

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

**INFLUÊNCIA DA COSTURA NA PERFORMANCE DE MEIOS FILTRANTES APLICADOS  
EM FILTRO DE MANGAS**

**Camila Raquel de Lacerda**

São Carlos  
2022

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

**INFLUÊNCIA DA COSTURA NA PERFORMANCE DE MEIOS FILTRANTES APLICADOS  
EM FILTRO DE MANGAS**

**Camila Raquel de Lacerda**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Química.

**Área de Concentração:** Controle Ambiental

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

**Coorientador:** Prof. Dr. Rafael Sartim



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

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

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Camila Raquel de Lacerda, realizada em 30/08/2022.

**Comissão Julgadora:**

Profa. Dra. Mônica Lopes Aguiar (UFSCar)

Prof. Dr. Rafael Sartim (UFES)

Profa. Dra. Vádila Giovana Guerra Béttega (UFSCar)

Prof. Dr. Eduardo Hiromitsu Tanabe (UFESM)

Prof. Dr. Olimpio Gomes da Silva Neto (IFSULDEMINAS)

***“É justo que muito custe  
O que muito vale.”***

***Santa Teresa de Ávila***

## AGRADECIMENTOS

---

Em primeiro lugar, quero agradecer a Deus e a Nossa Senhora por terem me permitido encontrá-los verdadeiramente neste tempo de universidade, por meio do Ministério Universidades Renovadas (MUR - São Carlos), e por terem me transformado de um modo tão doce e amoroso.

MUR - São Carlos, muito obrigada por tornar os meus dias muito mais cheios de fé, esperança, leveza e sentido. A todos aqueles que fizeram, fazem e farão parte do MUR, eu deixo aqui a minha eterna gratidão. Esse Ministério transforma vidas e resgata almas.

Meu muito obrigada à minha mãezinha, Rosângela, meu porto-seguro e aconchego, por sempre se doar tanto por mim. Ao meu irmão, Mateus, por sempre estar comigo, mesmo de longe, me presenteando com ligações breves, porém cheias de ternura, e por ter me dado duas joias raras que são minhas pequenas Emanuelle e Rafaela. À vó Nerci, por ter orado incessantemente por mim e por sempre me receber com tanto amor em sua casa. Um agradecimento especial à tia Cristina e à vó Eva, por terem me dado tanto suporte e por terem acreditado na minha caminhada.

Com muito amor, agradeço ao meu noivo, João Paulo, por ter trilhado esse caminho comigo. Obrigada por cada detalhe compartilhado, por cada conselho, pela paciência, compreensão, companheirismo e cumplicidade. Agradeço também pelas formatações minuciosas da tese e equações digitadas com tanto zelo.

Agradeço a todos os meus familiares, que sempre se fizeram presentes mesmo à distância. O apoio de vocês foi fundamental para que eu conseguisse ir até o fim de cada etapa.

Agradeço à minha orientadora, Prof. Dr<sup>a</sup>. Mônica Lopes Aguiar, por ter me acolhido de braços abertos desde o primeiro momento e por sempre zelar pelo meu aprendizado, meu crescimento profissional e pelo meu eu.

Obrigada ao Prof. Dr. Rafael Sartim, meu coorientador, por toda confiança, apoio e incentivo.

Agradeço à Prof. Dr<sup>a</sup>. Vádila Giovana Guerra Béttega, por sempre acompanhar de perto o trabalho e contribuir em todas as bancas, e aos demais membros da banca examinadora do exame de acompanhamento, do exame de qualificação e da defesa, Dr. Bruno de Araújo Lima, Prof. Dr. Eduardo Hiromitsu Tanabe e Prof. Dr. Olímpio Gomes da Silva Neto, por terem aceitado prontamente o convite e por trazerem contribuições enriquecedoras.

Deixo o meu agradecimento ao técnico do LabCAm, Marcos Oishi, e aos técnicos do DEQ - UFSCar, Oscar e Samuel, pela prontidão e boa vontade em todos os momentos que precisei.

Minha sincera e eterna gratidão a todos os amigos do LabCAm, por todo conhecimento compartilhado, pelos estudos em grupo, pela ajuda nos experimentos, pelos cafés, pelas incríveis festinhas surpresa de aniversário, pelas confraternizações sempre tão cheias de amor e alegria na casa da Prof. Mônica, pelos memoráveis vídeos de “blogueirinhos”, pelas conversas descontraídas e risos sinceros, pela parceria, pelo consolo nos momentos de angústia, por toda experiência compartilhada e por me ajudarem a compreender tantas coisas do meu doutorado.

Aos professores do PPGEQ - UFSCar, obrigada por todos os ensinamentos e exemplos.

Às minhas menininhas, com quem tive o prazer de dividir o mesmo lar, muito obrigada. Vocês tornaram os meus dias muito mais cheios de luz e risadas com nossos apelidos carinhosos.

À cidade de São Carlos, grata por ter sido minha doce casa nestes anos de pós-graduação.

Ao PPGEQ - UFSCar, à UFSCar, obrigada pelos serviços prestados, por toda infraestrutura dos laboratórios e por terem me permitido concretizar essa etapa tão valiosa da pós-graduação.

À CAPES, à ArcelorMittal, ao CNPq e à FAPESP, obrigada por fornecerem e proporcionarem tudo que foi necessário para a realização desta pesquisa. À CAPES - PrInt, obrigada por ter me permitido viver uma experiência enriquecedora de doutorado sanduíche. Aproveito para agradecer ao Prof. Dr. Achim Dittler, por ter me recebido em seu grupo de pesquisa (*Gas-Partikel - Systeme - GPS*); ao *Karlsruher Institut für Technologie - KIT* e ao *Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik - MVM*, pela infraestrutura e pelos lindos dias de outono e inverno; aos colegas do *GPS*, Peter Bächler e Almuth Schwarz, por terem contribuído de forma positiva para o trabalho; a todos os outros colegas do *GPS*, por terem me recebido tão bem; à empresa *Junker Filter GmbH* por ter fornecido os meios filtrantes costurados com diferentes diâmetros de agulha.

Aos irmãos de comunidade da Paróquia Nossa Senhora do Carmo, que fortaleceram a minha fé e rezaram para que eu conseguisse ir além, muito obrigada.

A todos os estimados amigos que cruzaram o meu caminho, na universidade e fora dela, e que hoje fazem parte do meu existir, deixo a minha imensa gratidão por tudo que vocês significam para mim.

Sentirei muita saudade de cada um que fez parte deste capítulo. Levarei vocês no coração e espero reencontrá-los nas próximas páginas que serão escritas no livro da vida.

Muitíssimo obrigada! Sem vocês não haveria graça!

***“E o que vai ficar na fotografia  
São os laços invisíveis que havia...”***

## RESUMO

---

Há uma variedade de mangas filtrantes disponíveis no mercado para a limpeza de gases, compostas por diferentes materiais, com tamanhos variados, com diversos tratamentos superficiais, alto grau de eficiência e diferentes acabamentos, o que possibilita a aplicação nas mais diversas condições térmicas e químicas. Na confecção das mangas, o meio filtrante é costurado em formato cilíndrico para ser instalado nos filtros de mangas industriais. Embora a área com costura seja de aproximadamente 4% da área total de uma manga filtrante industrial, faz-se necessária uma investigação mais ampla da influência dessa região na filtração, pois os pequenos orifícios podem ser um conduto à passagem de partículas finas mesmo após determinado tempo de uso da manga. Portanto, o objetivo do trabalho foi avaliar o desempenho de filtração - em relação aos mecanismos de coleta, porosidade da torta, duração dos ciclos de filtração, pressão diferencial, eficiência de separação fracionária e emissão de partículas - de dois grupos distintos de meios filtrantes, ambos contendo amostras com e sem costura, sendo o primeiro grupo de amostras com diferentes tempos de uso e o segundo com amostras virgens costuradas com agulhas de diferentes diâmetros. Em um primeiro momento, foram utilizadas as amostras de mangas filtrantes de poliimida (P84) virgem, com 10 meses e com 3 anos de uso (estas duas últimas foram usadas em um filtro de mangas industrial), e material particulado proveniente de uma planta de sinterização (processo primário de despoeiramento). As amostras foram submetidas a ciclos de filtração e limpeza no equipamento de laboratório construído com base na norma alemã VDI (*Verein Deutscher Ingenieure*) 3926, para análise da pressão diferencial, do tempo de ciclo e para o cálculo da porosidade da torta. A coleta de partículas também foi realizada para diâmetros na faixa de 0,523 a 2,8  $\mu\text{m}$ , em uma segunda linha de filtração que contém um contador de partículas (*Aerodynamic Particle Sizer - APS*), e na faixa de 10 a 300 nm, em um terceiro sistema de análise de partículas por diferencial de mobilidade elétrica (*Scanning Mobility Particle Sizer - SMPS*), com o intuito de avaliar a eficiência de separação e relacionar os resultados à atuação dos mecanismos de deposição das partículas quando há a presença de costura. Os resultados mostraram que a torta formada em ( $\Delta p'_{0} + 300$ ) Pa não foi suficiente para cobrir os furos da costura completamente, porém a amostra usada por 10 meses apresentou eficiência de quase 100%, o que indica que os furos foram selados pelo pó. Os ciclos de filtração mostraram que quanto maior o tempo de uso da manga, mais semelhante foi o desempenho das amostras sem e com costura. Em um segundo momento, foram utilizados os meios filtrantes de poliéster com membrana de politetrafluoretileno (PE/PTFE), costurados com agulhas de diâmetros de 90, 100 e 130  $\mu\text{m}$ , e o pó *Pural SB*<sup>®</sup>. Foi realizada uma investigação sobre o impacto do diâmetro da agulha na eficiência de separação fracionária e nas emissões de material particulado, respectivamente nas plataformas de teste MFP 3000 HF (*Modular Filter Test System*) e no equipamento baseado na norma VDI 3926 (esse último não é o mesmo equipamento utilizado no primeiro grupo de amostras), ambos pertencentes ao laboratório do *Karlsruher Institut für Technologie - KIT*. Enquanto a amostra sem costura apresentou uma eficiência de separação fracionária de quase 100% para toda a faixa de diâmetro de partículas avaliada, o aumento no diâmetro da agulha ocasionou aumento nas emissões. As amostras costuradas com agulhas de diâmetros de 100 e 130  $\mu\text{m}$  não tiveram os furos selados completamente pelo pó mesmo após as quatro etapas do procedimento de filtração adaptado da norma VDI 3926.

Palavras-chave: costura de mangas filtrantes, diâmetro da agulha, porosidade da torta, ciclos de filtração, caminhos preferenciais.

## ABSTRACT

---

There is a variety of filter bags available in the market for cleaning gases, composed of different materials, of various sizes, with several surface treatments, high efficiency, and different finishes, which enables the application in the most diverse thermal and chemical conditions. When making the filter bags, the filter medium is sewn in a cylindrical shape to be installed in industrial bag filters. Although the sewing area is approximately 4% of the total area of an industrial filter bag, it is necessary a broader investigation of the influence of this region in filtration, because the small holes can be a conduit for the passage of fine particles even after a certain time of use of the filter bags. Therefore, this work aimed to evaluate the filtration performance – regarding the mechanisms of deposition, the cake porosity, the duration of filtration cycles, the differential pressure, the fractional separation efficiency, and particle emission - of two distinct groups of filter media, both containing samples without and with seam, the first group of samples with different aging times and the second with virgin samples sewn with needles of different diameters. In a first step, samples of polyimide (P84) filter bags, virgin, with 10 months of use and with 3 years of use (the latter two were used in an industrial bag filter), and particulate material from a sintering plant (the primary process of dedusting) were used. The samples were submitted to filtration and cleaning cycles in laboratory equipment built based on the VDI 3926 standard, to analyze the pressure drop, the cycle time and to estimate the cake porosity. Particle collection was also performed for diameters in the range from 0.523 to 2.8  $\mu\text{m}$ , on a second filtration test rig containing a particle counter (Aerodynamic Particle Sizer-APS), and in the range from 10 to 300 nm, in a third particle analysis system by differential electric mobility (Scanning Mobility Particle Sizer - SMPS), in order to evaluate the separation efficiency and relate the results to the performance of the particle deposition mechanisms when there is the presence of seam. The results showed that in the seam region the preferential paths for the airflow had effects on the particle deposition mechanisms. The total filtration time was longer for the samples with seam. In a second step, polyester filter media with a polytetrafluoroethylene (PE/PTFE) membrane, sewn with different needle diameters, 90, 100, and 130  $\mu\text{m}$ , and *Pural SB*<sup>®</sup> powder, were used. An investigation of the impact of the needle diameter on fractional separation efficiency and particle emissions was conducted, respectively, on MFP 3000 HF (Modular Filter Test System) and VDI 3926-based test rigs (the latter is not the same equipment used in the first group of samples), both belonging to the Karlsruhe Institute of Technology. While the sample without seam showed a particle separation of almost 100%, the increase in needle diameter led to an increase in particle emissions. The sewn samples with needle diameters of 100 and 130  $\mu\text{m}$  did not have the holes completely sealed by the dust even after all steps of the filtration procedure adapted from VDI 3926 standard.

Keywords: seam of filter bags, needle diameter, cake porosity; filtration cycles; preferential paths.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estrutura básica do filtro de mangas com sistema de limpeza por jato de ar pulsante.	19
Figura 2 - Etapas da filtração em tecido.	20
Figura 3 - Mecanismo de coleta por interceptação.	21
Figura 4 - Mecanismo de coleta por impactação inercial.	22
Figura 5 - Mecanismo de coleta por difusão.	23
Figura 6 - Eficiência de coleta versus diâmetro de partícula para velocidades superficiais de filtração de 1,0 e 10 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ .	24
Figura 7. Eficiência versus velocidade superficial para diâmetros de partícula de 0,2; 0,4 e 0,5 $\mu\text{m}$ .	25
Figura 8. Regiões em que diferentes mecanismos de coleta contribuem 20% ou mais na eficiência total de fibra-única.	26
Figura 9. Efeito do tamanho da fibra na eficiência de coleta de um meio filtrante em função do tamanho de partícula, para velocidade superficial de 10 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ .	27
Figura 10. Ciclos de filtração em operação estável e instável.	28
Figura 11 - Dimensões da manga filtrante inteira e ilustração de uma amostra retirada na região com costura.	40
Figura 12 - Imagens da seção transversal da manga limpa, em microscópio óptico, nas regiões sem costura (a) e com costura (b).	41
Figura 13 - Amostras sem costura (a) e com costura (b) retiradas da manga virgem; sem costura (c) e com costura (d) retiradas da manga usada por 10 meses; sem costura (e) e com costura (f) retiradas da manga usada por 3 anos.	41
Figura 14 - MEV da superfície externa da amostra da manga P84 virgem, da região sem costura (a) e da região com costura (b).	42
Figura 15 – Diagrama esquemático da linha de filtração utilizada para determinar a constante de permeabilidade Darciana dos meios filtrantes.	43
Figura 16 - Foto ilustrativa (a) e imagem do MEV (b) do pó da sinterização.	45
Figura 17 - <i>Analysis Table</i> com os resultados da análise, selecionada no software de controle do equipamento.	48
Figura 18 - Distribuição granulométrica em volume do pó da sinterização.	49
Figura 19 - Diagrama esquemático da linha de filtração para determinação da eficiência de coleta de nanopartículas.	50
Figura 20 - Desenho esquemático do classificador com analisador de mobilidade diferencial longo.	53
Figura 21 - Desenho esquemático do interior do contador de partículas.	54
Figura 22. Diagrama esquemático da linha de filtração utilizada para determinar a eficiência de coleta de micropartículas.	55
Figura 23 - Desenho esquemático do sistema óptico do APS.	57
Figura 24 - Diagrama esquemático do sistema construído de acordo com parâmetros da norma VDI 3926 (2003).	60
Figura 25 - Componentes fundamentais do <i>Dust Feeder NDF 100</i> (alimentador de pó) (a) e detalhamento da unidade de alimentação (b).	60
Figura 26 - Fotografia das amostras sem costura (a) e com costura (b); imagens do MEV da membrana PTFE (c), e os furos de costura associados a diferentes diâmetros de agulha: 90 $\mu\text{m}$ (d), 100 $\mu\text{m}$ (e), 130 $\mu\text{m}$ (f).	64
Figura 27 - Foto (a) e imagem do MEV (b) do <i>Pural SB</i> <sup>®</sup> .	65
Figura 28 - Distribuição granulométrica em volume do <i>Pural SB</i> <sup>®</sup> .	66

Figura 29 - Diagrama esquemático do MFP 3000 HF e parâmetros operacionais (a) e fotos do equipamento (b).....	68
Figura 30 - Distribuição granulométrica do NaCl determinada via U-SMPS ( <i>Palas</i> ®).....	69
Figura 31 - Diagrama esquemático do equipamento VDI 3926 e parâmetros operacionais (a) e foto do equipamento (b).....	70
Figura 32 - Etapas do procedimento de filtração adaptado da norma VDI 3926.....	71
Figura 33 - Queda de pressão por espessura do meio filtrante em função da velocidade superficial de filtração das amostras sem costura e com costura das mangas P84 limpa, com 10 meses e com 3 anos de uso.....	74
Figura 34 - Eficiência fracionária de coleta das amostras virgens em ( $\Delta p_0$ ), ( $\Delta p_0 + 100$ ) Pa e ( $\Delta p_0 + 300$ ) Pa para a amostra sem costura (a) e em ( $\Delta p'_0$ ), ( $\Delta p'_0 + 100$ ) Pa e ( $\Delta p'_0 + 300$ ) Pa com costura (b).....	76
Figura 35 - Fotografia do meio filtrante com costura, mostrando os furos descobertos após a filtração atingir queda de pressão igual a ( $\Delta p'_0 + 300$ ) Pa.....	77
Figura 36 - Eficiência fracionária de coleta das amostras sem e com costura da manga usada por 10 meses.....	78
Figura 37 - Eficiência fracionária de coleta das amostras limpas sem costura, com costura e com costura selada, em função do diâmetro de mobilidade elétrica das partículas (10-300 nm).....	79
Figura 38 - Ciclos de filtração da manga P84 limpa sem costura (rosa), limpa com costura (cinza), com 10 meses de uso sem costura (azul), com meses de uso com costura (verde), com 3 anos de uso sem costura (vermelho) e com 3 anos de uso com costura (roxo).....	80
Figura 39 - Eficiência fracionária das amostras limpas sem costura e com costura (diâmetro da agulha de 90, 100 e 130 $\mu\text{m}$ ).....	82
Figura 40 - Tempo para completar 30 ciclos (a) e queda de pressão inicial ( $\Delta p_0$ ) (b), a 2 m·min <sup>-1</sup> , para cada amostra, nas etapas de condicionamento e medição.....	84
Figura 41 - Concentração em número de partículas ao longo do tempo para as amostras sem costura (verde) e com diâmetros de agulha de 90 $\mu\text{m}$ (roxo), 100 $\mu\text{m}$ (azul) e 130 $\mu\text{m}$ (vermelho), durante o estágio de condicionamento. Os retângulos rosas representam os picos antes do primeiro pulso de limpeza.....	86
Figura 42 - Concentração em número de partículas ao longo do tempo para as amostras sem costura (verde) e com diâmetros de agulha de 90 $\mu\text{m}$ (roxo), 100 $\mu\text{m}$ (azul) e 130 $\mu\text{m}$ (vermelho), durante o estágio de envelhecimento. Para este estágio também são mostrados os valores médios de 1 minuto.....	87
Figura 43 - Concentração em número de partículas ao longo do tempo para as amostras sem costura (verde) e com diâmetros de agulha de 90 $\mu\text{m}$ (roxo), 100 $\mu\text{m}$ (azul) e 130 $\mu\text{m}$ (vermelho), durante o estágio de estabilização. Os retângulos rosas representam os picos antes do primeiro pulso de limpeza.....	88
Figura 44 - Concentração em número de partículas ao longo do tempo para as amostras sem costura (verde) e com diâmetros de agulha de 90 $\mu\text{m}$ (roxo), 100 $\mu\text{m}$ (azul) e 130 $\mu\text{m}$ (vermelho), durante o estágio de medição. Os retângulos rosas representam os picos antes do primeiro pulso de limpeza.....	89
Figura 45 - Distribuição do tamanho de Pural SB® nas emissões medidas via sistema Palas® no lado do gás limpo durante os primeiros 90 minutos dos estágios de condicionamento e medição.....	90
Figura 46 - Concentração média em massa durante as etapas de condicionamento, envelhecimento, estabilização e medição para cada amostra avaliada.....	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações técnicas fornecidas pelo fabricante da manga virgem P84. ....	39
Tabela 2 - Dimensões da manga, das amostras e da costura.....	40
Tabela 3 – Diâmetros médios das fibras e da linha de costura da manga P84. ....	43
Tabela 4 - Composição química do pó da sinterização. ....	47
Tabela 5 - Médias dos diâmetros volumétricos característicos do pó da sinterização. ....	50
Tabela 6 - Condições experimentais dos ensaios de filtração no equipamento de teste baseado na norma alemã VDI 3926 (2003).....	63
Tabela 7 - Especificações do meio filtrante de poliéster com membrana PTFE, sem costura, fornecidas pelo fabricante <i>Junker - Filter GmbH</i> . ....	64
Tabela 8 - Composição química do <i>Pural SB®</i> fornecida pelo fabricante <i>Sasol</i> .....	65
Tabela 9 - Médias dos diâmetros volumétricos característicos do <i>Pural SB®</i> .....	66
Tabela 10 - Constantes de permeabilidade Darciana ( $k_1$ ) e porosidade dos meios filtrantes ( $\epsilon$ ) sem costura, com costura, e das médias ponderadas para a manga inteira. ....	74
Tabela 11 - Porosidade da torta em amostras limpas, com 10 meses de uso e com 3 anos de uso, sem e com costura, no trigésimo ciclo, utilizando as equações de Ergun, McDonald e Kozeny-Carman.....	81
Tabela 12 - Porosidade da torta pelo método indireto, utilizando as equações de Ergun, McDonald e Kozeny-Carman, para as amostras sem costura, com diâmetros de agulha de 90, 100 e 130 $\mu\text{m}$ , no trigésimo ciclo da etapa de medição.....	92
Tabela 13 - Tempo para completar o trigésimo ciclo na etapa de medição e queda de pressão inicial no início desse ciclo, para as amostras sem costura, com diâmetros de agulha de 90, 100 e 130 $\mu\text{m}$ .....	92

## SUMÁRIO

---

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2 FILTRO DE MANGAS COM SISTEMA DE LIMPEZA POR JATO DE AR PULSANTE</b> .....	<b>18</b>
<b>3.3 TEORIA DA FILTRAÇÃO EM TECIDO</b> .....	<b>19</b>
3.3.1 ETAPAS DA FILTRAÇÃO EM TECIDO.....	20
3.3.2 MECANISMOS DE DEPOSIÇÃO PARTÍCULA-FIBRA.....	21
3.3.2.1 INTERCEPTAÇÃO DIRETA .....	21
3.3.2.2 IMPACTAÇÃO INERCIAL.....	22
3.3.2.3 DIFUSÃO.....	22
3.3.2.4 DEPOSIÇÃO GRAVITACIONAL.....	23
3.3.2.5 DEPOSIÇÃO ELETROSTÁTICA .....	23
3.3.3 EFICIÊNCIA DE COLETA DOS MECANISMOS DE DEPOSIÇÃO.....	24
3.3.4 CICLOS DE FILTRAÇÃO.....	27
<b>3.4 PARÂMETROS OPERACIONAIS E CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DO MEIO FILTRANTE QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DE FILTRAÇÃO</b> .....	<b>28</b>
<b>3.5 TRABALHOS QUE AVALIARAM FUROS FEITOS PROPOSITAMENTE NO MEIO FILTRANTE E A REGIÃO DA COSTURA</b> .....	<b>35</b>
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>38</b>
<b>4.1 MEIOS FILTRANTE: AMOSTRAS DE MANGAS P84 VIRGEM, COM 10 MESES E COM 3 ANOS DE USO</b> .....	<b>38</b>
4.1.1 DESCRIÇÃO GERAL DAS MANGAS FILTRANTE .....	38
4.1.2 DIMENSÕES DAS MANGAS, DAS AMOSTRAS E DA REGIÃO DA COSTURA	39
4.1.3 DIÂMETRO MÉDIO DAS FIBRAS E DA LINHA DE COSTURA .....	42
4.1.4 PERMEABILIDADE AO AR.....	43
4.1.5 POROSIDADE DO MEIO FILTRANTE.....	44
4.1.6 DESCRIÇÃO GERAL DO MATERIAL PARTICULADO: PÓ DA SINTERIZAÇÃO (PROCESSO PRIMÁRIO).....	45
4.1.7 DENSIDADE APARENTE .....	46
4.1.8 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	46
4.1.9 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA EM VOLUME.....	47
4.1.10 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS.....	50
4.1.10.1 EFICIÊNCIA DE COLETA DE NANOPARTÍCULAS .....	50
4.1.10.2 EFICIÊNCIA DE COLETA DE MICROPARTÍCULAS.....	55
4.1.10.3 CICLOS DE FILTRAÇÃO COM LIMPEZA POR JATO DE AR PULSANTE ....	59
<b>4.2 MEIOS FILTRANTE: PE/PTFE SEM COSTURA E COM COSTURA COM DIFERENTES DIÂMETROS DE AGULHA (90, 100 e 130 µm)</b> .....	<b>63</b>
4.2.1 DESCRIÇÃO GERAL DOS MEIOS FILTRANTE .....	63
4.2.2 DESCRIÇÃO GERAL DO MATERIAL PARTICULADO: PURAL SB®.....	64

4.2.3	DENSIDADE APARENTE DO PURAL SB® .....	65
4.2.4	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO PURAL SB® .....	65
4.2.5	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA EM VOLUME DO PURAL SB® .....	65
4.2.6	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E EQUIPAMENTOS .....	67
4.2.6.1	EQUIPAMENTO MFP 3000 HF (MODULAR FILTER TEST SYSTEM) .....	67
4.2.6.2	EQUIPAMENTO BASEADO NA NORMA VDI 3926 .....	69
4.2.7	POROSIDADE DA TORTA DE FILTRAÇÃO .....	71
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>73</b>
<b>5.1</b>	<b>MEIOS FILTRANTES: AMOSTRAS DE MANGAS P84 VIRGEM, COM 10 MESES E COM 3 ANOS DE USO .....</b>	<b>73</b>
5.1.1	INFLUÊNCIA DO TEMPO DE USO DA MANGA NA PERMEABILIDADE AO AR 73	
5.1.2	EFICIÊNCIA DE COLETA DE MICROPARTÍCULAS .....	75
5.1.3	EFICIÊNCIA DE COLETA DE NANOPARTÍCULAS .....	78
5.1.4	CICLOS DE FILTRAÇÃO COM LIMPEZA POR JATO DE AR PULSANTE .....	79
5.1.5	POROSIDADE DA TORTA DE FILTRAÇÃO .....	81
<b>5.2</b>	<b>MEIOS FILTRANTES PE/PTFE VIRGENS: SEM COSTURA, COM COSTURA COM DIÂMETROS DA AGULHA IGUAIS A 90, 100 E 130 µm.....</b>	<b>82</b>
5.2.1	EFICIÊNCIA DE COLETA AVALIADA NO EQUIPAMENTO MFP 3000 HF .....	82
5.2.2	INFLUÊNCIA DE COSTURAS COM DIFERENTES DIÂMETROS DE AGULHA NA EVOLUÇÃO DOS CICLOS DE FILTRAÇÃO E NA QUEDA DE PRESSÃO NO EQUIPAMENTO VDI 3926.....	83
5.2.3	EMISSÕES DURANTE AS ETAPAS DE CONDICIONAMENTO, ENVELHECIMENTO, ESTABILIZAÇÃO E MEDIÇÃO.....	85
5.2.4	DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS NO GÁS FILTRADO DURANTE AS ETAPAS DE CONDICIONAMENTO E DE MEDIÇÃO.....	90
5.2.5	DESENVOLVIMENTO DA CONCENTRAÇÃO MÉDIA EM MASSA DURANTE O PROCEDIMENTO DE FILTRAÇÃO ADAPTADO DA NORMA VDI 3926.....	91
5.2.6	POROSIDADE DA TORTA DE FILTRAÇÃO .....	92
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>94</b>
	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>97</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>98</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Estima-se que 99% de toda a população mundial esteja exposta a níveis de poluição do ar que ultrapassam os limites de qualidade recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS). A exposição do ser humano ao ar poluído ocasiona cerca de 7 milhões de mortes anualmente em todo o mundo, as quais são decorrentes da penetração de partículas finas pelas vias aéreas e corrente sanguínea, o que causa doenças cardíacas, derrames, doenças pulmonares obstrutivas crônicas, câncer e pneumonia (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2022).

No Brasil, os padrões de qualidade do ar são atualmente estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução nº491/2018, que propõe etapas intermediárias e subseqüentes até se chegar aos valores finais de referência recomendados pela OMS em 2005. Para o material particulado, na fase final, os limites médios anuais previstos são de  $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  para  $\text{PM}_{10}$  (partículas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a  $10 \mu\text{m}$ ) e  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  para  $\text{PM}_{2,5}$  (partículas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a  $2,5 \mu\text{m}$ ) (CONAMA, 2018; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2005). Entretanto, em maio de 2022, o Plenário do Supremo Tribunal Federal (STF) determinou que o CONAMA edite, em um prazo de 24 meses, uma nova resolução para os padrões de qualidade do ar. Embora a atual resolução tenha como referência de valores finais os valores recomendados pela OMS em 2005, a resolução prevê padrões iniciais muito permissivos. A nova diretriz deverá atender às recomendações estabelecidas pela OMS em 2021, de acordo com a realidade nacional e com as peculiaridades locais. As últimas Diretrizes de Qualidade do Ar da OMS de 2021 recomendam que para  $\text{PM}_{2,5}$  a média anual seja de  $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  e a média de 24 horas seja de  $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; para  $\text{PM}_{10}$ , média anual de  $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  e média de 24 horas de  $45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2021). Caso a nova resolução não seja elaborada pelo CONAMA no prazo determinado, irá prevalecer no Brasil as determinações da OMS de 2021 (SUPREMO TRIBUNAL FEDERAL, 2022).

Para as emissões atmosféricas industriais, há três resoluções: Resolução CONAMA nº 08/1990, Resolução CONAMA nº 382/2006 e Resolução CONAMA nº 436/2011 (CONAMA, 1990, 2006, 2011). Para determinar a norma federal aplicável, é necessário avaliar a data da instalação da fonte fixa ou da solicitação de licença de instalação, bem como verificar o tipo de processo da indústria. É importante verificar também se o estado em que se localiza a fonte emissora possui norma regulamentadora. Caso exista e essa norma estadual apresente valores diferentes da norma federal, deve-se prevalecer a mais restritiva. Nas três resoluções

mencionadas não se faz distinção quanto ao tamanho do material particulado emitido pelas chaminés das fontes fixas.

Considerando a necessidade de compatibilizar o desenvolvimento econômico com a preservação do meio ambiente e da qualidade de vida, as indústrias têm colocado esforços em encontrar soluções eficientes para a redução dos impactos ambientais, principalmente aqueles causados pelas emissões atmosféricas (CORA; HUNG, 2002; REMUS *et al.*, 2013; ZAPASNYI *et al.*, 2018). Porém, para muitas indústrias, o desafio está em adquirir e/ou adequar equipamentos de controle da poluição do ar de modo que apresentem elevada eficiência de coleta para partículas finas e consumo de energia reduzido.

Há uma diversidade de equipamentos para o controle da poluição do ar em indústrias, como os ciclones, os lavadores de gases, os precipitadores eletrostáticos, os filtros híbridos e os filtros de mangas. A escolha do equipamento adequado para cada processo específico deve levar em consideração o tipo de material particulado, incluindo distribuição granulométrica, abrasividade, higroscopicidade e concentração, como também considerar as características da corrente gasosa do processo, como composição química, corrosividade, temperatura, umidade e vazão (ALEKSANDROV; BARANOVA; VALDBERG, 2010; JAWOREK *et al.*, 2019; MUKHOPADHYAY, 2009; ZHENG; KANAOKA, 2018; ZUKERAN *et al.*, 1999). Para os processos a seco, o filtro de mangas com sistema de limpeza por jato de ar pulsante é largamente utilizado, uma vez que apresenta eficiência de coleta superior a 99% para uma ampla faixa granulométrica e permite variações das condições do material particulado e do gás ao longo do processo, sem variar a emissão significativamente (BOUDHAN *et al.*, 2019; CARR, 1986; KANAOKA, 2019; MUKHOPADHYAY, 2009; PACHECO, 2002).

