autores comprovaram que há um aumento na emissão e na perda de carga, uma diminuição na permeabilidade e tração com o tempo de uso. E também que a membrana PTFE em não tecidos para filtração de particulados nos processos de carvão apresentaram controle de emissão, perda de carga, permeabilidade e tração significativamente superior em relação ao poliéster.

Manzano-Agugliaro, Carrillo-Valle (2016) converteram um precipitador eletrostático em filtros mangas com limpeza de jato de ar pulsante, utilizando a carcaça do precipitador. As condições utilizadas foram: temperatura do gás de 130°C, fluxo total de  $2,6 \times 10^6 \text{ Nm}^3/\text{h}$  e alimentação de  $15\text{g}/\text{Nm}^3$  com partículas de tamanho médio de 4  $\mu\text{m}$ .

Em que durante os testes com mangas de feltro P84 / PPS com reforço de PPS e tratamento de superfície PTFE, observou-se que a concentração reduziu de 15 g/Nm<sup>3</sup> na entrada do filtro para uma média horária de 20 mg/Nm<sup>3</sup> na saída do filtro com todos os compartimentos em serviço.

Förster *et al.* (2016) utilizou um feltro de agulha comercial feito de politetrafluoroetileno (PTFE) e fibras de poliimida para filtração do pó de alumina comercial (Pural NF, Sasol), representando as partículas de cinza volante na planta de incineração de resíduos. Os ensaios foram realizados com a alimentação de 5g/m e velocidade de rosto de 2 m/min que quando atingia a pressão de 1000 Pa era aplicado um pulso de 5 bar. Os resultados mostraram que a partir de uma queda de pressão de 500 Pa, a maioria das nanopartículas que são coletados no filtro e a eficiência torna-se próxima de 1.

Carvalho (2018) comparou as mangas de poliéster e de poliéster com PTFE de dois fabricantes na filtração de material particulado proveniente do despoejamento secundário da aciaria. Os experimentos foram realizados de acordo com a norma VDI 3926. Os resultados apontaram que o poliéster sem PTFE do fabricante A foi mais eficiente que o poliéster sem PTFE do fabricante B na coleta de PM<sub>2.5</sub> e PM<sub>1.0</sub> antes e após os 20 ciclos de filtração. Já os meios filtrantes com PTFE apresentaram eficiências de coleta próximas a 100% tanto para nano quanto para micropartículas.

Boudhan *et al.* (2019), ao avaliar a influência da umidade do ar no meio filtrante, testou uma estrutura não tecida composta por fibras de Teflon (politetrafluoroetileno, PTFE) com aerossol de carbono não higroscópico. Foram realizados dez ensaios em condições secas a 150 °C e dez ensaios com umidade absoluta de 73g/m<sup>3</sup>, todos com queda de pressão máxima de 15 mmH<sub>2</sub>O e velocidade superficial de 1,14 m/min. Os resultados revelaram que a umidade do ar influencia significamente no desempenho do filtro de mangas. A umidade melhorou eficiência de coleta de partículas entre 110 e 300 nm de diâmetro e também aumentou a queda de pressão do filtro de mangas e reduziu a eficiência de limpeza da manga.

Li *et al.* (2019), investigaram no desempenho filtração de cinzas volantes, menores que 75µm em meios filtrantes de fibras de poliéster em um sistema com limpeza de jato de ar pulsante, os efeitos do tamanho da partícula e da queda de pressão máximo. Os parâmetros utilizados na filtração foram: velocidade de 1,39 m/min, concentração de alimentação de material particulado de 9,74 g/m<sup>3</sup>, queda de pressão inicial de 3,9 mmH<sub>2</sub>O, pressão de pulso de 5 bar e tempo de pulso de 150 ms. Os autores constataram que se manter a queda de pressão máxima e aumentar o tamanho das partículas, há uma redução

na média da queda de pressão, no número de pulso de limpeza e na emissão média, o que levaria a uma maior eficiência. E se manter o tamanho da partícula e reduzir a queda de pressão máxima, há um aumento na média da queda de pressão, no número de pulsos de limpezas e na emissão média, que foi proveniente de uma menor eficiência.

Já Costa (2020) analisou a filtração de material particulado oriundo da etapa de sinterização primária de uma siderurgia, em tecido de poliimida aromática sem costura. Foram realizados 30 ciclos de filtração de acordo com a norma VDI 3926, onde ao atingir a que de pressão máxima de 100 mmH<sub>2</sub>O era aplicado um pulso de ar reverso com pressão de 5 bar e duração de 60 ms. Os resultados constataram que o meio filtrante analisado se mostrou eficiente, apresentando uma eficiência mássica de 99,68% no primeiro ciclo de filtração e de 99,83% no trigésimo ciclo.

Diante desse cenário, torna-se necessário explorar ainda mais a filtração de filtro de mangas simulando condições operacionais da indústria siderúrgica. Avaliando a eficiência de filtração de mangas com diferentes técnicas de fabricação durante o processo de filtração visando atender as legislações ambientais vigentes.

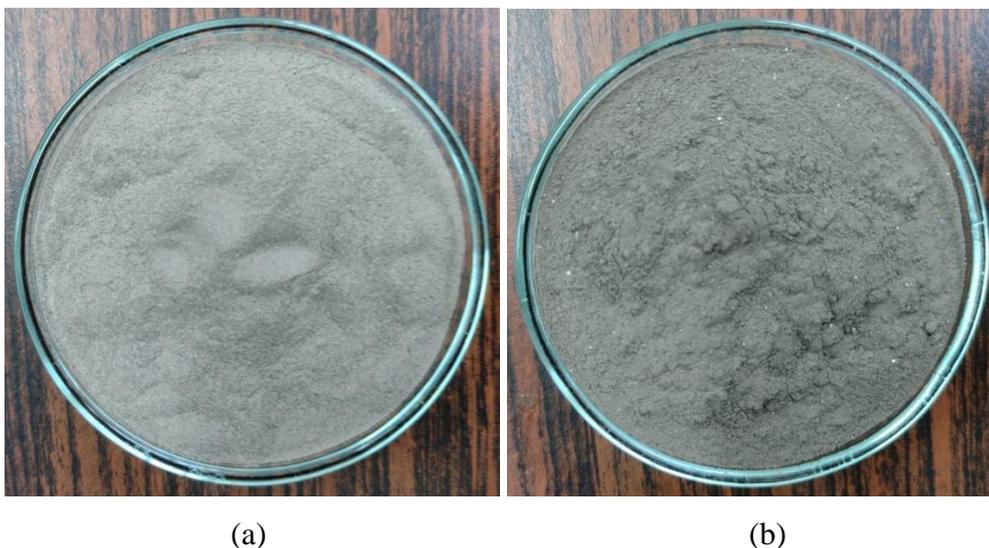
## 4 METODOLOGIA

Este capítulo visa apresentar a metodologia dotada com o intuito de atender os objetivos geral e específicos propostos, onde serão realizados ensaios com materiais distintos em laboratórios do Departamento de Engenharia Química (DEQ) das Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), para traçar um estudo comparativo do desempenho dos meios filtrantes com diferente construção.

### 4.1 Caracterização do Material Particulado

Os materiais particulados utilizados nesse trabalho foram dois e estão apresentados na Figura 20, (a) rocha fosfática e (b) pó da dessulfuração. A rocha fosfática foi proveniente do próprio Laboratório de Controle Ambiental (LCA) do DEQ da UFSCar. E o pó da dessulfuração foi cedido por uma siderurgia, onde foram coletadas seis amostras nas seis câmaras de filtros mangas, uma amostra no defagulhador e uma amostra na descarga do filtro do sistema de despoejamento da dessulfuração de gusa, para se ter uma amostra do que entra na alimentação.

**Figura 20** – Amostras de materiais particulados (a) rocha fosfática e (b) pó da dessulfuração.



Fonte: Arquivo pessoal.

Antes de iniciar a caracterização e as análises, o material particulado foi peneirado com uma peneira granulométrica de abertura 0,5 mm (32 *mesh*) e após foi seco em estufa a 70 °C por 24 horas para remoção da umidade.

Para a caracterização desses materiais particulados foi feito a análise de massa específica, de composição química e distribuição granulométrica, todas as análises foram realizadas em triplicatas.

A massa específica, foi possível encontrar através da picnometria a hélio no equipamento *AccuPyc 1330 Micromeritics*, disponível no Laboratório de Controle Ambiental da UFSCar. A densidade para amostra de rocha fosfática apresentou um valor médio igual a  $2,9172 \pm 0,0026 \text{ g/cm}^3$ , já a amostra do pó da dessulfuração apresentou uma densidade média de  $3,2070 \pm 0,0012 \text{ g/cm}^3$ .

A análise química foi feita por fluorescência de raio x (XRF) no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do DEMa da UFSCar. Na Tabela 2, apresenta-se os resultados encontrados na análise de composição.

**Tabela 2** - Composição química dos materiais particulados.

<b>Rocha fosfática</b>		<b>Pó da dessulfuração</b>	
<b>Componente Químico</b>	<b>Massa (%)</b>	<b>Componente Químico</b>	<b>Massa (%)</b>
Ca	50,67	Ca	53,49
P	18,31	Fe	29,18
Si	16,76	Zn	4,35
Al	5,18	K	4,09
Fe	5,07	S	3,12
K	2,29	Si	1,74
Sr	0,98	Cl	1,68
Ti	0,48	Mg	0,80
Outros	0,25	Outros	1,47

Fonte: Arquivo pessoal.

A partir da Tabela 2 é possível ver que ambos os materiais particulados possuem composição parecida o que sugere um comportamento de filtração parecido. Observou-se também uma grande porcentagem mássica de cálcio no pó da dessulfuração, esse alto valor é devido o processo de dessulfuração do gusa ser realizado com calcário.

Já a distribuição granulométrica por volume foi feita através do equipamento *Malvern Mastersizer MicroPlus*, disponível no Laboratório de Controle Ambiental do DEQ da UFSCar. Onde os valores obtidos para o material particulado usado nos ensaios, são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3** - Distribuição granulométrica dos materiais particulados.

Distribuição granulométrica	Rocha fosfática	Pó da dessulfuração
D (v, 0,1) $\mu\text{m}$	$0,2533 \pm 0,0058$	$0,4833 \pm 0,0231$
D (v, 0,5) $\mu\text{m}$	$17,5733 \pm 0,7450$	$39,1433 \pm 1,3018$
D (v, 0,9) $\mu\text{m}$	$86,0200 \pm 3,3752$	$133,0967 \pm 5,2783$

Fonte: Arquivo pessoal.

Também foram analisados a distribuição granulométrica do defagulhador e de cada câmara. Na Tabela 4, apresenta-se os valores médios de diâmetros volumétricos em cada câmara. O material da descarga apresentou a seguinte distribuição:

$$D (v, 0,1) = 36,1700 \pm 0,6564;$$

$$D (v, 0,5) = 112, 5367 \pm 3,7374;$$

$$D (v, 0,9) = 366,4333 \pm 18,3805.$$

Nota-se que as partículas maiores ficam retidas no defagulhador e só as menores seguem para os filtros manga, reduzido o volume de material particulado que chega ao meio filtrante, melhorando a eficiência de filtração e reduzindo os desgastes por abrasão. Essas partículas maiores, ao chegar nos meios filtrantes podem queima-los, causando aberturas e até mesmo faíscas que pode levar a incêndios.

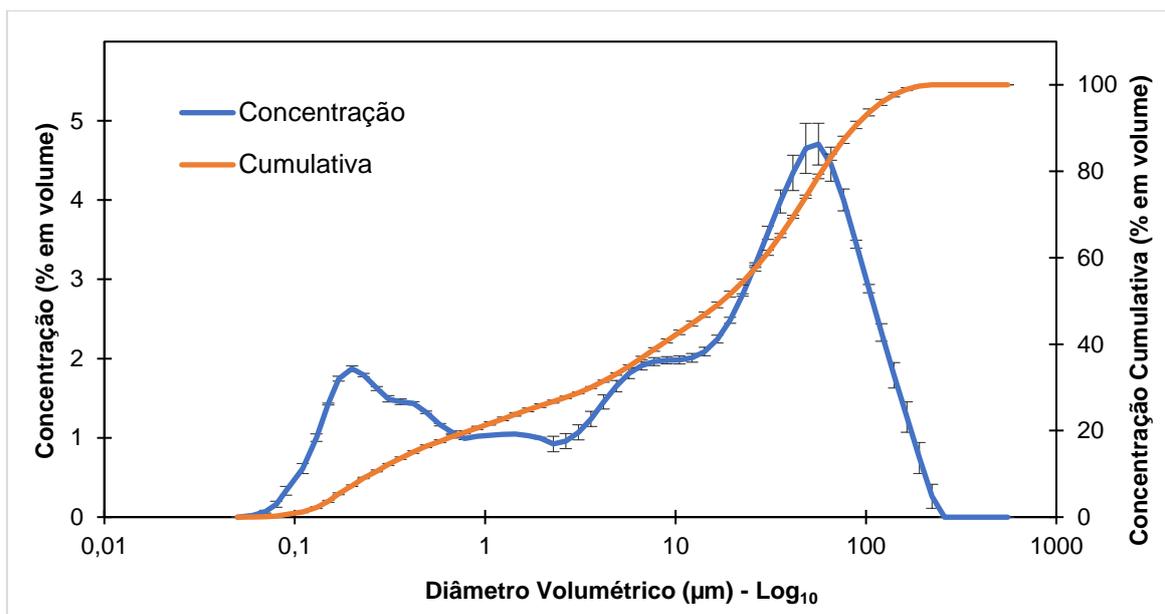
**Tabela 4** - Distribuição granulométrica do material particulado em cada câmara.

Câmara	Diâmetro Volumétrico ( $\mu\text{m}$ )		
	D (v, 0,1)	D (v, 0,5)	D (v, 0,9)
1	$0,3167 \pm 0,0058$	$22,3533 \pm 0,6170$	$100,3933 \pm 10,8364$
2	$0,5033 \pm 0,0404$	$33,7233 \pm 1,1705$	$166,2767 \pm 1,6803$
3	$0,3367 \pm 0,0058$	$27,4767 \pm 1,2901$	$122, 7233 \pm 10,7892$
4	$0,3500 \pm 0,0100$	$29,2567 \pm 0,3614$	$100,7467 \pm 2,0002$
5	$0,2900 \pm 0,0000$	$21,2267 \pm 0,1629$	$103,3900 \pm 2,4301$
6	$0,3200 \pm 0,0100$	$25,0467 \pm 0,6568$	$175, 7967 \pm 8,6815$

Fonte: Arquivo pessoal.

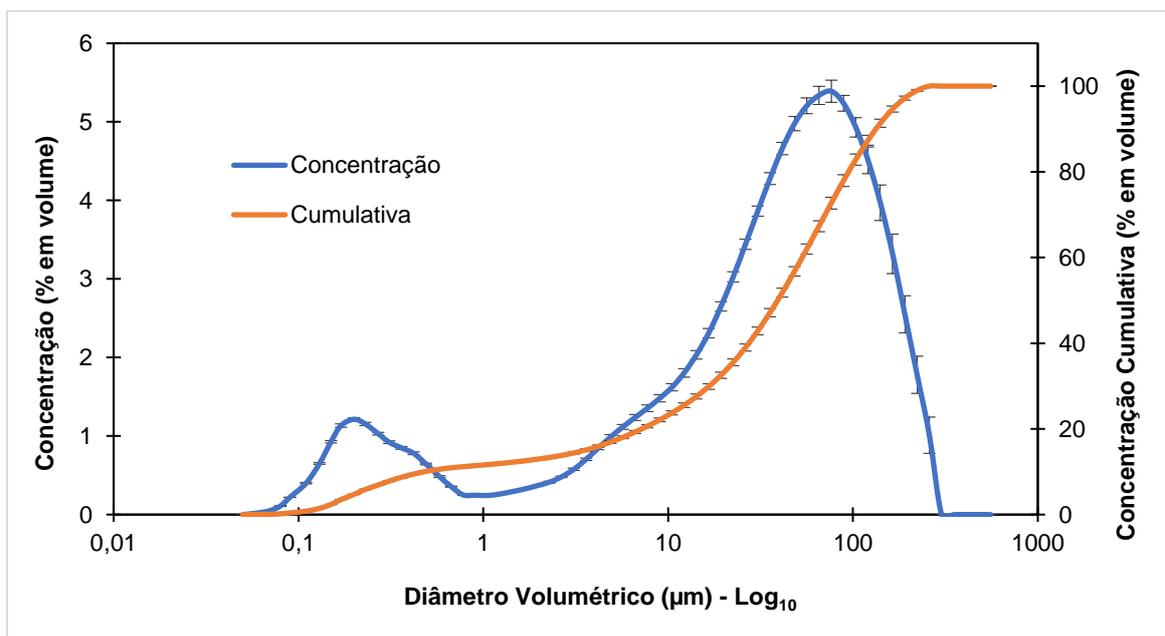
Nas Figuras 21 e 22, apresentam-se a distribuição granulométrica por concentração simples e cumulativa (em volume) das amostras, mostrando que ambos os materiais particulados utilizados são polidispersos. E tanto a rocha fosfática quanto o pó da dessulfuração variaram de 0,06 a 258,95  $\mu\text{m}$ .

**Figura 21** - Distribuição granulométrica em volume da rocha fosfática.



Fonte: Arquivo pessoal.

**Figura 22** - Distribuição granulométrica em volume do pó da dessulfuração.

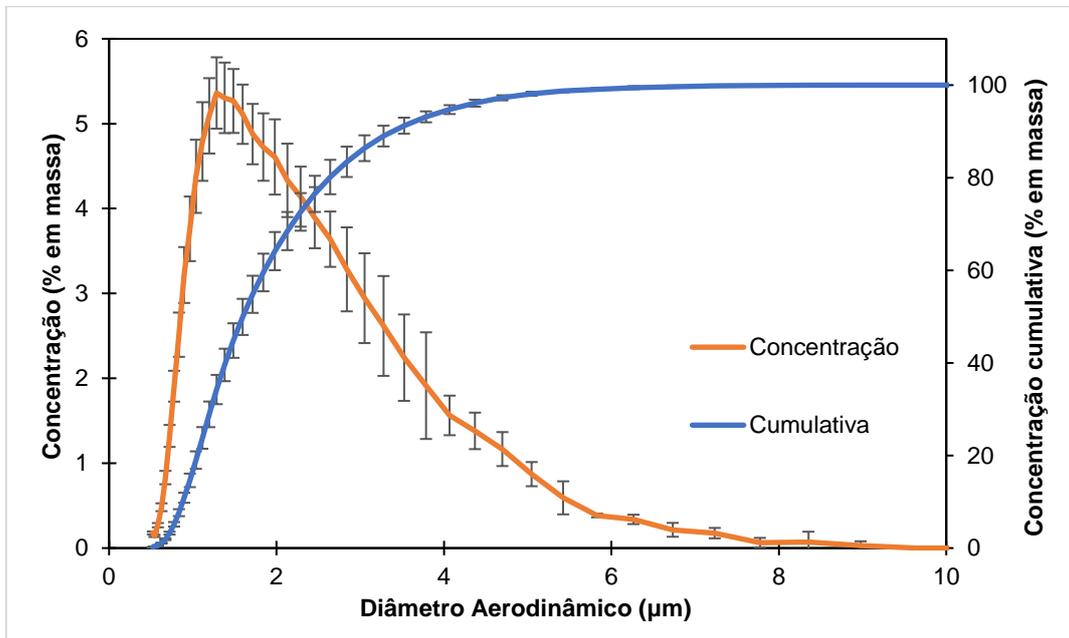


Fonte: Arquivo pessoal.