Um filtro de mangas industrial pode conter milhares de mangas filtrantes, portanto a especificação correta é fundamental para aumentar a vida útil dessas mangas e evitar prejuízos tanto para o meio ambiente quanto para a indústria. Após a vida útil, as mangas ficam saturadas, ocasionando o aumento da queda de pressão do sistema e consequente aumento do gasto energético, até chegar ao ponto da falha completa, como por exemplo rasgar e causar prejuízos ainda maiores (PACHECO, 2002; PATNAIK; ANANDJIWALA, 2016; QIN; DEKERMENJIAN; MARTIN, 2006).

Há na literatura estudos que investigaram as emissões de partículas provocadas por pequenos furos feitos propositalmente no meio filtrante, com diâmetros definidos, como também por furos da costura, e esses pequenos orifícios contribuíram significativamente para a emissão de particulados finos nas chaminés (BACH; SCHMIDT, 2007; BÄCHLER *et al.*, 2020; BÄCHLER *et al.*, 2022; MOURET *et al.*, 2009; MUKHOPADHYAY; MAHAWAR, 2020; QIN; DEKERMENJIAN; MARTIN, 2006). Ao avaliar esses estudos, observou-se que todos investigaram apenas meios filtrantes virgens. Portanto, o presente trabalho propôs a análise

da costura de meios filtrantes que foram envelhecidos durante diferentes tempos em um filtro de mangas industrial. Além disso, avaliou-se o impacto do tamanho do orifício da costura no desempenho de filtração. Pequenos orifícios causados por agulhas menos espessas podem potencialmente colmatar após um tempo operacional suficiente e não afetar mais as emissões. Já os orifícios maiores poderiam servir como um desvio permanente, formando um caminho preferencial, e causar emissões contínuas de partículas.



## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho foi investigar a influência da costura de filtros de tecido, em diferentes estágios da vida útil e costurados com agulhas de diferentes diâmetros, no desempenho de filtração.

Os objetivos específicos foram:

Utilizando amostras sem costura e com costura, retiradas das mangas filtrantes P84 em diferentes estágios da vida útil:

- avaliar a influência do tempo de uso da manga na permeabilidade ao ar;
- determinar a eficiência de coleta de micropartículas utilizando o pó da sinterização (proveniente do processo primário) e de nanopartículas de cloreto de sódio;
- avaliar o desenvolvimento da queda de pressão e o tempo necessário para completar 30 ciclos de filtração, utilizando o pó da sinterização;
- determinar, pelo método indireto, a porosidade da torta de filtração utilizando o pó da sinterização.

Utilizando amostras sem costura e com costura, retiradas dos meios filtrantes PE/PTFE (poliéster/politetrafluoroetileno) virgens, determinar para diferentes diâmetros da agulha:

- a eficiência de separação fracionária das amostras virgens, utilizando nanopartículas de cloreto de sódio;
- o tempo para completar os ciclos de filtração em cada etapa do procedimento de filtração adaptado da norma VDI 3926 (BÄCHLER; MEYER; DITTLER, 2019), realizado no equipamento VDI 3926, utilizando o pó *Pural SB*<sup>®</sup>;
- as emissões de material particulado em cada etapa do procedimento de filtração adaptado da norma VDI 3926 (BÄCHLER; MEYER; DITTLER, 2019), realizado no equipamento VDI 3926, utilizando o pó *Pural SB*<sup>®</sup>;
- a distribuição granulométrica do material particulado que passa pelo meio filtrante;
- a porosidade da torta de filtração utilizando o *Pural SB*<sup>®</sup>.

# 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foram apresentados os tópicos relacionados à legislação ambiental de emissões atmosféricas no Brasil, a descrição básica do filtro de mangas com sistema de limpeza por jato de ar pulsante, a teoria de filtração em tecido e os trabalhos encontrados na literatura que permitiram obter o estado atual do conhecimento sobre o tema e as lacunas ainda existentes.

## 3.1 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

No âmbito federal, as emissões atmosféricas são regulamentadas pelo CONAMA, o qual estabelece os limites máximos de emissões de poluentes por meio de resoluções. O Ministério do Meio Ambiente (MMA) e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) são responsáveis pela coordenação das discussões que determinam os novos limites de emissão. Em relação à edição das resoluções sobre emissões industriais, há também a participação dos órgãos ambientais dos estados, uma vez que estes têm papel predominante no licenciamento e na fiscalização destas atividades, além de deterem conhecimento específico da realidade de seus respectivos territórios. Participam também das discussões os representantes da indústria brasileira, dos governos municipais e da sociedade civil, com o intuito de propiciar resoluções condizentes com a realidade do país (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2020).

Intensos debates no CONAMA sobre a regulamentação dos padrões de qualidade do ar e das emissões atmosféricas das fontes fixas, a partir do final da década de 90, resultaram na edição de importantes resoluções, que proporcionaram grande avanço para o país em termos de limites de emissão de poluentes, qualidade do ar e proteção ao meio ambiente e à saúde humana (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2020).

Um breve resumo das resoluções permite compreender o avanço alcançado ao longo dos anos em relação aos limites de emissões atmosféricas.

Resolução CONAMA nº 5, de 15 de junho de 1989: nesta resolução foi instituído o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR), com o objetivo de permitir o desenvolvimento econômico e social do país de forma ambientalmente segura, limitando a nível nacional as emissões por tipologia de fontes e poluentes prioritários, reservando o uso dos padrões de qualidade do ar como ação complementar de controle (CONAMA, 1989).

Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990: dispôs sobre os padrões de qualidade do ar previstos no PRONAR, tendo como base as normas e recomendações da

OMS, que consideram limites de concentração compatíveis com a saúde e o bem-estar humanos. Nessa resolução ficaram estabelecidos os Padrões de Qualidade do Ar, primários e secundários, para partículas totais em suspensão, fumaça, partículas inaláveis, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, ozônio e dióxido de nitrogênio. Padrões Primários de Qualidade do Ar são as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população. Padrões Secundários de Qualidade do Ar são as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Destacam-se aqui os padrões primários e secundários para partículas inaláveis, concentração média aritmética anual de  $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; concentração média de 24 horas de  $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  que não deve ser excedida mais de uma vez por ano (CONAMA, 1990).

Resolução CONAMA n° 8, de 06 de dezembro de 1990: considerando que entre toda tipologia industrial os processos de combustão externa constituem-se no maior contingente de fontes fixas de poluentes atmosféricos, o que justifica ser a primeira atividade a ter emissões regulamentadas em nível nacional, resolveu-se estabelecer os limites máximos de emissão de poluentes do ar para processos de combustão externa em fontes fixas novas (cuja licença prévia foi solicitada após a publicação dessa Resolução) (CONAMA, 1990a).

Resolução CONAMA n° 382, de 26 de dezembro de 2006: estabeleceu os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas, com limites de emissão por poluente e por tipologia de fonte, para todas as fontes fixas instaladas a partir de 2007, conforme anexos dessa Resolução (CONAMA, 2006).

Resolução CONAMA n° 436, de 22 de dezembro de 2011: estabeleceu os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas, ou com pedido de licença de instalação, anteriores a janeiro de 2007, complementando a Resolução n° 382/2006, de modo a impor novos limites às fontes antigas. Para a maioria dos segmentos da indústria, as fábricas antigas tiveram que se modernizar e diminuir substancialmente as emissões, equiparando-se às novas fábricas (CONAMA, 2011).

A Resolução n° 436/2011 foi uma das medidas de maior impacto ambiental que o CONAMA aprovou nos últimos anos, induzindo uma profunda mudança tecnológica ao parque industrial brasileiro, de modo a reduzir expressivamente as emissões destas indústrias, que por serem mais antigas, são as que estão localizadas em áreas urbanas mais consolidadas, com maior impacto poluidor (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2020).

Resolução CONAMA n° 491, de 19 de novembro de 2018: revogou a Resolução CONAMA n° 3/1990. Essa resolução estabeleceu novos padrões para a qualidade do ar, com três metas intermediárias, tendo valores temporários, e padrões finais que representam o alvo de longo prazo e estão em concordância com os valores de referência da OMS em 2005. Para  $\text{PM}_{10}$ , as concentrações médias de 24 horas consecutivas nas etapas intermediárias devem

ser de 120, 100, 75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , e a fase final de 50  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; para a média aritmética anual, os valores intermediários são 40, 35, 30  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , e a fase final de 20  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Para  $\text{PM}_{2,5}$ , as concentrações médias de 24 horas consecutivas são: 60, 50, 37  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , e para a fase final, 25  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; para a média aritmética anual, os valores são: 20, 17, 15  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , e para a fase final, 10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (CONAMA, 2018).

Neste cenário em que as leis estão cada vez mais estritas, as indústrias precisam investir na modernização e melhoria de desempenho dos equipamentos de controle da poluição do ar. No entanto, para muitas delas é um grande desafio alcançar as metas estabelecidas pelas legislações em vigor no país, estado ou município, principalmente referentes à emissão do material particulado fino ( $\text{PM}_{2,5}$ ). O desafio está em encontrar equipamentos de controle da poluição do ar que tenham alta eficiência de coleta, principalmente para partículas finas. Neste trabalho foi abordado o filtro de mangas com sistema de limpeza por jato de ar pulsante, no qual a eficiência de coleta do material particulado fino pode chegar a 99%.

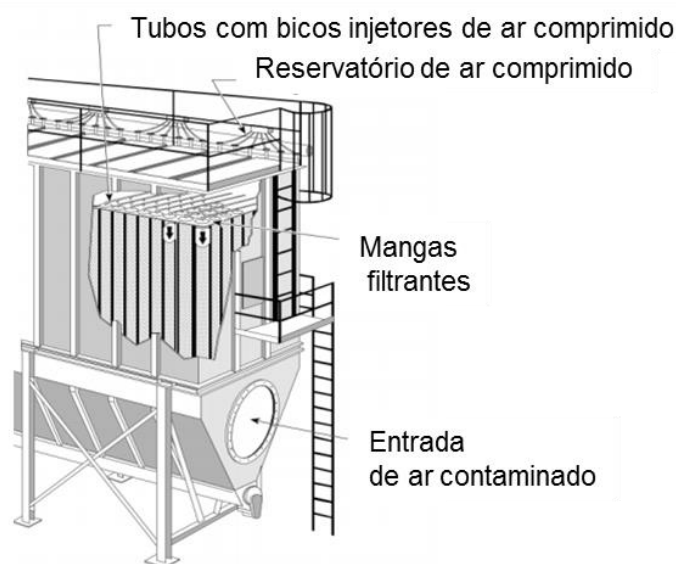
### **3.2 FILTRO DE MANGAS COM SISTEMA DE LIMPEZA POR JATO DE AR PULSANTE**

Os filtros de mangas com sistema de jato de ar pulsante são conhecidos e utilizados desde 1950-1960 na limpeza de gases industriais. Entretanto, o número de pesquisas relacionadas ao uso desses equipamentos apenas voltou a aumentar nas últimas décadas, devido ao surgimento de novas tecnologias na fabricação das mangas filtrantes, o que aumentou os limites de operação para temperatura e umidade, que eram bastante limitados (PACHECO, 2006).

As mangas filtrantes são instaladas em números variáveis nos filtros de mangas. Os filtros geralmente operam com alta eficiência de coleta, já que o ar contaminado passa por uma grande área filtrante onde o pó separado forma uma torta na superfície do meio filtrante. Uma camada de pó suficientemente espessa permite a separação quase perfeita das partículas, o que leva a uma concentração muito baixa no lado do gás limpo, próxima a zero. À medida que a espessura da torta aumenta, a queda de pressão também aumenta. A torta é periodicamente removida da superfície das mangas filtrantes para reduzir a queda de pressão e permitir uma operação econômica a longo prazo. A regeneração ocorre por meio da limpeza por jato de ar pulsante em intervalos fixos de tempo ou em limites pré-determinados de pressão diferencial máxima, comumente chamados de modos de operação controlados por  $\Delta t$  e  $\Delta p$ , respectivamente. A remoção da torta leva ao forte aumento na concentração de partículas no lado do gás limpo imediatamente após a regeneração, já que as partículas podem penetrar o meio filtrante por um curto período. Com a nova formação da torta, a concentração de partículas diminui novamente.

No sistema de limpeza por jato de ar pulsante, um bico injetor posicionado na abertura superior da manga dispara um jato de ar comprimido, geralmente com pressão do tanque entre 3 e 8 bar, por um período de abertura da válvula de 50 a 200 ms. O pulso provoca um choque mecânico no tecido, o que fornece energia suficiente para a torta desprender-se do meio filtrante e depositar-se na tremonha. Uma vez que o tempo do pulso é curto, a filtração não precisa ser interrompida e a limpeza é dita *online*. A Figura 1 ilustra a estrutura básica desse equipamento.

**Figura 1- Estrutura básica do filtro de mangas com sistema de limpeza por jato de ar pulsante.**



Fonte: Adaptado de Turner *et al.* (1998).

A escolha da manga filtrante para um processo deve levar em conta, primeiramente, a compatibilidade das propriedades do gás e do material particulado com o material da manga filtrante (SANCHEZ *et al.*, 1997). Após garantir a compatibilidade da manga com o efluente, é necessário avaliar alguns parâmetros operacionais que irão interferir diretamente no desempenho de filtração, para tanto é fundamental a compreensão da teoria da filtração em tecido.

### 3.3 TEORIA DA FILTRAÇÃO EM TECIDO

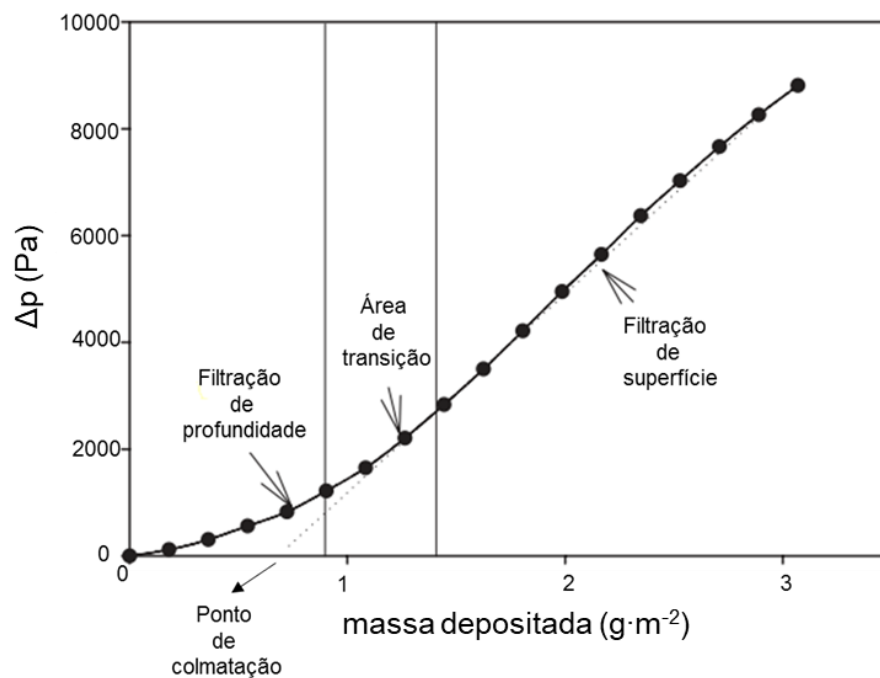
A filtração em tecido é utilizada para a limpeza industrial do ar que contém altas concentrações de poeira. Esses filtros são frequentemente operados em grandes instalações que contêm milhares de mangas filtrantes de tecido em paralelo. Cada manga pode ter 12-40 cm de diâmetro e 3-10 m de altura. A manga possui baixa eficiência de coleta inicialmente, mas se torna altamente eficiente quando uma camada de poeira se acumula na superfície externa do tecido e há a formação da torta. Em operação industrial, as mangas são limpas

periodicamente para remover a torta e, conseqüentemente, facilitar o escoamento do ar (HINDS, 1982).

### 3.3.1 ETAPAS DA FILTRAÇÃO EM TECIDO

O processo de filtração em tecido pode ser dividido em três etapas, como mostra a Figura 2.

**Figura 2 - Etapas da filtração em tecido.**



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

A primeira etapa é chamada filtração em profundidade, a qual ocorre no início do processo, quando a captura de partículas é feita no interior do tecido, sendo o material particulado retido pelas fibras. Durante a segunda etapa, de transição, as partículas passam a ser capturadas pelas partículas já aderidas nas fibras, o que forma dendritos que atuam como novos elementos coletores e a queda de pressão começa a aumentar progressivamente. Finalmente, uma vez que uma camada de partículas se forma no interior do tecido, ocorre o estágio de filtração superficial, no qual é formada a torta de filtração que assume o papel principal de capturar o material particulado.

É possível identificar também na Figura 2 o ponto de colmatação, definido como o ponto no qual se inicia a formação da torta de filtração. Esse ponto é obtido experimentalmente pelo prolongamento do segmento linear da curva de filtração com o eixo das abscissas (WALSH, 1996).

### 3.3.2 MECANISMOS DE DEPOSIÇÃO PARTÍCULA-FIBRA

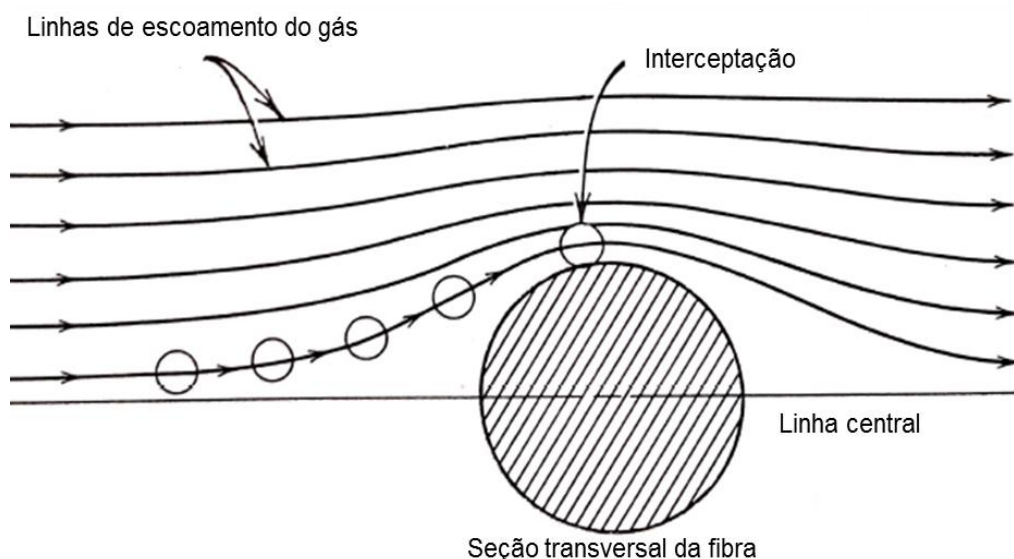
Avaliando a deposição fibra - partícula em um nível mais elementar, ou seja, a coleta de uma partícula por uma fibra individual, torna-se aparente a influência dos parâmetros de filtração na eficiência de coleta, como o diâmetro da partícula, a densidade de empacotamento ou solidez, a velocidade superficial de filtração e o diâmetro da fibra. A abordagem considera uma única fibra, posicionada perpendicularmente ao escoamento de ar, e analisa os mecanismos pelos quais as partículas podem ser coletadas nessa fibra. Assume-se que, se uma partícula atinge a fibra, ela adere e é removida permanentemente da corrente de aerossol (COOPER; ALLEY, 2002; HINDS, 1982).

Existem cinco mecanismos básicos pelos quais uma partícula de aerossol pode ser coletada pela fibra de um meio filtrante: interceptação direta, impactação inercial, difusão, deposição gravitacional e atração eletrostática. Esses mecanismos são ilustrados nesta seção para uma fibra com diâmetro igual a  $2\ \mu\text{m}$ , densidade de empacotamento igual a 0,05 e espessura do meio filtrante igual a 1 mm.

#### 3.3.2.1 INTERCEPTAÇÃO DIRETA

A coleta por interceptação ocorre quando uma partícula, seguindo uma linha de escoamento do gás, fica a uma distância da superfície da fibra correspondente a um raio de partícula, como mostra a Figura 3.

**Figura 3 - Mecanismo de coleta por interceptação.**



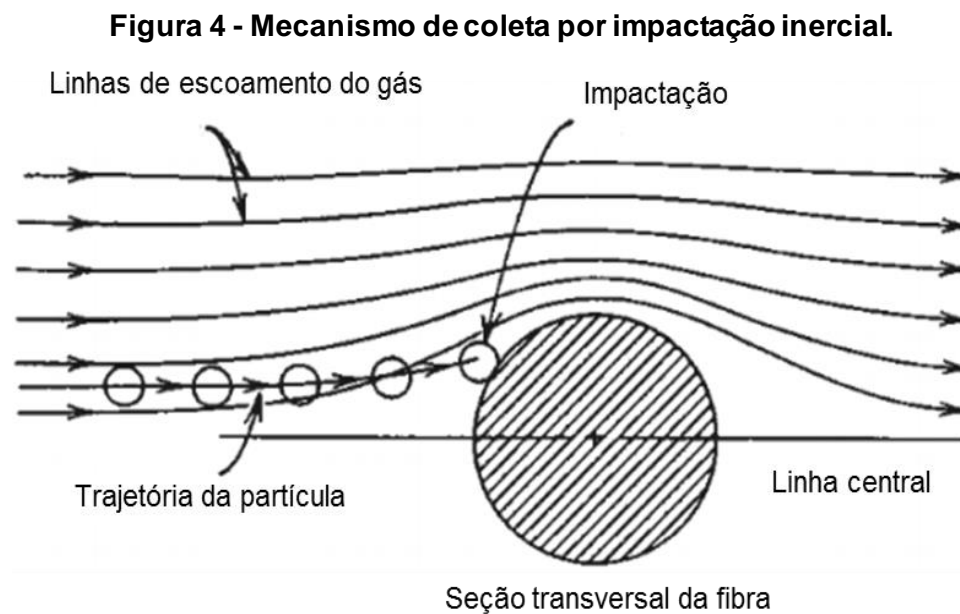
Fonte: Adaptado de Hinds (1982).

A partícula atinge a fibra e é coletada, assumindo-se que as partículas seguem perfeitamente as linhas de escoamento, ou seja, possuem inércia e movimento browniano desprezíveis. Dessa forma, pode-se dizer que a interceptação é um mecanismo de coleta que

não é resultado de uma partícula se afastando de sua linha de escoamento original. Além disso, esse mecanismo não depende da velocidade do fluido e tem a eficiência de coleta aumentada quando se aumenta um fator adimensional que relaciona diâmetro da partícula e diâmetro da fibra ( $d_p/d_f$ ). A interceptação é também um importante mecanismo de coleta para a faixa de tamanho de partícula que gera eficiência mínima (HINDS, 1982).

### 3.3.2.2 IMPACTAÇÃO INERCIAL

A impactação inercial ocorre quando uma partícula, por causa da inércia, é incapaz de se ajustar com rapidez suficiente às linhas de escoamento que mudam abruptamente nas proximidades de uma fibra, e atravessa essas linhas de escoamento para atingir a fibra, como mostra a Figura 4.



Fonte: Adaptado de Hinds (1982).

A eficiência de coleta por impactação aumenta quanto maior for a inércia da partícula (maior diâmetro ou maior densidade), maior velocidade da partícula ou quando houver curvatura mais abrupta das linhas de escoamento do gás. Impactação é o mecanismo mais importante para partículas maiores, mas tais partículas apresentam também usualmente coleta significativa por interceptação (HINDS, 1982).

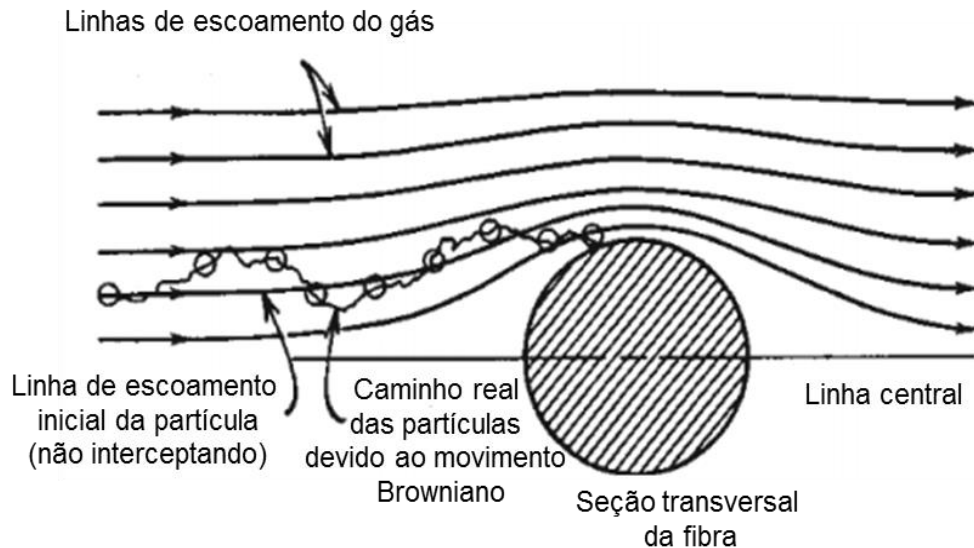
### 3.3.2.3 DIFUSÃO

O movimento browniano de pequenas partículas, decorrente das múltiplas colisões destas com as moléculas do fluido, que as fazem seguir um caminho aleatório, aumenta a probabilidade das partículas atingirem uma fibra enquanto passam por ela em uma linha de escoamento não interceptadora. As partículas, no entanto, apenas serão capturadas se



houver forças de curto alcance suficientemente fortes para mantê-las na superfície, como por exemplo, forças de *Van der Waals*, eletrostáticas e químicas (COOPER; ALLEY, 2002). A Figura 5 ilustra as trajetórias inicial e real de uma partícula.

**Figura 5 - Mecanismo de coleta por difusão.**



Fonte: Adaptado de Hinds (1982).

A eficiência de coleta por difusão aumenta quando se diminui o tamanho de partícula, o diâmetro da fibra e/ou a velocidade do fluido. Dentre os mecanismos mencionados, este é o único em que a eficiência de coleta aumenta quando o diâmetro da partícula diminui (HINDS, 1982).

### **3.3.2.4 DEPOSIÇÃO GRAVITACIONAL**

A deposição gravitacional apresenta menor eficiência de coleta que os demais mecanismos, exceto quando o tamanho da partícula é grande e a velocidade do fluido é baixa. Quando a velocidade do fluido é maior que  $6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , a impactação é mais importante que a deposição gravitacional. Esse mecanismo também depende da direção do fluido, tendo o escoamento horizontal menor eficiência que o escoamento descendente (HINDS, 1982).

### **3.3.2.5 DEPOSIÇÃO ELETROSTÁTICA**

O mecanismo de deposição eletrostática requer o conhecimento da carga das partículas e das fibras. É usualmente desconsiderado, a menos que as partículas ou fibras tenham sido carregadas de alguma maneira quantificável. Aumentando a carga das partículas e das fibras aumenta-se a eficiência de coleta. Partículas carregadas são atraídas por fibras com cargas opostas por atração coulômbica. Alternativamente, uma partícula carregada pode

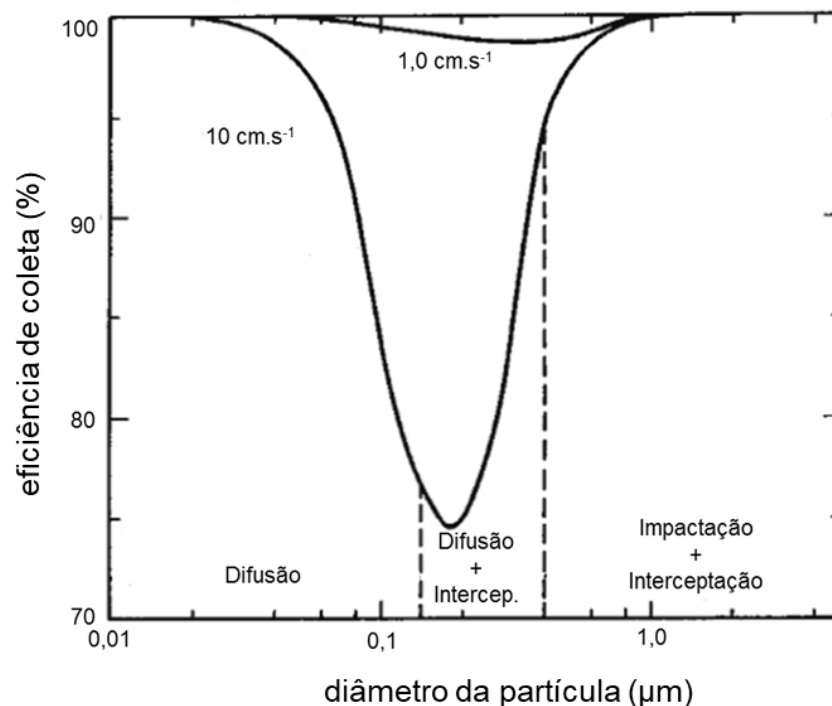
ser atraída por uma fibra descarregada, sendo que a partícula carregada induz uma carga igual e oposta na superfície da fibra e cria o próprio campo de atração (HINDS, 1982).

### 3.3.3 EFICIÊNCIA DE COLETA DOS MECANISMOS DE DEPOSIÇÃO

Conhecendo-se a eficiência total dos mecanismos de fibra única, pode-se determinar a eficiência global de um meio filtrante. Em teoria, não se deve adicionar os mecanismos de fibra única para se obter a eficiência total, pois diferentes mecanismos podem competir pelas mesmas partículas e a captura será contada duas vezes. Entretanto, os mecanismos de impactação, difusão e deposição gravitacional predominam para diferentes tamanhos de partícula e velocidade superficial, portanto, podem ser considerados mutuamente exclusivos e somados. A aproximação é suficientemente precisa para indicar corretamente as tendências na eficiência total (HINDS, 1982). Os gráficos apresentados nesta seção são correspondentes a um meio filtrante com 1 mm de espessura, densidade de empacotamento de 0,05 e diâmetro da fibra igual a 2  $\mu\text{m}$ , exceto quando especificado.

A Figura 6 mostra um gráfico da eficiência global de coleta *versus* diâmetro de partícula, para duas velocidades superficiais, 1,0  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  e 10  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

**Figura 6 - Eficiência de coleta versus diâmetro de partícula para velocidades superficiais de filtração de 1,0 e 10  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ .**



Fonte: Adaptado de Hinds (1982).

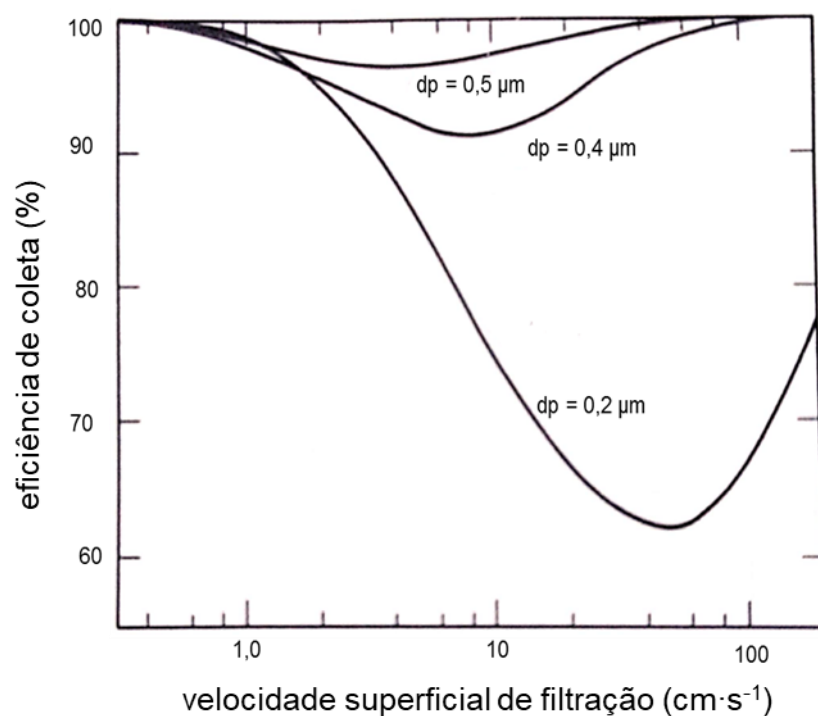
Analisando a Figura 6, observa-se que, para este meio filtrante específico e a velocidade superficial determinada, a interceptação e a impactação são desprezíveis para

partículas menores que  $0,5 \mu\text{m}$ , mas aumentam rapidamente para partículas maiores que  $0,5 \mu\text{m}$ . A difusão é o mecanismo mais importante para partículas abaixo de  $0,2 \mu\text{m}$ , porém é desprezível para partículas acima desse tamanho. Para todos os tamanhos de partícula, a deposição gravitacional é desprezível em comparação aos outros mecanismos. O tamanho de partícula que fornece a eficiência mínima, cerca de  $0,2 \mu\text{m}$ , é um tamanho intermediário que é considerado grande para que o mecanismo de difusão seja eficaz e pequeno para que o mecanismo de impactação ou de interceptação seja eficaz. Como esses mecanismos concorrentes operam em diferentes faixas de tamanho, todos os meios filtrantes têm um tamanho de partícula específico que fornece a eficiência mínima, geralmente entre  $0,05$  a  $0,5 \mu\text{m}$  (HINDS, 1982).

Lee; Liu (1980) derivaram equações para prever tanto a eficiência mínima quanto o tamanho de partícula que fornece eficiência mínima, com base no pressuposto de que os únicos mecanismos importantes na faixa de eficiência mínima são interceptação e difusão. Segundo esses autores, o tamanho de partícula para eficiência mínima diminuirá à medida em que o tamanho da fibra diminuir, e a eficiência mínima se tornará maior à medida em que o tamanho da fibra diminuir.

Há uma velocidade superficial que fornece a mínima eficiência para um dado tamanho de partícula e um meio filtrante, como mostra a Figura 7.

**Figura 7. Eficiência versus velocidade superficial para diâmetros de partícula de 0,2; 0,4 e 0,5  $\mu\text{m}$ .**



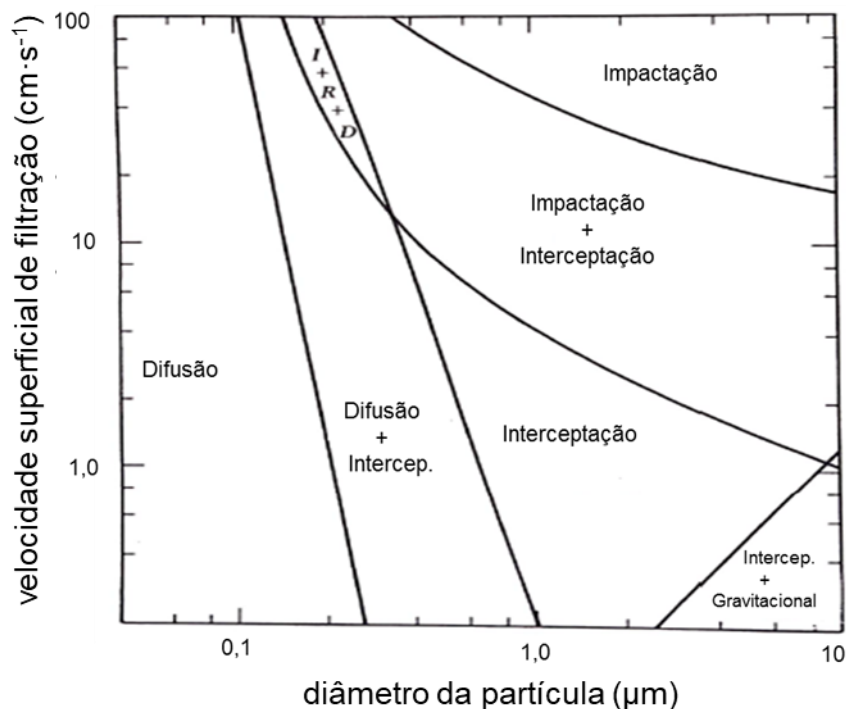
Fonte: Adaptado de Hinds (1982).

À medida em que a velocidade superficial aumenta, a coleta por difusão é reduzida e a coleta por impactação é aumentada, Figura 7. A velocidade superficial para a eficiência mínima aumenta com a diminuição do tamanho das partículas. Medir a eficiência de um meio filtrante em diferentes velocidades superficiais pode indicar quais mecanismos de coleta são mais importantes para o tamanho de partícula testado (HINDS, 1982).

A Figura 8 mostra um gráfico que relaciona o tamanho das partículas e a faixa de velocidade superficial para os mecanismos de filtração. As condições usadas são as mesmas da Figura 6 e da Figura 7.

As regiões da Figura 8 foram definidas onde um mecanismo específico contribui com mais de 20% para a eficiência total de fibra única. Para partículas menores que  $0,1 \mu\text{m}$ , a difusão é o mecanismo mais importante. A interceptação contribui significativamente para a coleta de partículas maiores que  $0,1 \mu\text{m}$  em uma região ampla. A impactação é importante para partículas maiores que  $1,0 \mu\text{m}$  em velocidades maiores (HINDS, 1982).

**Figura 8. Regiões em que diferentes mecanismos de coleta contribuem 20% ou mais na eficiência total de fibra-única.**



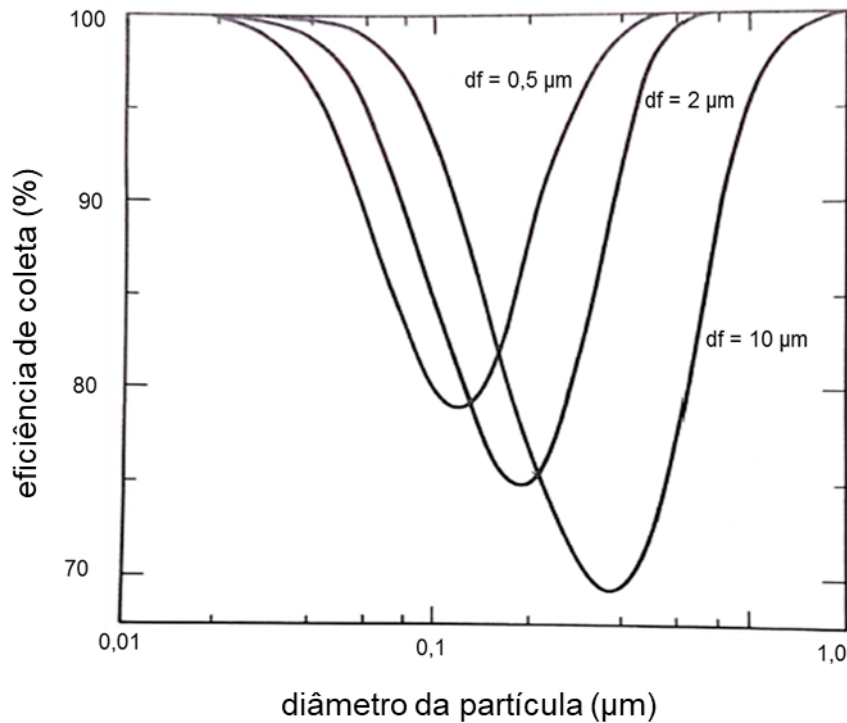
Fonte: Adaptado de Hinds (1982).

A Figura 9 mostra o efeito do tamanho da fibra na eficiência de um meio filtrante em função do tamanho de partícula, para meios filtrantes com densidade de empacotamento 0,05 e velocidade superficial de  $10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . A espessura dos meios filtrantes foi ajustada para que os três apresentassem a mesma queda de pressão. A queda de pressão é resultado do efeito combinado de cada fibra resistir ao escoamento de ar, sendo diretamente proporcional à

espessura, inversamente proporcional ao diâmetro da fibra ao quadrado ( $d_f^2$ ) e diretamente proporcional à velocidade superficial, pois o escoamento dentro do meio filtrante é laminar.

Nesta situação especificada na Figura 9, à medida em que o diâmetro da fibra diminui, o diâmetro de partícula que fornece a eficiência mínima diminui e a eficiência mínima aumenta.

**Figura 9. Efeito do tamanho da fibra na eficiência de coleta de um meio filtrante em função do tamanho de partícula, para velocidade superficial de  $10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ .**



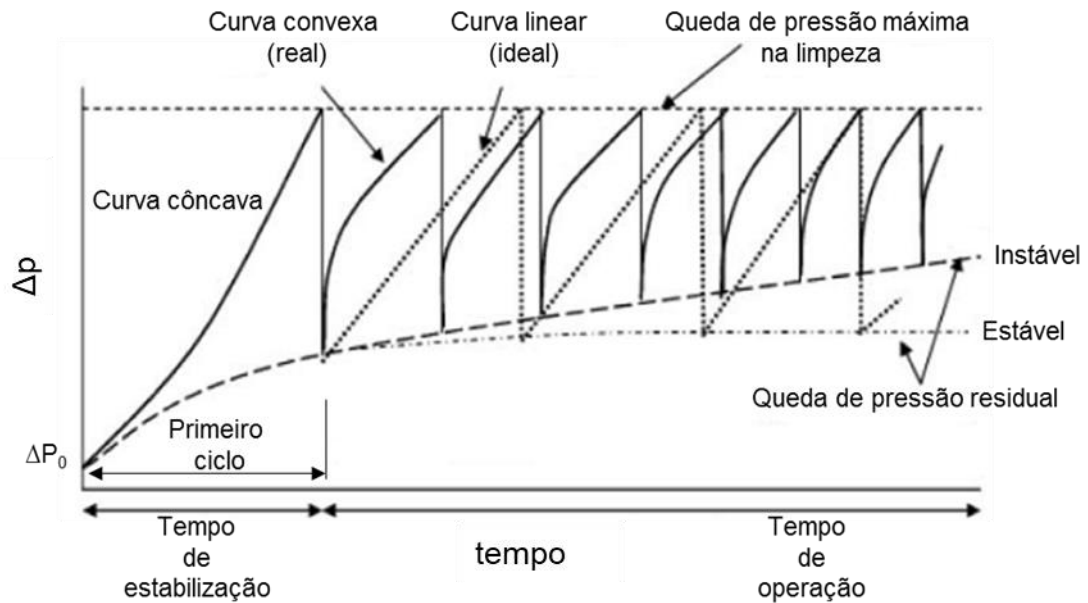
Fonte: Adaptado de Hinds (1982).

### 3.3.4 CICLOS DE FILTRAÇÃO

Os ciclos de filtração em um filtro de mangas com limpeza por jato de ar pulsante são contínuos e podem ser representados em um gráfico que relaciona queda de pressão ( $\Delta p$ ) versus tempo, conforme ilustra a Figura 10.

Nota-se pela Figura 10 que a curva do primeiro ciclo de filtração é coincidente para os processos estável e instável. É uma curva aproximadamente côncava, que representa a filtração de profundidade. Uma partícula capturada ocupa um espaço finito e pode agir como um local de coleta para as próximas partículas, contribuindo para a eficiência de filtração. Isso também aumenta a resistência à passagem do fluido e contribui para o aumento da queda de pressão. Nos estágios iniciais do carregamento do meio filtrante, o aumento da queda de pressão por unidade de depósito de partícula é muito baixo, uma vez que as partículas são depositadas na superfície de fibras individuais profundas e não afetam o escoamento em grande extensão (WALSH, 1996).

**Figura 10. Ciclos de filtração em operação estável e instável.**



Fonte: Adaptado de Mukhopadhyay (2009).

A partir do segundo ciclo, o padrão da curva de filtração muda para cada processo. Para o processo estável, o aumento da queda de pressão é linear, representando filtração de superfície, e a queda de pressão residual após a limpeza retorna aproximadamente ao valor do final do primeiro ciclo, o que significa que a torta é praticamente toda removida na limpeza. Esse perfil se repete nos próximos ciclos e, portanto, diz-se que a queda de pressão residual se tornou constante e estabilizou. No processo instável, a queda de pressão aumenta gradualmente e forma uma curva parcialmente convexa, que é característica do fenômeno de *patchy cleaning* (limpeza por blocos), e após a limpeza a queda de pressão residual é superior àquela do final do primeiro ciclo. Essa queda de pressão residual aumenta ciclo a ciclo, devido às partículas que penetraram no meio filtrante e não são removidas durante a limpeza e também devido à limpeza irregular da torta de filtração (*patchy cleaning*), tornando os ciclos mais curtos (MUKHOPADHYAY, 2009). Na prática, a extensão em que esses efeitos ocorrem depende de todos os fatores que influenciam o comportamento operacional de um filtro, especialmente as propriedades do meio filtrante, do gás, do material particulado e a eficiência de limpeza.

### 3.4 PARÂMETROS OPERACIONAIS E CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DO MEIO FILTRANTE QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DE FILTRAÇÃO

Os trabalhos encontrados na literatura, sobre a limpeza de gases utilizando filtros de tecido, avaliaram a influência dos parâmetros de operação (por exemplo, velocidade superficial, concentração do material particulado, umidade, temperatura, pressão do tanque

de limpeza, tempo do pulso de limpeza, dentre outros) no tempo total de filtração, na queda de pressão, na queda de pressão residual, na eficiência de coleta das partículas, na eficiência de limpeza das mangas, na porosidade da torta de filtração, nas forças de adesão e coesão e na penetração das partículas no meio filtrante. Além desses parâmetros, foram avaliados também a influência do tamanho, o formato e a higroscopicidade da partícula, bem como os tratamentos e acabamentos superficiais das mangas no desempenho de filtração. Entretanto, a maioria desses trabalhos utilizaram apenas amostras retiradas da superfície lisa das mangas, sem considerar a região da costura. Nesta seção estão apresentados alguns trabalhos relevantes que permitiram compreender melhor o tema em estudo e definir as lacunas existentes.

Silva *et al.* (1999) realizaram um estudo experimental sobre a influência da velocidade superficial de filtração na porosidade da torta e na força de adesão partícula-fibra, utilizando meio filtrante de poliéster e como material particulado a rocha fosfática. Os autores concluíram que o aumento da velocidade superficial de filtração reduziu a porosidade e aumentou a resistência específica da torta, uma vez que altas velocidades favoreceram a deposição de partículas com maiores diâmetros na torta. Além disso, o aumento da velocidade superficial de filtração resultou no aumento da força de adesão. Esses resultados sugeriram que altas velocidades de filtração não são recomendadas, uma vez que há tendência em formar tortas mais compactas, que dificultariam o processo de limpeza e provocariam o aumento dos gastos energéticos, devido ao acréscimo da queda de pressão, e acelerariam o desgaste das mangas pelo maior número de pulsos de limpeza requeridos.

Dittler; Umhauer (2001) avaliaram a influência do envelhecimento e da regeneração de filtros cerâmicos rígidos na filtração de gases. Os testes de filtração foram realizados no equipamento construído de acordo com a norma VDI 3926 (2003) e equipado com um tipo especial de contador de partículas óptico, que tem a vantagem de medir o tamanho e a concentração de partículas simultaneamente e *in situ* no lado do gás limpo. Foi demonstrado que a maior parte das partículas que penetraram diretamente o meio filtrante foram resultantes do processo de regeneração do filtro, de modo que a pressão do tanque de limpeza apresentou influência decisiva no comportamento de separação das partículas. Durante a formação subsequente da torta, o número de partículas que penetraram o meio filtrante diminuiu com o aumento do número de ciclos de filtração, devido ao envelhecimento do filtro.

Neto; Aguiar; Coury (2002) realizaram o estudo da porosidade da torta, pelo método direto com imagens do MEV, em mangas filtrantes de poliéster com 1,23 m de comprimento, tendo a rocha fosfática com 29  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio volumétrico como material particulado. Os autores variaram a velocidade superficial de filtração (5,0; 10 e 15  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) e a espessura da torta (62 a 1450  $\mu\text{m}$ ). Concluiu-se que a espessura da torta diminuiu da base para o topo da manga filtrante para a velocidade superficial de filtração de 5  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  e queda de pressão

de 365 mmH<sub>2</sub>O. As porosidades obtidas em função da posição no interior das tortas mostraram que no topo da manga não houve variação, já as amostras da base e do centro da manga apresentaram uma variação de porosidade em função da posição no interior da torta, sendo que o valor decresceu suavemente na direção tecido-ar. Nas velocidades de 10 e 15 cm·s<sup>-1</sup> a espessura da torta foi muito pequena (60 a 180 μm) e os valores de porosidade em função da posição no interior da torta não foram conclusivos. Os valores de porosidades ao longo do filtro em diferentes velocidades mostraram que para 5 cm·s<sup>-1</sup> as porosidades foram maiores em todas as posições da manga, já para as velocidades maiores as porosidades foram inferiores. Além disso, notou-se que no topo da manga a velocidade superficial de filtração apresentou pouca influência na porosidade. A comparação feita entre os valores de porosidade da torta obtidos experimentalmente e por correlações da literatura mostra que há divergências devido as equações serem melhor empregadas para tortas mais espessas que as que foram obtidas nos experimentos.

Qin; Dekermenjian; Martin (2006) apresentaram um algoritmo para o cálculo da carga de pó no exaustor do filtro de mangas quando uma ou mais mangas falham. Um exemplo de cálculo foi apresentado para um filtro de mangas equipado com 200 mangas, com 2,74 m de comprimento cada manga, velocidade superficial de filtração de 1,13 m·min<sup>-1</sup>, queda de pressão de 1444 Pa, vazão total de ar de 6583 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> e concentração de pó na entrada de 0,0114 kg·m<sup>-3</sup>. O filtro de mangas foi projetado para ter eficiência de 99,9%. Durante os testes, quando uma manga falhou, a eficiência caiu para 84,7%. A previsão mostra que uma pequena porcentagem de mangas com falhas pode levar a uma alta carga de poeira na saída e a uma baixa eficiência geral de coleta.

Ito; Aguiar (2009) avaliaram a influência do tipo de material particulado e da velocidade superficial na porosidade da torta de filtração, pelo método direto com imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Foram utilizados como materiais particulados polvilho, amido de milho e rocha fosfática, e como meio filtrante o poliéster. As velocidades de filtração foram de 3,0; 4,5; 6,0; 7,5 e 9,0 m·min<sup>-1</sup>. O tempo total de filtração foi estabelecido em 800 s, o que correspondeu a diferentes espessuras da torta. Após o tempo de filtração estabelecido, o meio filtrante era removido e passava por pré-tratamento que possibilitava a obtenção de imagens no MEV. Foi reportado pelos autores que, para os três tipos de material particulado, a porosidade média da torta de filtração diminuiu com o aumento da velocidade superficial de filtração. Mantendo-se a velocidade superficial de filtração, a porosidade média da torta foi menor para o material particulado com maior esfericidade, resultado este que está em concordância com o estudo de Cheng; Tsai (1998), no qual os autores mostraram que partículas esféricas preencheram os espaços intersticiais com mais eficiência, produziram maior empacotamento e resultaram em menor porosidade.



Rocha *et al.* (2010) avaliaram a influência de três velocidades de filtração (3,0; 6,0 e 9,0 m·min<sup>-1</sup>) na penetrabilidade das partículas no tecido, utilizando como material particulado rocha fosfática, com diâmetro volumétrico mediano de 4,5 µm, e como meio filtrante o poliéster. Foram realizados 10 ciclos de filtração, com duração de 450 s por ciclo, uma vez que com esse tempo, os autores atingiram queda de pressão máxima próxima à utilizada no âmbito industrial, 150 mmH<sub>2</sub>O. A limpeza foi feita por ar reverso. Os autores relataram que o aumento da velocidade superficial de filtração acarretou o aumento da penetrabilidade das partículas no meio filtrante. Dessa forma, houve maior queda de pressão residual a partir do segundo ciclo de filtração e a queda de pressão máxima foi atingida mais rapidamente em cada ciclo subsequente. Em um processo industrial, velocidades mais altas acarretariam maior desgaste da manga e, conseqüentemente, diminuiria a vida útil do tecido, já que seriam necessárias mais regenerações do meio filtrante. Por outro lado, baixas velocidades de filtração poderiam diminuir a queda de pressão residual e o número de regenerações, porém, exigiriam elevada área de filtração para determinada vazão fixa, podendo tornar um projeto industrial inviável.

Tanabe *et al.* (2011) investigaram a deposição de partículas de rocha fosfática com diâmetro mediano volumétrico de 4,8 µm, em meios filtrantes de acrílico, poliéster e polipropileno, com tratamentos superficiais, durante 10 ciclos de filtração com limpeza por ar reverso. Os autores determinaram também a força de adesão partícula-fibra. A velocidade superficial de filtração foi de 6 m·min<sup>-1</sup>, a queda de pressão máxima foi de 980 Pa e a velocidade na limpeza foi de 7,2 m·min<sup>-1</sup>. Os resultados mostraram que o polipropileno apresentou menor profundidade na deposição de partículas, o que foi atribuído à menor permeabilidade e porosidade desse meio filtrante. Porém, a remoção da torta de filtração do tecido de polipropileno foi dificultada devido à maior força de adesão partícula-fibra para esse tecido, que foi resultante da maior compactação da torta e das características estruturais do filtro de polipropileno. Diante dos resultados, os autores relataram que a queda de pressão residual não depende apenas da deposição de partículas no interior do meio filtrante, mas também das condições operacionais de filtração e limpeza, da força de adesão partícula-fibra, da porosidade da torta e das características físicas e químicas inerentes ao meio filtrante. No entanto, esse estudo fez uso de apenas um material particulado, e deve-se ressaltar que as características do material particulado também influenciam a formação e remoção de tortas de filtração, como foi mostrado no trabalho de (ITO; AGUIAR, 2009).

Barros; Tanabe; Aguiar (2012) avaliaram a eficiência fracionária de coleta de micropartículas de rocha fosfática (0,5 a 20 µm) para meios filtrantes de fibras de celulose, regenerados e virgens. Utilizaram velocidade superficial de 6,0 m·min<sup>-1</sup> e as amostragens, antes e após o meio filtrante, foram feitas quando a queda de pressão no meio filtrante alcançou os valores de 0; 3,0; 6,0; 9,0 e 12,0 mmH<sub>2</sub>O. Os resultados evidenciaram que o meio

filtrante virgem apresentou as maiores eficiências de coleta para partículas menores que 2,5  $\mu\text{m}$ , em todas as quedas de pressão, devido à menor permeabilidade comparado aos outros tecidos regenerados. À medida em que a torta se formava, a eficiência de coleta de  $\text{PM}_{2,5}$  aumentava para todos os meios filtrantes, uma vez que a torta atuava como uma barreira à passagem das partículas. Para partículas maiores que 2,5  $\mu\text{m}$ , as eficiências de todos os meios filtrantes foram aproximadamente 100% para todas as quedas de pressão.

Lupion *et al.* (2014) utilizaram quatro filtros comerciais - dois filtros de tecido e dois filtros rígidos - em uma instalação experimental de filtração de gás quente, para avaliar a compactação de tortas de filtração e a porosidade destas. Os resultados mostraram que o aumento da velocidade superficial de filtração provocou a redução da porosidade da torta. Quanto ao efeito do meio filtrante, filtros com maior permeabilidade resultaram em tortas menos compactas. A temperatura foi a variável que apresentou o efeito mais significativo na porosidade das tortas formadas nos filtros de tecido, sendo estas mais compactas a temperaturas mais elevadas, enquanto nos elementos rígidos esse efeito não foi perceptível.

Bao *et al.* (2014) avaliaram mangas filtrantes em relação à influência das características estruturais no desempenho de filtração. Foram utilizadas seis mangas de poliéster, com diferentes características estruturais. O material particulado foi o pó de teste tipo 8 da *Japanese Industrial Standard*, com diâmetro aerodinâmico mediano de 6,6  $\mu\text{m}$ . A queda de pressão máxima foi de 100  $\text{mmH}_2\text{O}$ , a concentração de entrada foi de 30  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , a velocidade superficial de 0,17  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ , a temperatura foi de  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ , a umidade relativa foi  $50 \pm 10\%$ , pressão do tanque de limpeza de 2 bar, tempo do pulso de 50 ms. Os resultados mostraram que a densidade linear de fibra mais alta evita que o pó penetre o filtro, e isso permite que o pó seja mais facilmente removido. A análise de várias formas de seção transversal da fibra indicou que, para a mesma densidade linear de fibra, a forma triangular foi melhor que a forma circular.

Barros; Tanabe; Aguiar (2015) avaliaram a eficiência de meios filtrantes de poliéster e HEPA (*High Efficiency Particulate Air*) na filtração de nanopartículas de cloreto de sódio (6 a 800 nm). A velocidade superficial de filtração utilizada foi de 3,6  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  e a eficiência de coleta foi determinada para os meios filtrantes limpos e para quedas de pressão intermediárias, tendo como queda de pressão máxima  $\Delta p_{\text{meio filtrante virgem}} + 100 \text{ mmH}_2\text{O}$ . As curvas de filtração mostraram que o HEPA apresentou filtração de superfície mais pronunciada, enquanto o poliéster reteve maior massa no interior para uma mesma queda de pressão, caracterizando a filtração de profundidade. Na ausência de torta de filtração, o HEPA foi mais eficiente, devido à menor permeabilidade, enquanto o poliéster mostrou eficiência de coleta inicial entre 20 e 40% para partículas entre 10 e 100 nm. Contudo, após a formação da torta, as eficiências de coleta de ambos os meios filtrantes foram próximas a 100% nos estágios finais da filtração.

Mukhopadhyay; Pandit; Dhawan (2016) estudaram o efeito de altas temperaturas no desempenho de meios filtrantes fabricados com P84 com tela suporte de PTFE e P84 com tela suporte de P84, em termos de emissões, eficiência de filtração e queda de pressão. Os autores concluíram que as emissões através do meio filtrante diminuíram com o aumento da temperatura (30 a 220°C), e a queda de pressão aumentou para temperaturas mais altas. Para temperaturas de até 220°C, a eficiência de filtração aumentou, porém, a queda de pressão residual também foi maior.

Cirqueira; Tanabe; Aguiar (2017) avaliaram meios filtrantes de poliéster, com e sem tratamento superficial, em 50 ciclos de filtração com sistema de limpeza por jato de ar pulsante, utilizando o calcário dolomítico como material particulado, com diâmetro mediano volumétrico igual a 9,60 µm, velocidade superficial de filtração de 2,4 m·min<sup>-1</sup>, queda de pressão máxima de 10 mmH<sub>2</sub>O, pressão do tanque de limpeza de 2 bar e tempo de pulso de 200 ms. Os resultados principais mostraram a relevância do tratamento superficial do meio filtrante para aumentar a eficiência de coleta de partículas nos momentos iniciais de filtração e reduzir o desgaste das fibras do tecido. Essas características obtidas com o tratamento da superfície são essenciais em um processo industrial que utiliza a filtração em tecido para controle da poluição do ar, uma vez que garante a qualidade do ar com a redução da emissão de particulado e reduz os gastos da empresa com a troca dos meios filtrantes.

Cirqueira; Tanabe; Aguiar (2019) avaliaram dois meios filtrantes com tratamentos superficiais, um de poliéster e outro de polipropileno, em ciclos de filtração com limpeza por jato de ar pulsante, utilizando o calcário dolomítico como material particulado, com diâmetro mediano volumétrico igual a 9,60 µm, velocidade superficial de filtração de 2,4 m·min<sup>-1</sup>, queda de pressão máxima de 100 mmH<sub>2</sub>O, pressão do tanque de limpeza de 2 bar e tempo de pulso de 200 ms. Após um total de 100 ciclos de filtração, os autores obtiveram melhor desempenho para o meio filtrante de poliéster, tanto na eficiência de coleta de partículas quanto na eficiência de limpeza. Esses resultados foram atribuídos ao menor diâmetro de fibras e menor porosidade superficial do tecido de poliéster, que ocasionaram a predominância da filtração de superfície, constatada pela deposição de partículas em menor profundidade no interior do tecido.

Boudhan *et al.* (2019) mostraram a influência da umidade absoluta do ar no desempenho de filtração de um filtro de mangas a jato pulsante, em escala laboratorial, a 150 °C, umidade absoluta de 73 g·m<sup>-3</sup>, velocidade superficial de 1,14 m·min<sup>-1</sup>, 150 Pa de queda de pressão máxima, como também em condições secas, a 150 °C. Foram realizados dez ciclos de filtração e limpeza, com aerossol de carbono não higroscópico e meio filtrante de PTFE. Os resultados experimentais mostraram que a presença de vapor de água influencia significativamente o desempenho do filtro de mangas a 150 °C, mesmo para baixa umidade relativa (3%). Os autores concluíram que a umidade do ar aumentou a eficiência de coleta de

partículas na faixa de 110 a 300 nm, pela consequência direta da umidade na densidade das partículas, o que melhora a coleta de partículas pelo mecanismo de impactação inercial. Ao mesmo tempo, não foi observado efeito da umidade para a eficiência da coleta de nanopartículas (abaixo de 100 nm). O aumento da umidade também acelerou o aumento da queda de pressão do filtro e reduziu a eficiência de limpeza da manga, levando ao aumento da queda de pressão residual, que é o principal parâmetro que reduz a vida útil do filtro de mangas.

Li *et al.* (2019) estudaram os efeitos do tamanho de partícula e da queda de pressão máxima no desempenho de filtração de filtro de cartucho plissado, com sistema de limpeza por jato de ar pulsante. Utilizaram poliéster como meio filtrante e cinzas volantes como material particulado, que foi classificado em grosseiro, médio e fino, com diâmetros medianos volumétricos respectivamente iguais a 40,2  $\mu\text{m}$ , 18,7  $\mu\text{m}$  e 9,4  $\mu\text{m}$ . A velocidade superficial foi de 1,39  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ , a concentração de entrada do material particulado foi de 9,74  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , a pressão do tanque de limpeza foi de 5 bar e tempo do pulso de 150 ms, a queda de pressão inicial nas mangas foi de 3,9  $\text{mmHg}_2\text{O}$  ( $\Delta p_0$ ) e as quedas de pressão máximas adotadas foram  $4\cdot\Delta p_0$ ,  $5\cdot\Delta p_0$ ,  $6\cdot\Delta p_0$  e  $7\cdot\Delta p_0$ . A queda de pressão foi monitorada durante 3000 s. Mantendo-se a queda de pressão máxima e aumentando o tamanho de partícula, houve redução na média da queda de pressão residual, no número de pulsos de limpeza e na emissão média, o que ocasionou melhoria na eficiência de coleta. Mantendo-se o tamanho de partícula e reduzindo a queda de pressão máxima, houve aumento na média da queda de pressão, no número de pulsos de limpeza e na emissão média, o que resultou em menor eficiência de coleta. Os autores também constataram que a emissão de partículas aumentava instantaneamente durante o pulso de limpeza e rapidamente reduzia após o pulso. E relataram que seria necessário selecionar a queda de pressão máxima ótima para reduzir a frequência dos pulsos.

Xie *et al.* (2020) desenvolveram um meio filtrante composto, no qual a base era *metal web* e a cobertura era membrana de PTFE. Esse meio filtrante foi comparado ao de *metal web* e ao de poliéster com membrana de PTFE. Utilizaram como material particulado partículas finas de sílica, com diâmetro volumétrico mediano de 2,61  $\mu\text{m}$ . Avaliaram a queda de pressão em função da velocidade superficial de filtração, uma vez que a velocidade superficial é um dos parâmetros que mais influencia a queda de pressão. O meio filtrante composto apresentou a maior queda de pressão com o aumento da velocidade superficial, possivelmente pelo fechamento dos poros das fibras pela membrana de PTFE. Fixando-se a velocidade superficial, avaliaram a influência da temperatura da corrente gasosa na queda de pressão. Novamente, o meio filtrante composto apresentou a maior queda de pressão com o aumento da temperatura. Os três meios filtrantes apresentaram aumento linear de queda de pressão com o aumento da temperatura. Os autores justificaram que esse fenômeno ocorreu devido ao aumento da viscosidade dinâmica do ar com o aumento da temperatura e a queda

de pressão no meio filtrante é diretamente proporcional à viscosidade dinâmica. As eficiências dos três meios filtrantes diminuíram com o aumento da velocidade, entretanto, as eficiências do meio filtrante composto foi a maior em todos os valores de velocidade avaliados. A eficiência de coleta diminuiu com o aumento da velocidade superficial porque partículas pequenas são coletadas principalmente pelo mecanismo de difusão e os efeitos desse mecanismo são enfraquecidos com o aumento da velocidade superficial dentro de um range. Embora o meio filtrante composto tenha apresentado a maior queda de pressão, a eficiência de coleta de partículas foi a maior dentre os três meios filtrantes. Com relação à eficiência de regeneração, os autores constataram que sob as mesmas condições operacionais, o meio filtrante composto apresentou a melhor eficiência de regeneração. Entretanto, a taxa de regeneração dos três meios filtrantes diminuiu com o decorrer dos ciclos. Por esta razão, a frequência das limpezas foi aumentada e, conseqüentemente, houve o desgaste dos meios filtrantes e diminuição da vida útil. Em relação à eficiência de coleta em função do aumento de temperatura, não houve impacto para o meio filtrante composto.