E a distribuição granulométrica aerodinâmica, foi possível através do equipamento *Aerodynamic Particle Sizer* (APS) 3320, e os valores do diâmetro aerodinâmico médio da rocha fosfática foi de aproximadamente  $1,6646 \pm 0,0907 \mu\text{m}$  e o do pó da dessulfuração de  $3,5235 \pm 0,0181 \mu\text{m}$ . As Figuras 23 e 24 apresentam a distribuição granulométrica em

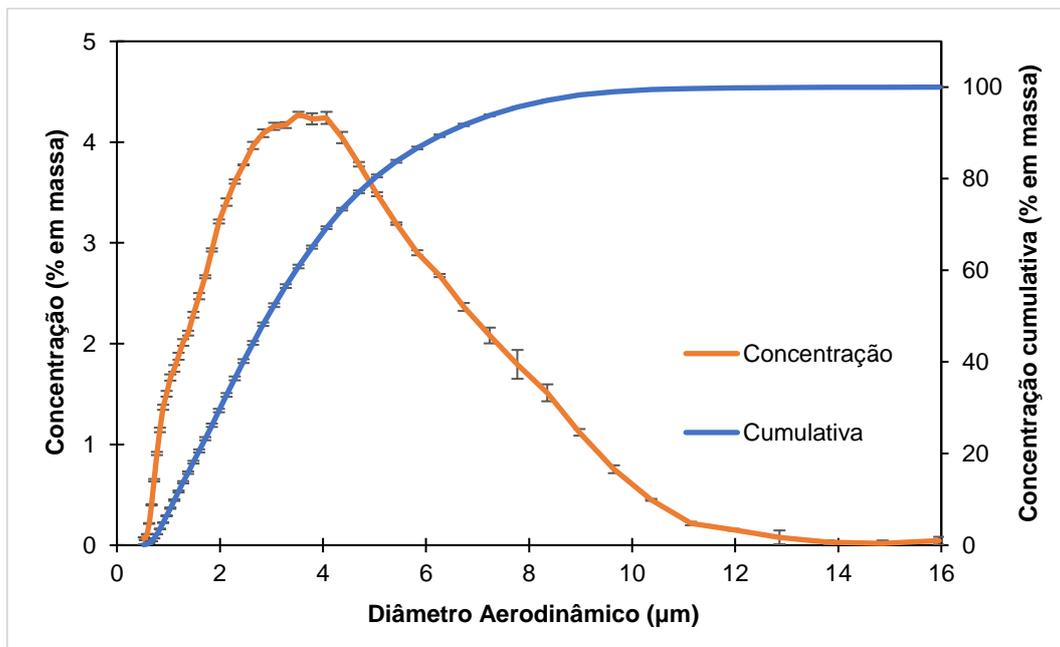
função do diâmetro aerodinâmico da rocha fosfática e do pó da dessulfuração, respectivamente .

**Figura 23** - Distribuição granulométrica aerodinâmica em massa da rocha fosfática.



Fonte: Arquivo pessoal.

**Figura 24** - Distribuição granulométrica aerodinâmica em massa do pó da dessulfuração.

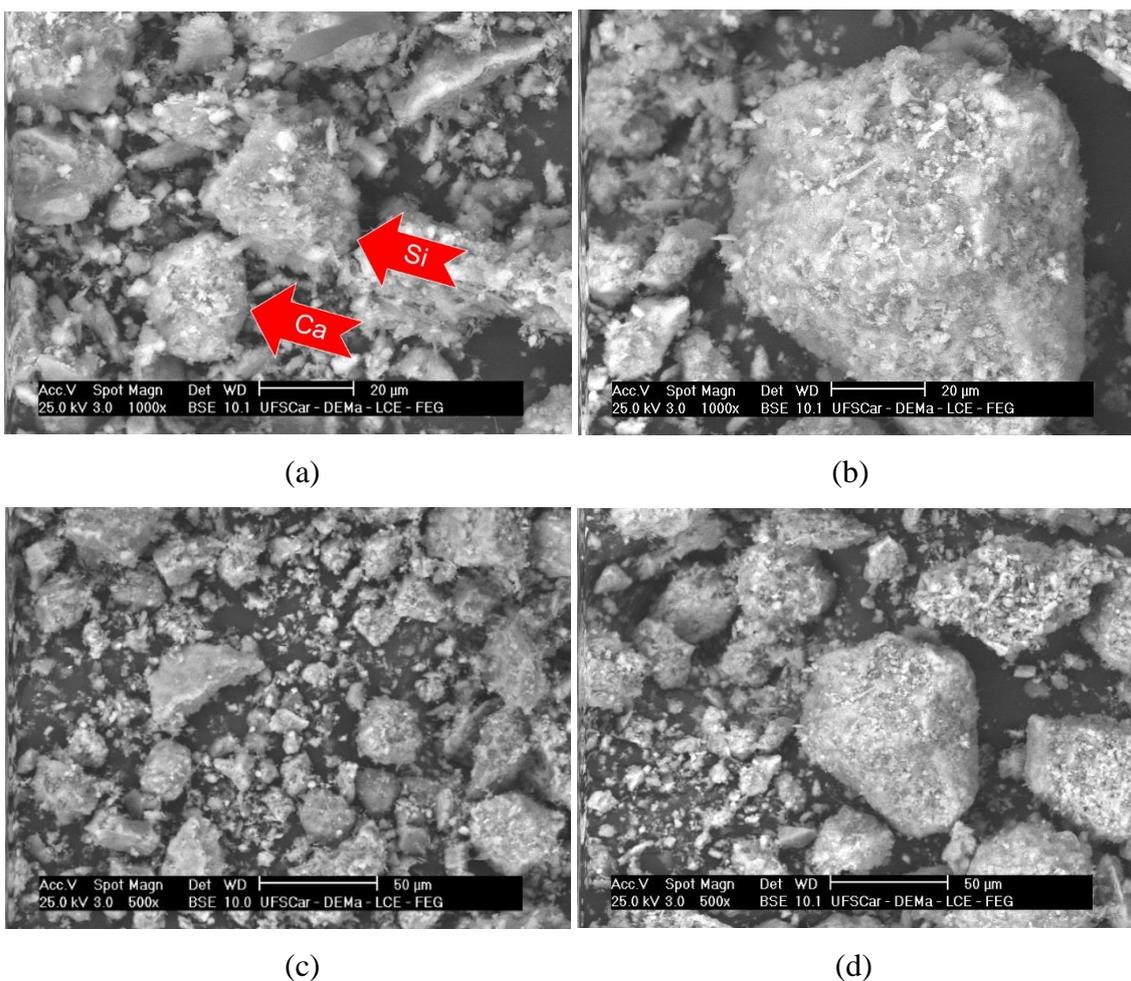


Fonte: Arquivo pessoal.

Verifica-se nas Figuras 23 e 24 que, para a rocha fosfática, aproximadamente, 100% das partículas são menores que  $PM_{10}$ , 77,34% menores que  $PM_{2.5}$  e 16,75% menor que  $PM_{1.0}$ , já para o pó da dessulfuração 99,23% são menores que  $PM_{10}$ , 41,09% menores que  $PM_{2.5}$  e 7,23% menor que  $PM_{1.0}$ . Assim, pode-se dizer que a rocha fosfática possui uma granulometria mais fina do que o pó da dessulfuração, o que leva a maior penetração e, conseqüentemente, pode acarretar em maior emissão e menor eficiência.

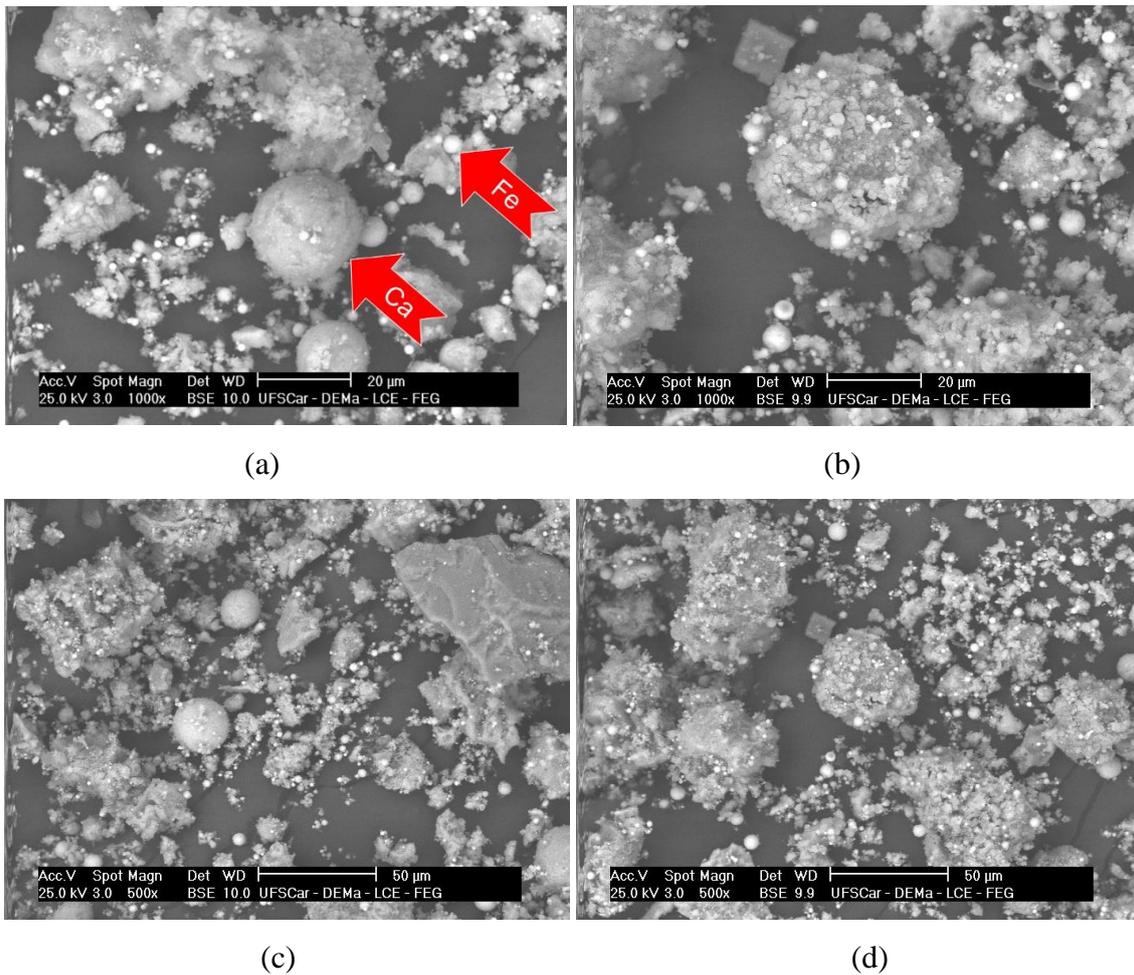
Também foram obtidas imagens dos materiais particulados em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) no LCE/DEMa da UFSCar. Nas imagens dos materiais particulados ilustradas nas Figuras 25 e 26, verifica em que os materiais particulados são compostos por partículas de diferentes formas e tamanhos. A rocha fosfática apresentou tamanhos maiores e formatos mais irregulares e pontiagudos. Enquanto o pó da dessulfuração apresentou-se tamanhos menores e formatos mais arredondado.

**Figura 25** - Imagens da rocha fosfática, com ampliações 1000x (a), (b) e 500x (c), (d).



Fonte: Arquivo pessoal.

**Figura 26** - Imagens do pó da dessulfuração, com ampliações 1000x (a), (b) e 500x (c), (d).



Fonte: Arquivo pessoal.

#### 4.2 Análise dos meios filtrantes virgens

Para estes testes foram utilizados dois meios filtrantes apresentados na Figura 27, sendo eles: (a) Meta-Aramida agulhado e (b) Meta-Aramida hidrojateado, ambos são termofixado, chamuscado do lado externo e possuem tratamento contra desgaste e abrasão.

**Figura 27** – Amostras dos meios filtrantes meta-aramida (a) agulhado e (b) hidrojateado.



Fonte: Arquivo pessoal.

A análise do diâmetro das fibras de cada manga foi realizada através de imagens da superfície obtidas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca Philips modelo XL-30 FEG (*Field Emission Gun*), onde foi possível determinar o diâmetro médio das fibras de cada meio filtrante pelo *software Image Pro Plus 7.0*.

A distância entre as lacunas deixadas pelas agulhas durante o processo de fabricação foi determinada através do *software Image Pro Plus 7.0*, utilizando imagens da superfície do meio filtrante.

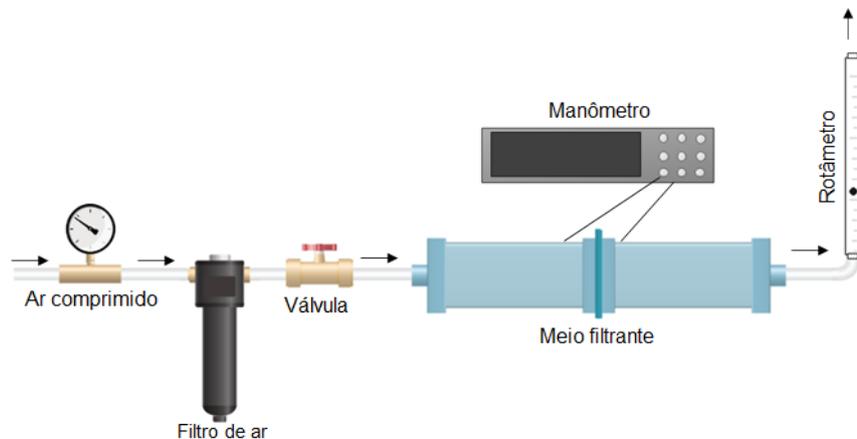
Os ensaios de gramatura, foi realizado utilizando uma balança semi-analítica da marca shimadzu modelo AY220 e com o paquímetro digital *Starret 727-8/200*, de acordo com a norma NBR 12984:2009 – Não tecido – Determinação da massa por unidade de área (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009).

Posteriormente, foi realizado análises de resistência à tração no CCDM do DEMa, o ensaio ocorreu segundo a norma ASTM D882:2012 – “*Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*” em máquina universal de ensaios modelo 5969R da Instron com célula de carga de 5000N e velocidade de ensaio de 50 mm/mim. Já a espessura do meio filtrante foi determinada através de dez medições em quatro imagens diferentes na transversal dos meios filtrantes obtidas pelo MEV, utilizando o *software Image Pro Plus 7.0*.

Também foram obtidos experimentalmente a constante de permeabilidade de Darcy ( $k_1$ ) e a porosidade. Através do equipamento apresentado na Figura 28, foi possível obter

dados para cálculo da permeabilidade dos meios filtrantes virgens. Onde o ar comprimido passa por filtros, em seguida por uma válvula, em que foi possível regular a vazão, então, o ar segue para o suporte contendo o meio filtrante teste, em que se tem um manômetro digital *TSI VelociCalc Plus 9555P* acoplado medindo o diferencial de pressão, passa por um rotâmetro e é liberado no ambiente. Assim variou-se a vazão até 60 L/min e registrou as quedas pressões, nos meios filtrantes. Em seguida, plotou-se uma curva de acordo com a equação de Darcy (Eq. 02), da velocidade de filtração em função da queda de pressão.

**Figura 28** - Equipamento para determinação da permeabilidade dos meios filtrantes.



Fonte: Arquivo pessoal.

A partir da curva queda de pressão em função da velocidade de filtração, foi possível obter a constante de permeabilidade de Darcy ( $k_1$ ) dos meios filtrantes, onde  $k_1 = \mu/a$  e posteriormente a permeabilidade.

Já a porosidade pode ser determinada pela equação de Ergun (Eq. 07), MacDonald (Eq. 08), Langmuir (Eq. 09) ou Davies (Eq. 10), utilizando o *Solver* do Excel para obter o valor médio da porosidade, a partir dos valores do diâmetro médio das fibras calculados juntamente com os valores de pressão e velocidade de filtração obtidos nos ensaios de permeabilidade.

Na Tabela 5, apresenta-se os valores de porosidade, gramatura, espessura, resistência a tração, de  $k_1$  e permeabilidade dos meios filtrantes virgens obtidos experimentalmente.

**Tabela 5** - Características dos meios filtrantes virgens.

Parâmetro	Meio Filtrante	
	Agulhado	Hidrojetado
<b>Porosidade (Ergun)</b>	0,8834 ± 0,0038	0,8411 ± 0,0012
<b>Porosidade (MacDonald)</b>	0,9035 ± 0,0002	0,8621 ± 0,0008
<b>Porosidade (Langmuir)</b>	0,9314 ± 0,0002	0,8912 ± 0,0011
<b>Porosidade (Davies)</b>	0,9314 ± 0,0002	0,8871 ± 0,0013
<b>Gramatura (g/m<sup>2</sup>)</b>	558,5213 ± 8,5028	464,7756 ± 6,0881
<b>Espessura (mm)</b>	2,3649 ± 0,1566	1,9128 ± 0,0763
<b>Força de Ruptura (N)</b>	<b>Longitudinal</b>	534,841 ± 24,711
	<b>Transversal</b>	551,209 ± 21,369
<b>k<sub>1</sub> x 10<sup>-12</sup> (m<sup>2</sup>)</b>	46,50147 ± 0,1576	35,30357 ± 0,2117
<b>Permeabilidade ((m<sup>3</sup>/min) /m<sup>2</sup>)</b>	<b>ΔP = 125 Pa</b>	10,4214 ± 0,0235
	<b>ΔP = 196 Pa</b>	15,4679 ± 0,0096

Fonte: Arquivo pessoal.

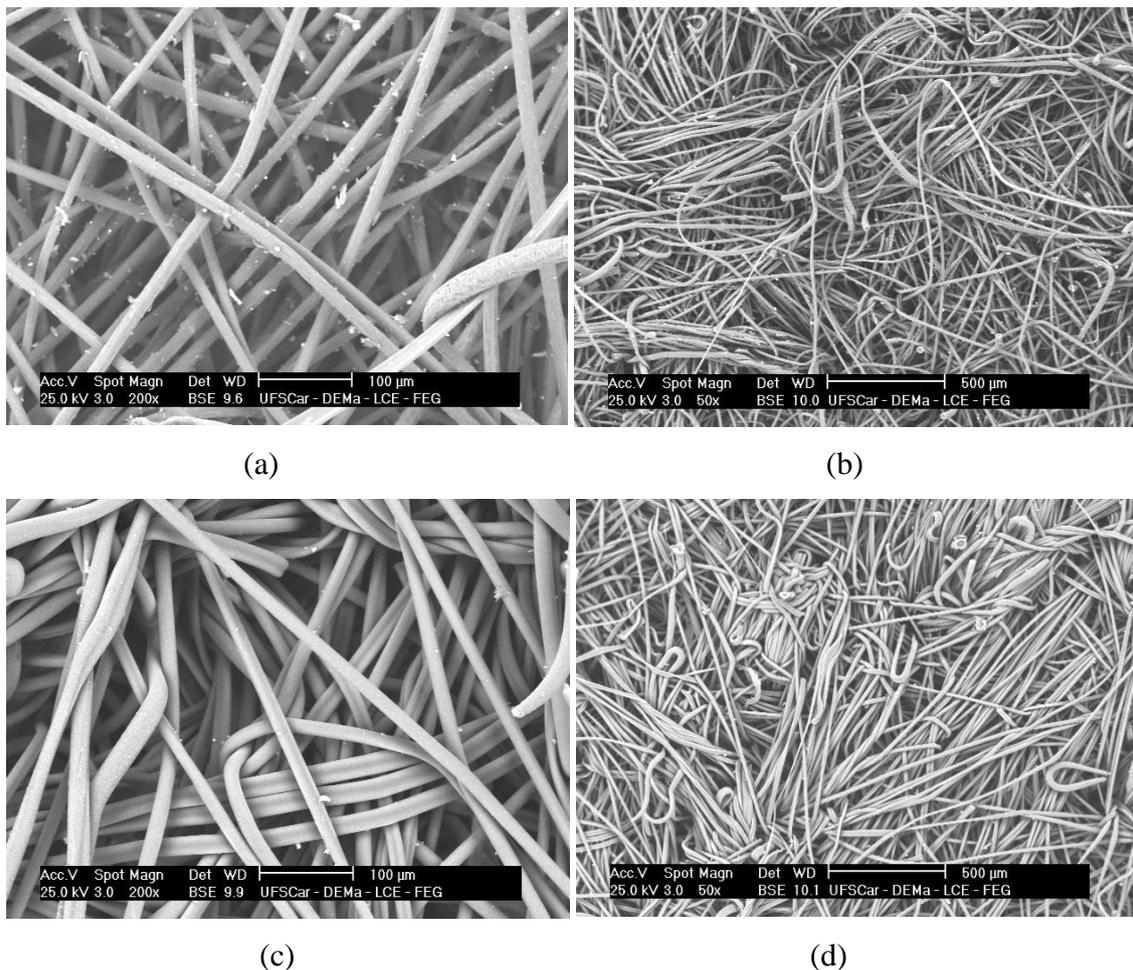
O meio filtrante agulhado apresentou menores quedas de pressão por espessura ( $\Delta P/L$ ), devido sua maior espessura e as lacunas que podem ser caminhos preferenciais de passagem do ar. Os altos desvios da gramatura podem ser devido ao uso de partes diferentes da manga que podem possuir uma composição heterogênea.

Observa-se que o meio filtrante agulhado apresentou maior porosidade e permeabilidade do que o meio filtrante hidrojetado, reafirmando que há caminhos preferenciais para escoamento do ar. No ensaio de tração foi possível notar que foi necessária uma força maior para romper o meio filtrante agulhado no sentido longitudinal, porém no sentido transversal, o meio filtrante hidrojetado que necessitou de mais força.

O meio filtrante de gramatura maior geralmente leva a maior espessura e um meio filtrante espesso com tamanhos de poros pequenos proporciona uma melhor eficiência de filtração, mas também diminui a flexão, o que dificulta a limpeza (MUKHOPADHYAY, 2009).

Na Figura 29 estão apresentadas as imagens das superfícies dos meios filtrantes (a), (b) agulhado e (c), (d) hidrojetado. Observa-se que, as imagens apresentaram diferenças em suas superfícies.

**Figura 29** - Imagens da superfície do meio filtrante (a) e (b) agulhado e (c) e (d) hidrojetado.



Fonte: Arquivo pessoal.

Na Figura 29 (a) as fibras do meio filtrante agulhado estão mais distantes umas das outras e na Figura 29 (c) as fibras do meio filtrante hidrojetado estão mais juntas. Comparando a Figura 29 (b) e (d) é possível ver que as fibras do meio filtrante hidrojetado estão mais emaranhadas e dispostas de forma mais uniforme, conferindo ao meio filtrante hidrojetado um tecido mais fechado o que pode proporcionar uma melhor eficiência. A deformação das fibras e a união de outras é causado pelo tratamento chamuscado realizado no meio filtrante para se ter um acabamento mais liso.

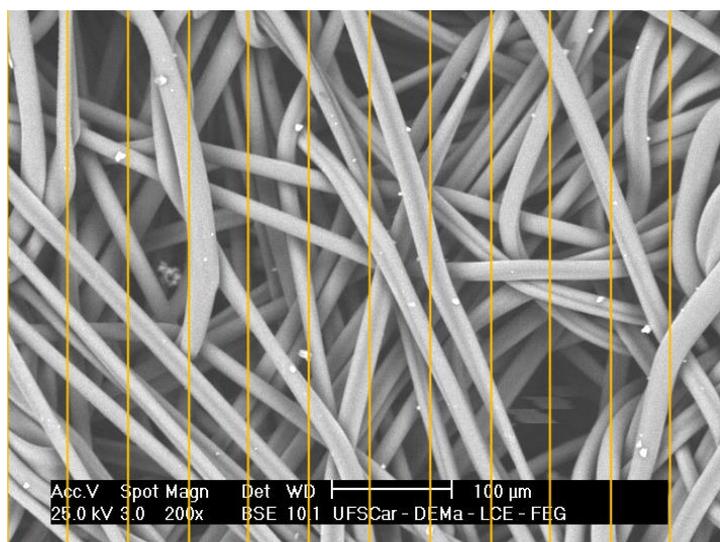
As imagens obtidas no MEV permitiram a análise da disposição das fibras, através dessas imagens calculou-se o diâmetro médio das fibras através da equação (BORTOLASSI, GUERRA, AGUIAR, 2017):

$$\bar{D}_f = \frac{\sum n_i d_{fi}}{N} \quad \text{Eq. (16)}$$

Em que,  $n_i$  é o número de fibras com um determinado diâmetro,  $d_{fi}$  é o diâmetro da fibra e  $N$  é número total de fibras.

Onde foram selecionadas sete imagens da superfície de cada meio filtrante e cada imagem foi dividido em doze seções verticais iguais, como apresentado na Figura 30. Posteriormente, utilizando o *Software Imagem Pro Plus 7.0*, determinou-se o diâmetro de cada fibra em cada seção, sendo realizados em média cem medições de diâmetros por imagem. Os valores de diâmetro médios encontrados estão apresentado na Tabela 6.

**Figura 30** – Esquema para a medição dos diâmetros das fibras dos meios filtrantes.



Fonte: Arquivo pessoal.

**Tabela 6** - Diâmetro médios dos meios filtrantes virgens.

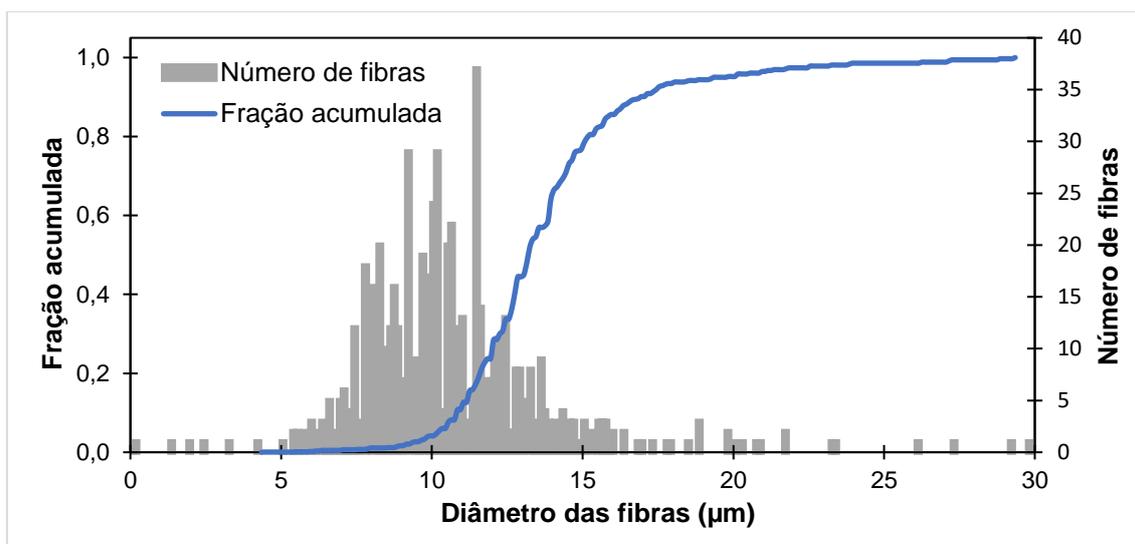
Meio filtrante	Diâmetro médio (µm)
Meta-Aramida Agulhado	13,75 ± 0,54
Meta-Aramida Hidrojateado	15,98 ± 0,75

Fonte: Arquivo pessoal.

Verifica-se na Tabela 6 que as fibras dos meios filtrantes possuem os diâmetros diferentes, que pode ser devido a gramatura diferente e/ou por serem de fabricantes diferentes. Para se ter um valor de erro do diâmetro das fibras menor, mensurou-se o diâmetro de fibras de sete imagens, pois a composição heterogênea de tamanhos presente em alguns meios filtrantes fibrosos pode influenciar muito.

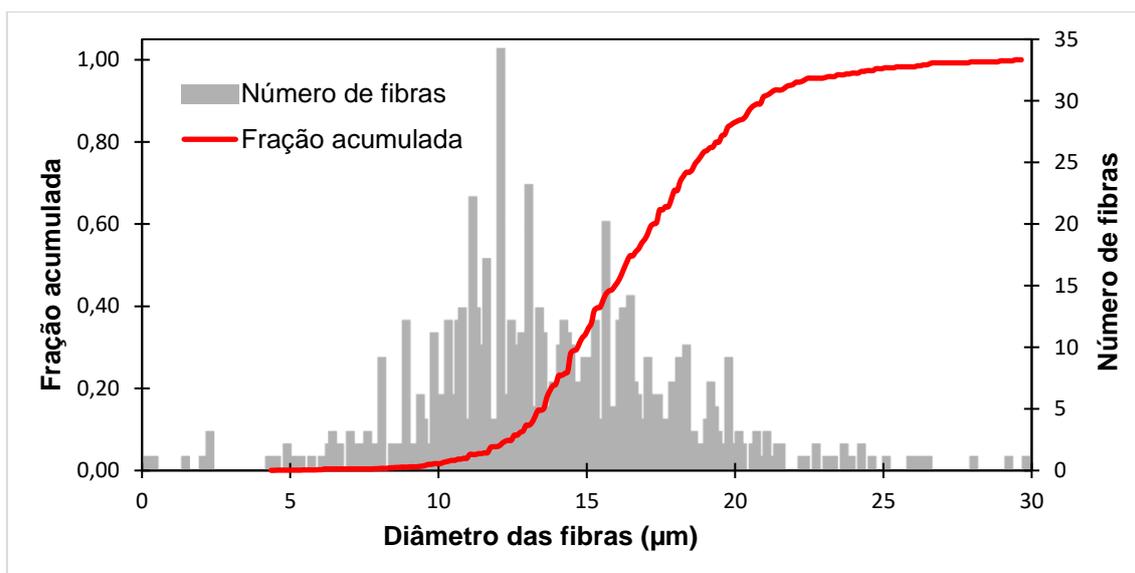
A distribuição de diâmetros das fibras dos tecidos em função da fração acumulada e números de fibras está melhor apresentada nas Figuras 31 e 32.

**Figura 31** - Distribuição de diâmetros das fibras do meio filtrante agulhado.



Fonte: Arquivo pessoal.

**Figura 32** - Distribuição de diâmetros das fibras do meio filtrante hidrojetado.



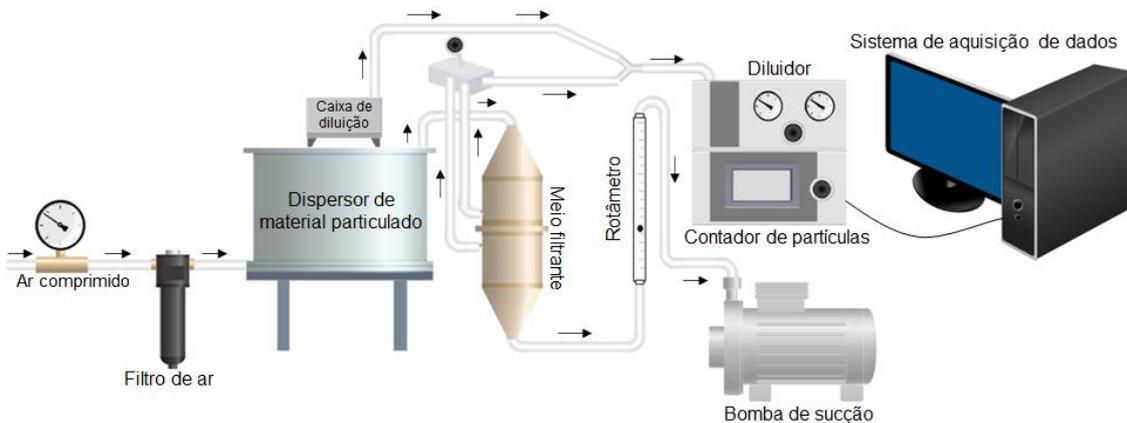
Fonte: Arquivo pessoal.

A partir de imagens da superfície do meio filtrante agulhado apresentado na Figura 27 e utilizando o *software Image Pro Plus 7.0*, foi possível determinar que as lacunas deixadas pelas agulhas têm um distanciamento médio entre si de aproximadamente  $0,8419 \pm 0,2772$  mm. O desvio alto é devido as agulhas não possuir um mesmo distanciamento entre si e também pelo processo ser contínuo onde a placa de agulhas se movimenta de forma rápida na vertical enquanto o véu de fibras passa por uma esteira, assim as agulhas vão fixando a fibra formando a manta.

### 4.3 Determinação da eficiência dos meios filtrantes para micropartículas

A determinação da eficiência para micropartículas foi estabelecida pelo equipamento apresentado na Figura 33.

**Figura 33** - Equipamento de filtração para micropartículas.



Fonte: Arquivo pessoal.

O ar que sai de uma linha de ar comprimido passa por uma torre de sílica e segue para caixa de alimentação. Na caixa de alimentação, o material particulado presente no prato giratório é sugado com o auxílio da bomba de sucção que segue para suporte do meio filtrante, onde fica retido, o ar passa pelo rotâmetro digital onde é possível aferir a vazão, no final do rotâmetro possui uma bomba que garante o fluxo de ar com o material particulado.

O suporte onde está o meio filtrante, é conectado a um medidor de pressão onde é medido o diferencial de pressão e é conectado também a uma válvula de três vias onde é possível regular para se coletar amostras antes e depois do meio filtrante através de sondas de amostragem, onde segue para um diluidor e em seguida para um espectrômetro *Aerodynamic Particle Sizer*® (APS) que encaminha os dados para um computador. A faixa de partículas analisadas foi de 0,523 a 17,15  $\mu\text{m}$ , por tempo de 60 segundos para cada coleta.

Os ensaios foram realizados estavam baseados na norma alemã de filtração VDI 3926, e as variáveis utilizadas estão descritas na Tabela 7. Foram realizados ensaios de filtração para um ciclo em triplicatas. A coleta de amostras isocinética antes e depois do meio filtrante durante o ensaio de filtração é necessário para saber a quantidade de partículas e calcular a eficiência a partir delas através da Equação (14).

**Tabela 7 – Variáveis utilizadas.**

<b>Dado</b>	<b>Valor</b>
Velocidade de filtração	2 m/min
Área útil de filtração	17,57 cm <sup>2</sup>
Área da sonda de amostragem	0,1158 cm <sup>2</sup>
Temperatura de filtração	Ambiente
Umidade relativa	< 50 %

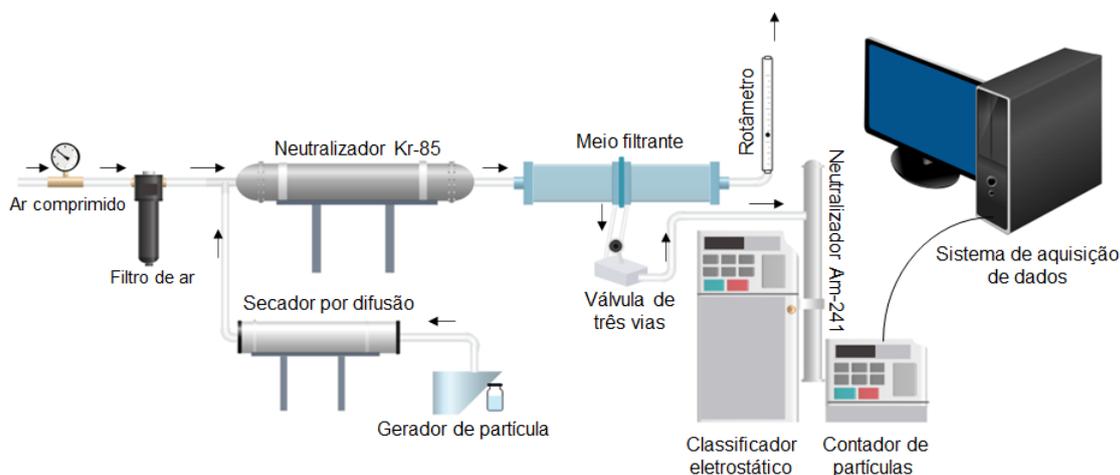
Fonte: Arquivo pessoal.

As amostragens isocinéticas antes e após o meio filtrante foram coletados em intervalos de 10 em 10 mmH<sub>2</sub>O de queda de pressão até a queda de pressão máxima de 100 mmH<sub>2</sub>O, com o propósito de calcular a eficiência de coleta com a formação da torta.

#### 4.4 Determinação da eficiência dos meios filtrantes para nanopartículas

A determinação da eficiência de coleta para nanopartículas dos meios filtrantes virgens, foi obtida utilizando o equipamento apresentado na Figura 34.

**Figura 34-** Equipamento de filtração de nanopartículas para meios filtrantes virgens.



Fonte: Arquivo pessoal.

O ar comprimido vindo de um compressor passa por filtros e segue para um neutralizador de criptônio 85 (Kr 85), o aerossol gerado pelo gerador de aerossol que contém uma solução de 1g/L de NaCl, segue para o secador por difusão e se junta a outra parte de ar filtrado. Em seguida, o ar com as partículas de aerossol passa por um

neutralizado de criptônio 85 (Kr 85), para remoção de cargas eletrostáticas, e segue para o suporte de filtração contendo o meio filtrante teste.

O suporte é conectado a um rotâmetro, onde o ar é liberado ao ambiente, é conectado também a uma válvula de três vias, no qual é possível coletar amostras antes e depois do meio filtrante teste e enviadas para um analisador de partículas por mobilidade elétrica (SMPS) que encaminha os dados obtidos para um computador.

Os ensaios de filtração que foram realizados estavam baseados na norma alemã de filtração VDI 3926, e as variáveis utilizadas estão descritas na Tabela 8. Foram realizados ensaios de filtração para um ciclo em triplicatas, onde foi possível calcular a eficiência de coleta experimental foi obtida a partir da Equação (14).