Stabile *et al.* (2020) avaliaram a emissão de partículas submicrômicas na chaminé de uma planta de incineração. Amostras foram coletadas antes do filtro de mangas e na chaminé, em setembro de 2010, setembro de 2011 e novembro de 2012. As amostras de 2010 e 2011 foram em mangas instaladas em 2007. As amostras de 2012 foram em mangas instaladas em 2012. O *set point* da queda de pressão de limpeza foi de 130 mmH<sub>2</sub>O. Em 2010, a queda de pressão média no filtro foi de 124 mmH<sub>2</sub>O, em 2011 foi de 141 mmH<sub>2</sub>O e em 2012 foi de 122 mmH<sub>2</sub>O. Isso significa que em 2011 os pulsos de limpeza foram mais frequentes, pois a queda de pressão ultrapassou o *set point*. Os testes mostraram que quanto mais tempo de uso da manga, mais frequentes foram os pulsos de limpeza e, conseqüentemente, houve maiores picos de concentrações medidos na chaminé nos momentos dos pulsos. Entretanto, todas as mangas, mesmo as usadas por mais tempo, garantiram eficiência de coleta de 99,99%.

### **3.5 TRABALHOS QUE AVALIARAM FUIROS FEITOS PROPOSITAMENTE NO MEIO FILTRANTE E A REGIÃO DA COSTURA**

Além do projeto e operação adequados do filtro - dimensionamento, instalação, parâmetros operacionais e manutenção - outro fator importante a ser considerado quando se pretende minimizar as emissões de material particulado é o projeto da costura das mangas filtrantes. Para a aplicação em filtro de mangas, a confecção do meio filtrante em formato cilíndrico é necessária para que os elementos filtrantes possam ser instalados de maneira eficiente. As formas típicas de confecção de mangas cilíndricas são a costura e a soldagem do material filtrante. Em relação às mangas filtrantes costuradas, as regiões de costura são pontos potenciais de vazamento durante o processo de filtração e podem contribuir para a

emissão de partículas. A contribuição de pequenos vazamentos nos filtros de tecido para as emissões de partículas tem sido estudada de diferentes maneiras, tanto para pequenas amostras do meio filtrante em plataformas de teste quanto para mangas filtrantes instaladas em plantas piloto de filtro de mangas, ou em plantas industriais.

Em relação à avaliação de amostras de meios filtrantes em plataformas de teste, (BACH; SCHMIDT, 2007) investigaram o comportamento de furos com diâmetros que variaram de 288  $\mu\text{m}$  a 1041  $\mu\text{m}$ . Os experimentos e cálculos mostraram que quanto maiores os orifícios, menor a eficiência de coleta da amostra do meio filtrante. Um aumento na velocidade superficial de filtração levou ao aumento na eficiência de coleta do meio filtrante com furo, pois uma cratera se formará ao redor da região do orifício, o que beneficia o mecanismo de impactação inercial das partículas maiores. Com o aumento da espessura da torta, aumenta a resistência ao escoamento de ar e a velocidade através dos orifícios. Mouret *et al.* (2009) também avaliaram a penetração de nanopartículas através de filtros perfurados com orifícios definidos. Os resultados mostraram que quanto menor o diâmetro da partícula, maior a penetração através dos *pinholes*. Este resultado foi mais pronunciado para filtros com alta resistência ao escoamento de ar, pois uma fração maior do escoamento passaria através do orifício em vez da matriz de fibras. Os autores desenvolveram um modelo para explicar os dados experimentais, e o experimento estava em boa concordância com o modelo. Mukhopadhyay; Mahawar (2020) investigaram experimentalmente o comportamento de emissão ao longo do tempo em meios filtrantes com diferentes diâmetros de orifício e o impacto da posição do orifício - base e topo de um meio filtrante vertical. Os resultados mostraram que o aumento no diâmetro do furo de 1 mm para 2 mm, o que corresponde ao aumento da área da superfície de vazamento por um fator de quatro, faz com que a emissão aumente mais de quatro vezes em ambas as posições do furo. Entretanto, ao alterar o diâmetro do furo de 2 mm para 4 mm, o que representa aumento da área da superfície de vazamento por um fator de quatro, a emissão aumentou menos que um fator de quatro em ambas as posições. Li *et al.* (2022) recentemente modelaram e verificaram experimentalmente a filtração em meios filtrantes com diferentes proporções de vazamento e diâmetros de orifícios. Os resultados mostraram que o vazamento faz com que a eficiência de coleta diminua.

Em relação às investigações próximas à aplicação industrial, por exemplo, em filtros de mangas em planta piloto, Mukhopadhyay; Choudhary (2013) investigaram o impacto do espaçamento das linhas de costura nas emissões. Os autores descobriram que para uma técnica de costura e diâmetro de furo constantes, maiores espaçamentos das linhas de costura e maiores áreas médias sobrepostas levam a menores emissões. Kurtz; Meyer; Kasper (2017) avaliaram a contribuição de pequenos furos intencionalmente colocados em mangas filtrantes, e a contribuição das costuras, sobre as emissões de partículas. Os

resultados mostraram que as emissões aumentaram significativamente mesmo devido a furos muito pequenos, e os vazamentos das costuras abertas foram responsáveis por 75% das emissões do meio filtrante para um pó de teste não coesivo. Bächler *et al.* (2020) investigaram a contribuição da emissão de partículas de mangas filtrantes individuais aplicando sensores distribuídos de baixo custo. Os autores detectaram um aumento no total de emissões contínuas localmente, por meio do sensor de partículas de baixo custo, substituindo uma das nove mangas filtrantes com costura selada por uma manga feita de um meio filtrante sem membranas com costuras não seladas. A manga filtrante com costura causou emissões contínuas de partículas e picos de concentração com maior altura após a limpeza por jato pulsante e pôde ser identificada como um ponto de emissão dentro do filtro. Em uma investigação posterior, Bächler *et al.* (2022) investigaram a emissão local de partículas em mangas filtrantes com costura e a correspondente evolução da emissão de partículas em múltiplos ciclos de filtração para diferentes pressões do tanque de limpeza, aplicando sensores distribuídos de baixo custo. Durante as primeiras etapas da vida útil do meio filtrante, foi possível detectar altas emissões contínuas para cada elemento filtrante instalado. Após os ciclos iniciais de limpeza, as costuras foram presumivelmente seladas pelo pó e, conseqüentemente, ocorreu uma redução do nível de emissão de particulados. Entretanto, as emissões contínuas, indicando a penetração de partículas através das costuras, ainda ocorreram para mangas filtrantes individuais, e eram mais pronunciadas quanto mais alta a pressão do tanque de limpeza. Esse comportamento foi associado à remoção de partículas das regiões de costura que anteriormente estavam seladas, o que permitiu que as partículas penetrassem nos orifícios da costura novamente.

Com relação à investigação em plantas industriais, Tomanovich; Knotts (2013) detectaram visualmente o vazamento de poeira através das costuras das mangas filtrantes usadas nos fornos de cimento. Eles atribuíram os vazamentos aos pulsos de limpeza, à baixa qualidade da linha de costura e outras tensões que ampliaram os furos e proporcionaram um caminho preferencial à passagem de material particulado. Os autores selaram as costuras para atingir níveis mais baixos de emissão de partículas e uma inspeção visual confirmou que, após mais de um ano de operação, a fita selante utilizada não foi danificada e que o compartimento permaneceu limpo.

Após revisão da literatura constatou-se que os trabalhos investigaram apenas meios filtrantes virgens, com furos propositais e/ou com costura, e que não foi relatada a contribuição para as emissões de partículas relacionadas ao diâmetro da agulha utilizado para costurar o tecido. Portanto, o presente trabalho traz como proposta a análise de meios filtrantes com costura que foram envelhecidos durante diferentes tempos em um filtro de mangas industrial e a avaliação do impacto de diferentes diâmetros da agulha no desempenho de filtração.

# 4. MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo foi dividido em duas seções principais, a primeira se refere aos ensaios com as amostras das mangas P84 limpa, com 10 meses e com 3 anos de uso, aplicando o pó da sinterização (processo primário). A segunda é relacionada aos testes com as amostras de PE/PTFE, utilizando o *Pural SB*<sup>®</sup>. Em ambas as seções foram apresentados o material, as metodologias e a descrição dos equipamentos, bem como as caracterizações dos meios filtrantes e materiais particulados.

## 4.1 MEIOS FILTRANTES: AMOSTRAS DE MANGAS P84 VIRGEM, COM 10 MESES E COM 3 ANOS DE USO

Nesta seção serão apresentados o material e os métodos utilizados para a realização de todos os experimentos relacionados às amostras das mangas P84 virgem, com 10 meses e com 3 anos de uso, nas regiões sem e com costura. Os materiais particulados utilizados nestes testes foram o pó da sinterização e o cloreto de sódio, que também foram caracterizados.

### 4.1.1 DESCRIÇÃO GERAL DAS MANGAS FILTRANTES

As amostras foram retiradas de três mangas filtrantes, sendo uma virgem e duas com diferentes tempos de uso no filtro de mangas do despoeiramento primário da planta de sinterização de uma siderúrgica - uma com 10 meses e outra com 3 anos de uso. Todas as mangas possuem costura tripla longitudinal, composição de fibras de poliimida, com acabamento chamuscado nas faces externas. As especificações técnicas da manga virgem, fornecidas pelo fabricante, estão dispostas na Tabela 1.



**Tabela 1 - Especificações técnicas fornecidas pelo fabricante da manga virgem P84.**

Gramatura <sup>i</sup>	710 g·m <sup>-2</sup>
Espessura <sup>ii</sup>	1,0 mm
Densidade	0,44 g·cm <sup>-3</sup>
Volume dos poros	78%
Permeabilidade ao ar a 20 mmH <sub>2</sub> O <sup>iii</sup>	80 L dm <sup>-2</sup> ·min <sup>-1</sup>
Resistência à tração longitudinal <sup>iv</sup>	>90 daN/5cm
transversal <sup>iv</sup>	>70 daN/5cm
Alongamento de ruptura longitudinal	35%
transversal	55%
Absorção de umidade	não absorve
Capacidade de retenção de água	~ 3%
Comportamento eletrostático	sem condutividade
Temperatura normal	240 °C
máxima	260°C
Resistência a ácido	Muito boa
Resistência alcalina	Muito boa
Resistência à hidrólise	Muito boa

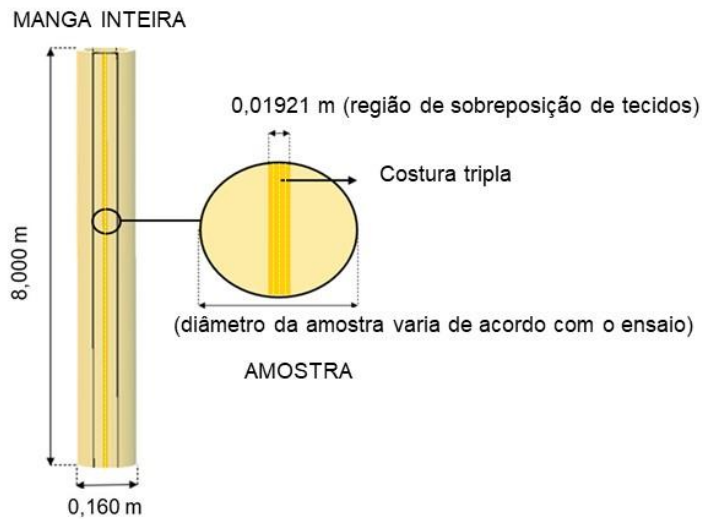
<sup>i</sup>DIN EN 29073 - parte 1; <sup>ii</sup>DIN EN ISO 9073 - parte 2; <sup>iii</sup>DIN EN ISO 9237; NI - não informado; <sup>iv</sup>DIN EN 29073 - parte 3.

#### **4.1.2 DIMENSÕES DAS MANGAS, DAS AMOSTRAS E DA REGIÃO DA COSTURA**

As mangas filtrantes, virgem e usadas, tinham as seguintes dimensões: 0,16 m de diâmetro e 8,00 m de comprimento, fornecendo uma área superficial de 4,0212 m<sup>2</sup> (Figura 11). Em uma manga inteira, a área da costura onde há a sobreposição de tecidos, destacada em amarelo na Figura 11, é igual a 0,1537 m<sup>2</sup>, o que representa aproximadamente 4% da área total.

As amostras retiradas para os ensaios de permeabilidade ao ar, porosidade do meio filtrante e filtração de nanopartículas apresentavam 0,0715 m de diâmetro, o que corresponde a uma área total aproximada de 0,0040 m<sup>2</sup>, sendo a área com costura igual a 0,0014 m<sup>2</sup>, o que representa 34% da área total. As amostras utilizadas nos ensaios de filtração de micropartículas apresentavam diâmetro igual a 0,0473 m, com área total de filtração aproximada de 0,0018 m<sup>2</sup>, e área da costura igual a 0,0009 m<sup>2</sup>, representando 52% da área total. Nos ensaios de filtração no equipamento VDI 3926, o diâmetro das amostras foi de 0,160 m, com área total de filtração de 0,0201 m<sup>2</sup>, e área da costura igual a 0,0031 m<sup>2</sup>, correspondendo a 15% da área total. Esses valores estão resumidos na Tabela 2.

**Figura 11 - Dimensões da manga filtrante inteira e ilustração de uma amostra retirada na região com costura.**



Fonte: Acervo pessoal.

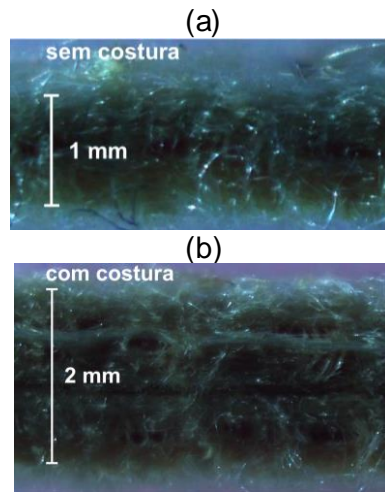
**Tabela 2 - Dimensões da manga, das amostras e da costura.**

	Área total (m <sup>2</sup> )	Área com costura (m <sup>2</sup> )	Área com costura em relação à área total (%)
Manga inteira	4,0212	0,1537	4
Amostras (permeabilidade ao ar, porosidade do meio filtrante e ensaios no SMPS)	0,0040	0,0014	34
Amostras (ensaios no APS)	0,0018	0,0009	52
Amostras (ensaios no VDI 3926)	0,0201	0,0031	15

Fonte: Acervo pessoal.

A espessura do meio filtrante sem costura é de 1 mm, como mostra a imagem da seção transversal (Figura 12 - a) obtida em microscópio óptico do Laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. Para a determinação da espessura do meio filtrante com costura foi feita uma média ponderada pela área de cada região da amostra, sem costura e com costura, uma vez que há sobreposição de tecidos na região central (Figura 12 - b) e obteve-se o valor de 1,34 mm.

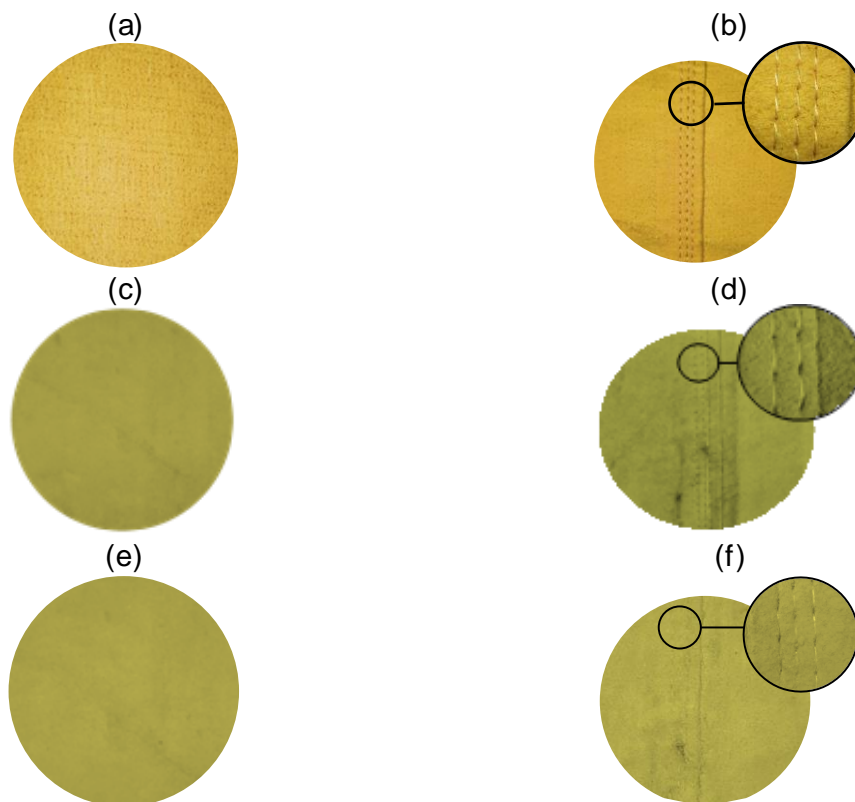
**Figura 12 - Imagens da seção transversal da manga limpa, em microscópio óptico, nas regiões sem costura (a) e com costura (b).**



Fonte: Acervo pessoal.

As amostras extraídas das mangas, nas superfícies lisa e com costura, estão mostradas na Figura 13.

**Figura 13 - Amostras sem costura (a) e com costura (b) retiradas da manga virgem; sem costura (c) e com costura (d) retiradas da manga usada por 10 meses; sem costura (e) e com costura (f) retiradas da manga usada por 3 anos.**



Fonte: Acervo pessoal.

#### 4.1.3 DIÂMETRO MÉDIO DAS FIBRAS E DA LINHA DE COSTURA

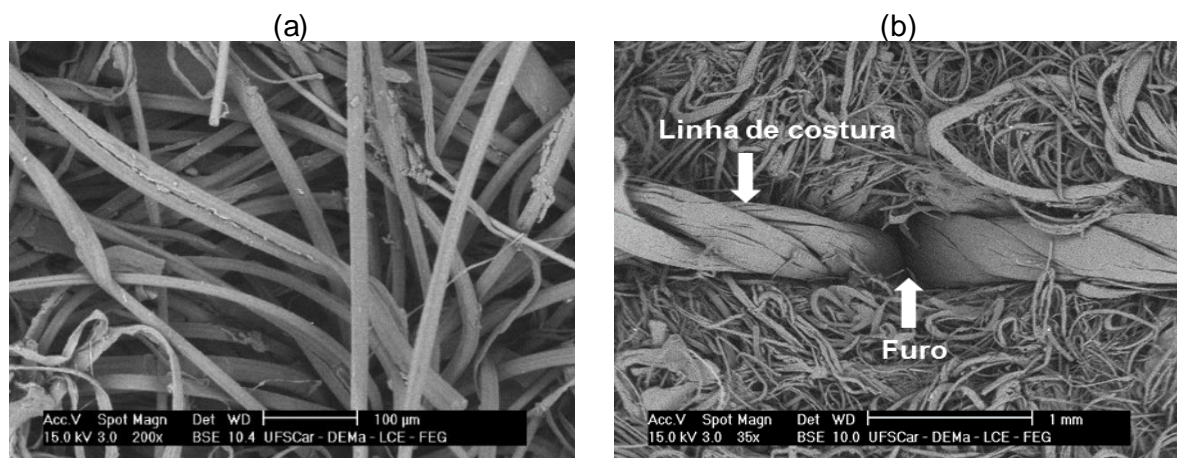
O diâmetro médio das fibras foi determinado segundo a metodologia proposta por Bortolassi; Guerra; Aguiar (2017). Foram obtidas imagens dos meios filtrantes no microscópio eletrônico de varredura, da marca *Philips* e modelo XL-30 FEG (*Field Emission Gun*), do Laboratório de Caracterização Estrutural do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar. Foram enviadas ao laboratório amostras de 1 cm x 1 cm dos meios filtrantes virgens, com e sem costura, para o recobrimento com uma fina camada de ouro e posterior obtenção das imagens. Foram obtidas seis imagens de cada amostra, em posições distintas, com magnificação de 200 vezes e *back-scatter detector* (BSE) (Figura 14 - a). Cada imagem foi sobreposta por uma tela com 12 seções verticais igualmente espaçadas e tratadas no *software ImagePro Plus 7.0*, a partir do qual foram medidos os diâmetros das fibras em cada interseção com as linhas verticais, aproximadamente 50 medições em cada imagem. O *software* disponibilizou os valores medidos e o diâmetro médio das fibras ( $D_f$ ) de cada meio filtrante foi determinado pela Equação 1 (WHEAT, 1963).

$$D_f = \frac{\sum n_i \cdot d_{fi}}{N} \quad (1)$$

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

Para a determinação do diâmetro médio da linha de costura, foram utilizadas seis imagens da amostra com costura (Figura 14 - b), com magnificação de 35 vezes, e o diâmetro da linha de costura foi medido pelo *Image Pro Plus 7.0*. Fez-se a média aritmética dos seis valores medidos.

**Figura 14 - MEV da superfície externa da amostra da manga P84 virgem, da região sem costura (a) e da região com costura (b).**



Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 14 - a, a fusão de algumas fibras e a deformação de outras devem-se ao acabamento chamuscado do meio filtrante, no qual as fibras salientes são queimadas para fornecer um acabamento mais liso. A linha de costura (Figura 14 - b) é mais espessa que as fibras. Os diâmetros médios das fibras e da linha de costura estão mostrados na Tabela 3.

**Tabela 3 – Diâmetros médios das fibras e da linha de costura da manga P84.**

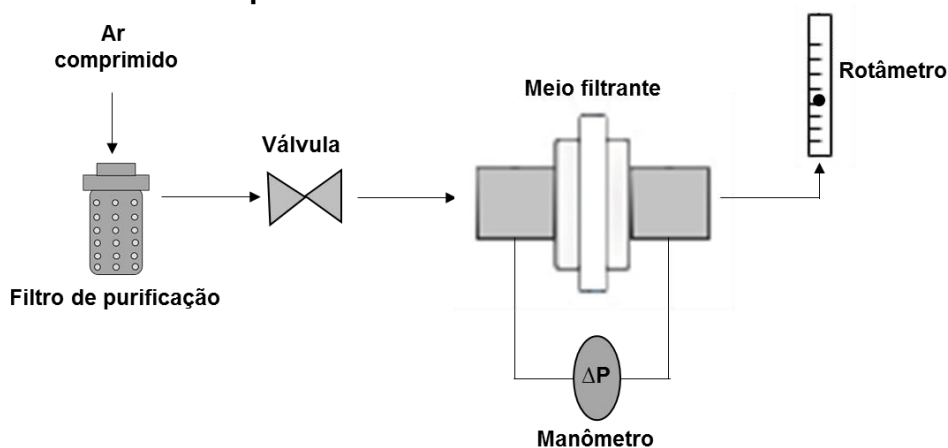
Fibras	$17,7 \pm 9,4 \mu\text{m}$
Linha de costura	$400 \pm 3,0 \mu\text{m}$

Fonte: Acervo pessoal.

#### 4.1.4 PERMEABILIDADE AO AR

Os ensaios para a determinação do coeficiente de permeabilidade Darciana ( $k_1$ ) foram realizados para as amostras sem costura e para as amostras com costura, das mangas virgem e usadas. Utilizou-se uma linha de filtração do Laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química da UFSCar que está ilustrada esquematicamente na Figura 15.

**Figura 15 – Diagrama esquemático da linha de filtração utilizada para determinar a constante de permeabilidade Darciana dos meios filtrantes.**



Fonte: Acervo pessoal.

A linha de filtração apresentada na Figura 15 é composta por ar comprimido, que passa por um sistema de purificação em filtros para remoção de umidade e impurezas, uma válvula para controle da vazão, o suporte para o meio filtrante, o manômetro digital TSI VelociCalc Plus 9555P que mede a queda de pressão no meio filtrante e o rotâmetro *Gilmont* n° 14 CP90533 ao final da linha para medir a vazão volumétrica de ar.

Foram ajustadas seis vazões ( $Q$ ) diferentes (10, 20, 30, 40, 50, 60 L·min<sup>-1</sup>) com o auxílio da válvula e do rotâmetro, e foram obtidos os valores correspondentes de queda de

pressão no manômetro. Essa operação foi realizada em triplicata para todas as amostras com costura e sem costura, virgens e usadas, com área útil de filtração igual a 0,0040 m<sup>2</sup>.

A Equação de *Forchheimer* (2), foi utilizada para o cálculo do coeficiente de permeabilidade Darciana ( $k_1$ ), desconsiderando o termo não-linear, já que o escoamento através dos meios filtrantes pode ser considerado puramente viscoso para a velocidade avaliada (FORCHHEIMER, 1901 *apud* THOMAS *et al.*, 2017).

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{v \cdot \mu}{k_1} + \frac{v^2 \cdot \rho}{k_2} \quad (2)$$

Em que  $\Delta p$  é a queda de pressão em Pascal,  $L$  é a espessura do meio filtrante em metro,  $v$  é a velocidade superficial em m·s<sup>-1</sup>,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do ar em Pa·s,  $\rho$  é a densidade do ar em kg·m<sup>-3</sup>.

Para os gases, a variação da viscosidade dinâmica com a temperatura pode ser aproximada pela Lei de *Sutherland*, Equação (3) (SUTHERLAND, 1893).

$$\mu = \mu_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{T_0 + S}{T + S}\right) \quad (3)$$

Em que  $\mu_0$  é a viscosidade dinâmica referência do ar, a 273,15 K (1,72 × 10<sup>-5</sup> Pa·s);  $T_0$  é a temperatura referência (273,15 K);  $S$  é temperatura de Sutherland para o ar (110,4 K) e  $T$  é a temperatura do ar em Kelvin. A densidade ( $\rho$ ) do ar pode ser calculada pela Lei dos Gases Ideais, Equação (4).

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (4)$$

Em que  $P$  é a pressão do ar em Pascal,  $M$  é a massa molar do ar (0,029 kg·mol<sup>-1</sup>),  $R$  é a constante universal dos gases ideais (8,314 J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>) e  $T$  é a temperatura do ar em Kelvin.

#### **4.1.5 POROSIDADE DO MEIO FILTRANTE**

A porosidade dos meios filtrantes, com e sem costura, virgem e usados, foi determinada pelo método indireto, utilizando a Equação de *Davies* (5) (DAVIES, 1952 *apud* TIAN; MO; LI, 2018).

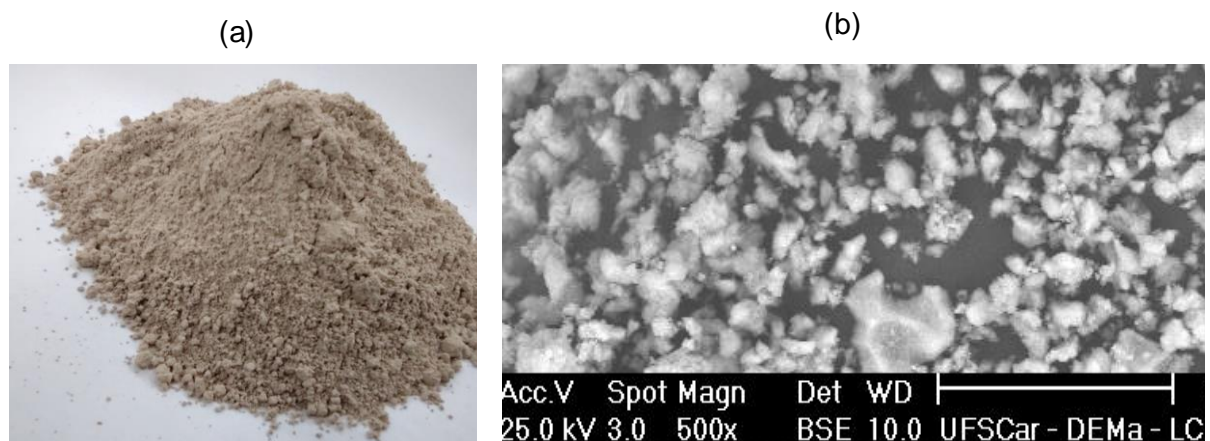
$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{64 \cdot \mu \cdot v \cdot (1 - \varepsilon)^{1,5} \cdot (1 + 56 \cdot (1 - \varepsilon)^3)}{D_f^2} \quad (5)$$

Em que  $\Delta p$  é a queda de pressão no meio filtrante, em Pascal,  $L$  é a espessura do meio filtrante, em metro,  $\varepsilon$  é a porosidade do meio filtrante,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido, em Pa·s,  $v$  é a velocidade superficial, em m·s<sup>-1</sup>,  $D_f$  é o diâmetro médio de fibra do meio filtrante, em metro. Para a resolução da Equação 5, foram utilizados os dados de  $\Delta p$ ,  $L$  e  $v$  obtidos nos ensaios de permeabilidade, bem como as Equações (3) e (4) para corrigir os valores de  $\mu$  e  $\rho$ . Utilizou-se o *Solver* do Excel para obter o valor médio da porosidade dos meios filtrantes ( $\varepsilon$ ) em diferentes velocidades.

#### 4.1.6 DESCRIÇÃO GERAL DO MATERIAL PARTICULADO: PÓ DA SINTERIZAÇÃO (PROCESSO PRIMÁRIO)

No processo primário da sinterização, os gases de combustão saídos da máquina de sínter são filtrados por um precipitador eletrostático e em série por um filtro de mangas, no qual há a injeção contínua de cal hidratada a fim de criar a pré-capa (*precoat*) nas mangas durante a operação, de modo a reduzir a penetração de partículas e auxiliar no destacamento da torta durante a limpeza, o que contribui para o aumento da vida útil do meio filtrante. O pó utilizado nos experimentos foi retirado das tremonhas do filtro de mangas. Portanto, esse pó não é apenas o material proveniente do processo de sinterização, mas também o material dessa injeção. Uma foto ilustrativa deste pó e uma imagem do MEV estão apresentadas na Figura 16.

**Figura 16 - Foto ilustrativa (a) e imagem do MEV (b) do pó da sinterização.**



Fonte: Acervo pessoal.

O pó foi peneirado em peneira granulométrica de abertura 0,500 mm (32 *mesh*) para homogeneização e seco em estufa a 68 °C por 24 horas para remoção de umidade. Ao ser

retirado da estufa, o pó foi imediatamente destinado ao local da análise e/ou experimento para evitar absorção de umidade do ambiente, já que o material é higroscópico. Quando foi necessário resfriar o pó até a temperatura ambiente, utilizou-se dessecador.

#### **4.1.7 DENSIDADE APARENTE**

A densidade aparente do pó de sinterização foi determinada por picnometria a hélio, no equipamento *AccuPyc 1330 Micromeritics*, disponível no Laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. Uma vez que a umidade interfere nas medições, uma amostra do pó foi retirada da estufa e colocada em dessecador para resfriar até a temperatura ambiente. Após resfriar, a massa foi medida e as análises realizadas.

O picnômetro é um equipamento que determina o volume de amostras sólidas, medindo a variação de pressão do gás hélio em volumes calibrados. Após inserir a amostra na câmara e informar ao equipamento a massa, a análise é iniciada. Os dados são coletados, os cálculos são executados e os resultados exibidos e impressos. A precisão dos resultados é assegurada pela medição dos dados em cinco execuções consecutivas e o resultado final de densidade é a média dos valores calculados (*AccuPyc 1330 Quick Reference Guide*, 1990).

A densidade determinada por picnometria a hélio é denominada densidade aparente pois o fluido preenche apenas os poros abertos, não contabilizando os poros não acessíveis (fechados) do material. No entanto, para materiais particulados não há grandes influências no valor, pois esses materiais são geralmente pouco porosos (ALLEN, 1997). A densidade aparente do material particulado é uma propriedade importante para a análise da queda de pressão, já que um material com menor densidade aparente, juntamente com a avaliação de outras propriedades, poderá causar menor queda de pressão, como foi relatado por (SCHILLER; SCHMID, 2014).