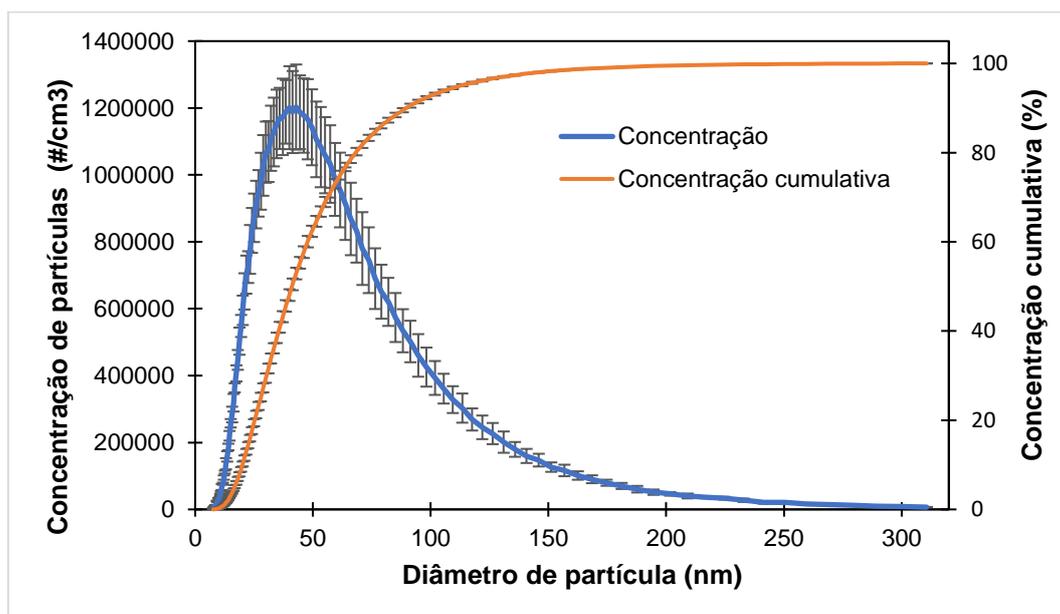
**Tabela 8** – Variáveis utilizadas.

Dado	Valor
Velocidade de filtração	2 m/min
Área útil de filtração	40,72 cm <sup>2</sup>
Área da sonda de amostragem	0,1158 cm <sup>2</sup>
Temperatura de filtração	Ambiente

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 35 ilustra a concentração de partícula geradas em função do diâmetro.

**Figura 35** - Caracterização das nanopartículas.



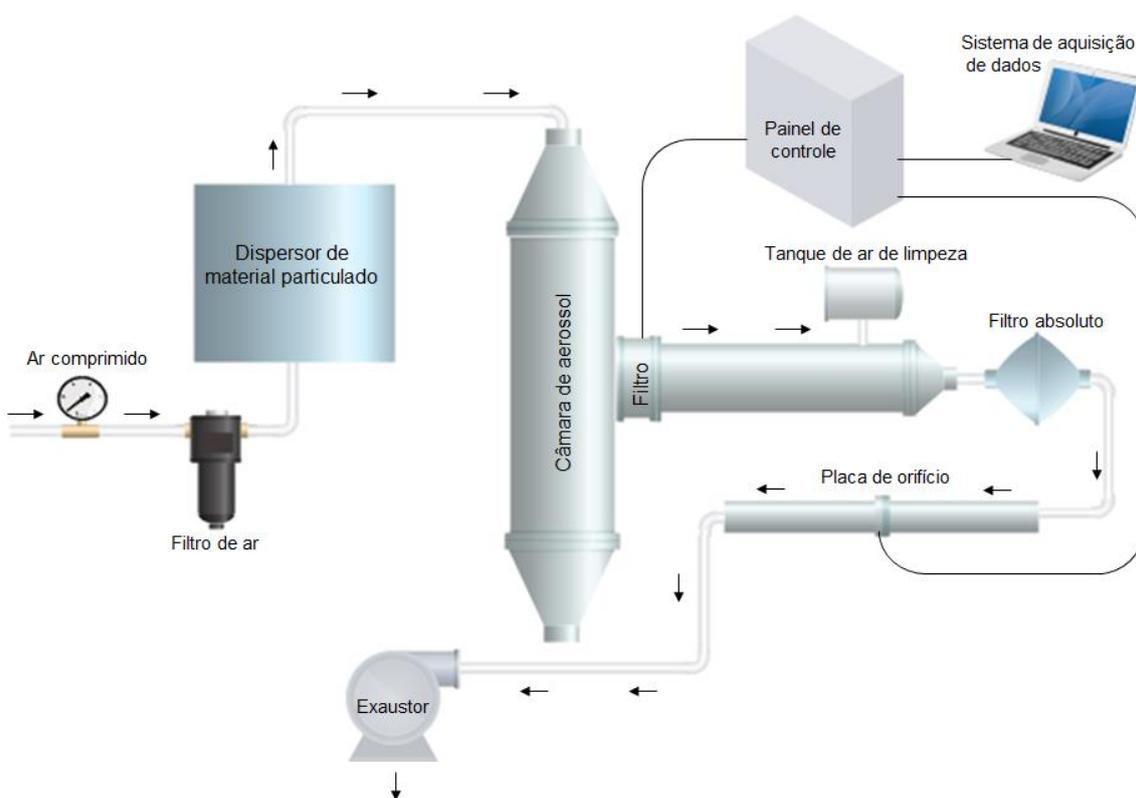
Fonte: Arquivo pessoal.

As partículas geradas pelo gerador de aerossol, apresentaram uma faixa de diâmetro entre 7,64 a 310,6 nm, por um tempo de coleta de 300 segundos. Observou-se na Figura 35 que, há uma maior quantidade de partículas na faixa inferior a 100 nm e a maior concentração notada foi no diâmetro de 42,9 nm.

#### 4.5 Ensaio de filtração

A Figura 36 mostra a vista geral do equipamento de filtração utilizado de acordo com a norma alemã VDI 3926, para simular a filtração de filtros mangas industrial em escala laboratorial.

**Figura 36** - Equipamento de filtração de acordo com a norma VDI.



Fonte: Arquivo pessoal.

O ar vindo da linha de ar comprimido passa por filtros e depois por um medidor de pressão no qual é dividido, onde parte passa por uma coluna de sílica e entra na caixa de alimentação, a outra parte vai para a balança apresentada na Figura 37, que fica dentro da caixa de alimentação.

**Figura 37** - Balança de alimentação.



Fonte: Arquivo pessoal.

O material particulado que está dentro da balança de alimentação é arrastado pelo parafuso e segue para a câmara. Um exaustor no final do equipamento succiona o ar que passa pelo meio filtrante ficando retido o material particulado. Esse meio filtrante é preso por um suporte. O ar segue e passa pelo um filtro absoluto podendo se estimar a eficiência gravimétrica. Assim o ar passa pela placa de orifício e vai para ambiente. O painel de controle recebe os dados de queda de pressão no meio filtrante e da placa de orifício e transmite para o computador.

Os ensaios de filtração que foram realizados estavam baseados na norma alemã de filtração VDI 3926, e as variáveis utilizadas de acordo com esta norma estão descritas na Tabela 9. Foram realizados ensaios de filtração para um ciclo em triplicatas, onde foi possível calcular a eficiência de coleta gravimétrica através da Equação (15).

**Tabela 9** - Valores experimentais dos ensaios de filtração.

<b>Dado</b>	<b>Valor</b>
Velocidade de filtração	2 m/min
Diâmetro útil do meio filtrante	160 mm
Concentração de pó no filtro	5000 mg/m <sup>3</sup>
Temperatura de filtração	Ambiente
Queda de pressão máxima	100 mmH <sub>2</sub> O
Umidade relativa	< 50 %
Pressão do tanque de limpeza	5 bar

Fonte: Norma VDI 3926.

Para garantir a concentração de pó no filtro, foi realizado a calibração do parafuso, alterando a velocidade de alimentação do parafuso no alimentador. A calibração era realizada diariamente antes do início dos ensaios, para reduzir as variações que o equipamento está sujeito.

O meio filtrante era pesado, em seguida utilizava-se um valor de velocidade do parafuso e o processo de filtração era iniciado com o pó sendo alimentado durante cinco minutos. Após esse tempo o processo era interrompido e o meio filtrante pesado novamente para avaliar a concentração (C) que chegou no meio filtrante utilizando a Equação:

$$C = \frac{M_{ff} - M_{fi}}{t Q} \quad \text{Eq. (17)}$$

Onde  $M_{fi}$  é a massa inicial do meio filtrante,  $M_{ff}$  é a massa final do meio filtrante,  $t$  é o tempo de filtração e  $Q$  é vazão.

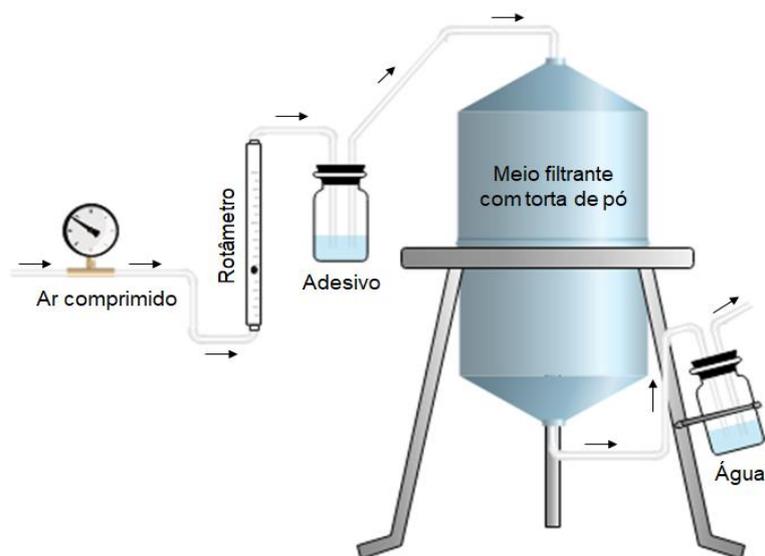
Em posse do valor de concentração obtido, aumentava-se ou diminuía-se a velocidade de rotação do parafuso, dava-se o pulso para a limpeza e esse procedimento era repetido até obter o valor de concentração da alimentação desejado.

#### **4.6 Preparação das amostras para análise no MEV**

Para a análise no microscópio de varredura é necessário fazer a preparação dos meios filtrantes para que a análise não interfira nas propriedades da torta. A preparação foi realizada segundo Aguiar (1995).

Primeiro realizou-se o pré-endurecimento da amostra como apresenta a Figura 38. O ar, que é alimentado pela linha de ar comprido do laboratório, passa pelo rotâmetro e segue, ao passar por um recipiente contendo resina (Loctite-416) o ar arrasta a resina até o meio filtrante, onde a mesma se fixa. Ao final do processo, tem-se um frasco com água que é para verificar se há vazamentos e retirar resíduos de resina que ainda possam estar presente no ar. O rotâmetro é necessário para garantir que a vazão fique em 0,5 L/min. Essa primeira etapa dura aproximadamente 24 horas e entorno de uma hora é necessário colocar mais três gotas de cola no recipiente.

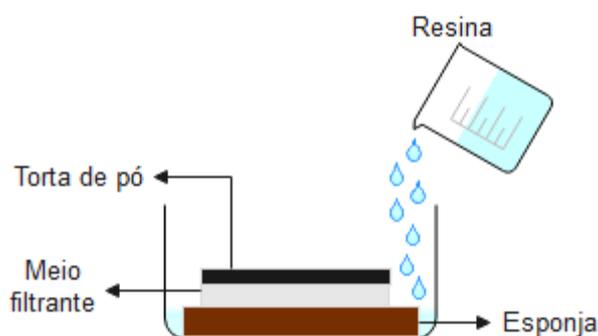
**Figura 38** - Equipamento para o pré-endurecimento da amostra.



Fonte: Arquivo pessoal.

Na segunda etapa é realizado o embutimento da amostra, demonstrada pela Figura 39, coloca-se em um recipiente de vidro uma esponja bem espalhada e 200 ml de resina loctite PMS-10E, com dez gotas de catalisador de polímeros, em seguida, a amostra pré-endurecida é colocada em cima da esponja. Assim a resina passa para a amostra pré-endurecida por difusão. Após, a amostra é colocada em uma placa de vidro e preso a garras, após esta etapa a amostra é colocada na estufa por 72 horas para secar.

**Figura 39** - Equipamento para o embutimento da amostra.



Fonte: Arquivo pessoal.

Após secar a amostra é encaminhada para a terceira etapa, onde é necessário ser cortada em 1 cm<sup>2</sup> com uma serrinha, e colocada dentro de moldes de cano de PVC, fixados sobre uma placa de vidro e acrescentado 100 ml de resina de poliéster da marca Du Látex, com sessenta gotas de catalisador de polímero e deixar secar em temperatura ambiente por 24 horas. Quando seca, é realizado o lixamento em lixas d'água com grãos de 240,

400, 600, 1200 e 2000 para retirar os arranhões que possa interferir na análise e em seguida as amostras eram polidas com solução de alumina 0,1  $\mu\text{m}$ , no laboratório do CCDM do DeMa/UFSCar.

Após finalizar a preparação, as amostras eram levadas ao LCE/DeMa, onde eram revestidas com ouro e posteriormente levadas ao MEV para obtenção das imagens da interface torta/filtro.

#### **4.7 Determinação da penetração das partículas nos meios filtrantes**

Após realizar os ensaios de filtração, os meios filtrantes utilizados foram preparados para análises no MEV. Onde as imagens obtidas permitiram determinar a penetração de partículas ao longo da seção transversal dos meios filtrantes. Após binarizar as imagens obtidas utilizando ao *software Image Pro Plus 7.0*, foi possível fazer a contagem do número de partículas por faixa de profundidade.

#### **4.8 Ensaio de ciclos de filtração e limpeza**

No ensaio de ciclos de filtração e limpeza, foi realizado trinta ciclos para avaliar a queda de pressão e tempo de filtração do meio filtrante. Os ciclos foram realizados de acordo com as condições operacionais apresentadas na Tabela 9 que quando alcançada a queda de pressão máxima era aplicado um pulso de 5 bar com 60 milissegundos de duração para a realização da limpeza, na direção contrária a filtração e assim iniciando o próximo ciclo até atingir novamente a queda de pressão máxima. Após trinta ciclos calculou-se a eficiência de coleta gravimétrica utilizando-se a Equação (15).

#### **4.9 Envelhecimento artificial dos meios filtrantes**

Meios filtrantes, 100% meta-aramida agulhado e hidrojateado, foram envelhecidas para simular a utilização na indústria. O envelhecimento ocorreu de acordo com norma VDI 3926, onde foram realizados trinta ciclos de filtração com a alimentação e queda de pressão máxima controlados, em seguida foram realizados 325 ciclos em um intervalo de aproximadamente cinco segundos cada e posteriormente dez ciclos de estabilização com a alimentação e queda de pressão máxima controlada.

#### **4.10 Avaliação da eficiência dos meios filtrantes envelhecidos**

Após o envelhecimento, foi avaliado a permeabilidade, eficiência de coleta de micropartículas e ciclos de filtração e limpeza, como descrito nos itens 4.2, 4.3 e 4.8 respectivamente.

#### **4.11 Avaliação da eficiência dos meios filtrantes usados**

Foram recebidos da indústria siderúrgica mangas usadas em 2190 ciclos por 3 anos no processo de despoeiramento da dessulfuração do gusa com as mesmas condições operacionais usada neste trabalho, com limpeza por jato de ar pulsante. O meio filtrante agulhado foi retirado na câmara 3 e o meio filtrante hidrojateado da câmara 5. Onde foram retiradas amostras para análise de permeabilidade como descrito no item 4.2 utilizando o equipamento apresentado na Figura 28 e imagens obtidas do MEV.

**Tabela 10** – Metodologia.

<b>Ensaio</b>	<b>Equipamento</b>	<b>Meio filtrante</b>	<b>Material Particulado</b>	<b>Velocidade de filtração</b>	<b>Queda de pressão</b>
Eficiência de micropartículas	Equipamento com contador de partícula APS (Figura 33)	Meta aramida agulhado e hidrojetado virgens e envelhecidos	Rocha Fosfática e Pó da dessulfuração	2 m/min	$\Delta P_0$ $\Delta P_0 + 10 \text{ mmH}_2\text{O}$ $\Delta P_0 + 20 \text{ mmH}_2\text{O}$
Eficiência de nanopartículas	Equipamento com contador de partícula SMPS (Figura 34)	Meta aramida agulhado e hidrojetado virgens	Solução de NaCl 1 g/L	2 m/min	-
Ensaio de filtração 1º ciclo	Equipamento de filtração baseado na norma alemã VDI (Figura 36)	Meta aramida agulhado e hidrojetado virgens	Pó da dessulfuração	2 m/min	100 mmH <sub>2</sub> O
Ensaio de filtração 30 ciclos	Equipamento de filtração baseado na norma alemã VDI (Figura 36)	Meta aramida agulhado e hidrojetado virgens e envelhecidos	Pó da dessulfuração	2 m/min	100 mmH <sub>2</sub> O

Fonte: Arquivo pessoal.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

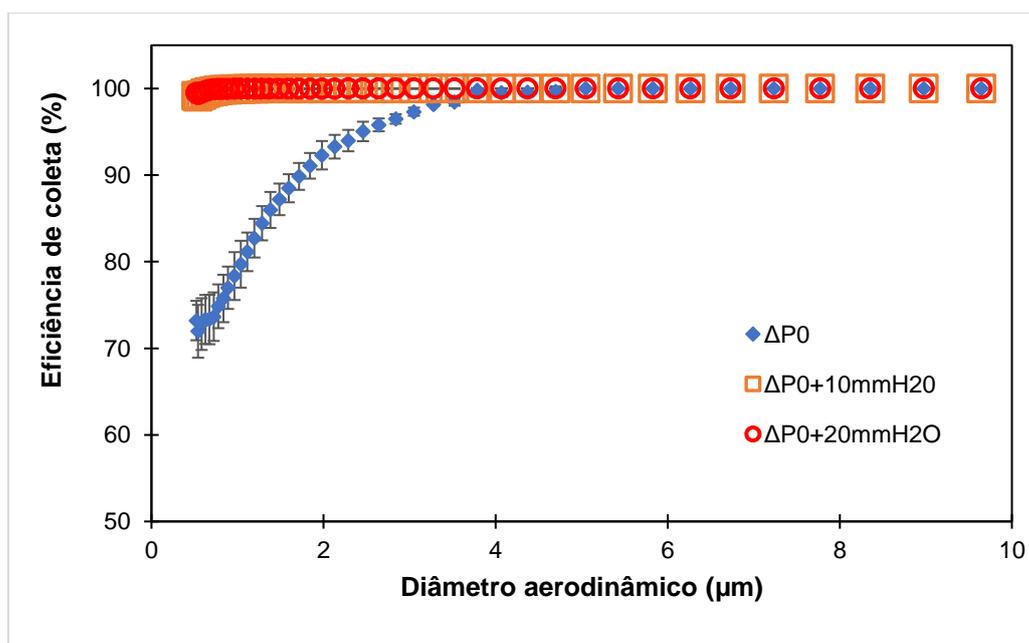
### 5.1 Eficiência para micropartículas

A eficiência para micropartículas pode ser vista nas Figuras 40 e 41 para rocha fosfática e nas Figuras 42 e 43 para o pó da dessulfuração, onde a faixa de diâmetro aerodinâmico analisada foi de 0,523 a 17,15  $\mu\text{m}$ .

A partir dessas figuras, foi possível notar que ao aumentar da queda pressão para  $\Delta P_0 + 10 \text{ mmH}_2\text{O}$ , os meios filtrantes apresentaram uma eficiência próxima a 100% para toda faixa de diâmetro aerodinâmico avaliado. Sendo assim os ensaios foram realizados até o ponto  $\Delta P_0 + 20 \text{ mmH}_2\text{O}$ , obtendo os mesmos valores que a faixa anterior.

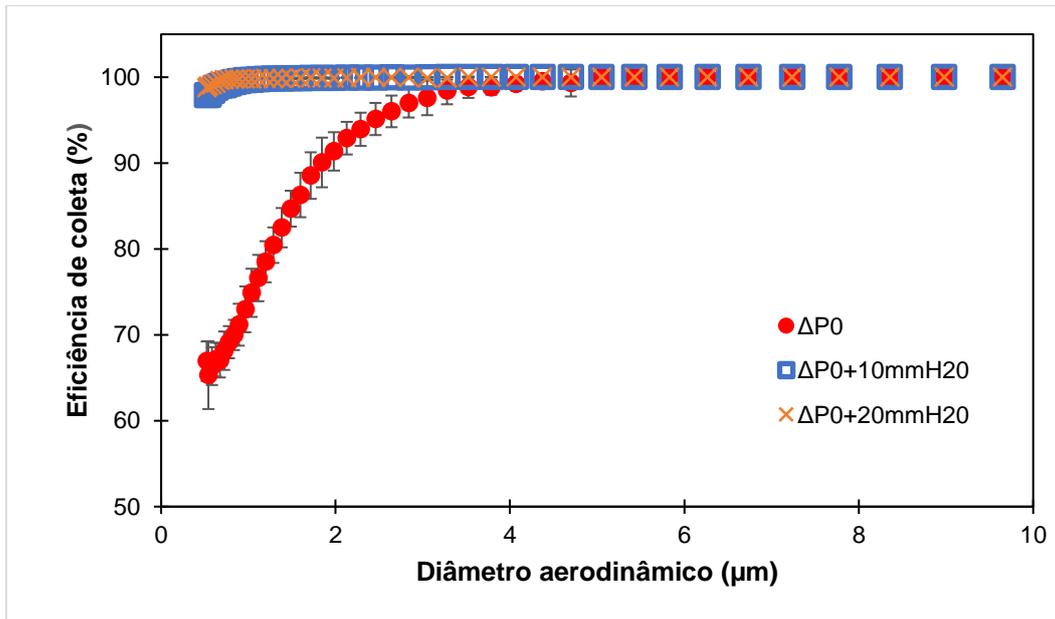
A alta eficiência de coleta com o aumento da pressão se deu por causa da formação inicial da torta, que filtra o particulado de modo mais efetivo.

**Figura 40** - Ensaio de filtração com a rocha fosfática utilizando o meio filtrante agulhado virgem.



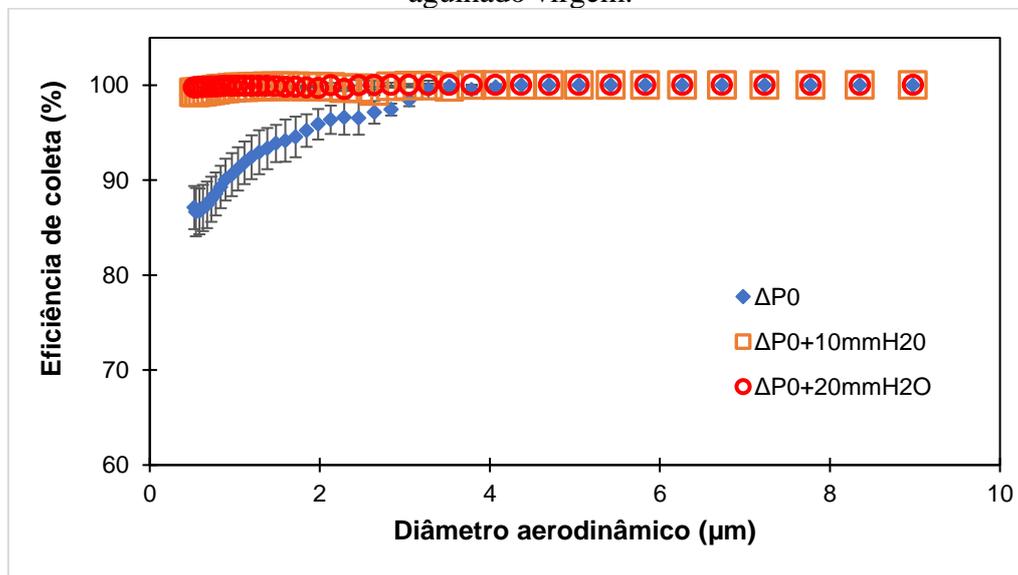
Fonte: Arquivo pessoal.

**Figura 41** - Ensaio de filtração com a rocha fosfática utilizando o meio filtrante hidrojetado virgem.



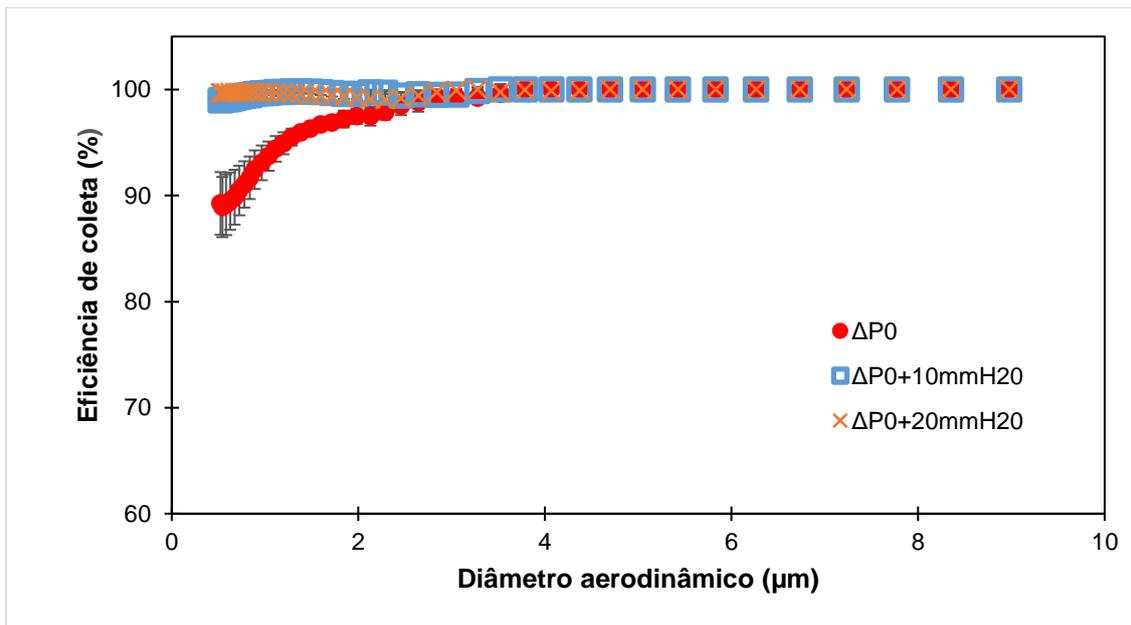
Fonte: Arquivo pessoal.

**Figura 42** - Ensaio de filtração com o pó da dessulfuração utilizando o meio filtrante agulhado virgem.



Fonte: Arquivo pessoal.

**Figura 43** - Ensaio de filtração com o pó da dessulfuração utilizando o meio filtrante hidrojateado virgem.



Fonte: Arquivo pessoal.

Nas Figuras 40, 41, 42 e 43, observa-se uma alta eficiência a partir de  $\Delta P_0 + 10\text{mmH}_2\text{O}$ , isso deve-se a formação de uma fina camada de pó na superfície do meio filtrante que sugere que a captura de novas partículas seja feita pelas partículas já retidas no meio filtrante. Com o aumento da espessura da torta é possível observar um aumento da eficiência de coleta das partículas maiores.

Durante os ensaios verificou-se que para o pó da dessulfuração, ambas as mangas levaram mais tempo para ter um aumento de pressão do que com a rocha fosfática, isso porque, de acordo com Thomas *et al.* (2001), a queda de pressão é menor quando o tamanho das partículas é maior, pois as partículas maiores possuem uma área específica menor.

Comparando a eficiência de coleta nos momentos iniciais ( $\Delta P_0$ ) de filtração dos meios filtrantes, apresentados na Figura 44, é possível verificar que o pó da dessulfuração ele é mais coeso que a rocha fosfática, assim tende a formar aglomerados mais facilmente o que explica porque a eficiência de remoção foi maior para o mesmo.

Já em relação aos meios filtrantes, o meio filtrante agulhado possui uma melhor eficiência para as partículas menores da rocha fosfática. Porém, se considerar o desvio, ambas eficiências começam a se igualar e a partir do diâmetro de 2 µm essa igualdade fica mais evidenciado. Isso pode ocorrer pela combinação de fatores que potencialmente está influenciado, como a rocha fosfática ser mais fina e leve apresentando menor

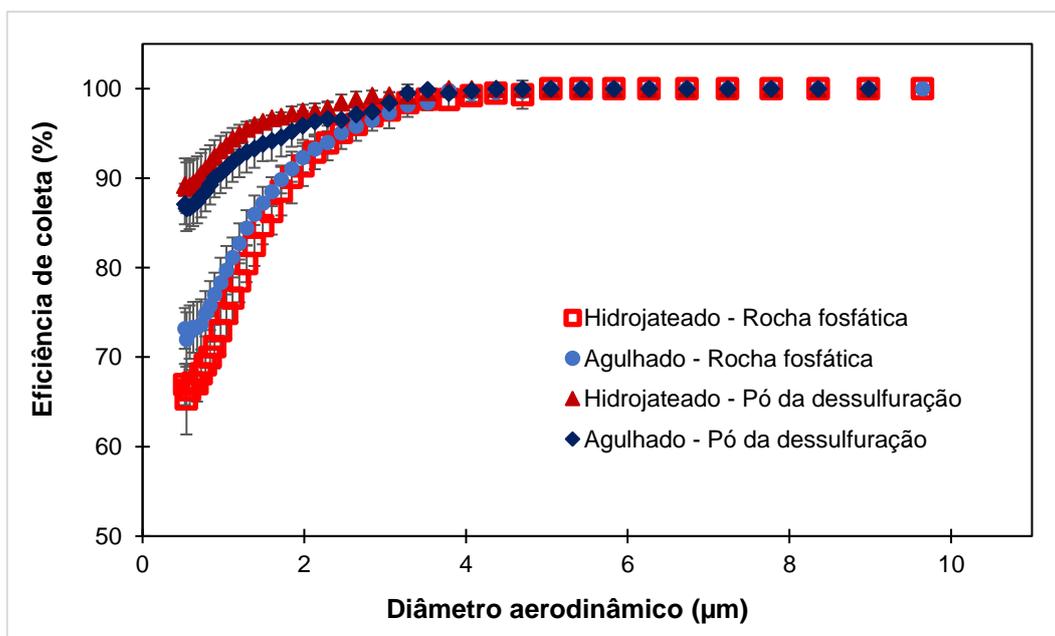
densidade, que está sujeita a ação forte do mecanismo de captura por difusão ou movimento browniano e o meio filtrante agulhado possuir uma espessura maior.

Já para o pó da dessulfuração, ambos os meios filtrantes apresentaram eficiência próximas, mas o meio filtrante hidrojetado apresentou uma eficiência levemente maior.

Essa diferença da eficiência entre os meios filtrantes e materiais particulados analisados evidencia a necessidade de fazer testes para determinar quais mangas são melhores para filtração de cada processo com seus respectivos materiais particulados.

A intensificação dos mecanismos de captura de interceptação direta e de impactação inercial favoreceu a alta eficiência na captura das partículas maiores pelos meios filtrantes virgens (HINDS, 1982).

**Figura 44** - Ensaio de filtração utilizando os meios filtrantes virgens nos momentos iniciais ( $\Delta P_0$ ).



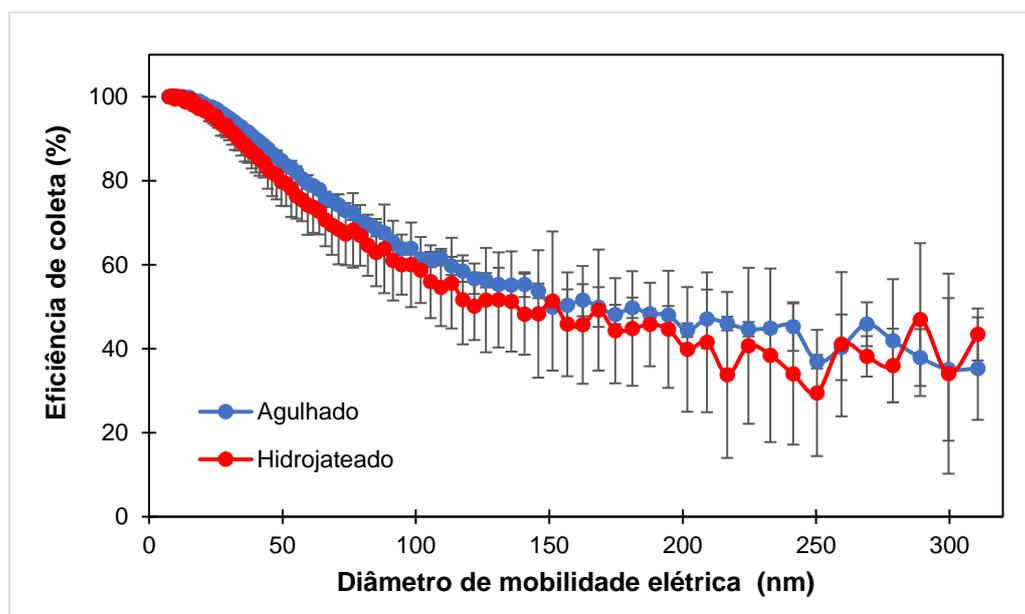
Fonte: Arquivo pessoal.

Andrade (2019) também observou uma pequena influência da gramatura nos momentos iniciais de filtração para micropartículas, onde o meio filtrante de poliéster com fibras encapsuladas com Teflon (PE P) de gramatura 600 g/cm<sup>2</sup> teve uma eficiência um pouco maior que o meio filtrante de poliéster com fibras encapsuladas com Teflon (PE P) de gramatura 540 g/cm<sup>2</sup>.

## 5.2 Eficiência para nanopartículas

Os meios filtrantes virgens foram submetidos a análise de nanopartículas para determinação da eficiência, no equipamento apresentado na Figura 34. A Figura 45 apresenta a eficiência encontrada pelo diâmetro de mobilidade elétrica.

**Figura 45** - Ensaio de filtração com nanopartículas utilizando os meios filtrantes virgens.



Fonte: Arquivo pessoal.

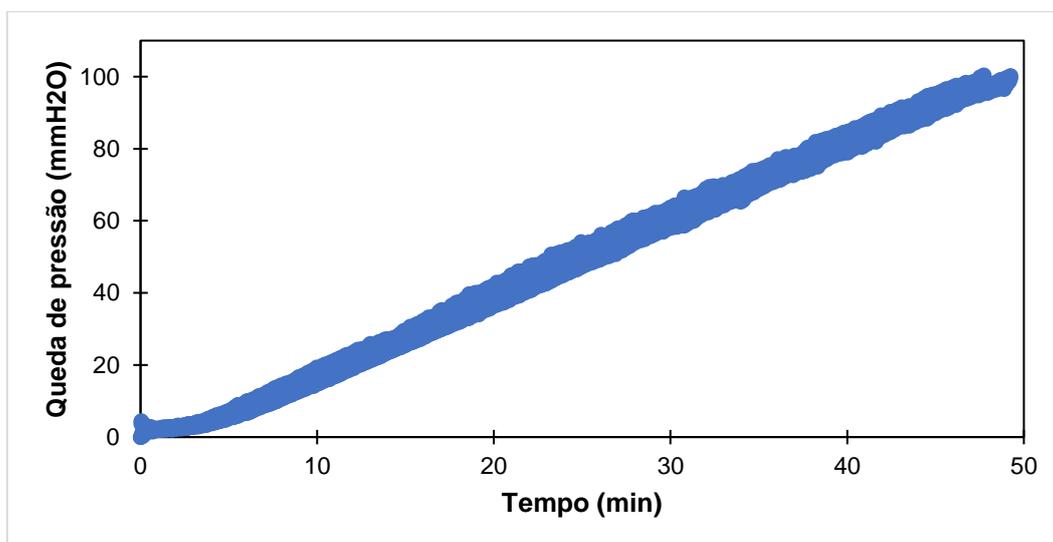
Constata-se na Figura 45 que a eficiência de ambos os meios filtrantes foi bem próxima, o meio filtrante agulhado apresentou maior eficiência de coleta de nanopartículas do que o meio filtrante hidrojateado, porém se considerar os desvios padrões as eficiências são iguais. E também, é possível ver que para ambos os meios filtrantes, há uma diminuição da eficiência com aumento do diâmetro da partícula. Isso ocorre devido ao desempenho dos mecanismos de coleta, que segundo Hinds (1982), essa faixa de diâmetro é grande para a ação dos mecanismos disfuncionais e pequenos para a ação dos mecanismos interceptação direta, o que torna essa faixa de diâmetro mais difícil de ser retido.

Os desvios padrões altos com o aumento do tamanho de partículas, são devido a competição entre os mecanismos de coletas de difusão e interceptação. A semelhança no comportamento dos meios filtrantes é devido as características físicas próximas de porosidade, tratamento superficial e serem feitos do mesmo material e possuírem o mesmo tratamento, como descrito no item 4.2.

### 5.3 Ensaios de filtração para o primeiro ciclo

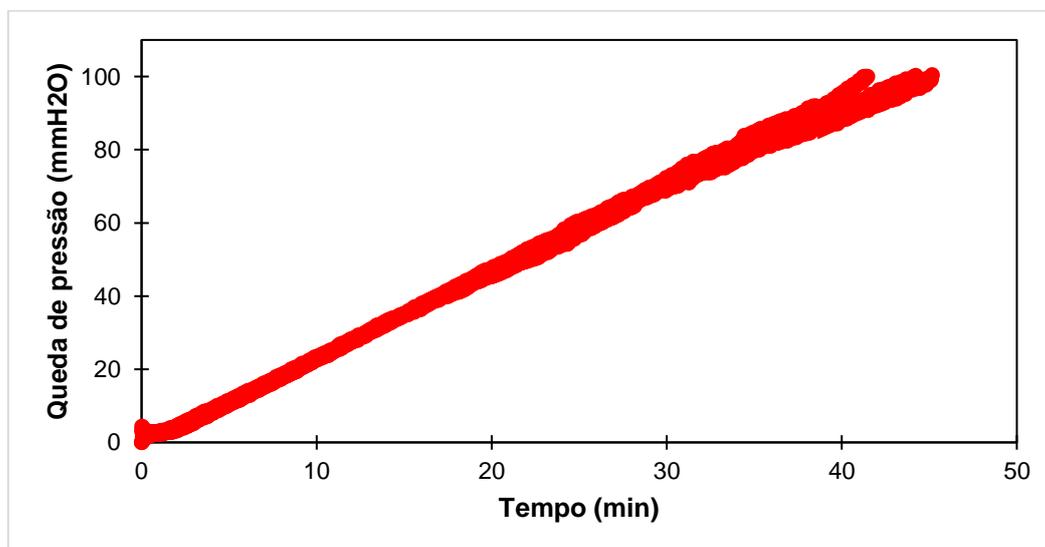
Os ensaios de filtração para um ciclo foram realizados de acordo com a norma alemã VDI 3926, para o primeiro ciclo de filtração de cada meio filtrante. Ao atingir a queda de pressão máxima de 100 mmH<sub>2</sub>O, a filtração era interrompida e o meio filtrante contendo a torta era pesado. Nas Figuras 46 e 47, apresenta-se as quedas de pressões em triplicadas obtidas no meio filtrante pelo tempo.

**Figura 46** - Ensaio de filtração para o primeiro ciclo com o pó da dessulfuração para meio filtrante agulhado.



Fonte: Arquivo pessoal.

**Figura 47** - Ensaio de filtração para o primeiro ciclo com o pó da dessulfuração para meio filtrante hidrojateado.



Fonte: Arquivo pessoal.