A densidade aparente obtida para o pó da sinterização foi de  $2,4485 \pm 0,0043 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

#### **4.1.8 COMPOSIÇÃO QUÍMICA**

A composição química do pó de sinterização foi determinada pela técnica de espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX), utilizando o espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva, da marca *Shimadzu* e modelo EDX-720, do Laboratório de Caracterização Estrutural do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar.

Esse equipamento permite a análise qualitativa e quantitativa de elementos com pesos atômicos entre o sódio e o urânio. As amostras podem ser sólidas, líquidas ou em pó, com tamanhos máximos de 300 mm de diâmetro e 150 mm de altura. Quando uma amostra é irradiada por um feixe de raios X, os átomos geram raios X característicos, conhecidos como raios X “fluorescentes”, que são emitidos da amostra e possuem uma energia específica que



é característica de cada elemento. Conseqüentemente, a análise qualitativa pode ser feita pela investigação das energias dos raios X emitidos pela amostra. A intensidade da energia característica emitida pelos componentes da amostra está relacionada à concentração de cada elemento presente, dessa forma a análise quantitativa é feita pela medição da quantidade de raios X com a energia específica de cada elemento.

A composição química do pó da sinterização está apresentada na Tabela 4. O alto teor de óxido de cálcio é justificado pela injeção contínua de cal hidratada na entrada do filtro de mangas industrial, para criar uma pré-capa nas mangas. No ensaio de perda ao fogo a amostra é submetida a um ciclo térmico de aquecimento pré-determinado, em um forno ou mufla, para eliminar a água estrutural existente e a matéria orgânica que pode ser contaminante.

**Tabela 4 - Composição química do pó da sinterização.**

Componente	Teor mássico (%)
CaO	59,66
SO <sub>3</sub>	8,21
K <sub>2</sub> O	2,87
C	1,90
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,76
SiO <sub>2</sub>	1,15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,07
Na <sub>2</sub> O	0,88
MgO	0,47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02
TiO <sub>2</sub>	0,01
Perda ao fogo	23,66

Fonte: Acervo pessoal.

#### **4.1.9 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA EM VOLUME**

A distribuição granulométrica em volume do pó de sinterização foi determinada no *Malvern Mastersizer MicroPlus*, disponível no Laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. Para estas medições, a umidade não interfere no material, pois as análises são feitas em solução. Portanto, não foi necessário manter a amostra no dessecador.

O *Mastersizer MicroPlus* é um medidor de tamanho de partículas que utiliza o princípio de difração a laser e possui uma escala de medida de 0,05 a 550  $\mu\text{m}$ . O feixe de laser passa por um sistema de espelhos e lentes, atravessa a célula de medida e é desviado pelas partículas da amostra. A luz espalhada por difração atinge o detector em diferentes ângulos, de acordo com o tamanho das partículas: quanto menor o tamanho da partícula, maior será o ângulo de desvio, e quanto maior o tamanho da partícula, menor será o ângulo de desvio. Os valores de intensidade de luz captados pelos detectores são convertidos em tamanho de partículas por sinal elétrico e os resultados são apresentados na tela em forma de uma tabela e um gráfico, cujos formatos podem ser selecionados pelo operador (MEDEIROS, 2008).

Para este trabalho, foi selecionada apenas a tabela *Analysis Table*, apresentada na Figura 17 como exemplo.

**Figura 17 - Analysis Table com os resultados da análise, selecionada no software de controle do equipamento.**

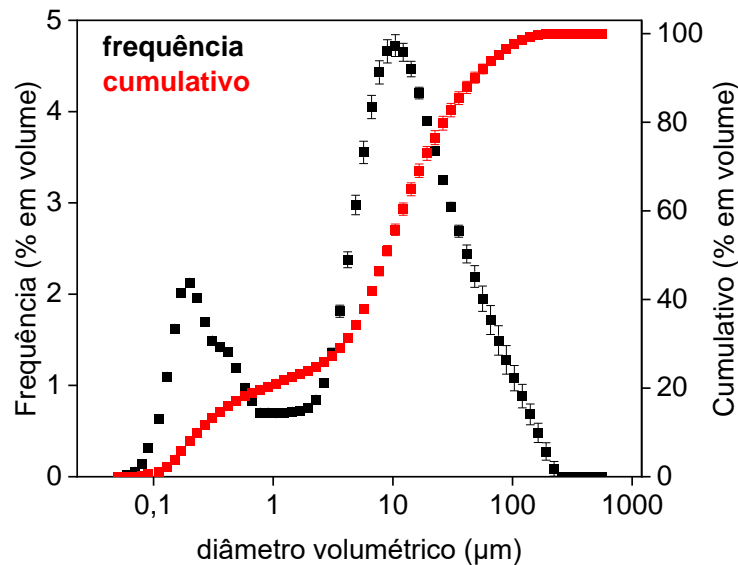
Result: Analysis Table							
ID: Tremonha 201		Run No: 1		Measured: 14/4/19 21:45			
File: OISHI		Rec. No: 1848		Analysed: 14/4/19 21:45			
Path: C:\SIZERMP\DATA\		Source: Analysed					
Sampler: Internal			Measured Beam Obscuration: 11.9 %				
Presentation: 5OHD			Analysis: Polydisperse		Residual: 0.972 %		
Modifications: None							
Conc. = 0.0053 %Vol		Density = 1.000 g/cm <sup>3</sup>		S.S.A. = 7.8719 m <sup>2</sup> /g			
Distribution: Volume		D[4, 3] = 7.31 $\mu\text{m}$		D[3, 2] = 0.76 $\mu\text{m}$			
D(v, 0.1) = 0.22 $\mu\text{m}$		D(v, 0.5) = 4.71 $\mu\text{m}$		D(v, 0.9) = 16.85 $\mu\text{m}$			
Span = 3.529E+00		Uniformity = 1.240E+00					
Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%	Size (um)	Volume Under%
0.05	0.00	0.58	24.51	6.63	62.10	76.32	100.00
0.06	0.01	0.67	25.87	7.72	68.19	88.91	100.00
0.07	0.06	0.78	26.97	9.00	73.98	103.58	100.00
0.08	0.16	0.91	28.02	10.48	79.15	120.67	100.00
0.09	0.41	1.06	29.04	12.21	83.53	140.58	100.00
0.11	0.94	1.24	30.07	14.22	87.04	163.77	100.00
0.13	1.94	1.44	31.16	16.57	89.75	190.80	100.00
0.15	3.55	1.68	32.33	19.31	91.81	222.28	100.00
0.17	5.74	1.95	33.63	22.49	93.42	258.95	100.00
0.20	8.33	2.28	35.15	26.20	94.79	301.68	100.00
0.23	11.02	2.65	37.03	30.53	96.02	351.46	100.00
0.27	13.62	3.09	39.46	35.56	97.16	409.45	100.00
0.31	16.11	3.60	42.58	41.43	98.15	477.01	100.00
0.36	18.53	4.19	46.48	48.27	98.94	555.71	100.00
0.42	20.84	4.88	51.13	56.23	99.51		
0.49	22.86	5.69	56.39	65.51	99.86		

Fonte: Acervo pessoal.

Na tabela apresentada na Figura 17, são fornecidos valores característicos da curva de distribuição granulométrica cumulativa, como  $D(v,0,1)$ ,  $D(v,0,5)$  e  $D(v,0,9)$ , e valores de natureza estatística, para efeitos de comparação entre amostras, como o  $D[3,2]$  e o  $D[4,3]$ . São fornecidos, em triplicata, todos os valores de diâmetros (*size*) e as respectivas porcentagens em volume (*volume under %*), que representam o percentual acumulado de partículas que são menores que o diâmetro correspondente na tabela, necessários para plotar a curva cumulativa, com valores *size* na abscissa e valores *volume under* na ordenada.

O diâmetro volumétrico refere-se ao valor do diâmetro de uma esfera que possui o mesmo volume e densidade que a partícula (ALLEN, 1997). A Figura 18 mostra a curva de frequência (% volume) e a curva de concentração cumulativa (% volume) do pó da sinterização em função do diâmetro volumétrico.

**Figura 18 - Distribuição granulométrica em volume do pó da sinterização.**



Fonte: Acervo pessoal.

A curva em formato de “S” na Figura 18 representa a curva cumulativa, com escala de 0 a 100%, e corresponde ao resultado acumulado abaixo de um determinado diâmetro de partícula. Para exemplificar, obtém-se o valor de diâmetro característico  $D(v, 0,9)$  na abscissa diretamente da curva cumulativa para o valor de 90% na ordenada, significando que 90% das partículas da amostra são menores que esse valor encontrado. A curva com um ou mais picos é denominada curva de frequência, com escala de 0 a 20%, obtida por derivação da curva cumulativa. Quando há apenas um pico, denomina-se unimodal, dois picos, bimodal, três picos, trimodal, acima de 3 picos, polimodal, sendo que cada pico corresponde a uma população de tamanhos de partículas diferentes. Quanto mais à esquerda do gráfico, menores são os tamanhos de partículas da população, e quanto mais à direita, maiores são os tamanhos de partículas da população, de acordo com a faixa de diâmetro em que o pico se encontra (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007).

A Tabela 5 apresenta as médias das triplicatas dos diâmetros volumétricos característicos do pó da sinterização.

**Tabela 5 - Médias dos diâmetros volumétricos característicos do pó da sinterização.**

Diâmetros característicos	Pó da sinterização ( $\mu\text{m}$ )
D(v, 0,1)	0,26 $\pm$ 0,01
D(v, 0,5)	8,71 $\pm$ 0,27
D(v, 0,9)	53,41 $\pm$ 4,61

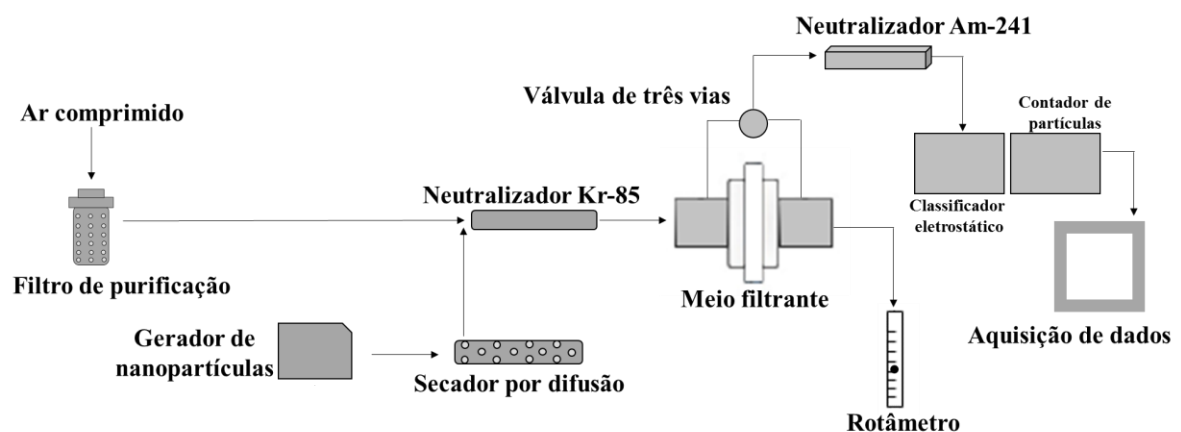
#### 4.1.10 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS

Nesta seção estão descritos todos os equipamentos e os procedimentos experimentais utilizados para os testes relacionados às mangas filtrantes P84 virgem, com 10 meses e com 3 anos de uso.

##### 4.1.10.1 EFICIÊNCIA DE COLETA DE NANOPARTÍCULAS

A eficiência de coleta de nanopartículas foi determinada para os meios filtrantes virgens e com 10 meses de uso, com e sem costura. Os ensaios foram realizados na mesma linha de filtração utilizada para determinar a permeabilidade, porém com a inserção de outros componentes. A Figura 19 mostra um desenho esquemático dessa linha.

**Figura 19 - Diagrama esquemático da linha de filtração para determinação da eficiência de coleta de nanopartículas.**



Fonte: Acervo pessoal.

Uma descrição simplificada foi realizada para cada componente da linha apresentada na Figura 19, para melhor compreensão do funcionamento e dos procedimentos adotados nas análises.

##### Gerador de nanopartículas (atomizador)

O gerador de partículas da marca TSI, modelo 3079A, foi responsável por gerar o aerossol a partir da injeção de ar comprimido a uma solução salina no frasco de vidro, com concentração definida. O tamanho de partícula resultante depende do tamanho da gota

gerada pelo atomizador e pode ser variado alterando-se a concentração da solução salina. A vazão de aerossol poderá ser ajustada por um rotâmetro com válvula do tipo agulha que fica localizado na parte de trás do gerador de partículas. Vazões volumétricas mais baixas levarão a uma taxa de produção de partículas reduzida (TSI, 2014). Neste trabalho foi utilizada a vazão de  $2,4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  e a concentração da solução salina foi de  $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ .

#### Ar comprimido, filtros de purificação e válvula agulha

O ar comprimido que entra no sistema foi provido por um compressor da marca *Schulz*, modelo MSV 12/175, e passou por filtros de purificação, da marca TSI, modelo 3074B, para remover umidade e outras impurezas antes de adentrar os outros componentes da linha. Já o ar que entra no gerador de partículas foi provido por um compressor interno do próprio gerador. A válvula agulha foi utilizada para ajustar a vazão de ar que vem do compressor. A vazão do gerador de aerossol foi fixa em  $2,4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ .

#### Rotâmetro e termo-higrômetro

Os meios filtrantes tinham área útil de filtração igual a  $4,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ . Para que a velocidade superficial fosse igual a  $2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  (norma VDI 3926 (2003)), a vazão total do sistema foi de  $8,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ , calculada pela Equação 1. O controle da vazão foi realizado por uma válvula agulha localizada posteriormente ao sistema de filtração do ar. Dessa forma, a vazão total de gás no duto foi composta pela soma da vazão de ar advinda do compressor e da vazão de ar comprimido contendo nanopartículas do gerador de aerossol. Portanto, para o ajuste da vazão total de gás no sistema, foi mantida a vazão do gerador de nanopartículas e apenas a vazão de ar do compressor foi alterada.

O termo-higrômetro foi utilizado na saída do rotâmetro para medir a temperatura e a umidade do fluido.

#### Sondas de amostragem e válvula de três vias

Há duas sondas para as amostragens, uma antes e uma após o meio filtrante, instaladas no centro do duto e paralelas ao escoamento do aerossol. O local da amostragem, antes ou após o meio filtrante, foi determinado pela válvula de três vias. Uma vez que os efeitos inerciais e de impactação são desprezíveis para o particulado na faixa de tamanho avaliado, não foi necessária a condição de amostragem isocinética (FEITOSA, 2009).

A válvula de três vias foi empregada para garantir um acionamento alternado e imediato das amostragens antes e após os meios filtrantes. Desta forma, a seleção da amostragem requerida foi realizada pelo acionamento manual da alavanca da válvula na posição correspondente à amostragem solicitada.

#### Secador por difusão

O secador por difusão modelo 3062 da TSI foi projetado como um secador que possui uma perda mínima de aerossol. A entrada do secador possui um coletor de água que captura

gotículas maiores de água. Dois cilindros concêntricos formados por um cilindro interno de tela de arame e um cilindro externo de acrílico contêm um volume anular preenchido com sílica gel. À medida que o aerossol úmido flui através do cilindro interno, o vapor de água se difunde através da tela de arame e na sílica gel. A perda de partículas é minimizada porque não entram em contato com a sílica gel. A sílica gel pode ser facilmente regenerada em estufa a 120° C (TSI, 2003).

#### Neutralizadores de aerossol Kr-85 e Am-241

O neutralizador Kr-85 modelo 3054 da TSI é um neutralizador radioativo de uso geral que emite partículas beta, possui meia-vida de 10,7 anos, radioatividade de 370 MBq e é adequado para uso com vazões de até 150 L/min. Se as partículas são altamente carregadas e/ou altamente concentradas, esse modelo é bastante adequado. O neutralizador Am-241 emite partículas alfa e possui meia-vida de 432,2 anos. A neutralização de partículas de aerossol é fundamental para a coleta de dados confiáveis sobre o tamanho das partículas ao usar o instrumento de dimensionamento baseado na mobilidade elétrica.

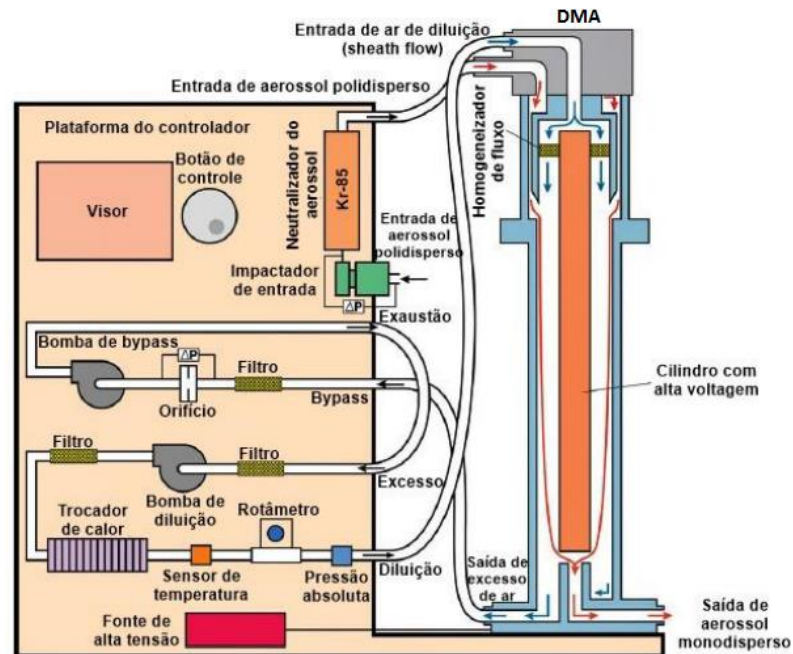
#### Classificador eletrostático

O classificador eletrostático, modelo 3080 da TSI, consiste em vários subsistemas, incluindo o analisador de mobilidade diferencial longo (*Long DMA*), modelo 3081 da TSI, que são capazes de processar o aerossol polidisperso e fornecer na saída um aerossol monodisperso. Os principais subsistemas incluem: impactador, controlador do ar de diluição (*sheat-air flow controller*), neutralizador, controlador de alta voltagem e o DMA. Todo o controle pode ser feito utilizando a interface do painel frontal ou o computador (TSI, 2008). A Figura 20 mostra o diagrama esquemático do classificador.

O aerossol inicialmente passa por um impactador, que coleta as partículas maiores por impactação inercial, já as partículas menores seguem as linhas de fluxo. Em seguida, passam por um neutralizador de Kr-85, atingem o equilíbrio de cargas e seguem para o DMA. O escoamento polidisperso, proveniente do impactador, entra no DMA por um tubo no topo e escoam na direção axial entre dois cilindros concêntricos para distribuir uniformemente o escoamento. No topo do DMA, tem também a entrada do ar de diluição (*sheath flow*) que segue por uma câmara anular e passa por um homogeneizador de fluxo. O cilindro interno é mantido a uma voltagem negativa controlada, enquanto o cilindro externo é eletricamente aterrado, o que cria um campo elétrico entre os dois cilindros. O campo elétrico faz com que as partículas positivamente carregadas sejam atraídas através do ar de diluição para o cilindro interno. As partículas são depositadas ao longo de todo o comprimento do cilindro interno, sendo que as partículas com mobilidade elétrica precipitam na parte superior do cilindro interno, enquanto as partículas de menor mobilidade precipitam na parte inferior do cilindro interno. As partículas negativamente carregadas depositam-se no eletrodo externo, enquanto

as partículas neutras são removidas na corrente de ar em excesso. Apenas partículas em uma faixa estreita de mobilidade elétrica saem na corrente de aerossol monodisperso para a determinação da concentração no contador de partículas (TSI, 2008).

**Figura 20 - Desenho esquemático do classificador com analisador de mobilidade diferencial longo.**



Fonte: Adaptado de TSI (2008).

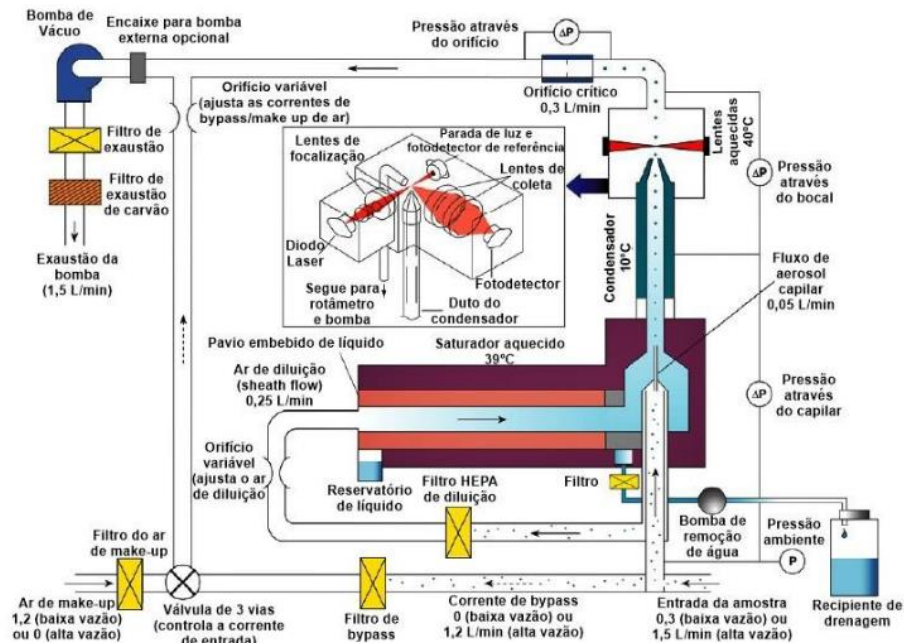
No *software* do classificador eletrostático foi necessário ajustar o tempo de amostragem (*scan up*), o tempo de descarregamento do sistema para nova aferição (*retrace*) e o tempo entre as medições (*break*). O *sheath flow rate* também é um parâmetro que necessita ser ajustado, pois controla a faixa de tamanho de partícula a ser medida pelo equipamento. Nos experimentos foi utilizada a vazão de amostragem (*sample flow*) de  $1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  e a vazão do ar de diluição (*sheath flow rate*) igual a  $10,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , mantendo-se a relação 1:10 entre a vazão de amostragem e a vazão do ar de diluição recomendada pelo fabricante. Com esta relação, os diâmetros medidos foram na faixa entre 7,23 e 305,1 nm.

#### Contador de partículas

Após a saída do classificador eletrostático, as partículas seguem para o contador de partículas ultrafinas por condensação (*Ultrafine Condensation Particle Counter*), modelo 3776 da TSI, conforme apresentado esquematicamente na Figura 21.

A amostra de aerossol é continuamente bombeada para o interior do contador de partículas por uma bomba de vácuo interna, que pode ser configurada para operar a alta vazão,  $1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , para melhorar o tempo de resposta e minimizar a perda no transporte de partículas; ou a baixa vazão,  $0,3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , para fornecer flexibilidade quando usado como parte de um sistema de *Scanning Mobility Particle Sizer Spectrometer* TSI (2006).

Figura 21 - Desenho esquemático do interior do contador de partículas.



Fonte: Adaptado de TSI (2006).

Para o modo de operação a alta vazão, a corrente gasosa se divide em uma de  $1,2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  e outra de  $0,3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ . A corrente de  $1,2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  é desviada na chamada corrente de *bypass* e enviada para fora do equipamento. A corrente de  $0,3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  se divide novamente, sendo uma de  $0,25 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  que é filtrada por um filtro HEPA e torna-se ar de diluição (*sheath flow*) e outra de  $0,05 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  que segue pelo tubo capilar. O ar de diluição passa por um saturador aquecido a  $39^\circ\text{C}$ , no qual o butanol é vaporizado e difunde-se na corrente de ar de diluição. Em seguida, o ar de diluição mistura-se novamente com a corrente de aerossol de  $0,05 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  e a mistura resultante passa por um condensador resfriado a  $10^\circ\text{C}$ , no qual ocorre a supersaturação do butanol. As partículas presentes no gás atuam como núcleos de condensação e partículas maiores que um tamanho limite rapidamente aumentam de tamanho e passam por um detector óptico para a contagem. O líquido que condensa nas paredes do tubo do condensador cai e é removido pelo sistema de remoção de água. Caso contrário, o líquido retornará ao saturador e será absorvido pelo pavio para reutilização. O detector óptico do sensor é composto por diodo laser, lente colimadora, lente cilíndrica, lentes de coleta e detector de fotodiodo. O laser e a lente colimadora formam uma fita horizontal de luz acima do bocal de saída do aerossol. As lentes de coleta e o detector incorporam um par de lentes esféricas que coletam a luz dispersa pelas partículas em um ângulo de  $90^\circ$  (dispersão lateral) e concentram a luz em um fotodiodo de baixo ruído. Os pulsos de luz são convertidos em pulsos elétricos que são contados como uma medida da concentração de partículas. Um fotodiodo de referência é usado para manter a potência constante do laser. A temperatura da superfície da caixa óptica é mantida em um nível superior ao do saturador



para evitar condensação nas superfícies da lente. Os dados são transmitidos a um microcomputador conectado ao equipamento através de *software* próprio do equipamento (TSI, 2006a).

Para a operação a baixa vazão, a válvula de três vias é aberta para o caminho do ar de reposição e o *bypass* é fechado. O ar de reposição de  $1,2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  entra na parte traseira do instrumento e mistura-se com a corrente de aerossol de  $0,3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  antes de entrar na bomba de vácuo para formar o fluxo total de  $1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ . Somente a vazão de entrada no equipamento,  $0,3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , é levada em direção ao sensor, até ser dividida nas correntes de  $0,025 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  e  $0,05 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  e passa pelo mesmo processo descrito para a alta vazão TSI (2006).

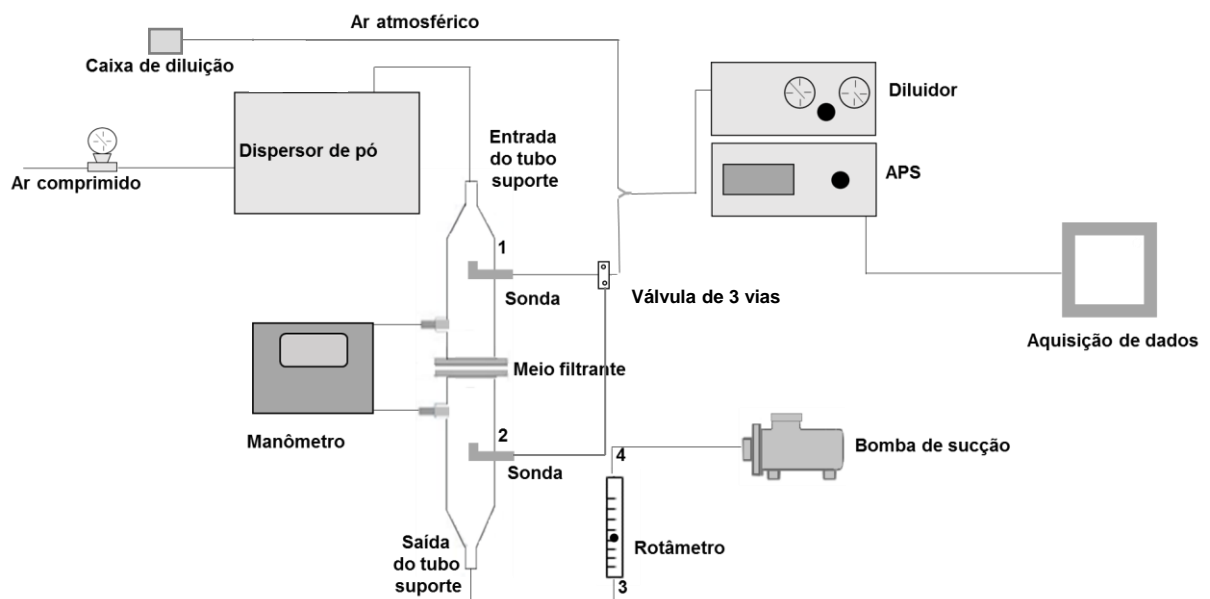
A eficiência de coleta fracionária experimental ( $E$ ) foi calculada a partir da Equação (6), na qual  $C_e$  é a concentração de entrada e  $C_s$  é a concentração de saída do meio filtrante, cada qual coletada em triplicata.

$$E(\%) = \frac{C_e - C_s}{C_e} \cdot 100 \quad (6)$$

#### 4.1.10.2 EFICIÊNCIA DE COLETA DE MICROPARTÍCULAS

A eficiência de coleta de micropartículas foi determinada para os meios filtrantes virgens e com 10 meses de uso, com e sem costura, utilizando o pó da sinterização. A Figura 22 mostra um desenho esquemático da linha de filtração utilizada.

**Figura 22. Diagrama esquemático da linha de filtração utilizada para determinar a eficiência de coleta de micropartículas.**



Fonte: Acervo pessoal.

Foi feita uma descrição simplificada de cada componente da linha apresentada na Figura 22, para melhor compreensão do funcionamento e dos procedimentos adotados nas análises.

#### Ar comprimido e bomba de sucção

O ar comprimido passa por uma coluna de sílica gel para remoção de umidade e por um filtro para retirar impurezas, depois segue para o dispersor de pó. O ar comprimido arrasta o pó do disco rotatório do dispersor e forma o aerossol, que é direcionado ao meio filtrante com o auxílio da bomba de sucção e levado ao interior do APS com auxílio da bomba interna do APS.

#### Rotâmetro

O rotâmetro *Gilmont* n° 14 CP90533, utilizado para ajustar a vazão do sistema, foi instalado de modo que a saída do tubo suporte estivesse conectada à entrada do rotâmetro (3) e a saída do rotâmetro (4) conectada à bomba de sucção. A vazão do sistema (Q) foi calculada pela Equação 7, considerando-se a velocidade (v) de filtração em todos os ensaios igual a  $2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  (estabelecida na norma VDI 3926 (2003)) e a área útil do meio filtrante igual a  $1,8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ .

$$Q = v \cdot A \quad (7)$$

Portanto, a vazão do sistema foi de  $3,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  para todos os ensaios de determinação da distribuição granulométrica aerodinâmica do pó de sinterização.

#### Dispersor de pó

A umidade relativa do ambiente era menor que 40%, para evitar que o pó se aglomerasse no disco rotatório do dispersor de pó e causasse problemas na sucção.

O dispersor de pó de pequena escala modelo 3433 da TSI possui um disco rotatório no qual o pó foi adicionado e espalhado homogeneamente, para garantir uma sucção mais uniforme pelo tubo capilar, que é estreito e pelo qual é feita a sucção de pequenas quantidades do pó. A taxa e o sentido de rotação do disco, a vazão de ar limpo que promove a desincrustação do pó das paredes do tubo capilar e sopra o pó no disco para evitar que ocorra aglomeração, e a pressão de sucção foram ajustados de acordo com as necessidades do experimento. Para as análises deste estudo, foram setados os seguintes valores: a taxa de rotação foi o valor máximo do equipamento, que é 14, a rotação do disco foi no sentido horário, a vazão de ar limpo para desaglomerar o pó foi de  $3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  e a pressão de sucção foi de 155 polegadas de água.

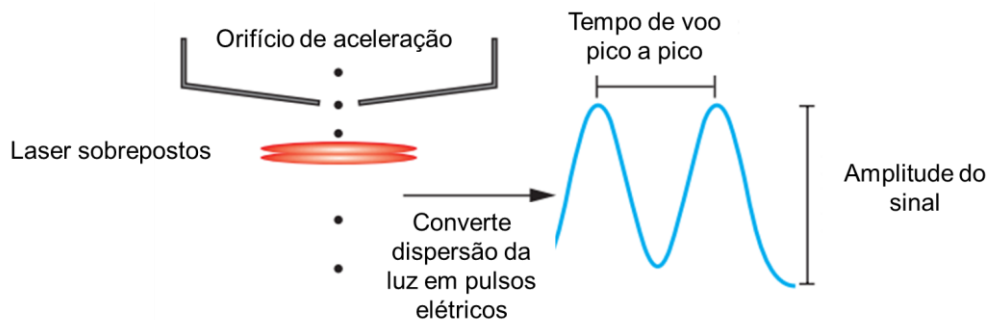
#### Diluidor e Aerodynamic Particle Sizer (APS)

O diluidor modelo 3302A da TSI encontra-se acoplado ao APS devido ao limite de tolerância de concentração de partículas no espectrômetro. Ao coletar as amostras,

principalmente antes do meio filtrante, a concentração máxima permitida geralmente é excedida, portanto, é necessário diluir a corrente de aerossol antes da entrada no APS.