Ambos os meios filtrantes apresentaram uma curva com formato de concavidade para cima, este comportamento é próprio do primeiro ciclo de filtração de alguns dos meios filtrantes, onde se tem a penetração do material particulado no meio filtrante. Porém é possível notar que a concavidade do meio filtrante hidrojetado é menor do que o meio filtrante agulhado, que pode indicar menor penetração no meio filtrante hidrojetado.

A Tabela 11 estão os resultados obtidos no ensaio de filtração para um ciclo, onde possível verificar a diferença entre os meios filtrantes.

**Tabela 11** - Resultados para ensaio de filtração para o primeiro ciclo.

Parâmetro	Pó da dessulfuração	
	Agulhado	Hidrojetado
<b>Eficiência (%)</b>	99,9702 ± 0,0147	99,9269 ± 0,0115
<b>Tempo (min)</b>	48,7889 ± 0,9179	43,6222 ± 1,9242

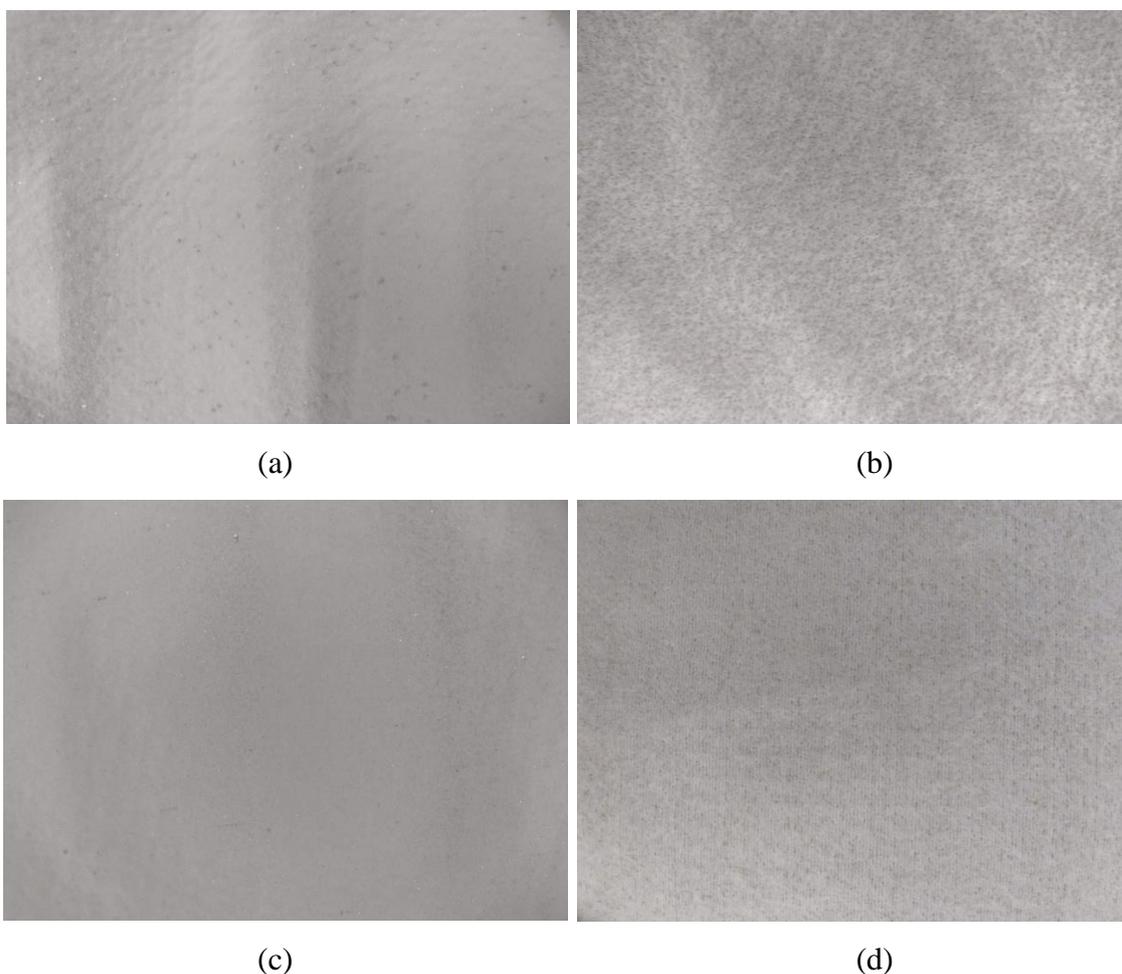
Fonte: Arquivo pessoal.

Ambos os meios filtrantes apresentaram eficiência acima de 99,9%, onde o meio filtrante agulhado apresentou maior tempo de filtração do que o meio filtrante hidrojetado. Isso deve-se ao fato de que o tempo de filtração é maior quando os meios filtrantes apresentam maior permeabilidade e porosidade, como é o caso do meio filtrante agulhado.

Quando se utiliza a limpeza por jato de ar pulsante, é mais favorável que a manga leve um maior tempo para atingir a queda de pressão máxima, pois haveria menor necessidade de limpeza o que prolonga a vida útil da manga. A partir disso, o meio filtrante agulhado obteve melhores resultados no primeiro ciclo de filtração.

Os meios filtrantes que promovem a coleta de poeira na superfície proporcionam uma limpeza mais eficaz dos pulsos, que conseqüentemente, no próximo ciclo levará mais tempo para atingir a queda pressão máxima. Na Figura 48 é possível ver os meios filtrantes com a torta de filtração e após o primeiro pulso de limpeza.

**Figura 48** – Pó da dessulfuração sobre o meio filtrante e após o primeiro pulso de limpeza (a), (b) agulhado e (c), (d) hidrojetado.



Fonte: Arquivo pessoal.

Durante os ensaios de filtração para o primeiro ciclo, percebeu-se que o pó da dessulfuração aderiu mais uniformemente ao meio filtrante hidrojetado. Também se notou que no meio filtrante agulhado a poeira ficou incrustada após o primeiro pulso de limpeza, mostrando ser mais resistente ao efeito do pulso de limpeza do que o meio filtrante hidrojetado. Essa resistência a limpeza, com o tempo de filtração, faz com que o meio filtrante atinja a queda de pressão máxima mais rápido, ou seja, menor tempo do ciclo.

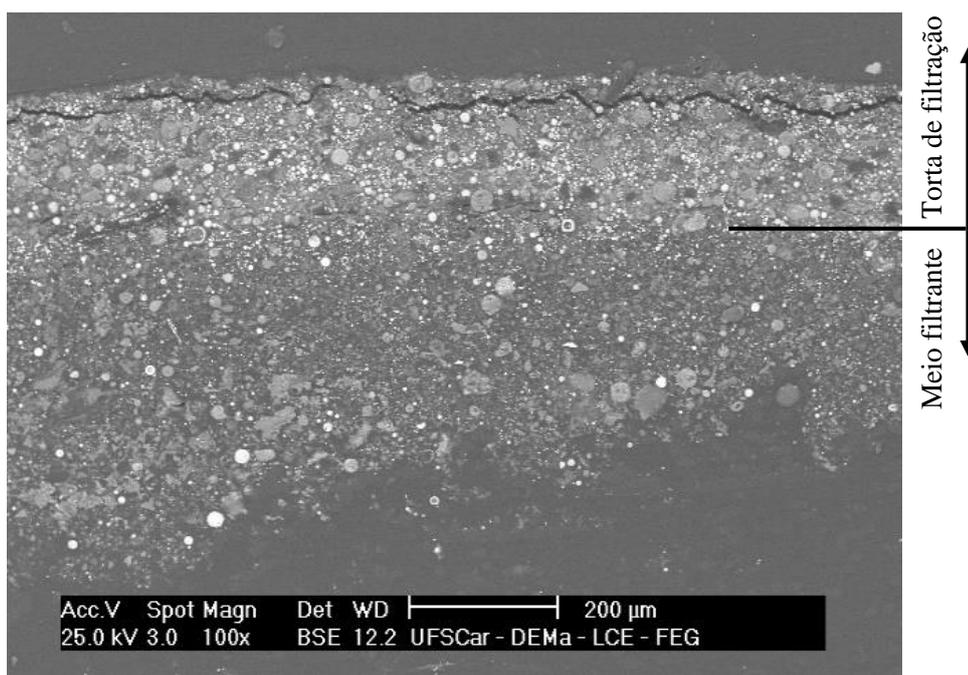
O meio filtrante hidrojetado foi o que apresentou a menor quantidade de massa depositada ao atingir a queda de pressão máxima, isso deve-se ao seu tecido ser mais fechado.

#### 5.4 Determinação da penetração das partículas no meio filtrante

Após os meios filtrantes serem submetidos aos ensaios de filtração para um ciclo, eles foram embutidos, lixados e polidos. Em seguida, foram encaminhadas ao Laboratório de Caracterização Estrutural do DEMa/UFSCar, onde através do equipamento MEV, foram obtidas imagens da seção transversal do meio filtrante contendo a torta, como ilustrado na Figura 49.

Por causa da qualidade das imagens do meio filtrante agulhado não foi possível fazer a contagem de partículas por profundidade do meio filtrante porém, como as imagens do meio filtrante hidrojetado ficaram bem visíveis, foi possível determinar em qual teve maior penetração apenas observando as imagens.

**Figura 49** - Imagens da seção transversal dos meios filtrantes submetidos aos ensaios de filtração de um ciclo. Meio filtrante agulhado em (a) e hidrojetado em (b); Aumento de 100x e escala de 200  $\mu\text{m}$ .



(a)



(b)

Fonte: Arquivo pessoal.

Na Figura 49, é possível ver a deposição de material particulado em ambos os meios filtrantes. Também há regiões com maior deposição de pó do que outras, isso porque algumas partes do meio filtrante durante o processo de fabricação podem ser mais fechadas sendo mais resistente a passagem do gás, que faz com que o gás contendo material particulado procure as partes mais abertas do meio filtrante que apresentam menor resistência à passagem do gás.

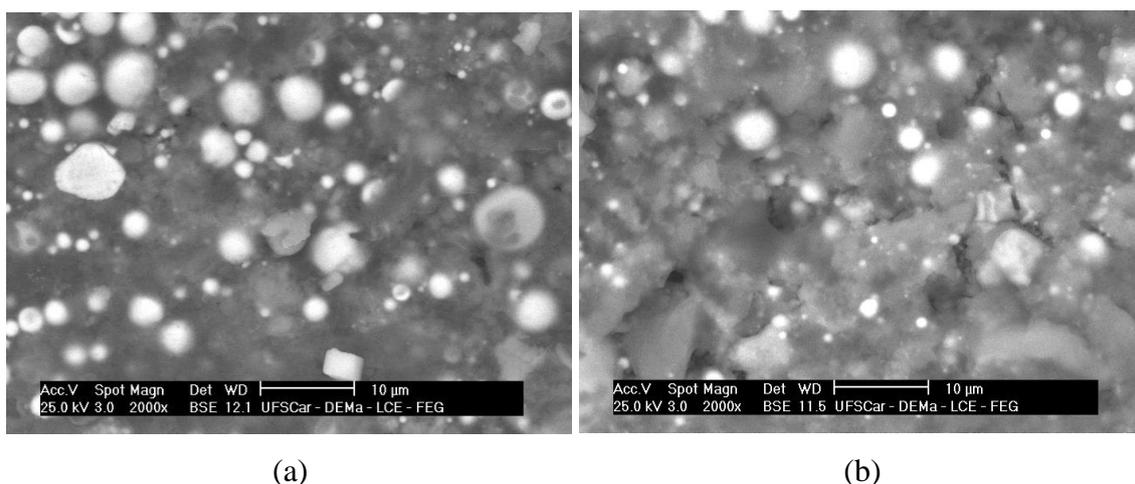
No meio filtrante hidrojetado observa-se menor penetração do material particulado, o que resulta numa melhor facilidade de limpeza, conseqüentemente menor perda de carga e menor emissão de material particulado com o tempo.

E a maior penetração o material particulado no meio filtrante agulhado deve-se a sua maior porosidade. Segundo Pereira *et al.* (2016), quanto mais profunda for a penetração das partículas de material particulado no meio filtrante, maior poderá ser o desgaste, o que diminui a vida útil do meio filtrante.

## 5.5 Porosidade da torta

As imagens da torta de filtração obtido pelo MEV não ficaram nítidas o que impossibilitou fazer a binarização das imagens utilizando o *software Image Pro Plus 7.0*. A Figura 50 apresenta o material particulado das tortas de filtração de cada meio filtrante.

**Figura 50** – Torta de filtração do meio filtrante (a) agulhado e (b) hidrojetado.



Fonte: Arquivo pessoal.

Utilizando as equações de Ergun e McDonald modificadas foi possível calcular a porosidade teórica da torta de filtração. A porosidade encontrada para a torta do meio filtrante agulhado foi de  $0,8799 \pm 0,0018$  e para torta do meio filtrante hidrojetado foi de  $0,8704 \pm 0,0042$ . Já na equação de MacDonald modificada a porosidade encontrada para a torta do meio filtrante agulhado foi de  $0,8948 \pm 0,0017$  e para torta do meio filtrante hidrojetado foi de  $0,8861 \pm 0,0039$ .

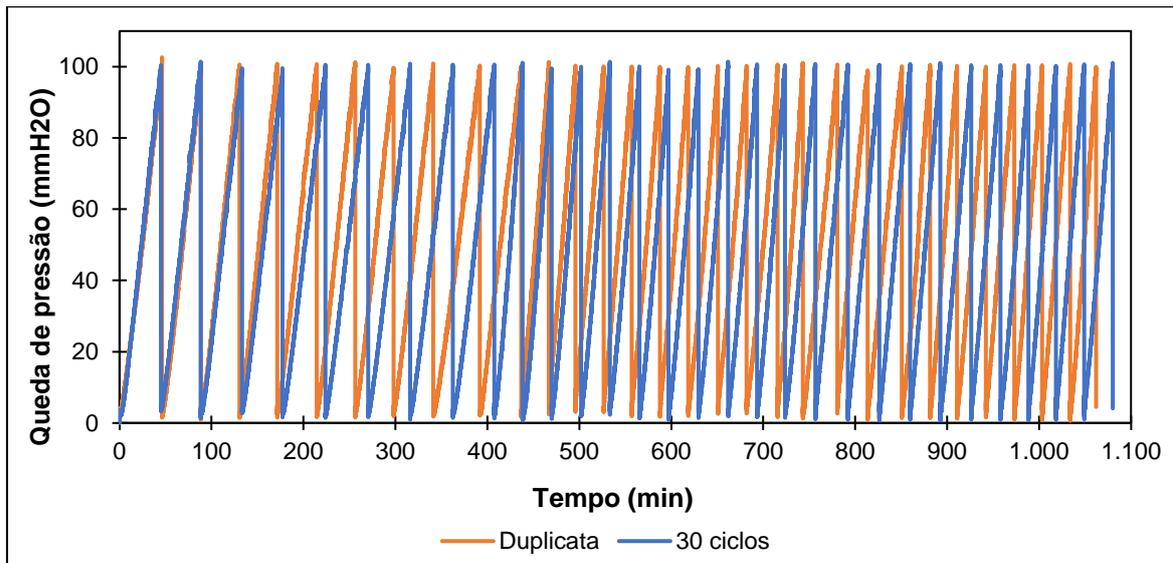
A porosidade da torta dos meios filtrantes foi próxima pois os meios filtrantes são compostos do mesmo material, meta-aramida, e a filtração realizada com o mesmo material particulado. Valores de porosidade pequenos indicam que a torta de filtração é mais compacta.

## 5.6 Ciclos de filtração e limpeza

Os trintas ciclos de filtração foram realizados utilizando o pó da dessulfuração e com limpeza por jato de ar pulsante nos meios filtrantes virgens, conforme descrito no item 4.8.

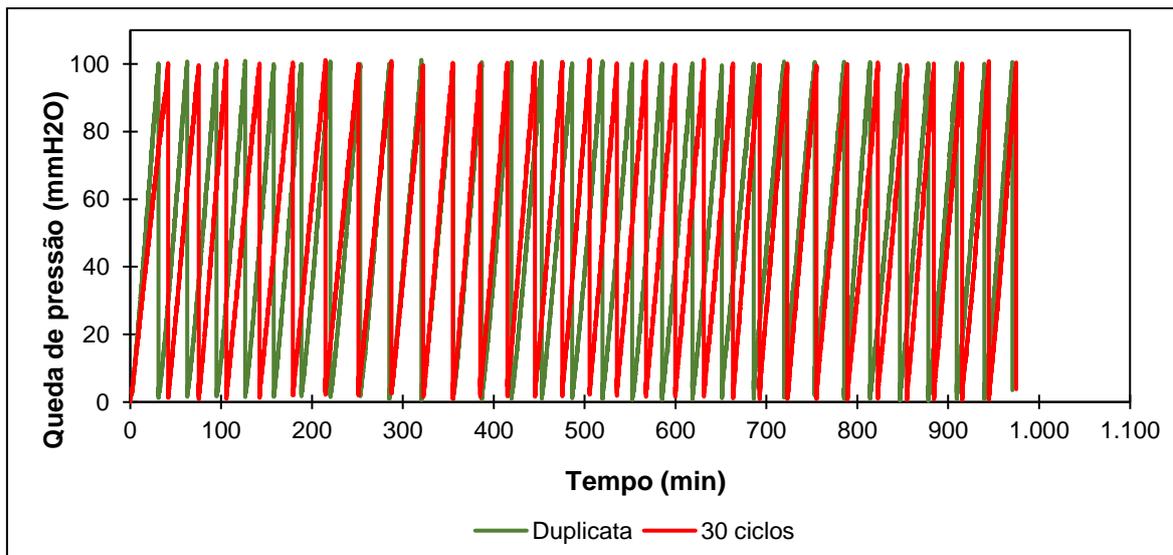
Nas Figuras 51 e 52 apresenta-se os gráficos de queda de pressão em função do tempo.

**Figura 51** - Trinta ciclos de filtração do meio filtrante agulhado virgem.



Fonte: Arquivo pessoal.

**Figura 52** - Trinta ciclos de filtração para o meio filtrante hidrojateado virgem.



Fonte: Arquivo pessoal.

Verifica-se nas Figuras 51 e 52, que a duração dos ciclos variou e que o tempo de filtração de ambas as duplicatas foram menores do que os trinta primeiros ciclos. Essa diferença no tempo total pode ser devido ao uso de partes diferentes da manga, a realização de ensaios em dias diferentes, uma diferença na alimentação durante o processo ou ainda a variações que o equipamento pode estar sujeito, que pode influenciar no processo de filtração.

Os ciclos do meio filtrante agulhado foram mais longos do que o meio filtrante hidrojetado os tempos de filtração estão apresentados na Tabela 12. Também foi calculado a eficiência no décimo, vigésimo e trigésimo ciclo.