O APS modelo 3320 da TSI é um espectrômetro de partículas que mede o diâmetro aerodinâmico e a intensidade de dispersão da luz. Ele fornece medições de tamanho aerodinâmico em tempo real, com alta resolução, na faixa de 0,5 a 20  $\mu\text{m}$ . Também mede a intensidade de dispersão da luz na faixa de tamanho óptico equivalente de 0,37 a 20  $\mu\text{m}$ . Um sistema óptico de dupla crista, capaz de detectar a ocorrência de coincidência de partículas e minimizar os efeitos de sinais ruins próximos ao limiar de detecção mais baixo. Esse modelo de APS acelera o fluxo de amostras de aerossóis através de um orifício de aceleração (Figura 23). O tamanho aerodinâmico de uma partícula determina sua taxa de aceleração, com partículas maiores acelerando mais lentamente como resultado do aumento da inércia. À medida que as partículas saem do orifício, elas atravessam dois raios laser parcialmente sobrepostos na área de detecção. Um espelho elíptico, colocado a 90° em relação ao eixo do feixe de laser, coleta a luz e a focaliza em um fotodetector de avalanche. O fotodetector de avalanche converte os pulsos de luz em pulsos elétricos. Dois feixes de laser parcialmente sobrepostos permitem que cada partícula gere um único sinal de dupla crista. O tempo de voo pico a pico é medido com resolução de 4 nanossegundos para dimensionamento aerodinâmico. A amplitude do sinal é registrada para a intensidade de dispersão da luz. Pequenas partículas que podem ter apenas uma crista detectável são armazenadas separadamente. Partículas com mais de duas cristas, indicativas de coincidência, também são armazenadas separadamente, mas não são usadas para criar distribuições de tamanho aerodinâmico ou de dispersão de luz (TSI, 2006).

**Figura 23 - Desenho esquemático do sistema óptico do APS.**



Fonte: Adaptado de (TSI, 2006).

### Sondas de amostragem

As sondas de amostragem 1 e 2 foram utilizadas para as coletas isocinéticas do material particulado.

Antes de iniciar as análises, a posição das sondas foi ajustada, garantindo que ambas estivessem centralizadas no interior do tubo suporte e voltadas para cima, como mostra a Figura 22. Uma vez que as sondas de amostragem possuem área inferior à do meio filtrante, foi necessário ajustar a vazão na saída da sonda para que a amostragem fosse isocinética, ou seja, a velocidade na amostragem fosse igual à velocidade superficial ( $2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ). O diâmetro externo ( $D_{ext}$ ) da sonda é de  $4,8 \times 10^{-3} \text{ m}$  e a espessura ( $d$ )  $9,4 \times 10^{-4} \text{ m}$ , portanto, para obter o diâmetro interno ( $D_{int}$ ), utilizou-se a Equação 8.

$$D_{int} = D_{ext} - 2 \cdot d \quad (8)$$

Obteve-se o  $D_{int}$  de  $2,9 \times 10^{-3} \text{ m}$ . Portanto, a área de filtração foi calculada e o valor obtido foi de  $6,7 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ . Para manter a velocidade de  $2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , a vazão foi calculada pela Equação (7) e obteve-se  $1,3 \times 10^{-5} \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ . Portanto, a vazão na saída das sondas foi ajustada com o auxílio da caixa de diluição, pois o APS possui uma bomba interna de sucção com vazão fixa de  $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ , superior à vazão necessária.

#### Válvula de três vias

A válvula de 3 vias foi utilizada para que a amostragem fosse realizada ora antes ora depois da passagem do aerossol pelo meio filtrante.

#### Caixa de diluição

Uma vez que o APS possui uma bomba de sucção interna com vazão fixa superior à vazão necessária para garantir a amostragem isocinética nas sondas, utilizou-se uma caixa de diluição, de modo a dividir a vazão de sucção interna do APS.

#### Pontos de tomada de pressão

O manômetro conectado aos pontos de tomada de pressão permitiu medir a queda de pressão inicial do meio filtrante e acompanhar a queda de pressão ao longo da filtração.

#### Sistema de aquisição de dados

O *software Aerosol Instrument Manager*® que acompanha o APS foi utilizado para coletar os dados e armazená-los em arquivos na forma de gráficos e tabelas, e para fornecer informações estatísticas.

Cinco parâmetros foram ajustados no *software* antes de iniciar as amostragens: o fator de diluição, que foi de 100:1; a densidade da partícula; a correção de Stokes, já que a densidade do material particulado foi maior que a unidade; o tempo de amostragem para cada amostra, que foi de um minuto; e o número de amostragens por cada amostra, que foram três na entrada.

Os ensaios consistiram em medir a concentração das partículas presentes no aerossol antes e após a passagem pelo meio filtrante, em três momentos distintos, denominados ( $\Delta p$ ), ( $\Delta p_0 + 100$ ) Pa e ( $\Delta p_0 + 300$ ) Pa para o meio filtrante virgem sem costura e ( $\Delta p'_0$ ), ( $\Delta p'_0 + 100$ )

Pa e  $(\Delta p'_0 + 300)$  Pa para o meio filtrante virgem com costura. O primeiro momento,  $(\Delta p_0)$  e  $(\Delta p'_0)$ , refere-se à queda de pressão dos meios filtrantes virgens. Os momentos subsequentes,  $(\Delta p_0 + 100)$  Pa,  $(\Delta p_0 + 300)$  Pa e  $(\Delta p'_0 + 100)$  Pa,  $(\Delta p'_0 + 300)$  Pa, referem-se aos instantes em que a queda de pressão atingia os valores mencionados, devido ao aumento de resistência ao escoamento causada pela deposição de material particulado no interior e na superfície do filtro. O aumento da queda de pressão foi acompanhado por meio de manômetro *Furness FCO12*.

A partir das amostragens feitas antes de passar pelo meio filtrante e após passar pelo meio filtrante, em triplicata, determinou-se a eficiência de coleta de partículas ( $E$ ) dentro de uma faixa de diâmetro aerodinâmico, utilizando-se a Equação (6). Para o cálculo da eficiência fracionária de coleta, podem ser utilizados os dados referentes à concentração em massa ( $dM/d\log D_p$ ) e/ou em número ( $dN/d\log D_p$ ). O gráfico plotado teve como abscissa o diâmetro aerodinâmico ( $\mu\text{m}$ ) e como ordenada a eficiência de coleta.

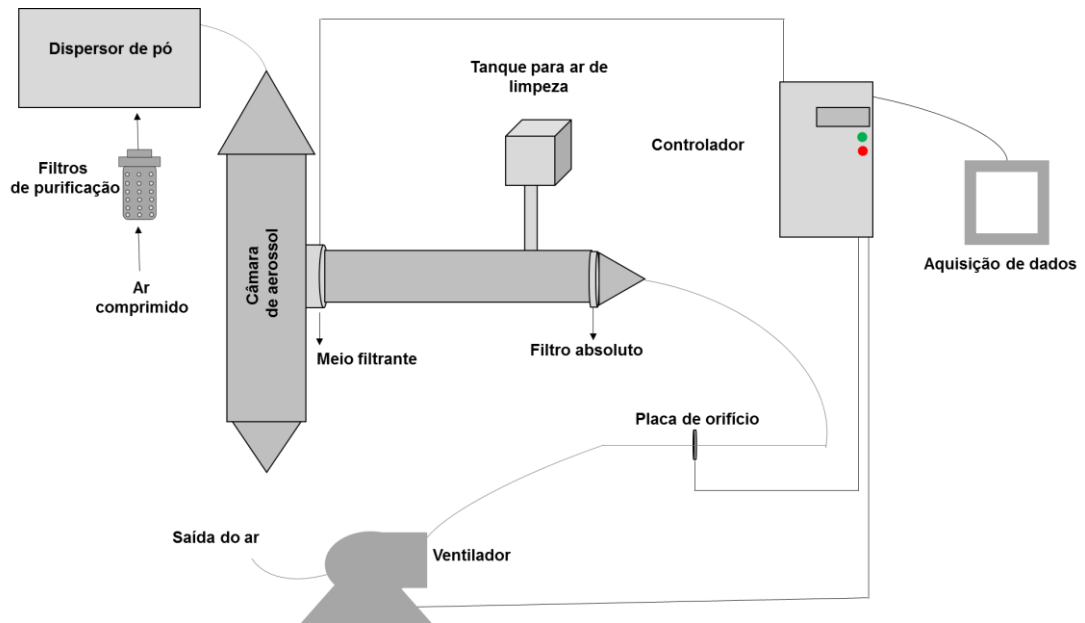
#### **4.1.10.3 CICLOS DE FILTRAÇÃO COM LIMPEZA POR JATO DE AR PULSANTE**

Os ciclos de filtração foram realizados no equipamento de teste do Laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química da UFSCar, apresentado esquematicamente na Figura 24. Este sistema foi construído de acordo com parâmetros da norma alemã VDI 3926 (2003) e as condições operacionais utilizadas nos experimentos também seguiram a referida norma.

O sistema apresentado na Figura 24 é composto por ar comprimido, filtros coalescentes, dispersor de pó, câmara de aerossol, meio filtrante e filtro absoluto, placa de orifício, ventilador, sistema de limpeza por jato de ar pulsante, controlador e sistema de aquisição dos dados.

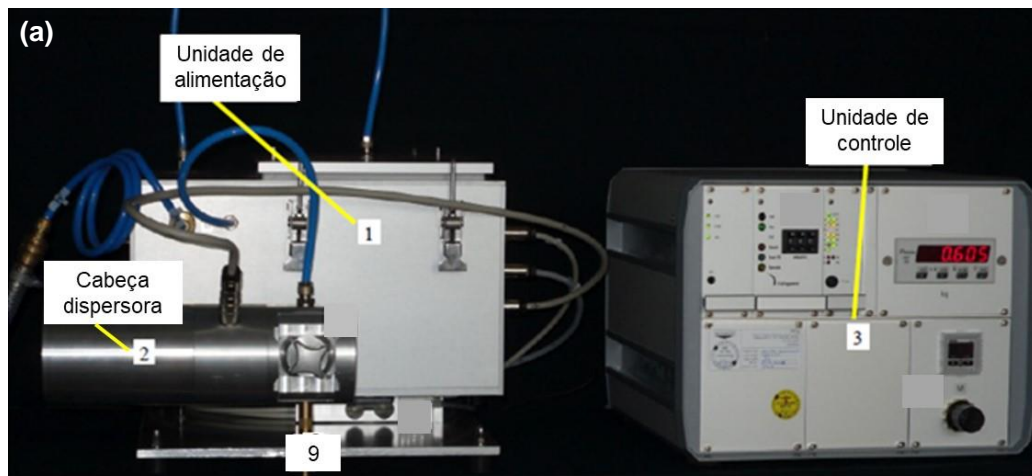
O ar passa por filtros coalescentes da empresa Apexfil e por caixas de sílica antes de entrar no dispersor de pó, com o intuito de remover umidade e óleos. O dispersor de pó é composto por um *Dust Feeder NDF 100*, da empresa alemã Filteq GmbH, tendo como partes fundamentais uma unidade de alimentação do pó por sistema de parafuso (1), uma cabeça dispersora (2) e uma unidade de controle (3), como mostra a Figura 25 - a.

Figura 24 - Diagrama esquemático do sistema construído de acordo com parâmetros da norma VDI 3926 (2003).

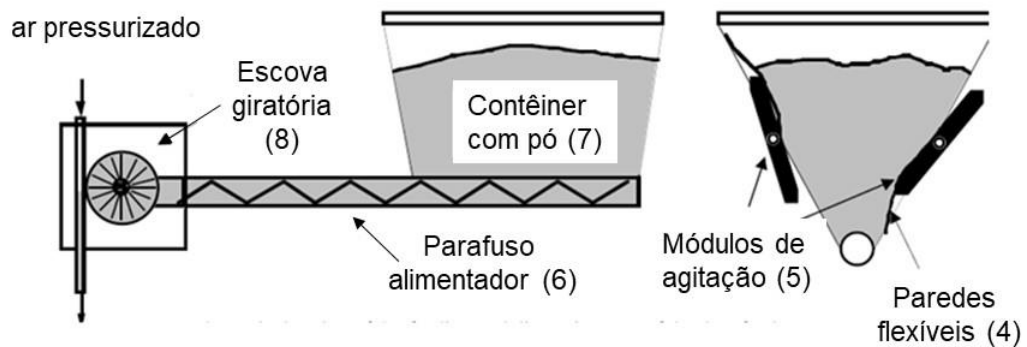


Fonte: Acervo pessoal.

Figura 25 - Componentes fundamentais do *Dust Feeder NDF 100* (alimentador de pó) (a) e detalhamento da unidade de alimentação (b).



(b)



Fonte: Adaptado do manual da Filteq GmbH (2018).

A unidade de alimentação funciona de acordo com os princípios de um alimentador de parafuso (6) e transporta o pó (7) para a escova giratória da cabeça dispersora (8). O movimento das paredes flexíveis do contêiner (4) evita que o pó fino no contêiner se aglomere e é responsável também pelo enchimento constante do parafuso, como mostra a Figura 25 - b. Na cabeça dispersora (2), o pó é retirado do canal do parafuso pela rotação rápida da escova e é disperso por um jato de ar de alta velocidade e ejetado através do bico (9) na câmara de aerossol. Há um ventilador ao final do sistema, que é responsável por succionar o ar. Parte do pó fica retido nas paredes do equipamento devido à higroscopia, outra porção deposita-se na parte inferior da câmara e parte é coletada no meio filtrante instalado na lateral da câmara. O particulado que chega ao meio filtrante e não fica retido, é coletado no filtro absoluto que fica após o meio filtrante.

As calibrações foram feitas antes de cada experimento variando a velocidade do parafuso alimentador para avaliar a concentração de pó que chega ao meio filtrante. Para controle da velocidade superficial de filtração, há uma placa de orifício que controla a vazão de ar. A queda de pressão nessa placa deve ser mantida constante pelo controlador para assegurar que a vazão seja também constante. A queda de pressão no meio filtrante também foi monitorada ao longo do tempo, e após atingir a queda de pressão máxima estabelecida (1000 Pa) fez-se a limpeza do meio filtrante por jato de ar pulsante, com duração de 60 ms e pressão do tanque de limpeza de 5 bar, encerrando-se um ciclo de filtração.

Nesta etapa foram realizados 30 ciclos de filtração para cada amostra, com e sem costura, virgem, com 10 meses e com 3 anos de uso. Antes de iniciar os ensaios, algumas etapas prévias foram necessárias para ajustar as condições operacionais conforme a norma VDI 3926 (2003).

#### Calibração da placa de orifício

Para calibrar a placa de orifício, é fundamental que não haja vazamentos no sistema. Para tanto, foi necessário instalar o meio filtrante e o filtro absoluto no equipamento, além de conferir todos os outros pontos do sistema que pudessem apresentar vazamentos. Ligou-se o controlador, no qual há um botão para ativar a sucção do ventilador. Utilizou-se um rotâmetro *Gilmont* n° 14 CP90533 de capacidade máxima 80 L min<sup>-1</sup> para medir a vazão na saída do ar e um manômetro digital TSI VelociCalc Plus 9555P para medir a queda de pressão na placa de orifício. Com os dados de vazão e queda de pressão, plotou-se a curva de calibração. Utilizou-se a Equação (9) para calcular o valor de  $k$ , com o valor máximo de vazão.

$$Q = k \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (9)$$

Em que  $Q$  é a vazão volumétrica medida no rotâmetro, em  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $\Delta p$  é a queda de pressão medida no manômetro, em  $\text{mmH}_2\text{O}$ , e  $k$  é a constante calculada, que depende de fatores como a relação entre orifício e tubulação e características do fluido.

#### Cálculo da vazão volumétrica de ar no sistema

Para os ensaios desta seção, os meios filtrantes utilizados tinham diâmetro útil igual a  $1,47 \times 10^{-1} \text{ m}$ , o que corresponde a uma área filtrante de  $1,70 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ . Para que a velocidade superficial fosse  $2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , a vazão medida no rotâmetro foi igual a  $34 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ , calculada pela Equação 7. O valor de queda de pressão do orifício referente a essa vazão foi inserido no *software* do controlador, no campo “set point do orifício”. Para que essa vazão fosse mantida constante ao longo dos ciclos, o controlador era responsável por aumentar ou diminuir a sucção do ventilador, de modo a manter o *set point* do orifício.

#### Concentração de pó que chega ao meio filtrante

O controle da concentração de pó que chega ao meio filtrante foi realizado por meio do ajuste da velocidade de rotação do parafuso alimentador. Realizou-se a calibração para cada amostra com o pó da sinterização. Para tanto, a amostra circular era pesada antes de iniciar a calibração, um valor arbitrário de velocidade do parafuso era ajustado e alimentava-se o pó por um período de 5 min. Posteriormente, o meio filtrante era pesado novamente e a partir da Equação (10) calculava-se a concentração de pó no meio filtrante.

$$C_p = \frac{m_f - m_i}{t \cdot Q} \quad (10)$$

Em que  $m_f$  e  $m_i$  são as massas do meio filtrante depois e antes da filtração, respectivamente,  $t$  é o tempo de filtração e  $Q$  a vazão de ar. A partir do valor obtido de concentração, a rotação do parafuso era aumentada ou diminuída e repetia-se o procedimento até encontrar a concentração desejada. Ao encontrar o valor de interesse, repetia-se a calibração por mais duas vezes para confirmar o resultado.

Ressalta-se que esse procedimento é necessário todas as vezes em que se trabalha com um novo pó e/ou um novo meio filtrante. Para garantir a confiabilidade dos dados, esse procedimento foi realizado para todos os meios filtrantes em estudo, com e sem costura, em triplicata.

As condições experimentais utilizadas neste trabalho estão resumidas na Tabela 6.



**Tabela 6 - Condições experimentais dos ensaios de filtração no equipamento de teste baseado na norma alemã VDI 3926 (2003).**

Velocidade superficial	2 m·min <sup>-1</sup>
Diâmetro útil do meio filtrante	0,160 m
Vazão volumétrica de ar	34 L·min <sup>-1</sup>
Concentração de pó no meio filtrante	5 g·m <sup>-3</sup>
Queda de pressão máxima	1000 Pa
Temperatura (ambiente)	26 ± 4 °C
Pressão (ambiente)	0,9 atm
Umidade relativa (ambiente)	< 50 %
Tempo de abertura da válvula para limpeza	60 ms
Pressão do tanque de limpeza	5 bar

Fonte: Acervo pessoal.

#### **4.2 MEIOS FILTRANTES: PE/PTFE SEM COSTURA E COM COSTURA COM DIFERENTES DIÂMETROS DE AGULHA (90, 100 e 130 µm)**

Nesta seção serão apresentados o material e os métodos utilizados para a realização de todos os experimentos relacionados às amostras dos meios filtrantes de PE/PTFE sem costura e com costura com diferentes diâmetros de agulha (90, 100 e 130 µm). Os materiais particulados utilizados nestes testes foram o *Pural SB*<sup>®</sup> e o cloreto de sódio, que também foram caracterizados. Esses experimentos foram desenvolvidos em parceria com o grupo de pesquisa da Alemanha, *Gas-Partikel-Systeme - GPS*, no laboratório do *Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik - MVM*, localizado no *Karlsruher Institut für Technologie - KIT*.

##### **4.2.1 DESCRIÇÃO GERAL DOS MEIOS FILTRANTES**

Os meios filtrantes utilizados nos experimentos tinham a base de poliéster com uma membrana de PTFE na superfície. Esses filtros são comerciais, porém foram adaptados para as análises, sem a sobreposição de tecidos e costurados com agulhas de diâmetros específicos que estavam disponíveis no laboratório do fabricante *Junker - Filter GmbH*.

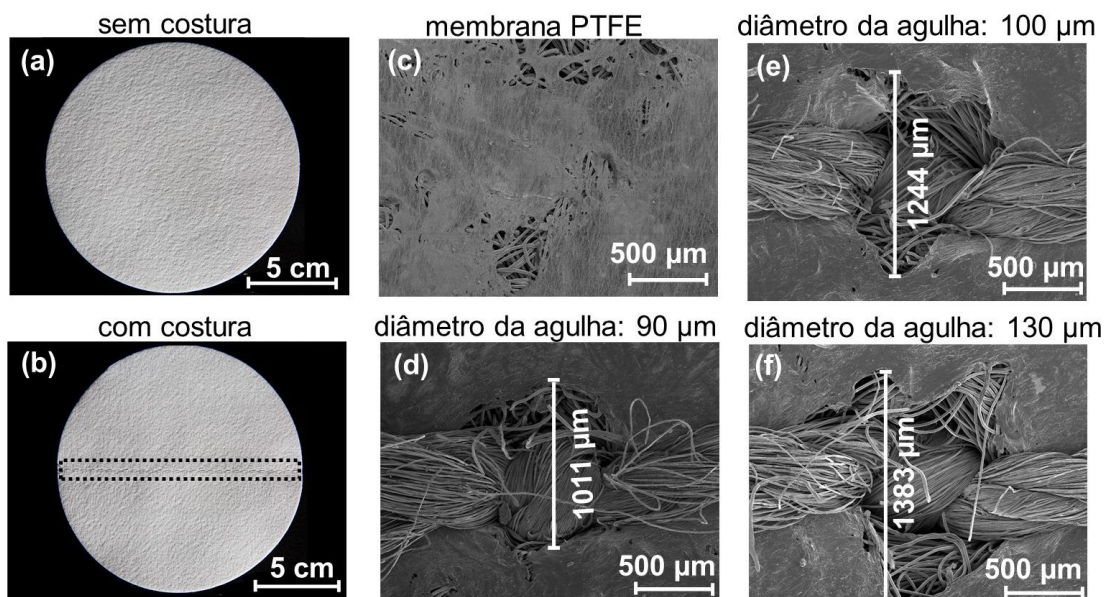
As especificações do meio filtrante sem costura, fornecidas pelo fabricante, estão listadas na Tabela 7. Como o objetivo desta investigação foi o impacto dos furos da costura, um meio filtrante com membrana serve como uma referência sólida devido à alta eficiência de separação e rápida formação de torta. Dessa forma, a maioria das emissões de partículas pode ser atribuída aos orifícios da costura do meio filtrante.

**Tabela 7 - Especificações do meio filtrante de poliéster com membrana PTFE, sem costura, fornecidas pelo fabricante *Junker - Filter GmbH*.**

Permeabilidade a 200 Pa ( $L \cdot dm^{-2} \cdot min^{-1}$ )	45
Gramatura ( $g \cdot m^{-2}$ )	550
Espessura (mm)	2
Diâmetro de fibras ( $\mu m$ )	14

Para estes experimentos, quatro tipos de amostras circulares destes meios filtrantes foram utilizados: um sem costura e três amostras cada uma com uma costura com diferente diâmetro de agulha (90, 100 e 130  $\mu m$ ), como mostrado na Figura 26. O meio filtrante com costura foi costurado uma vez, sem sobreposição de tecidos. Observe que os orifícios da costura não correspondem perfeitamente ao diâmetro da agulha. Para a costura, a matriz de fibras adjacente ao orifício da costura ainda está intacta e o orifício da costura é preenchido pela linha. Isto pode servir como base para o entupimento do defeito.

**Figura 26 - Fotografia das amostras sem costura (a) e com costura (b); imagens do MEV da membrana PTFE (c), e os furos de costura associados a diferentes diâmetros de agulha: 90  $\mu m$  (d), 100  $\mu m$  (e), 130  $\mu m$  (f).**



Fonte: Acervo pessoal.

#### 4.2.2 DESCRIÇÃO GERAL DO MATERIAL PARTICULADO: PURAL SB®

Para a investigação dos ciclos de filtração no equipamento baseado na norma VDI 3926, o *Pural SB®* foi utilizado por ser um pó não tóxico com boas propriedades dispersivas. O pó também contém partículas na região submicrômica e geralmente causa altas emissões de partículas em testes de filtração devido ao comportamento não aglomerante (BÄCHLER; MEYER; DITTLER, 2022). A Figura 27 mostra uma foto e uma imagem do MEV do *Pural SB®*.

**Figura 27 - Foto (a) e imagem do MEV (b) do *Pural SB*<sup>®</sup>.**



Fonte: Acervo pessoal.

#### **4.2.3 DENSIDADE APARENTE DO PURAL SB<sup>®</sup>**

A densidade aparente do *PURAL SB*<sup>®</sup> foi fornecida pelo fabricante *Sasol* e o valor é igual a 2,80 g·cm<sup>-3</sup>.

#### **4.2.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO PURAL SB<sup>®</sup>**

A composição química do *Pural SB*<sup>®</sup> também foi fornecida pelo fabricante *Sasol* e está apresentada na Tabela 8.

**Tabela 8 - Composição química do *Pural SB*<sup>®</sup> fornecida pelo fabricante *Sasol*.**

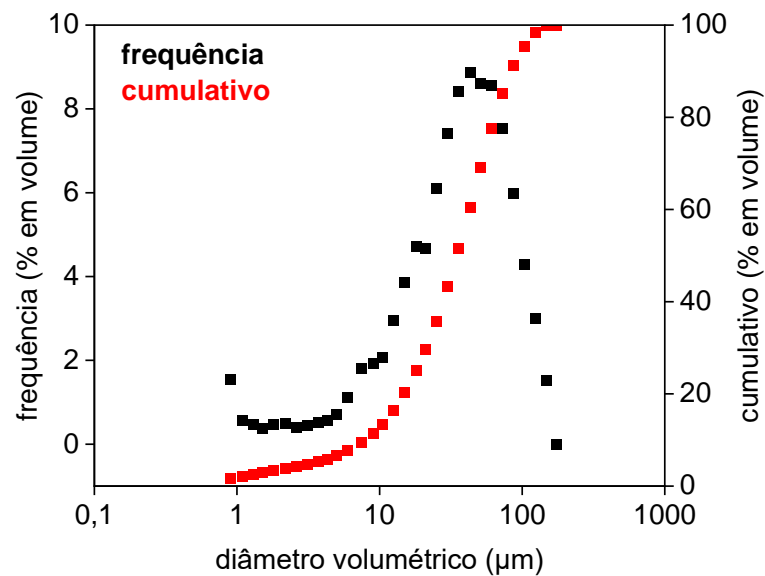
Componente	Teor mássico (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	74
Na <sub>2</sub> O	0,002
C	0,250
SiO <sub>2</sub>	0,010 - 0,015
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,005 - 0,015
TiO <sub>2</sub>	0,010 - 0,20

#### **4.2.5 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA EM VOLUME DO PURAL SB<sup>®</sup>**

O *Pural SB*<sup>®</sup> foi caracterizado quanto à distribuição granulométrica em volume, pela técnica de difração a laser, no equipamento *HELOS (H0309) & RODOS* do laboratório do *Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik - MVM*, localizado no *Karlsruher Institut für Technologie - KIT*.

O sensor compacto *HELOS*, em combinação com o dispersor seco automatizado *RODOS*, oferecem análise granulométrica rápida e repetível de produtos secos, finamente dispersos, na faixa de 0,1  $\mu\text{m}$  a 875  $\mu\text{m}$ . O dispersor de alta velocidade *RODOS* enriquece o *HELOS* - com seu clássico arranjo de difração em um caminho de feixe paralelo - por meio de uma combinação de dosagem e dispersão. Para permitir uma dispersão suave, completa e específica do produto, o ar comprimido é utilizado para gerar um aerossol seco, que é soprado através do feixe de luz e coletado no aspirador após a análise. As características de medição, dispersão e dosagem são controladas pelo *software PAQXOS*, o que permite a determinação simultânea de todos os parâmetros relevantes de tamanho e forma das partículas.

**Figura 28 - Distribuição granulométrica em volume do *Pural SB*<sup>®</sup>.**



A Tabela 9 apresenta as médias das duplicatas dos diâmetros volumétricos característicos do *Pural SB*<sup>®</sup>.

**Tabela 9 - Médias dos diâmetros volumétricos característicos do *Pural SB*<sup>®</sup>.**

Diâmetros característicos	<i>Pural SB</i> <sup>®</sup> ( $\mu\text{m}$ )
D(v, 0,1)	7,90 $\pm$ 0,05
D(v, 0,5)	34,84 $\pm$ 0,13
D(v, 0,9)	84,20 $\pm$ 0,34

Fonte: Acervo pessoal.

#### **4.2.6 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E EQUIPAMENTOS**

Nesta seção estão descritos todos os equipamentos e os procedimentos experimentais utilizados para os testes relacionados às amostras de PE/PTFE sem costura e com costura com diferentes diâmetros de agulha (90, 100 e 130  $\mu\text{m}$ ), realizados no laboratório do *Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik - MVM*, localizado no *Karlsruher Institut für Technologie - KIT*.

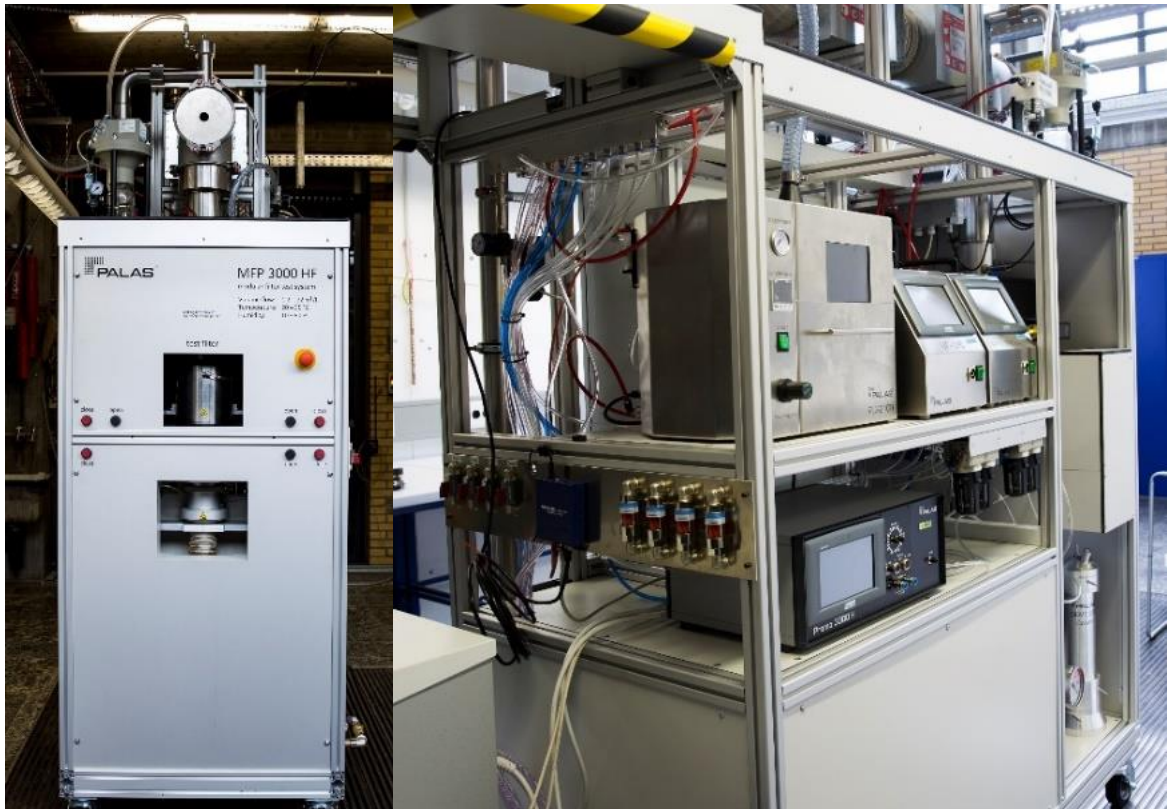
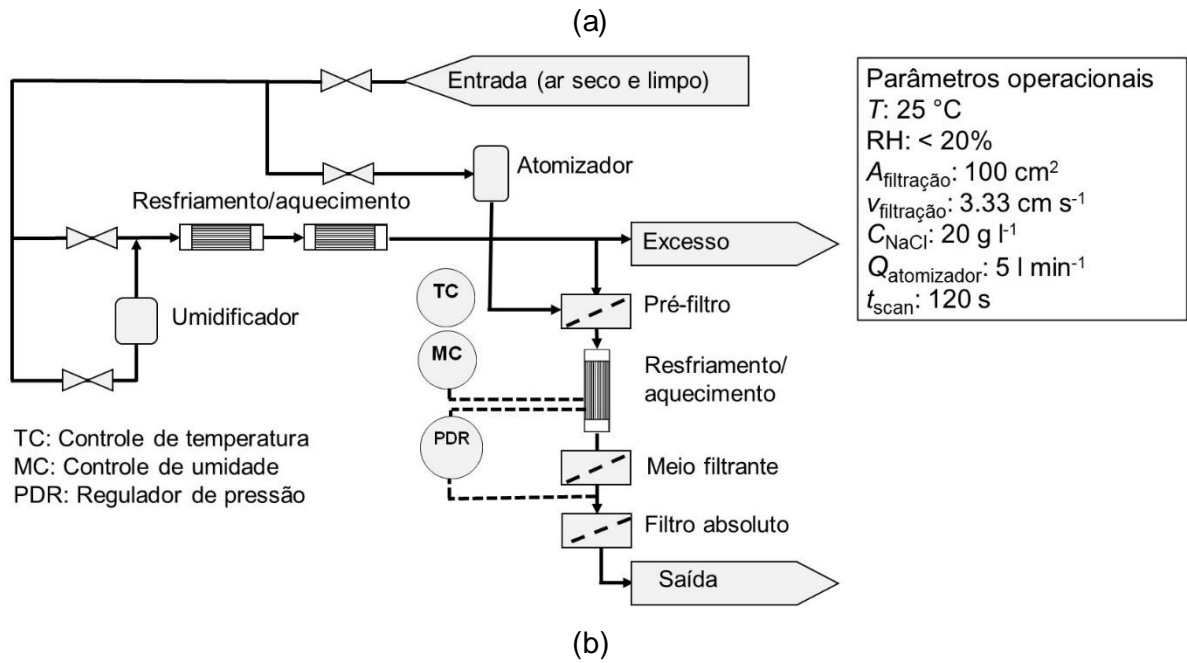
##### **4.2.6.1 EQUIPAMENTO MFP 3000 HF (MODULAR FILTER TEST SYSTEM)**

Como confirmação adicional dos resultados obtidos durante o procedimento de teste dos meios filtrantes no equipamento VDI 3926, as amostras também foram investigadas quanto à eficiência de separação fracionária em um equipamento apropriado sob diferentes condições experimentais, o MFP 3000 HF (*Palas*<sup>®</sup>) (Figura 29). Além disso, o dispositivo de medição foi um U-SMPS (*Universal Scanning Mobility Particle Sizer*), a fim de contabilizar partículas de tamanho menor e cobrir o tamanho de partícula mais penetrante (MPPS) do meio filtrante e a contribuição de emissão das costuras.

Para a avaliação da eficiência de separação fracionária, uma solução de NaCl foi utilizada, uma vez que este sal é facilmente disperso com uma distribuição estreita de tamanho de partícula. Uma solução de NaCl de 20  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  foi atomizada a 5  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$  e seca com sílica gel em um secador por difusão. A distribuição granulométrica das partículas secas de sal foi determinada com um U-SMPS (*Palas*<sup>®</sup>) em uma faixa de tamanho de 20 a 800 nm e é apresentada na Figura 30. Para garantir certeza estatística durante as medições da eficiência de separação fracionada, foi assegurado que para cada classe de tamanho foram medidas pelo menos 100 partículas.

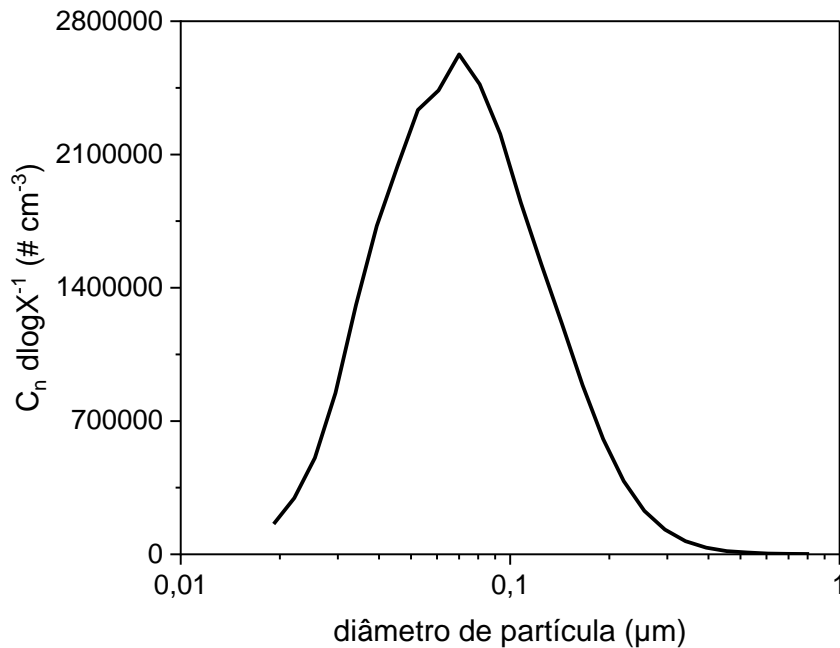
As amostras utilizadas neste equipamento tinham uma área efetiva de filtração de 100  $\text{cm}^2$ . Aquelas com costura continham 23 orifícios expostos. As amostras foram expostas ao aerossol de NaCl durante 120 s, em triplicata. Media-se a concentração de ar limpo para cada amostra da triplicata, posteriormente colocava-se um outro meio filtrante qualquer e fazia a medição da concentração do ar sujo, de modo a evitar a formação de torta no meio filtrante em análise e influenciar na eficiência de coleta. A velocidade superficial de filtração foi mantida constante a 2  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ , a temperatura a 25  $^{\circ}\text{C}$  e a umidade relativa abaixo de 20%. O número de orifícios de costura por área do meio filtrante é menor no equipamento MFP 3000 HF (23 orifícios de costura) do que no equipamento de teste VDI 3926 (28 orifícios de costura). Além disso, a faixa de tamanho de partícula avaliada em cada equipamento de teste é diferente. Como a eficiência de separação fracionária foi usada como uma confirmação dos níveis de emissão das amostras e não para comparação direta, estas diferenças não impactam os resultados apresentados.

**Figura 29 - Diagrama esquemático do MFP 3000 HF e parâmetros operacionais (a) e fotos do equipamento (b).**



Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 30 - Distribuição granulométrica do NaCl determinada via U-SMPS (*Palas*<sup>®</sup>).**



Fonte: Acervo pessoal.

#### **4.2.6.2 EQUIPAMENTO BASEADO NA NORMA VDI 3926**

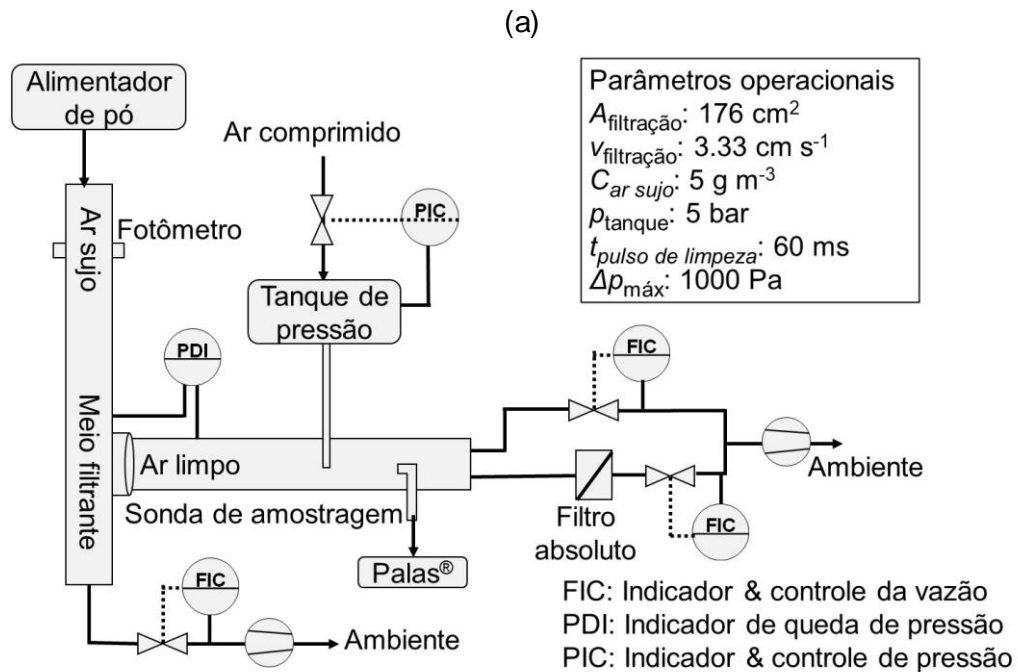
Para avaliar o comportamento das emissões durante eventos de filtração e regeneração em múltiplos ciclos, o equipamento de teste VDI 3926 foi empregado (Figura 31). Esse equipamento é diferente do apresentado na Figura 24, devido ao sistema de medição óptica de emissão de partículas composto por um espectrômetro de luz dispersa (*Promo*<sup>®</sup> 2000) e um sensor com tecnologia de fibra ótica (*Welas*<sup>®</sup> 2100) da fabricante *Palas*<sup>®</sup>.

Os parâmetros operacionais do equipamento de teste VDI 3926 foram mantidos constantes para todos os experimentos: velocidade superficial de filtração de 2 m·min<sup>-1</sup>, concentração de ar na entrada de 5 g·m<sup>-3</sup>, pressão do tanque de limpeza de 5 bar, válvula aberta para o pulso durante 60 ms e área do meio filtrante de 176 cm<sup>2</sup> contendo 28 orifícios de costura expostos nas amostras com costura.

O alimentador dispersa o pó em uma câmara de ar, onde é instalado um fotômetro para garantir uma concentração constante na entrada. A pressão diferencial entre o lado do ar sujo e o lado do ar limpo é monitorada. Quando o valor máximo pré-determinado de 1000 Pa é atingido, um pulso de 5 bar com abertura da válvula durante 60 ms é liberado para a limpeza do meio filtrante. No final do duto de ar limpo há uma sonda de amostragem isocinética para o sensor *Welas*<sup>®</sup> 2100 que permite a medição em tempo real das concentrações e tamanho de partícula do aerossol penetrante a cada um segundo. As concentrações médias são determinadas apenas utilizando a média aritmética das medições em tempo real coletadas pelo contador de partículas óticas (*Promo*<sup>®</sup> 2000 com um sensor

*Welas*<sup>®</sup> 2100 da *Palas*<sup>®</sup>). Há boa concordância em relação aos níveis de emissão de medição gravimétrica e óptica.

**Figura 31 - Diagrama esquemático do equipamento VDI 3926 e parâmetros operacionais (a) e foto do equipamento (b).**



(b)

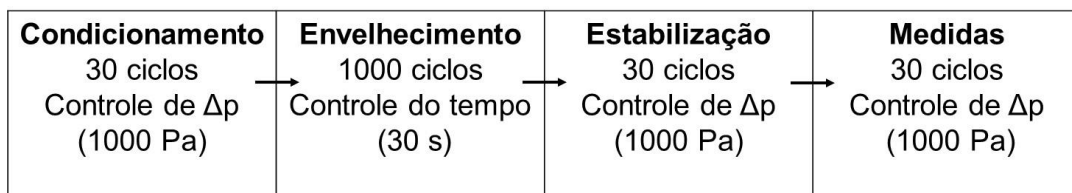


Fonte: Acervo pessoal.



O procedimento de filtração adaptado da norma VDI 3926 consiste em quatro etapas subsequentes, como mostra a Figura 32. No primeiro estágio, ou seja, condicionamento, o meio filtrante é submetido a 30 ciclos com pressão diferencial pré-determinada (1000 Pa) para a limpeza por jato de ar pulsante. No segundo estágio, o envelhecimento, o meio filtrante é submetido a 1000 pulsos de limpeza em intervalos de 30 s, causando assim o desprendimento frequente do pó, e permitindo a emissão contínua através do meio filtrante, de modo que as partículas sejam depositadas na matriz das fibras. Este efeito chamado envelhecimento do filtro normalmente leva a um aumento da pressão diferencial residual e a uma melhor separação das partículas. O terceiro estágio, a estabilização, é realizado para estabilizar as condições operacionais, nas quais o meio filtrante é exposto a 30 ciclos com pressão diferencial pré-determinada (1000 Pa) para a limpeza por jato pulsante. No último estágio, medição, o meio filtrante é novamente exposto a 30 ciclos de filtração com operação controlada por  $\Delta p$  para poder comparar as diferentes amostras sob condições iguais.

**Figura 32 - Etapas do procedimento de filtração adaptado da norma VDI 3926.**



Fonte: Adaptado de (BÄCHLER; MEYER; DITTLER, 2019).

#### 4.2.7 POROSIDADE DA TORTA DE FILTRAÇÃO

A porosidade da torta de filtração foi estimada utilizando-se três equações da literatura, sendo elas a Equação de *Ergun* (11), a Equação de *MacDonald* (12) e a Equação de *Kozeny-Carman* (13) (CARMAN, 1937 *apud* SHTYKA 2017; ERGUN, 1952; KOZENY, 1927 *apud* HUTTEN, 2016; MCDONALD *et al.*, 1979).

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot v}{d^2} + 1,75 \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{d} \quad (11)$$

$$\frac{\Delta p}{L} = 180 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 \cdot d^2} \cdot \mu \cdot v + B \cdot \frac{(1-\varepsilon) \cdot \rho \cdot v^2}{\varepsilon^3 \cdot d} \quad (12)$$

$$\frac{\Delta p}{L} = 18 \cdot \frac{2 \cdot k_p \cdot (1-\varepsilon)^2 \cdot \mu \cdot v}{\varepsilon^3 \cdot d^2 \cdot C} \quad (13)$$

Em que  $\Delta p$  é a queda de pressão através do meio filtrante,  $L$  é a espessura da torta,  $\varepsilon$  é a porosidade da torta,  $\mu$  é a viscosidade do ar,  $\rho$  é a densidade do ar,  $v$  é a velocidade superficial de filtração,  $d$  é o diâmetro médio de *Sauter* da partícula,  $B$  é um parâmetro igual a 4 para partículas rugosas,  $k_p$  é um parâmetro igual a 5 para partículas irregulares e  $C$  é o fator de correção de *Cunningham* (CHENG; TSAI, 1998; ENDO; CHEN; PUI, 1998; MCDONALD *et al.*, 1979).

A espessura da torta foi estimada usando a Equação 14, em que  $A_f$  é a área da superfície de filtração,  $\rho_p$  é a densidade do pó,  $m_f$  é a massa final do meio filtrante,  $m_i$  é a massa inicial do meio filtrante, o que é plausível para filtros com alta eficiência de coleta (AGUIAR; COURY, 1996). As porosidades da torta foram calculadas usando a ferramenta *Solver* do *Microsoft Excel* para solucionar as equações de *Ergun*, *MacDonald* e *Kozeny-Carman*.

$$L = \frac{m_f - m_i}{A_f \cdot \rho_p \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (14)$$

A porosidade da torta de filtração foi calculada tanto nos experimentos com os meios filtrantes P84 e pó da sinterização quanto naqueles em que se utilizou o PE/PTFE e *Pural SB*<sup>®</sup>. Amostras sem e com costura, virgem e usadas, foram avaliadas quanto à porosidade da torta no trigésimo ciclo de filtração.

# 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo foi dividido em duas seções principais, sendo a primeira referente aos ensaios com os meios filtrantes P84: virgens, com 10 meses e com 3 anos de uso. A segunda refere-se aos ensaios com os meios filtrantes PE/PTFE: virgens e costurados com diferentes diâmetros de agulha.

## 5.1 MEIOS FILTRANTES: AMOSTRAS DE MANGAS P84 VIRGEM, COM 10 MESES E COM 3 ANOS DE USO

Para esta etapa foram utilizadas seis diferentes amostras dos meios filtrantes P84: virgem sem e com costura; com 10 meses de uso sem e com costura; com 3 anos de uso sem e com costura.

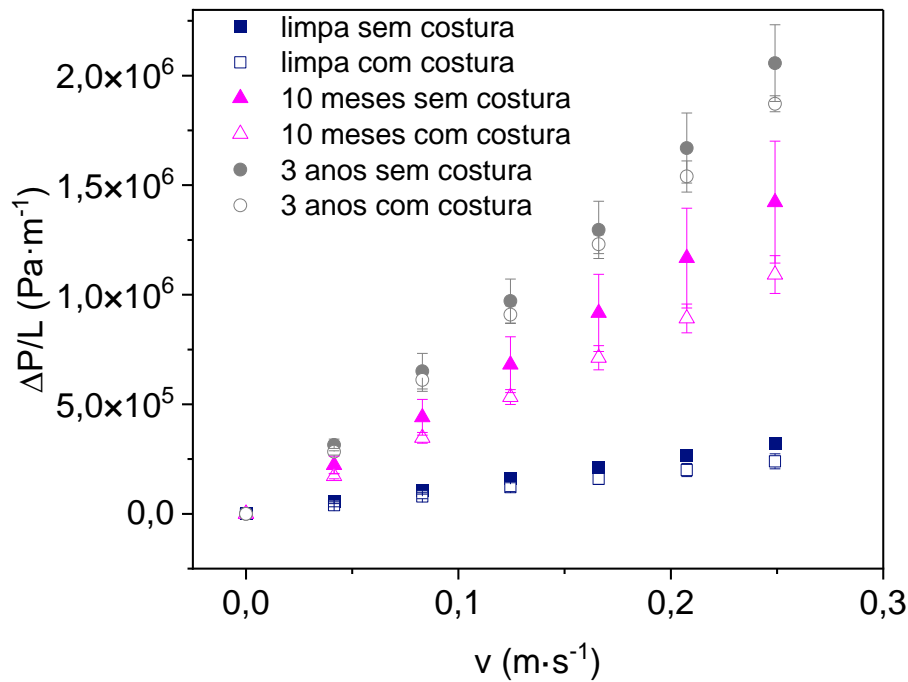
### 5.1.1 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE USO DA MANGA NA PERMEABILIDADE AO AR

O aumento da queda de pressão dos meios filtrantes em função do aumento da velocidade superficial de filtração está representado na Figura 33. Os ensaios foram realizados em triplicata, com amostras de diâmetro 0,0715 m, de mangas filtrantes P84 limpa, com 10 meses e com 3 anos de uso, com e sem costura, utilizando ar comprimido e sem adicionar material particulado.

O tempo de uso da manga ocasionou o aumento da queda de pressão por espessura do meio filtrante para todas as velocidades superficiais avaliadas, como pode ser visto na Figura 33, para ambas as amostras sem costura e com costura. Entretanto, o aumento foi mais expressivo nas amostras sem costura, já que as amostras com costura podem apresentar furos da costura ainda abertos devido aos pulsos de limpeza, o que reduz a resistência ao escoamento do ar.

Os valores experimentais das constantes de permeabilidade Darciana ( $k_1$ ) e das porosidades dos meios filtrantes ( $\epsilon$ ) calculadas por método indireto (Equação de *Davies*), de amostras das mangas P84 virgem, com 10 meses e com 3 anos de uso, estão dispostos na Tabela 10. Os experimentos foram realizados em triplicata, com três amostras diferentes retiradas ao longo do comprimento de cada manga. As dimensões reais da manga P84 eram 8,00 m de comprimento e 0,16 m de diâmetro, totalizando uma área de 4,02 m<sup>2</sup>, dos quais 3,87 m<sup>2</sup> eram a área sem costura e 0,1537 m<sup>2</sup> era a área com costura. Considerando essas áreas, uma média ponderada para cada característica foi calculada para estimar o valor referente à manga inteira. Os resultados também são apresentados na Tabela 10.

**Figura 33 - Queda de pressão por espessura do meio filtrante em função da velocidade superficial de filtração das amostras sem costura e com costura das mangas P84 limpa, com 10 meses e com 3 anos de uso.**



Fonte: Acervo pessoal.

**Tabela 10 - Constantes de permeabilidade Darciana ( $k_1$ ) e porosidade dos meios filtrantes ( $\epsilon$ ) sem costura, com costura, e das médias ponderadas para a manga inteira.**

	Amostra sem costura	Amostra com costura	Média ponderada para a manga inteira
$k_1$ ( $m^2$ ) - virgem	$(1,45 \pm 0,09) \cdot 10^{-11}$	$(1,95 \pm 0,27) \cdot 10^{-11}$	$1,47 \cdot 10^{-11}$
$\epsilon$ - virgem	0,72	0,74	0,72
$k_1$ ( $m^2$ ) - 10 meses	$(3,40 \pm 0,67) \cdot 10^{-12}$	$(4,31 \pm 0,33) \cdot 10^{-12}$	$3,43 \cdot 10^{-12}$
$\epsilon$ - 10 meses	0,56	0,60	0,56
$k_1$ ( $m^2$ ) - 3 anos	$(2,32 \pm 0,23) \cdot 10^{-12}$	$(2,50 \pm 0,09) \cdot 10^{-12}$	$2,33 \cdot 10^{-12}$
$\epsilon$ - 3 anos	0,53	0,54	0,53

Fonte: Acervo pessoal.

Os meios filtrantes com costura apresentaram maiores constantes de permeabilidade ao ar e porosidades que os respectivos filtros sem costura, tanto as amostras virgens quanto as usadas. Isto pode indicar possíveis caminhos preferenciais para o escoamento de ar na região da costura. A amostra limpa com costura apresentou constante de permeabilidade 34,5 % maior que a respectiva amostra sem costura. Para as amostras com costura, com 10 meses e com 3 anos de uso, as constantes de permeabilidade foram, respectivamente, 26,8 % e 7,8

% maiores que as respectivas amostras sem costura. Nota-se que quanto maior o tempo de uso da manga menos pronunciada foi a diferença nos valores das constantes de permeabilidade das amostras sem e com costura, indicando que os furos já não são mais abertos pelo pulso de limpeza e que a manga alcançou uma estabilidade na resistência ao escoamento de ar.

Comparando as amostras sem costura, foi observada redução da permeabilidade ao ar de aproximadamente 77 % na manga usada por 10 meses e 84% na manga usada por 3 anos, em relação à manga virgem. Para as amostras com costura, essa redução foi em torno de 78 % e 87 %, respectivamente para as mangas usadas por 10 meses e por 3 anos, em relação à amostra limpa. Os poros das amostras das mangas usadas foram preenchidos com pó, o que contribuiu para os menores valores de permeabilidade ao ar e porosidade em relação aos resultados das amostras virgens sem e com costura.

A permeabilidade ao ar e a porosidade estimadas para a manga inteira por meio das médias ponderadas ficaram próximas aos valores da amostra sem costura, o que era esperado, visto que a área com costura representava apenas cerca de 4% da área total da manga.

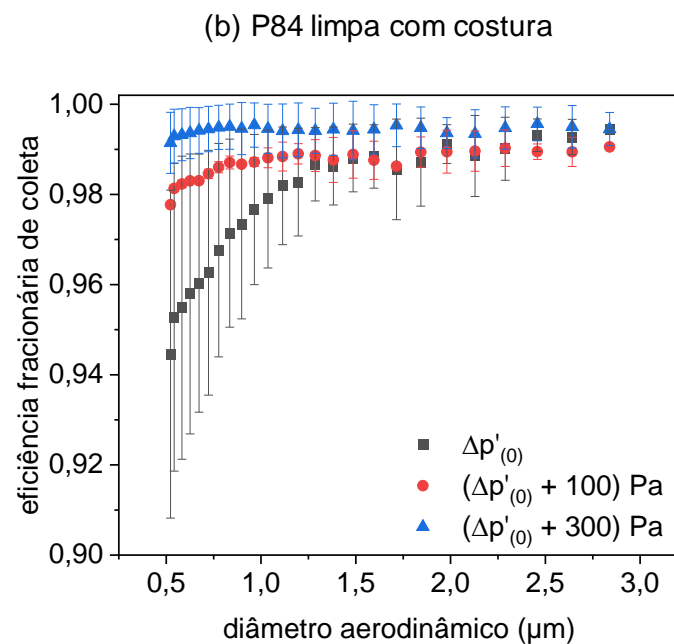
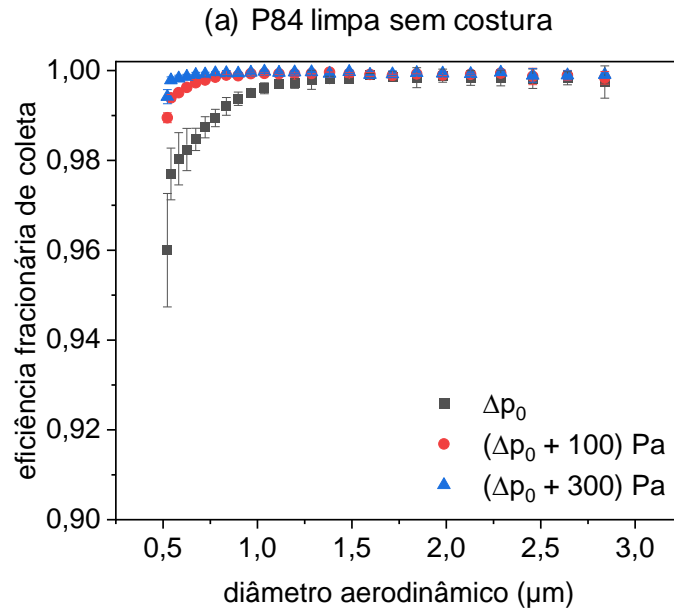
### **5.1.2 EFICIÊNCIA DE COLETA DE MICROPARTÍCULAS**

A eficiência de coleta de micropartículas (0,5 a 2,8  $\mu\text{m}$ ) das amostras virgens sem costura (a) e com costura (b) estão mostradas na Figura 34.

Os testes foram realizados em triplicata, com amostras de diâmetro igual a 0,048 m, utilizando o pó da sinterização (processo primário), com velocidade superficial de 2  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Os valores  $\Delta p_0$  e  $\Delta p'_0$  representam a queda de pressão inicial dos meios filtrantes virgens, sem costura e com costura, respectivamente. Os momentos subsequentes, ( $\Delta p_0 + 100$ ) Pa, ( $\Delta p_0 + 300$ ) Pa e ( $\Delta p'_0 + 100$ ) Pa, ( $\Delta p'_0 + 300$ ) Pa, referem-se aos instantes em que a queda de pressão atingia os valores mencionados entre parênteses.

A amostra limpa sem costura (Figura 34 - a), apresentou eficiências de coleta de aproximadamente 100% para partículas maiores que 1,5  $\mu\text{m}$  e em torno de 96% para as menores partículas avaliadas. A coleta de partículas maiores pelas fibras, no meio filtrante virgem sem costura, foi favorecida pela intensificação dos mecanismos de interceptação e impactação inercial (DONOVAN, 1985; HINDS, 1982). Em ( $\Delta p_0 + 100$ ) Pa, a filtração de superfície já havia iniciado, com base na análise de que 99% das partículas finas foram coletadas, o que sugere que uma fina camada de pó se formou na superfície do meio filtrante e a captura de partículas ocorreu em partículas já coletadas anteriormente. À medida em que a torta se tornou mais espessa, a eficiência de coleta das menores partículas foi progressivamente maior, atingindo quase 100% em ( $\Delta p_0 + 300$ ) Pa.

**Figura 34 - Eficiência fracionária de coleta das amostras virgens em  $(\Delta p_0)$ ,  $(\Delta p_0 + 100)$  Pa e  $(\Delta p_0 + 300)$  Pa para a amostra sem costura (a) e em  $(\Delta p'_{(0)})$ ,  $(\Delta p'_{(0)} + 100)$  Pa e  $(\Delta p'_{(0)} + 300)$  Pa com costura (b).**

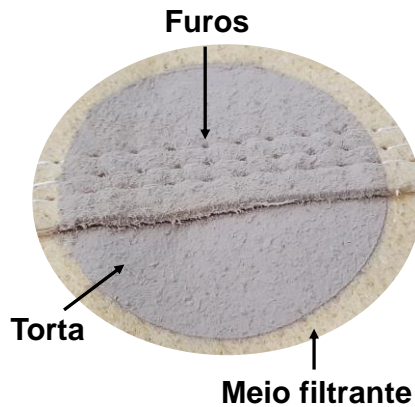


Fonte: Acervo pessoal.

Para a amostra limpa com costura (Figura 34 - b), os elevados desvios obtidos em  $\Delta p'_{(0)}$  possivelmente estão relacionados à heterogeneidade da região da costura, onde há a presença da linha, dos furos e de tecidos sobrepostos. À medida em que a torta se forma, em  $(\Delta p_0 + 100)$  Pa e  $(\Delta p_0 + 300)$  Pa, os desvios tornam-se menores, mas ainda assim são superiores àqueles obtidos para a amostra sem costura. Conforme apresentado na Tabela 10, a amostra limpa com costura apresentou constante de permeabilidade ao ar 34,5 % maior que a amostra sem costura, o que indicou menor resistência ao escoamento de ar e, portanto,

resultou em menores eficiências de coleta. Na região sobre a costura, os furos permaneceram descobertos mesmo em  $(\Delta p'_0 + 300)$  Pa, conforme mostrado na Figura 35.

**Figura 35 - Fotografia do meio filtrante com costura, mostrando os furos descobertos após a filtração atingir queda de pressão igual a  $(\Delta p'_0 + 300)$  Pa.**



Fonte: Acervo pessoal.

Ainda analisando a Figura 34 - b, em  $\Delta p'_0$ , para as menores partículas avaliadas, 0,5  $\mu\text{m}$ , o valor obtido para a eficiência de coleta pode ser um indicativo de redução do mecanismo de coleta por difusão atuante nesta faixa de tamanho, uma vez que esse mecanismo é prejudicado pelo aumento da velocidade intersticial pelos furos que se tornam caminhos preferenciais (BOUDHAN *et al.*, 2018). Porém, à medida que o diâmetro da partícula aumenta, a eficiência de coleta aumenta devido à intensificação da impactação inercial, que é favorecida pela maior velocidade da partícula através dos furos da costura e pela maior inércia da partícula (HINDS, 1982). Vale observar que as eficiências de coleta de partículas maiores na amostra com costura ficaram abaixo de 100%, pois quando há caminhos preferenciais, as linhas de escoamento de gás tendem a seguir principalmente esses caminhos e o mecanismo de interceptação pode ser prejudicado, já que para um dado tamanho de partícula há certas linhas de escoamento do gás que não resultam em captura da partícula (HINDS, 1982). Com a formação da torta, em  $(\Delta p'_0 + 100)$  Pa e  $(\Delta p'_0 + 300)$  Pa, a eficiência de coleta aumentou devido à captura das partículas pelas partículas já depositadas. Porém, os valores foram menores quando comparados à amostra sem costura nos mesmos estágios da filtração,  $(\Delta p_0 + 100)$  Pa e  $(\Delta p_0 + 300)$  Pa, indicando que os furos da costura abertos (Figura 35) podem ter prejudicado o mecanismo de coleta por interceptação.

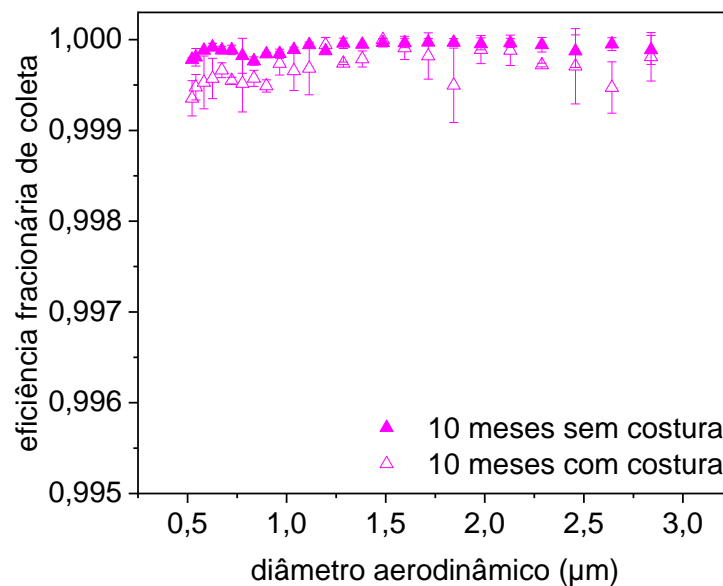
Outro ponto a se destacar é que a formação da torta sobre a costura, em que a linha de costura fica exposta, possivelmente impactou de forma negativa a coleta de partículas. A maior espessura da linha de costura em relação às fibras do meio filtrante pode prejudicar a coleta de partículas maiores pelos mecanismos que atuam nesta faixa de diâmetro, uma vez que a interceptação e impactação inercial tornam-se menos eficientes para fibras de maior

tamanho (HINDS, 1982). Portanto, pode-se inferir que a presença da costura em um meio filtrante tem forte influência na coleta de partículas, principalmente quando a torta começa a se formar não homogeneamente na região costurada.