**Tabela 12** - Eficiência e tempo de filtração para ciclos dos meios filtrantes virgens.

<b>10 ciclos</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Agulhado</b>	<b>Hidrojetado</b>
<b>Eficiência (%)</b>	99,9618 ± 0,0057	99,9624 ± 0,0140
<b>Tempo total médio (min)</b>	437,5667 ± 0,9899	337,6500 ± 24,4423
<b>Tempo médio do ciclo (min)</b>	43,7567 ± 0,0990	33,7650 ± 2,442
<b>20 ciclos</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Agulhado</b>	<b>Hidrojetado</b>
<b>Eficiência (%)</b>	99,9813 ± 0,0105	99,9820 ± 0,0048
<b>Tempo total médio (min)</b>	749,9667 ± 9,6167	657,0500 ± 8,6503
<b>Tempo médio do ciclo (min)</b>	37,4983 ± 0,4808	32,8525 ± 0,4325
<b>30 ciclos</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Agulhado</b>	<b>Hidrojetado</b>
<b>Eficiência (%)</b>	99,9821 ± 0,0021	99,9825 ± 0,0001
<b>Tempo total médio (min)</b>	1071,1000 ± 12,8222	972,7167 ± 2,9463
<b>Tempo médio do ciclo (min)</b>	35,7033 ± 0,4274	32,4239 ± 0,0982

Fonte: Arquivo pessoal.

Na Tabela 12 é possível perceber que após os trinta ciclos de filtração a eficiência de ambos os meios filtrantes se igualam e o tempo de filtração se aproxima. Também se percebe que os valores de tempo médio do ciclo vigésimo e trigésimo do meio filtrante hidrojetado são bem próximos, quase igual, o que indica que houve a saturação do meio filtrante.

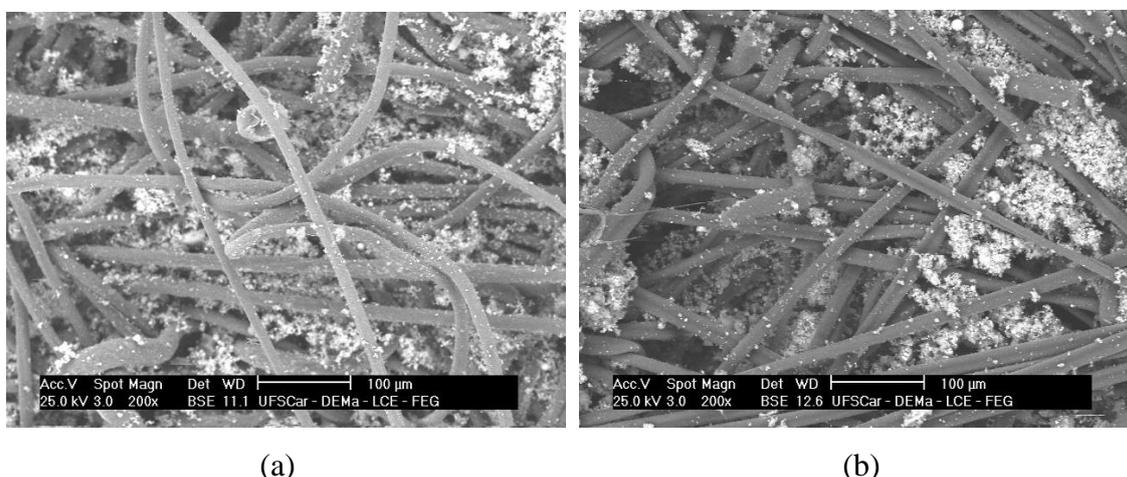
Comparando as Tabelas 11 e 12 é possível constatar um pequeno aumento de eficiência e uma redução de tempo do ciclo. Para trinta ciclos, essa redução do tempo médio foi aproximadamente 25,67% para o meio filtrante hidrojetado e 26,82% para meio filtrante agulhado. Nota-se que o meio filtrante agulhado ainda apresenta maior tempo de filtração, porém ao comparar com o tempo do primeiro ciclo de filtração, o meio filtrante hidrojetado apresentou uma redução menor no tempo de filtração. Essa menor

redução do tempo de filtração é devido a limpeza ser mais efetiva no meio filtrante hidrojateado, que faz com que leve mais tempo para atingir a queda de pressão máxima.

### 5.7 Eficiência dos meios filtrantes envelhecidos

Conforme descrito nos itens 4.9 e 4.10, amostras de meios filtrantes foram envelhecidos, para simular o uso em uma indústria siderúrgica, e posteriormente foram analisadas. A Figura 53 apresenta imagens da superfície externa dos meios filtrantes envelhecidos para verificar se houve desgaste pelo processo.

**Figura 53** - Imagens da superfície externa do meio filtrante envelhecido (a) agulhado e (b) hidrojateado.



(a)

(b)

Fonte: Arquivo pessoal.

Na Figura 53 é possível notar que há a presença do material particulado em ambos os meios filtrantes. Percebe-se que grande parte do material particulado foi removido da superfície, mas ainda há material particulado no interior do meio filtrante, fechando-se assim os poros e os caminhos preferencias de escoamento do ar.

O diâmetro de fibra e a espessura dos meios filtrantes envelhecidos apresentaram alteração insignificantes, o que representa que os meios filtrantes possuem vida útil longa.

Essas amostras passaram por ensaios de permeabilidade, avaliação da eficiência de coleta para micropartículas e ciclos de filtração e limpeza. Na Tabela 13 apresenta-se os valores de permeabilidade, constante de Darcy e de ensaio de tração obtidos para os meios filtrantes envelhecidos.

**Tabela 13** – Características dos meios filtrantes envelhecidos.

Parâmetro	Meio filtrante	
	Agulhado	Hidrojetado
$k_1 \times 10^{-13} \text{ (m}^2\text{)}$	228,4270 ± 1,2108	143,9835 ± 0,1450
<b>Permeabilidade ((m<sup>3</sup>/min) /m<sup>2</sup>) @ 196 Pa</b>	6,5086 ± 0,0431	7,7607 ± 0,0179
<b>Porosidade (Ergun)</b>	0,8252 ± 0,079	0,7903 ± 0,0004
<b>Força de Ruptura (N)</b>	<b>Transversal</b>	530,757 ± 17,892
	<b>Longitudinal</b>	484,199 ± 27,271

Fonte: Arquivo pessoal.

Observando os valores de permeabilidade apresentado nas Tabelas 5 e 13, nota-se que para o meio filtrante agulhado usado obteve-se uma redução média de 57,92% na permeabilidade quando comparada ao meio filtrante virgem e para o meio filtrante hidrojetado essa redução foi de 36,03%.

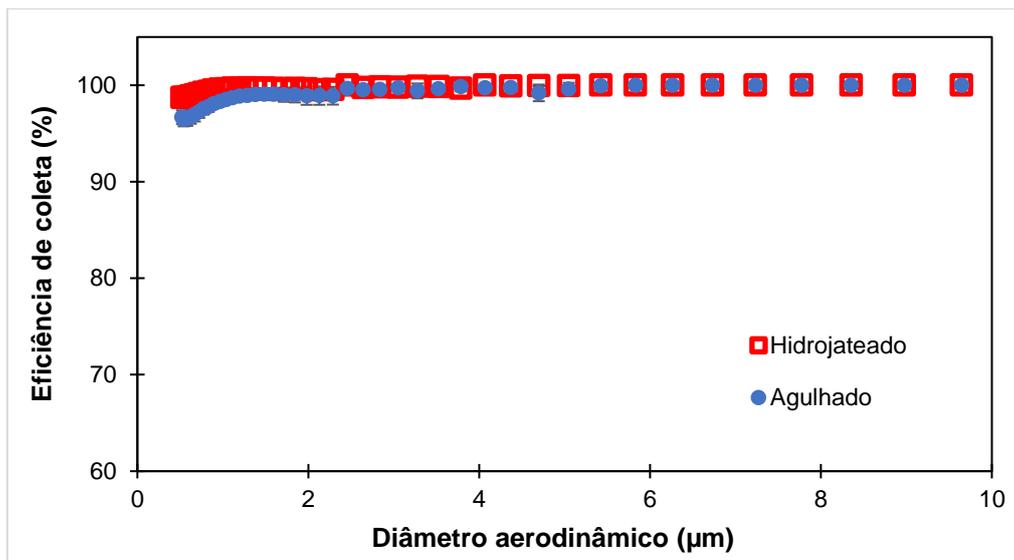
A redução da permeabilidade do meio filtrante agulhado foi maior e ele apresentou a permeabilidade um pouco menor do que o meio filtrante hidrojetado, ou seja, após o envelhecimento o meio filtrante hidrojetado apresentou um valor de permeabilidade 16,13% maior do que o meio filtrante agulhado. Esse valor maior de redução de permeabilidade pode significar que com mais ciclos de filtração, o tempo do ciclo de filtração do meio filtrante agulhado reduz cada vez mais, necessitando de limpeza mais rápido do que o meio filtrante hidrojetado.

Foi visto também redução na porosidade de ambos os meios filtrantes pois o material particulado preencheu os poros e não houve alteração na espessura e diâmetro de fibras dos meios filtrante indicando que não houve desgaste.

Comparando os valores de tração obtidos, ainda nas Tabelas 5 e 13, observa-se uma redução da força necessária para ruptura, como já era esperado pelo uso do meio filtrante. Com os valores obtidos próximos ao do meio filtrante virgem, o meio filtrante envelhecido demonstra uma boa conservação das propriedades mecânicas, indicando que não houve algum tipo de ataque que desgastaria os meios filtrantes durante o processo.

Já eficiência de coleta para micropartículas em função do diâmetro aerodinâmico para as mangas envelhecidas esta ilustrada na Figura 54.

**Figura 54** - Eficiência de coleta de micropartículas para o meio filtrante envelhecidos.

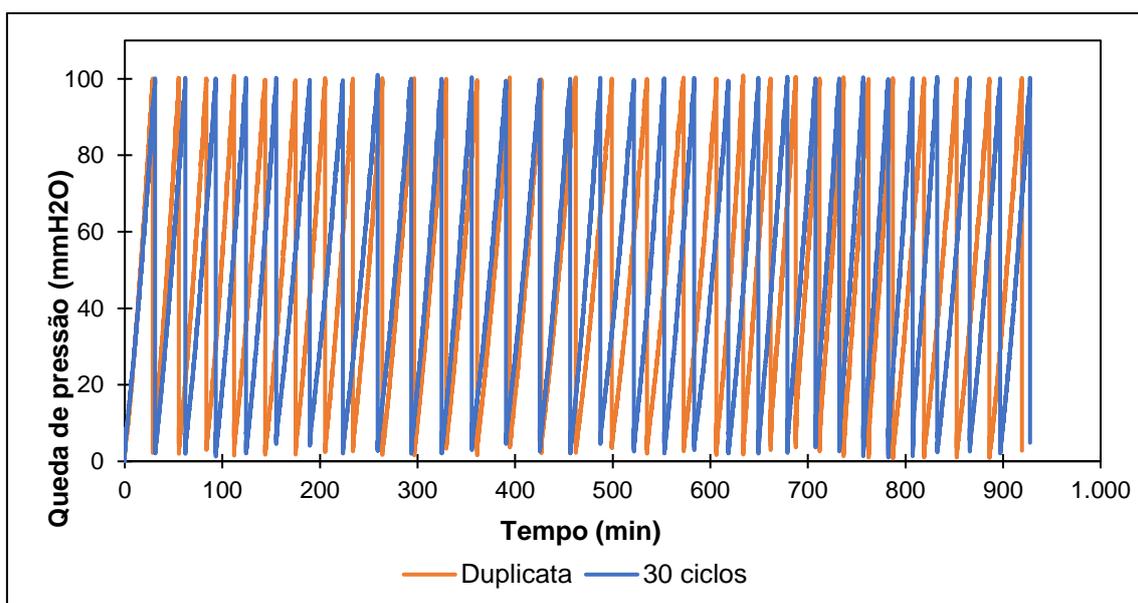


Fonte: Arquivo pessoal.

Conforme ilustrado na Figura 54, a eficiência de coleta de ambos os meios filtrantes aumentou, quando comparado com eles virgens, apresentando uma eficiência próxima a 100% para toda a faixa de diâmetro aerodinâmica analisada. Isso ocorre porque os poros dos meios filtrantes já estavam preenchidos com pó, impedindo a passagem e fazendo uma filtração mais efetiva.

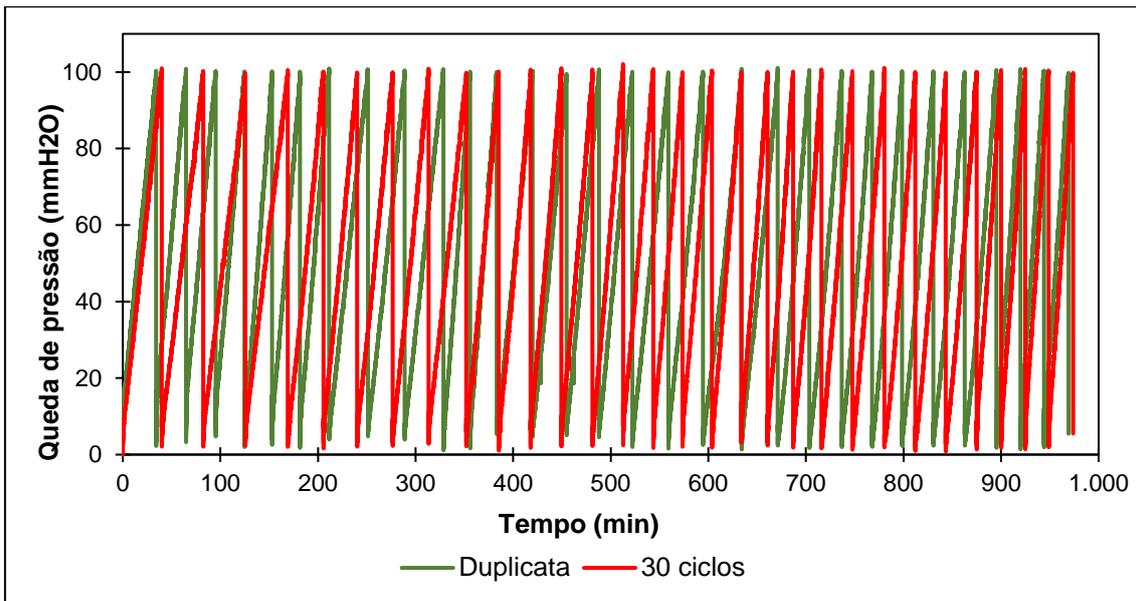
As Figuras 55 e 56, ilustra a queda de pressão em função do tempo de filtração dos meios filtrantes envelhecidos.

**Figura 55** - Ciclos de filtração para o meio filtrante agulhado envelhecido.



Fonte: Arquivo pessoal.

**Figura 56** - Ciclos de filtração para o meio filtrante hidrojetado envelhecido.



Fonte: Arquivo pessoal.

Constata-se nas Figuras 55 e 56, que ambas as duplicatas ainda tiveram o tempo total de filtração menor do que os trinta primeiros ciclos. Essa diferença no tempo total pode ser devido ao uso dos mesmos meios filtrantes usados nos trinta ciclos de filtração do item 5.5, a realização dos ensaios em dias diferentes, uma diferença na alimentação durante o processo ou ainda a variações que o equipamento pode estar sujeito que pode influenciar na filtração.

Na Tabela 14 apresenta-se os valores de tempo total da filtração, tempo do ciclo e eficiência para o décimo, vigésimo e trigésimo ciclo de filtração, para o meio filtrante envelhecido.

**Tabela 14** - Eficiência e tempo de filtração para 30 ciclos do meio filtrante envelhecidos.

<b>10 ciclos</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Agulhado</b>	<b>Hidrojetado</b>
<b>Eficiência (%)</b>	99,9558 ± 0,0063	99,9711 ± 0,0005
<b>Tempo total (min)</b>	310,6167 ± 19,8226	356,9167 ± 40,0458
<b>Tempo médio do ciclo (min)</b>	31,0617 ± 1,9823	35,6917 ± 4,0046
<b>20 ciclos</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Agulhado</b>	<b>Hidrojetado</b>
<b>Eficiência (%)</b>	99,9566 ± 0,0043	99,9736 ± 0,0009
<b>Tempo total (min)</b>	641,4667 ± 10,9837	679,0167 ± 11,1959
<b>Tempo médio do ciclo (min)</b>	32,0733 ± 0,5492	33,9508 ± 0,5598
<b>30 ciclos</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Agulhado</b>	<b>Hidrojetado</b>
<b>Eficiência (%)</b>	99,9537 ± 0,0016	99,9734 ± 0,0021
<b>Tempo total (min)</b>	923,5167 ± 5,8690	971,5000 ± 3,2998
<b>Tempo médio do ciclo (min)</b>	30,7839 ± 0,1956	32,3833 ± 0,1100

Fonte: Arquivo pessoal.

Comparando as Tabelas 12 e 14, nota-se que ainda houve redução no tempo dos trinta ciclos de filtração dos meios filtrantes quando comprados aos virgens e que o tempo de filtração do meio filtrante hidrojetado ultrapassou o tempo de filtração do meio filtrante agulhado. Com relação a redução do tempo, para o meio filtrante agulhado essa redução de tempo foi de aproximadamente 13,78%, quanto para meio filtrante hidrojetado foi de 0,13%, isso deve-se a limpeza ser mais eficiente.

Segundo a norma VDI 3926, a duração do ciclo muda ao longo de um número maior de ciclos. Em alguns casos, surgem valores relativamente constantes, isso é chamado de comportamento operacional estável. A avaliação desta afirmação requer cerca de 100 ciclos a 1000 ciclos de filtração dependendo do meio filtrante. Isso sugere que o meio filtrante possui uma fase de adaptação onde é possível obter valores diferentes nos momentos iniciais de filtração.

Apesar do meio filtrante agulhado ter se mostrado mais indicado nos momentos iniciais da filtração com o meio filtrante virgem, após o envelhecimento verificou-se que o meio filtrante hidrojetado mostrou-se mais indicado para o material particulado usado

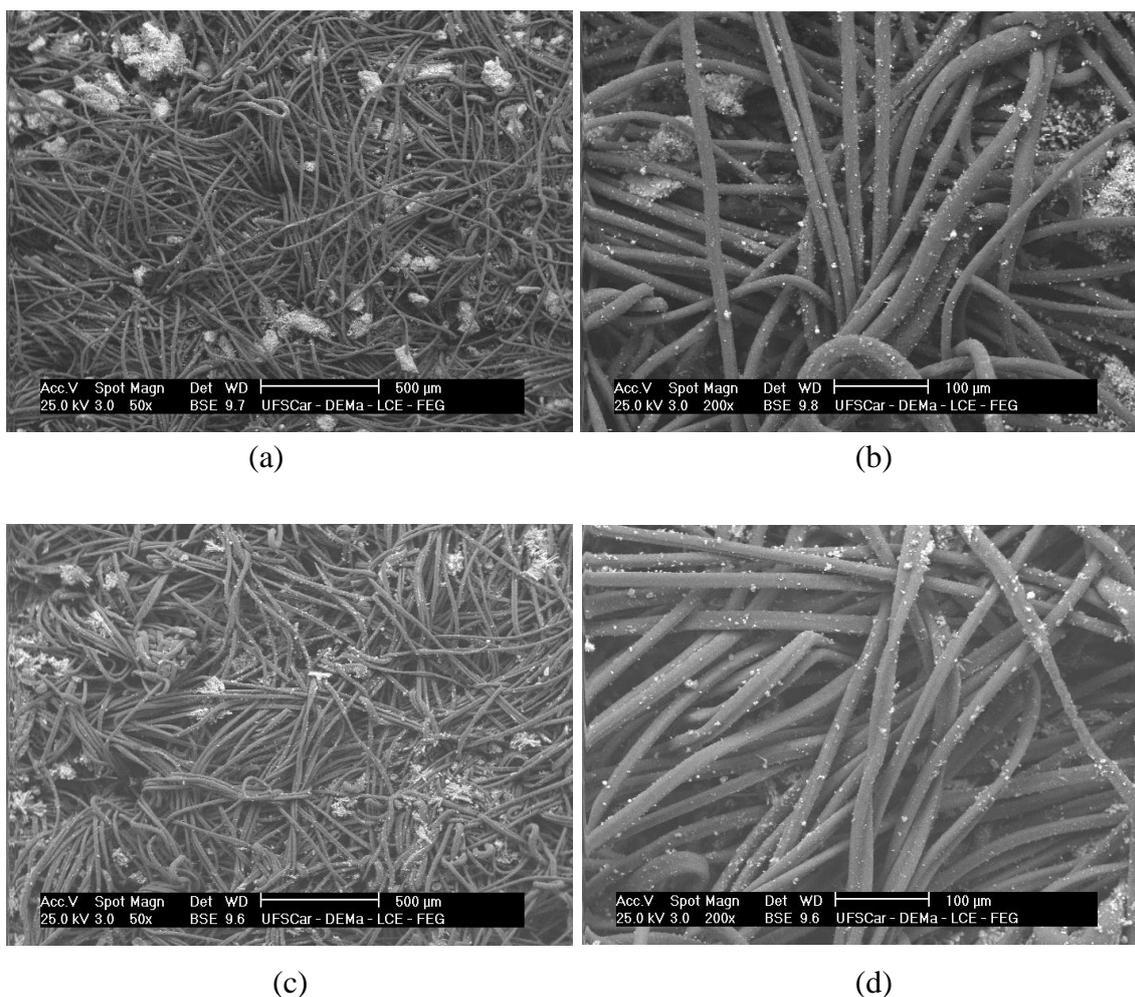
nos teste experimentais, apresentando uma melhor eficiência, maior tempo de filtração e uma menor redução de tempo que são indicativos de uma melhor limpeza.

### 5.8 Avaliação dos meios filtrantes usados

As mangas recebidas não possuíam evidências de desgastes, furos ao longo de seu comprimento ou qualquer outro dano que pudesse comprometer sua integridade, e foram usadas em 2190 ciclos de filtração com o pó da dessulfuração e as mesmas condições operacionais do trabalho.

Como descrito no item 4.11, após receber as mangas foram retiradas amostras para realizar análise de permeabilidade e para ser encaminhadas ao LCE para obtenção de imagens da superfície do meio filtrante usado a partir do equipamento MEV. As imagens obtidas estão apresentadas na Figura 57.

**Figura 57** - Imagens da superfície externa do meio filtrante usado (a) e (b) agulhado e (c) e (d) hidrojetado.



Fonte: Arquivo pessoal.

Na Figura 57 nota-se a presença de material particulado na superfície e no interior dos meios filtrantes. Analisando as Figuras 53 e 57, é possível ver que não ocorreu grandes desgastes das fibras dos meios filtrantes usados pela indústria siderúrgica o que indica boa conservação das suas propriedades.

Na tabela 15 é possível ver as características dos meios filtrantes usados.

**Tabela 15** – Características dos meios filtrantes usados.

Parâmetro	Meio filtrante	
	Agulhado	Hidrojetado
$k_1 \times 10^{-13} \text{ (m}^2\text{)}$	150,6862 ± 0,2151	242,6078 ± 0,1933
<b>Permeabilidade ((m<sup>3</sup>/min) /m<sup>2</sup>) @ 196 Pa</b>	6, 2070 ± 0,6364	7,8617 ± 0,4671
<b>Porosidade (Ergun)</b>	0,8093 ± 0,0019	0,7923 ± 0,0037

Fonte: Arquivo pessoal.

Na Tabela 15, constata-se que o meio filtrante hidrojetado apresentou maior permeabilidade com o tempo de uso, isso deve-se ao material particulado que ficou presente no interior do meio filtrante agulhado fechando os caminhos preferenciais de ar. Houve também uma aproximação dos valores de porosidade, onde se teve uma redução de 8,40% para meio filtrante agulhado e 5,80% para o meio filtrante hidrojetado.

Ao analisar os dados da Tabela 15 e comparar com a Tabela 13, é possível observar que houve um aumento na permeabilidade do meio filtrante hidrojetado e uma pequena redução na permeabilidade do meio filtrante agulhado. Esse aumento da permeabilidade do meio filtrante hidrojetado quando comparado ao meio filtrante envelhecido pode ser devido ao desgaste sofrido pelas fibras dos meios filtrantes fazendo com que as fibras se desgastem e aumente a sua permeabilidade.

Comparando os meios filtrantes usados com os meios filtrantes virgens é possível ver uma redução de 59,87% na permeabilidade do meio filtrante agulhado e 35,19% na permeabilidade do meio filtrante hidrojetado durante esse tempo de uso pela indústria siderúrgica.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho avaliou-se o desempenho dos meios filtrantes 100% meta-aramida agulhado e hidrojateado. E a partir dos resultados apresentados no capítulo 5 foi possível concluir que:

Considerando os dois meios filtrantes utilizados neste estudo, as fibras do meio filtrante agulhado são em média 13,99% menores do que as fibras do meio filtrante Hidrojateado. O que justifica o meio filtrante agulhado apresentar permeabilidade e porosidade maiores do que o meio filtrante hidrojateado.

Na avaliação de eficiência para nanopartículas, o meio filtrante agulhado virgem apresentou uma eficiência um pouco maior do que a do meio filtrante hidrojateado virgem, mas ambas as eficiências estão bem próximas.

Para a eficiência de micropartículas utilizando a rocha fosfática, simulando uma pior condição, o meio filtrante agulhado virgem se mostrou mais eficiente para as partículas de diâmetro entre 0,523 a 2  $\mu\text{m}$ , a partir de 2  $\mu\text{m}$ , as eficiências de ambos os meios filtrantes se igualam. Para o pó da dessulfuração, a eficiência de ambos os meios filtrantes foi próxima, tendo o meio filtrante hidrojateado sido levemente maior.

Nos ensaios de queda de pressão máxima, o meio filtrante agulhado virgem demorou mais tempo para completar o ciclo de filtração do que o meio filtrante hidrojateado virgem. As eficiências de filtrações, de acordo com a norma VDI 3926, para ambos os meios filtrantes foram próximas, tendo alteração na segunda casa decimal.

Na determinação de penetração de material particulado, o meio filtrante agulhado apresentou uma maior penetração de partículas ao longo da secção transversal do filtro, devido a sua maior porosidade.

Após 30 ciclos filtração, foi possível verificar que as eficiências de coleta se igualam. Já o tempo, houve uma diminuição quando comparado com o primeiro, essa redução de tempo de filtração foi maior para o meio filtrante agulhado.

Após o envelhecimento houve uma redução na permeabilidade e porosidade para ambos os meios filtrantes. Ao analisar eficiência de micropartículas para os meios filtrantes envelhecidos utilizando apenas o pó da dessulfuração, constatou-se que para ambos os meios filtrantes a eficiência de coleta aumentou em relação aos meios filtrantes virgens e se aproximaram de 100% para toda faixa de diâmetro analisada.

Já nas análises de 30 ciclos de filtração após o envelhecimento, observou-se que o meio filtrante hidrojateado envelhecido apresentou uma maior eficiência de remoção de partículas e maior tempo de filtração do que meio filtrante agulhado envelhecido. O meio

filtrante hidrojateado apresentou o tempo de filtração mais estável e teve uma menor redução no tempo de filtração, comparando aos 30 ciclos de filtração dos meios filtrantes virgens, do que o meio filtrante agulhado.

Em resumo, o meio filtrante agulhado obteve maior tempo de filtração e maior massa retida no primeiro ciclo de filtração, porém apresentou maior penetração de partículas. Também o meio agulhado apresentou maior tempo para completar os trinta ciclos de filtração, no entanto, a eficiência de coleta foi levemente inferior ao meio filtrante hidrojateado. Após o envelhecimento o meio filtrante hidrojateado apresentou maior tempo de filtração para completar os trinta ciclos de filtração e maior eficiência.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Sugere-se a realização de mais ciclos de filtração no equipamento baseado na norma VDI 3926, utilizando os meios filtrantes virgens, para avaliar a evolução da queda de pressão e eficiência de coleta.

A realização de ensaios com trinta ciclos de filtração em meios filtrantes utilizados pela indústria com mais de um ano de uso, para verificar se o meio filtrante hidrojateado possui uma menor redução no tempo de ciclo, demorando mais para precisar de limpeza do que o meio filtrante agulhado.

A realização de ensaios para verificar a influência da gramatura do meio filtrante na eficiência de filtração de gases com dois tipos de material particulado um mais denso e outro menos denso.

## 8 REFERÊNCIAS

AGUIAR, M. L. Filtração de gases em filtros de tecido: deposição e remoção da camada de pó formada. Tese de doutorado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.

ANDRADE, B. K. S. A. Avaliação do precoating e dos meios filtrantes para filtro de mangas do processo de despoeiramento secundário da aciaria. 2019. Universidade Federal de São Carlos, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12984. Não-tecido - Determinação da massa por unidade de área. Rio de Janeiro, 2009.

BAIRD, C. Química Ambiental, 2ª.edição, Bookman: Porto Alegre, 2002.

BAIRD, C.; CANN, M. Química Ambiental, 4ª. edição, Bookman: Porto Alegre, 2011.

BARBOSA, M. G. Uso de filtro de mangas para tratamento de gases resultantes da combustão de bagaço de cana. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Bauru – SP, 2014.

BARROS, P. M. De. Avaliação do desempenho de meios filtrantes fibrosos na remoção de partículas nanométricas. 2014. Universidade Federal de São Carlos, 2014.

BLASCT, V. Fiber textile cu destinatii special si inalt performante. Vol. 1, Editar. Tehnopress, Iasi, 85, 2000.

BONDEX. Hydrolox Portfolio Bondex, 2019.

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, v. 175, p. 79-86, mar. 2017.

BOUDHAN, R. et al. Influence of air humidity on particle filtration performance of a pulse-jet bag filter. Journal of Aerosol Science, v. 130, p. 1-9, abril, 2019.

BRITO, G. F. S.; SODRÉ, F. F.; ALMEIDA, F. V. O impacto do material particulado na qualidade do ar. Revista Virtual de Química, v. 10, Nº. 5, outubro, 2018.

CARVALHO, M. V. A. De. Avaliação de meios filtrantes para filtro de mangas com sistema de limpeza de jato de ar pulsante do processo de despoeiramento secundário da aciaria de uma indústria siderúrgica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2018.

CARVALHO, P. S. L. De.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. De. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n.41 , p. [181]-236, mar. 2015.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Siderurgia no Brasil 2010-2025; subsídios para tomada de decisão – Brasília, 2010.

CERON, L. P. Alta eficiência na filtração tangencial de particulados de carvão em filtros de mangas. 10º Simpósio internacional de qualidade ambiental. Porto Alegre-RS, 2016.

CETESB. Qualidade do Ar 2022. 2022.

CIRQUEIRA, S. S. R. Avaliação do Desempenho dos Tratamentos das Superfícies dos Meios Filtrantes submetidos à Filtração por Pulso de Ar Reverso. 2017. Universidade Federal de São Carlos, 2017.

CONAMA. Resolução Conama nº 5/1989. 1989.

CONAMA. Resolução Conama nº 436/2011. 2011.

CONAMA. Resolução Conama nº 491/2018. 2018.

CONCEIÇÃO, A. F. G. Estudo da concentração dos poluentes atmosféricos de três lagoas e a correlação destes com variáveis meteorológicas. 2017. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017.

COSTA, R. M. Estudo da eficiência da poliimida aromática como meio filtrante em um filtro de mangas para processo de sinterização de uma indústria siderúrgica. Trabalho de graduação. Universidade Federal de São Carlos, 2020.

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

DAVIES, C. N. Air filtration. London: Academic Press, 1973.

DAVIES, C. N. The Separation of Airborne Dust and Particles. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 167, n. 1b, pp. 185 – 213, 1953.

DECRETO-LEI Nº 1.413, de 31 de julho de 1975.

DENNIS, R.; WILDER, J. E.; HARMON, D. L. Predicting pressure loss for pulse jet filters. Journal of the Air Pollution Control Association, v. 31, n. 9, p. 987 – 992, 1981.

DONOVAN, R. P. Fabric Filtration for Combustion Sources - Fundamentals and Basic Technology. New York and Basel: Marcel Dekker, 1985.

DUO, W. et al. Patchy cleaning of rigid gas filters – I. A probabilistic model. Chemical Engineering Science, v. 52, p. 141 – 151, 1997.

ENFIL, Catálogo. Soluções para Controle da Poluição Atmosférica. 2000.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. Chemical Engineering Progress, V. 48, p.89-94, 1952

FIBER LINE®. Moving High Performance Fibers Forward. Nomex Meta-Aramid. 2021.

FÖRSTER, H. et al. Separation of nanoparticles: Filtration and scavenging from waste incineration plants. Waste Management, v. 52, p. 346-352, junho 2016.

GEANKOPLIS, C. J. “Transport processes and separation process principles”. 4th ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall Professional Technical Reference, 2003.

GUARIEIRO, L. L. N.; VASCONCELLOS, P. C.; SOLCI, M. C. Poluentes atmosféricos provenientes da queima de combustíveis fósseis e biocombustíveis: uma breve revisão. Revista Virtual de Química, v. 3, Nº 5, 2011.

HINDS, W. C. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. John Wiley & Sons, 1982.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Dados do setor, 2020. Acessado em 14 de agosto de 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Estatísticas mensal, 2021. Acessado em 14 de fevereiro de 2022.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Proposição de limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos de fontes fixas existentes para a indústria siderúrgica em nível nacional – Justificativa técnica. Rio de Janeiro, 29 de novembro de 2020.

LI, S. et al. Study on effects of particle size and maximum pressure drop on the filtration and pulse-jet cleaning performance of pleated cartridge filter. *Process Safety and Environmental Protection*, V.123, p. 99-104, 2019.

LISBOA, H. De. M.; SCHIRMER, W. N. Metodologia de controle da poluição atmosférica. (Unidade VII). Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

LORA, E. E. S. Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético Industrial e de Transporte. São Paulo: Interciencia, 2002.

MACDONALD, I. F. et al. Flow through Porous Media—the Ergun Equation Revisited. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, v. 18, n. 3, p. 199–208, 1979.

MANZANO-AGUGLIARO, F.; CARRILLO-VALLE, J. Conversion of an existing electrostatic precipitator casing to Pulse Jet Fabric filter in fossil power plants. *Dyna*, v. 83, n. 195, p. 189–197, 2016.

MARONI, L. G. et al. Classificação, identificação e aplicação de não tecidos. Associação brasileira das indústrias de nãotecidos - ABINT. Nov. 1999.

MATTESON, M. J. *Filtration: Principles and Practices*. New York, Marcel Dekker Inc., 1987.

MCKENNA, J. D.; TURNER J. H.. *Fabric Filter-Baghouses I, Theory, Design, and Selection*. Roanoke, VA: ETS, 1989.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Mortes devido à poluição aumentam 14% em dez anos no Brasil, 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/noticias/mortes-devido-a-poluicao-aumentam-14-em-dez-anos-no-brasil>>. Acesso em: 03 de novembro de 2020.

MOREIRA, F. L. Estudo da vibração mecânica na remoção de tortas de filtração em filtros de manga. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 1998.

MUKHOPADHYAY, A. Pulse-jet filtration: An effective way to control industrial pollution Part I: Theory, selection and design of pulse-jet filter. *Textile Progress*, v. 41, n. 4, p. 195–315, 29 dez. 2009.

MUKHOPADHYAY, A.; PANDIT, V.; DHAWAN, K. Effect of high temperature on the performance of filter fabric. *Journal of Industrial Textiles*, v. 45, n. 6, p. 1587-1602, 2016.

NORMA ABNT NBR 12546:2017. Materiais têxteis – Ligamentos fundamentais de tecidos planos – Terminologia. 2017.

NORMA ABNT NBR 13370:2017. Nãotecido – Terminologia. 2017.

NORMA ASTM D882:12. Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. 2012.

NORMA VDI 3926. Part 1: testing of filter media for cleanable filters Standard test for the evaluation of cleanable filter media. Düsseldorf. 2003.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. Nove em cada dez pessoas em todo o mundo respiram ar poluído, 2018. Disponível em: <[https://www.paho.org/bra/index.php?option=com\\_content&view=article&id=5654:nove-em-cada-dez-pessoas-em-todo-o-mundo-respiram-ar-poluido&Itemid=839](https://www.paho.org/bra/index.php?option=com_content&view=article&id=5654:nove-em-cada-dez-pessoas-em-todo-o-mundo-respiram-ar-poluido&Itemid=839)>.

Acessado em 23 de novembro de 2020.

PACHECO, T. De. A. Filtros de manga: Como obter o rendimento máximo dos filtros de manga. química e derivados, 2002.

PACHECO, T. De. A.; BERNARDINI, M. V. Tecnologia de filtro manga combate poluição atmosférica. *Revista Meio Filtrante*, edição 63, julho/agosto 2013.

PEREIRA, T. W. C. et al. The influence of the fabric filter layout of in a flow mass filtrate. *Journal of Cleaner Production*, v. 111, p. 117–124, 2016.

ROCHA, S. M. S. “Estudo da influência da velocidade e dos ciclos de filtração na formação da torta de limpeza de gases em filtro de mangas”. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Programa Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG. 168p. 2010.

ROTHWELL, E. Changing patterns in dust filtration research. *Filtration and Separation*, p.3641, 1989.

SALVINI, V. R.; INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C. Correlação entre permeabilidade e resistência mecânica de filtros cerâmicos no sistema  $AL_2O_3$ -SiC. *Ceramic News*, vol. 7, n. 1, 2000.

SANTINI, J. Filtro de mangas para o controle de emissões atmosféricas de material particulado gerados no beneficiamento de mármore e granitos. Trabalho de conclusão de curso. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo - RS, 2011.

SILVA, C. R. N. et al. Influence of gas velocity on cake formation and detachment. *Power Technology*, v. 101, p. 165 – 172, 1999.

SILVA, G. M. C. De. Desempenho de filtros cerâmicos na filtração de gases a altas temperaturas. Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2008.

SONG, C. B.; PARK, H. S.; LEE, K.W. Experimental study of filter clogging with monodisperse PSL particles. *Powder Technology*, v. 163, Issue 3, p. 152-159, 2006.

TANABE, E. H. Desempenho dos meios filtrantes na filtração de gases a altas pressões. Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos – SP, 2011.

TANABE, E.H. et al. Experimental investigation of deposition and removal of particles during gas filtration with various fabric filters. *Sep. Purif. Technol.* 80, 187–195, 2011.

THEODORE, L.; BUONICORE, A. J. Air pollution control equipment - particulates. V01, CRC Press, Flórida, 1988.

THOMAS, D. et al. Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles Experimental and modelling study. *Chemical Engineering Science*, v. 56, p. 3549-3561, 2001.

TIENI, E. F. Filtração de gases: Estudo do fenômeno da limpeza por blocos. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos – SP, 2005.

TOZETTI, K. D. Estudo de viabilidade técnica e econômica da substituição ou reforma de sistema de filtragem: estudo de caso. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória – ES, 2008.

WAKEMAN, R. The influence of particle properties on filtration. *Separation and Purification Technology*, v. 58, p. 234-241, 2007.

WIEBECK, H.; HARADA, J. *Plásticos de engenharia*. São Paulo, Editora Artliber, 2005.

YANG, H. H. *Kevlar Aramid Fiber*. Wiley, 1993.

YAO, L.; KIM, K.; KIM, J.; Fabrication of Meta-aramid Fibril by Precipitation. *Fibers and Polymers*, Vol.13, N° 3, p. 277-281, 2012.