As eficiências de coleta de micropartículas das amostras sem e com costura da manga com 10 meses de uso também foram avaliadas, na velocidade superficial de  $2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , utilizando amostras com diâmetro igual a  $0,048 \text{ m}$  e pó da sinterização (processo primário). Os resultados estão mostrados na Figura 36.

Para proporcionar uma melhor visualização dos dados, o gráfico da Figura 36 está em uma escala diferente da Figura 35. Para ambas as amostras, a eficiência de coleta foi superior a 99,9 % para toda a faixa de tamanho de partícula investigada, de  $0,5$  a  $2,8 \mu\text{m}$ . Esses resultados indicam que após os 10 meses de uso no filtro de mangas industrial, com ciclos de filtração e limpeza, os poros da manga filtrante bem como os furos da costura foram selados pelo pó e a filtração de superfície é predominante. Essa alta eficiência de coleta confirma os resultados de permeabilidade (Tabela 10) das amostras com 10 meses de uso, sem e com costura.

**Figura 36 - Eficiência fracionária de coleta das amostras sem e com costura da manga usada por 10 meses.**



Fonte: Acervo pessoal.

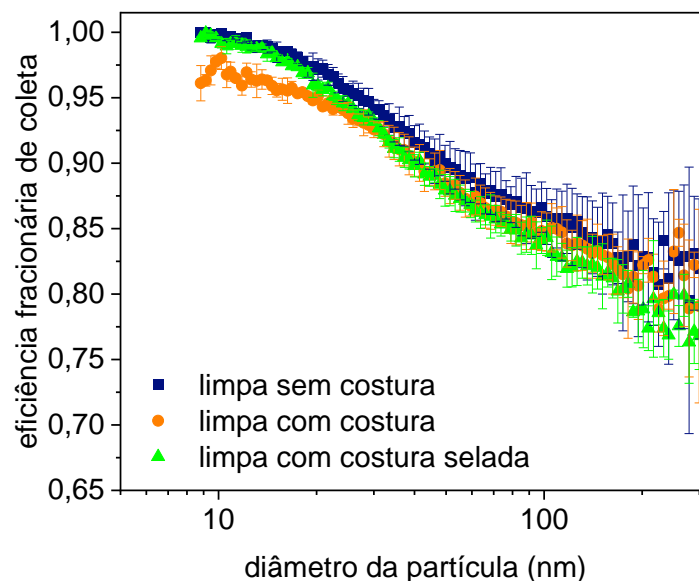
### 5.1.3 EFICIÊNCIA DE COLETA DE NANOPARTÍCULAS

A Figura 37 mostra os resultados da eficiência de coleta de nanopartículas das amostras limpas sem costura, com costura aberta e com costura selada (utilizou-se selante de poliuretano para cobrir os furos), utilizando uma solução de  $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  de cloreto de sódio e com velocidade superficial de  $2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .



As três amostras apresentaram comportamentos semelhantes, em que a eficiência de coleta diminuiu com o aumento do diâmetro das partículas, levando a um valor mínimo de eficiência para partículas com diâmetro em torno de 300 nm. Para os menores tamanhos de partícula, houve um forte desempenho da difusão e a coleta foi altamente eficiente, chegando a 100% a 10 nm para as amostras sem costura e com costura selada. Conforme o tamanho da partícula aumentou, o mecanismo de difusão tornou-se menos eficaz, mas as partículas ainda eram muito pequenas para que a interceptação ou impactação se tornasse eficiente. Devido a essa competição dos mecanismos de deposição, uma região de eficiência mínima é comumente observada (HINDS, 1982). A curva da amostra com costura ficou abaixo das curvas das amostras sem costura e com costura selada, mostrando que quando o escoamento de ar seguia os caminhos preferenciais através da costura o efeito do mecanismo de difusão diminuía devido ao aumento da velocidade intersticial. A mesma tendência foi observada por Boudhan *et al.* (2018) para partículas abaixo de 0,1  $\mu\text{m}$ .

**Figura 37 - Eficiência fracionária de coleta das amostras limpas sem costura, com costura e com costura selada, em função do diâmetro de mobilidade elétrica das partículas (10-300 nm).**



Fonte: Acervo pessoal.

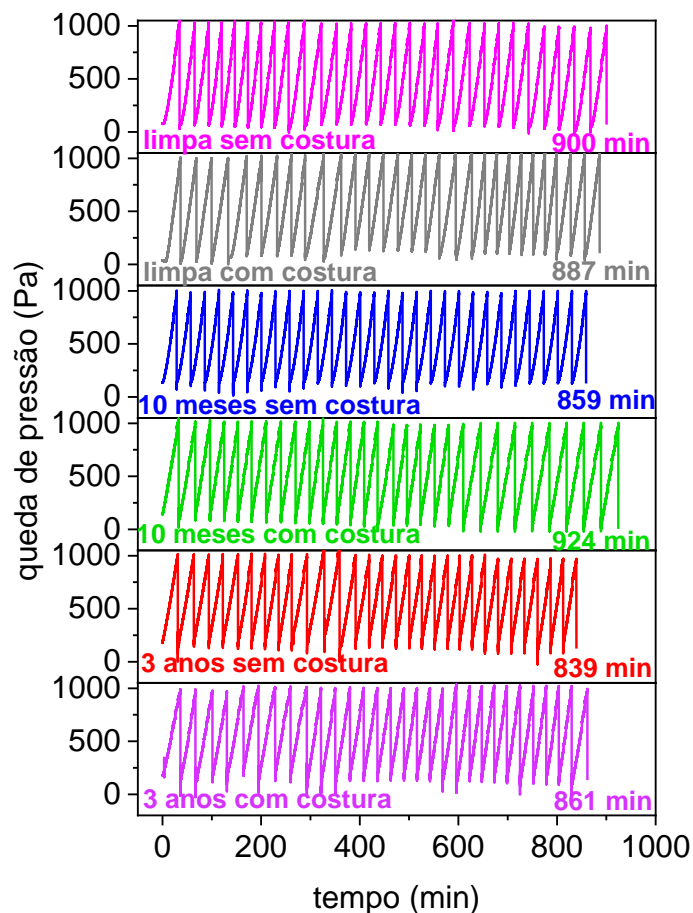
#### 5.1.4 CICLOS DE FILTRAÇÃO COM LIMPEZA POR JATO DE AR PULSANTE

Os ciclos de filtração foram realizados com velocidade superficial de  $2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , concentração de material particulado (pó da sinterização do processo primário) igual a  $5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , queda de pressão máxima de 1000 Pa, pressão do tanque de limpeza igual a 5 bar e duração do pulso de 60 ms. Foram realizados 30 ciclos de filtração com limpeza por jato de ar pulsante para as amostras limpas sem e com costura, representando o primeiro estágio do

procedimento de filtração adaptado da norma VDI 3926, denominado condicionamento do meio filtrante. Nesta etapa, os ciclos de filtração são instáveis, podendo ocorrer flutuações da queda de pressão residual e do tempo de ciclo. Para as amostras usadas por 10 meses e por 3 anos, houve naturalmente um processo de envelhecimento da manga no filtro de mangas industrial. Portanto, os 30 ciclos realizados com estas amostras correspondem ao último estágio do procedimento de filtração adaptado da norma VDI 3926, denominado medição, em que o meio filtrante já passou por todo processo necessário para assegurar resultados mais estáveis de queda de pressão, tempo de ciclo e eficiência de coleta.

A Figura 38 apresenta os ciclos de filtração das amostras sem e com costura das mangas P84 limpa, com 10 meses e com 3 anos de uso. A temperatura ambiente durante a realização dos ciclos foi de  $23,7 \pm 2,5$  °C e a umidade relativa de  $26 \pm 8\%$ .

**Figura 38 - Ciclos de filtração da manga P84 limpa sem costura (rosa), limpa com costura (cinza), com 10 meses de uso sem costura (azul), com meses de uso com costura (verde), com 3 anos de uso sem costura (vermelho) e com 3 anos de uso com costura (roxo).**



Fonte: Acervo pessoal.

Considerando a instabilidade durante o estágio de condicionamento das amostras limpas, pode-se dizer que o tempo para completar 30 ciclos para as amostras sem e com

costura, 900 e 887 min, respectivamente, foi bastante similar, sendo uma média de 26 s a mais em cada ciclo da amostra sem costura. Avaliando as amostras com 10 meses de uso, o resultado foi inverso, no qual a amostra com costura levou mais tempo para completar os 30 ciclos, 65 min a mais, sendo uma média de 2 minutos a mais em cada ciclo. Para as amostras com 3 anos de uso, a amostra com costura também levou mais tempo para completar os 30 ciclos, sendo 22 min a mais, uma média de 44 s a mais por ciclo. Com o tempo de uso, as amostras sem e com costura tornam-se semelhantes, já que tanto os poros do meio filtrante quanto os furos da costura são preenchidos pelo pó. Essa maior semelhança entre as amostras devido ao tempo de uso também foi obtida na permeabilidade, conforme Figura 33 e Tabela 10. Além disso, pode-se destacar que o tempo de uso das mangas teve maior influência nas amostras com costura, já que a diferença entre o tempo para completar 30 ciclos das amostras com costura com 10 meses de uso e com 3 anos de uso (63 min), foi aproximadamente três vezes superior à diferença das respectivas amostras sem costura (20 min).

### 5.1.5 POROSIDADE DA TORTA DE FILTRAÇÃO

A porosidade da torta foi calculada pelo método indireto, utilizando as equações de *Ergun*, *MacDonald* e *Kozeny-Carman*, para o trigésimo ciclo de filtração das amostras com 10 meses e com 3 anos de uso, sem e com costura. Os resultados estão apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11 - Porosidade da torta em amostras limpas, com 10 meses de uso e com 3 anos de uso, sem e com costura, no trigésimo ciclo, utilizando as equações de Ergun, McDonald e Kozeny-Carman.**

Amostra	<i>Ergun</i>	<i>McDonald</i>	<i>Kozeny-Carman</i>
10 meses sem costura	0,944	0,954	0,948
10 meses com costura	0,952	0,958	0,951
3 anos sem costura	0,942	0,951	0,946
3 anos com costura	0,949	0,956	0,948

Fonte: Acervo pessoal.

Analisando os valores da Tabela 11, pode-se destacar uma tendência: maior constante de permeabilidade ao ar proporciona a formação de tortas menos compactas, ou seja, com maior porosidade. A amostra com costura com 10 meses de uso foi a que apresentou a maior constante de permeabilidade ao ar (Tabela 10) e conseqüentemente foi a que teve a maior porosidade da torta, para todas as equações avaliadas. Esse resultado também corrobora o maior tempo de filtração para a referida amostra (Figura 38). Essa tendência também foi observada em outros trabalhos da literatura, o que aponta para a influência da permeabilidade

do filtro na estrutura da torta de pó: elevada permeabilidade o ar resulta em uma torta com estrutura menos compacta (KANAOKA; AMORNKITBAMRUNG, 2001; LUPION *et al.*, 2014), o que induz uma queda de pressão reduzida na torta e consequentemente proporciona um ciclo mais longo.

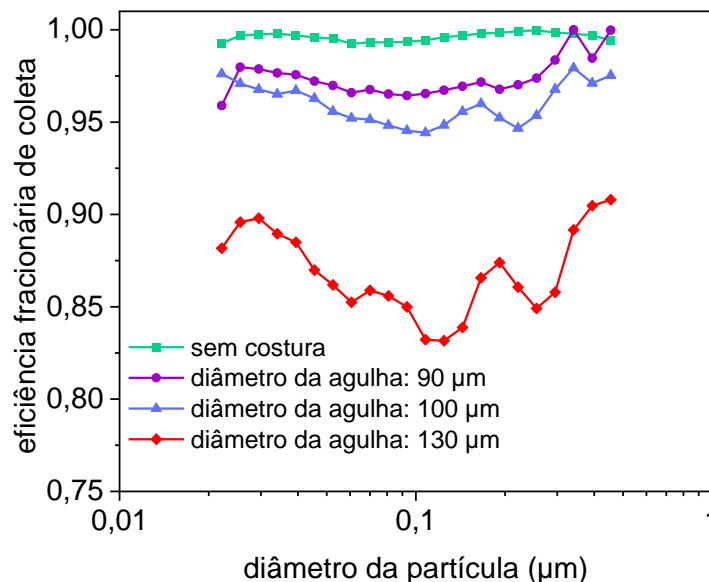
## 5.2 MEIOS FILTRANTES PE/PTFE VIRGENS: SEM COSTURA, COM COSTURA COM DIÂMETROS DA AGULHA IGUAIS A 90, 100 E 130 $\mu\text{m}$

Para esta etapa, quatro diferentes amostras dos meios filtrantes PE/PTFE foram utilizadas: uma sem costura, três com costura, costuradas com agulhas de diferentes diâmetros (90, 100 e 130  $\mu\text{m}$ ).

### 5.2.1 EFICIÊNCIA DE COLETA AVALIADA NO EQUIPAMENTO MFP 3000 HF

A Figura 39 mostra a eficiência fracionária de coleta das quatro amostras avaliadas no equipamento MFP 3000 HF: uma sem costura e três costuradas com diferentes diâmetros de agulha (90, 100 e 130  $\mu\text{m}$ ). As amostras utilizadas neste equipamento tinham uma área efetiva de filtração de 100  $\text{cm}^2$  e foram expostas ao aerossol de NaCl durante 120 s, em triplicata. A velocidade superficial de filtração foi mantida constante a 2  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ , a temperatura a 25  $^{\circ}\text{C}$  e a umidade relativa abaixo de 20%.

**Figura 39 - Eficiência fracionária das amostras limpas sem costura e com costura (diâmetro da agulha de 90, 100 e 130  $\mu\text{m}$ ).**



Fonte: Acervo pessoal.

A amostra sem costura apresenta eficiências de coleta maiores que 99%, o que é típico para meios filtrantes com membrana, para a faixa de diâmetro avaliada (0,02 a 0,5  $\mu\text{m}$ ). Para as amostras com costura, quanto maior o diâmetro da agulha, maior o diâmetro do furo, e

menor a eficiência de coleta. Estes resultados são consistentes com os trabalhos de Bach; Schmidt (2007) e Mouret *et al.* (2009), nos quais os autores avaliaram diferentes diâmetros de orifícios em filtros de superfície e descobriram que diâmetros de orifícios maiores levam a uma redução acentuada na eficiência de filtração.

Os furos nas amostras com costura tornaram-se caminhos preferenciais para o escoamento de ar e, conseqüentemente, ocorreu um aumento na velocidade intersticial. Com o aumento da velocidade através dos orifícios da costura, o mecanismo de coleta de partículas menores que 0,1  $\mu\text{m}$  por difusão Browniana foi prejudicado. Entretanto, para partículas maiores que 0,1  $\mu\text{m}$ , a eficiência de coleta aumentou devido ao maior papel da impactação inercial, que foi favorecida pelo aumento da velocidade através dos furos e pela maior inércia das partículas (BACH; SCHMIDT, 2007; HINDS 1999; BOUDHAN *et al.* (2018).

### **5.2.2 INFLUÊNCIA DE COSTURAS COM DIFERENTES DIÂMETROS DE AGULHA NA EVOLUÇÃO DOS CICLOS DE FILTRAÇÃO E NA QUEDA DE PRESSÃO NO EQUIPAMENTO VDI 3926**

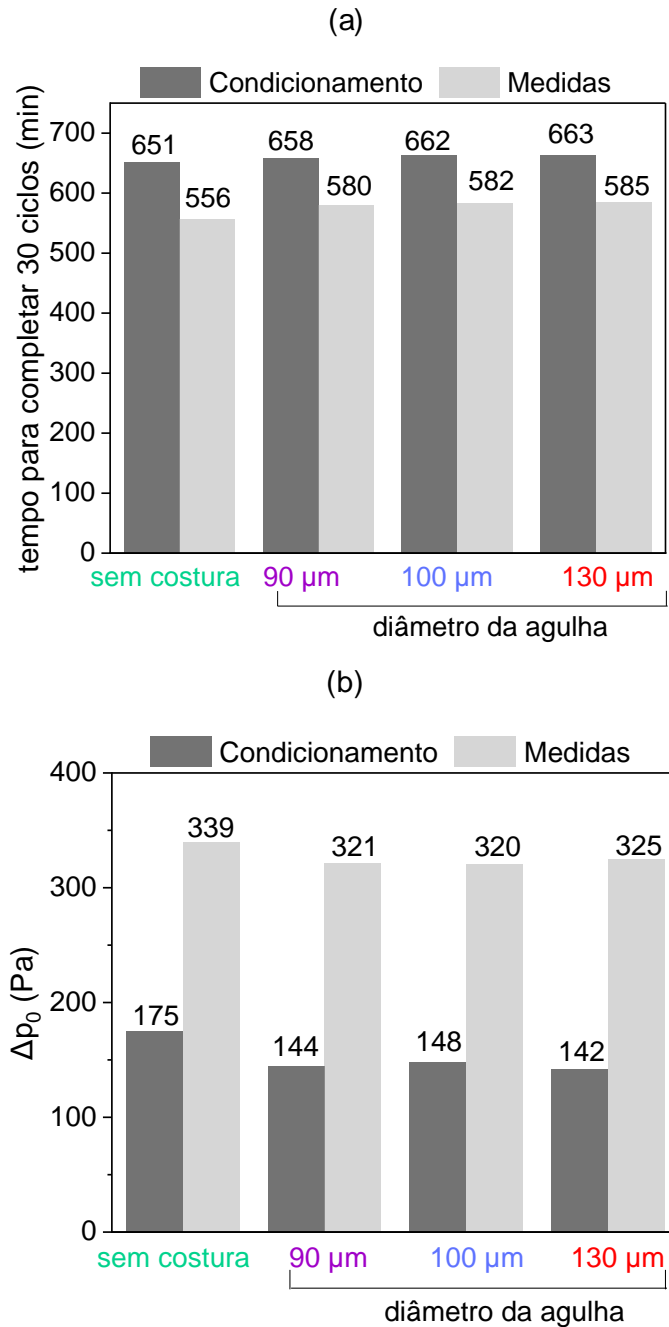
O condicionamento é o primeiro estágio do procedimento de teste do meio filtrante. Os ciclos iniciais de filtração são instáveis, nos quais podem ocorrer flutuações da queda de pressão residual e do tempo de ciclo. Após o condicionamento, envelhecimento e estabilização, a medição é o último estágio do procedimento. Nesta etapa, condições de operação estáveis são asseguradas, e a comparação dos diferentes meios filtrantes pode ser baseada em condições de envelhecimento semelhantes para cada amostra.

A Figura 40 - a apresenta o tempo necessário para completar 30 ciclos. A Figura 40 - b mostra a queda de pressão inicial ( $\Delta p_0$ ) de cada amostra, nas etapas de condicionamento e medição. Para um meio filtrante novo, são esperados tempos de ciclo mais longos, conseqüentemente menores quedas de pressão inicial.

A Figura 40 - a mostra que, na fase de condicionamento, o tempo total necessário para completar 30 ciclos é semelhante para todas as amostras avaliadas. A maior diferença é cerca de 12 minutos entre a amostra sem costura e aquela com um diâmetro de agulha de 130  $\mu\text{m}$ , aproximadamente 24 s a mais para cada ciclo. Esta é uma pequena diferença, considerando que esta etapa é relativamente instável em relação à duração dos ciclos. Na etapa de medição, o tempo para completar 30 ciclos é muito semelhante entre as três amostras com costura. A amostra sem costura apresentou um tempo muito mais curto para o condicionamento. Este comportamento da amostra sem costura pode ser explicado pelo aumento mais rápido da queda de pressão, uma vez que a amostra coleta mais material particulado, como foi demonstrado pela avaliação da eficiência de coleta na Figura 39. Nas amostras com costura, além do escoamento através da camada de membrana e dos poros, existem furos de costura, que tornam o meio filtrante mais permeável e favorecem a

penetração direta do material particulado. Isso afeta a queda de pressão, fazendo com que o meio filtrante carregue mais lentamente e assim demore mais para atingir a pressão máxima de limpeza e conclusão do ciclo de filtração.

**Figura 40 - Tempo para completar 30 ciclos (a) e queda de pressão inicial ( $\Delta p_0$ ) (b), a  $2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , para cada amostra, nas etapas de condicionamento e medição.**



Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 40 - b valida as observações sobre o tempo para completar 30 ciclos. O meio filtrante sem costura apresenta uma maior queda de pressão em ambos os estágios de

condicionamento e medição em comparação às amostras com costura. As diferenças entre as amostras com costura são desprezíveis.

Estes resultados mostram que a presença de costura influencia ligeiramente o progresso da filtração, o que pode ser demonstrado por ambos, o tempo necessário para completar os ciclos de filtração e a queda de pressão residual do meio filtrante. Ao comparar os resultados entre as amostras com costura, pode-se notar que o diâmetro da agulha não tem uma grande influência no desempenho operacional, respectivamente na pressão diferencial do filtro.

### **5.2.3 EMISSÕES DURANTE AS ETAPAS DE CONDICIONAMENTO, ENVELHECIMENTO, ESTABILIZAÇÃO E MEDIÇÃO**

A Figura 41, a Figura 42, a Figura 43 e a Figura 44 mostram a concentração em número de partículas por centímetro cúbico ( $\# \cdot \text{cm}^{-3}$ ) determinada opticamente ao longo do tempo em cada etapa do procedimento de filtração (Figura 32), respectivamente, o condicionamento (controlado por  $\Delta p = 1000 \text{ Pa}$ ), o envelhecimento (controlado por  $\Delta t = 30 \text{ s}$ ), a estabilização (controlada por  $\Delta p = 1000 \text{ Pa}$ ) e a medição (controlada por  $\Delta p = 1000 \text{ Pa}$ ), para cada amostra (sem costura, com costura com diâmetros de agulha de 90, 100 e 130  $\mu\text{m}$ ). Ressalta-se que as medições de concentração são feitas em tempo real a cada um segundo e que as médias apresentadas correspondem à média aritmética de todos os valores obtidos ao longo dos ciclos. Durante o pulso de limpeza há picos de concentração bastante elevados, que são as emissões transitórias, porém as emissões contínuas apresentam valores baixos, o que torna a média das concentrações mais baixa.

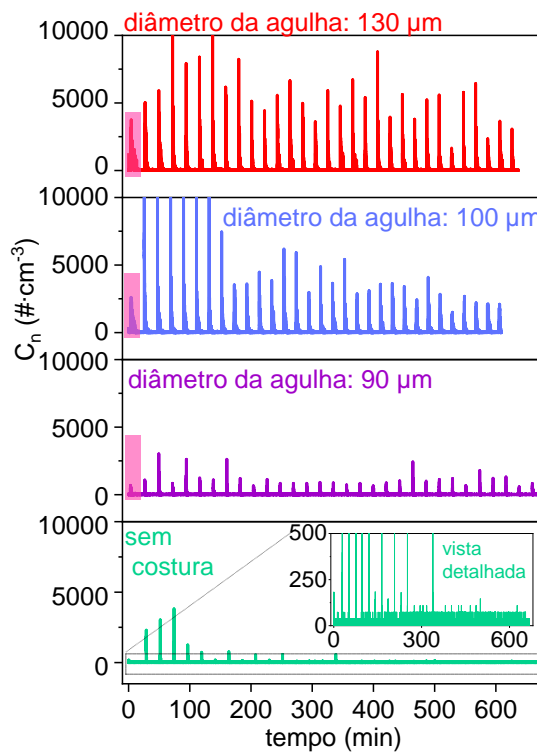
Quando os picos de concentração durante os pulsos não puderam ser distinguidos da linha de base, foi feita uma vista detalhada para melhor visualização destes picos, como é mostrado na Figura 41 para a amostra sem costura e na Figura 42 e na Figura 43 para as amostras sem costura e com diâmetro de agulha de 90  $\mu\text{m}$ .

Analisando a Figura 41, etapa de condicionamento, a amostra sem costura tem nível de emissão quase zero e picos de baixa concentração após a limpeza por jato pulsante, mesmo nos primeiros minutos, o que demonstra a alta eficiência de separação do meio filtrante com membrana.

A concentração média para os 30 ciclos foi de aproximadamente  $7,13 \# \cdot \text{cm}^{-3}$ . Os valores mais altos dos picos de concentração durante os primeiros 100 minutos ocorreram porque os poros e pequenos defeitos do meio filtrante ainda não estavam fechados. Após os 200 minutos iniciais, quase não é possível detectar qualquer emissão de partículas. As amostras costuradas com agulhas de 90, 100 e 130  $\mu\text{m}$  de diâmetro apresentaram picos de penetração inicial de partículas (retângulos rosa nos gráficos) antes do primeiro pulso de limpeza. A amostra sem costura não teve esse pico inicial, o que demonstra a alta eficiência

de separação da membrana. As amostras com costura também mostraram picos de concentração mais altos após os pulsos de limpeza durante todo o período experimental. As concentrações médias durante 30 ciclos foram  $14,74 \text{ \#}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  $124,83 \text{ \#}\cdot\text{cm}^{-3}$  e  $107,33 \text{ \#}\cdot\text{cm}^{-3}$  para as amostras costuradas com agulhas de  $90 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $100 \text{ }\mu\text{m}$ , e  $130 \text{ }\mu\text{m}$ , respectivamente

**Figura 41 - Concentração em número de partículas ao longo do tempo para as amostras sem costura (verde) e com diâmetros de agulha de  $90 \text{ }\mu\text{m}$  (roxo),  $100 \text{ }\mu\text{m}$  (azul) e  $130 \text{ }\mu\text{m}$  (vermelho), durante o estágio de condicionamento. Os retângulos rosas representam os picos antes do primeiro pulso de limpeza.**



Fonte: Acervo pessoal.

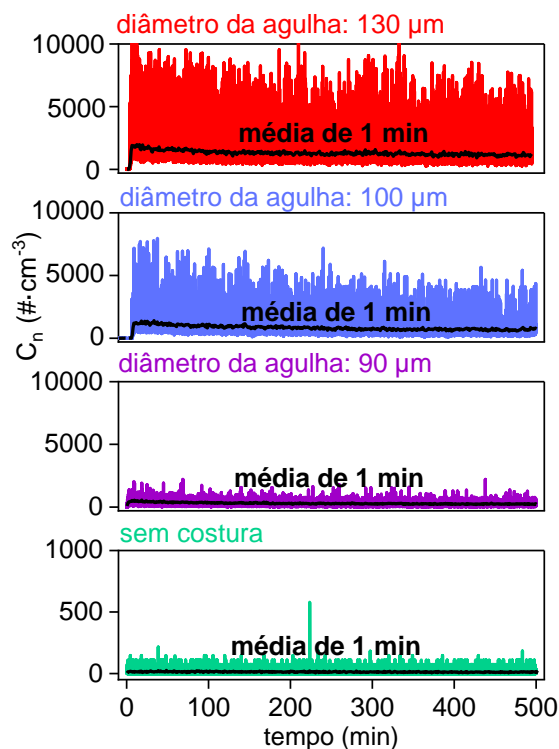
Nesta fase de condicionamento, seria de se esperar que a altura dos picos de concentração diminuísse ao longo de vários ciclos devido aos poros e orifícios da costura estarem fechados por partículas, mas as amostras costuradas mostraram dispersão na altura dos picos. Isso pode ser explicado principalmente pelas condições instáveis durante os ciclos iniciais do procedimento de filtração. A amostra com um diâmetro de agulha de  $100 \text{ }\mu\text{m}$  apresentou a maior concentração média de emissão devido aos grandes picos de concentração nos primeiros 100 minutos, mas após 200 minutos do experimento, a altura do pico tornou-se menor em comparação com a amostra de  $130 \text{ }\mu\text{m}$  de diâmetro de agulha.

O objetivo do envelhecimento é gerar condições comparáveis aos meios filtrantes, que estão mais próximas daquelas que os filtros suportam durante a aplicação industrial após um longo período de operação. Na Figura 42, a escala no eixo da ordenada para a amostra sem costura é 10 vezes menor que para as demais amostras, de modo a avaliar as baixas



emissões desse meio filtrante com membrana. Durante a etapa de envelhecimento, não há formação completa de torta, uma vez que os ciclos são curtos. Conseqüentemente, são detectadas emissões constantes de material particulado no lado do gás filtrado devido à penetração contínua de partículas. Nessa fase, apesar das altas emissões, há também a agregação de material particulado no interior do meio filtrante.

**Figura 42 - Concentração em número de partículas ao longo do tempo para as amostras sem costura (verde) e com diâmetros de agulha de 90  $\mu\text{m}$  (roxo), 100  $\mu\text{m}$  (azul) e 130  $\mu\text{m}$  (vermelho), durante o estágio de envelhecimento. Para este estágio também são mostrados os valores médios de 1 minuto.**



Fonte: Acervo pessoal.

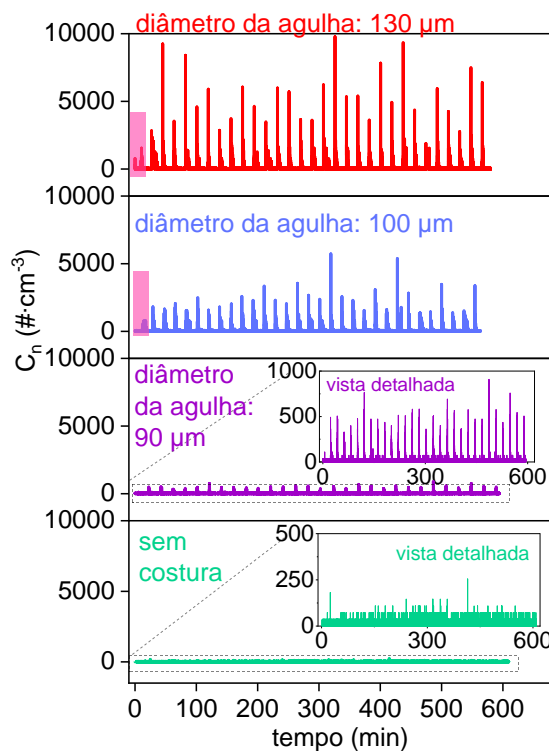
As partículas depositadas aumentam a eficiência de coleta dos filtros, o que diminui a concentração de emissão, como pode ser visto pelo comportamento decrescente da curva da média de 1 minuto (linha preta). As concentrações médias durante os 1000 ciclos de 30 s cada foram 12,74  $\# \cdot \text{cm}^{-3}$ , 292,90  $\# \cdot \text{cm}^{-3}$ , 795,79  $\# \cdot \text{cm}^{-3}$ , e 1306,43  $\# \cdot \text{cm}^{-3}$  para as amostras sem costura, com diâmetros de agulha de 90, 100, e 130  $\mu\text{m}$ , respectivamente, mostrando que diâmetros de agulha maiores levam a maiores níveis de emissão e que os furos de costura têm uma forte influência nas emissões.

Na Figura 43, etapa de estabilização, a amostra sem costura apresentou emissões muito baixas, a maioria abaixo de 100  $\# \cdot \text{cm}^{-3}$  durante todos os ciclos.

Os picos de concentração após a limpeza por jato pulsante não puderam ser distinguidos na linha base, por isso foi feita uma vista detalhada em menor escala. Assim, a

emissão detectada para a amostra sem costura corresponde a uma separação quase perfeita de partículas ao longo de todo o experimento. As emissões das amostras com costura foram menores em relação à fase de condicionamento, devido à etapa de envelhecimento. As emissões transitórias após os pulsos de limpeza ainda flutuaram em altura de pico, principalmente para as amostras com diâmetro de agulha de 100  $\mu\text{m}$  e 130  $\mu\text{m}$ , em que alguns picos dos ciclos finais foram maiores que os ciclos iniciais.

**Figura 43 - Concentração em número de partículas ao longo do tempo para as amostras sem costura (verde) e com diâmetros de agulha de 90  $\mu\text{m}$  (roxo), 100  $\mu\text{m}$  (azul) e 130  $\mu\text{m}$  (vermelho), durante o estágio de estabilização. Os retângulos rosas representam os picos antes do primeiro pulso de limpeza.**

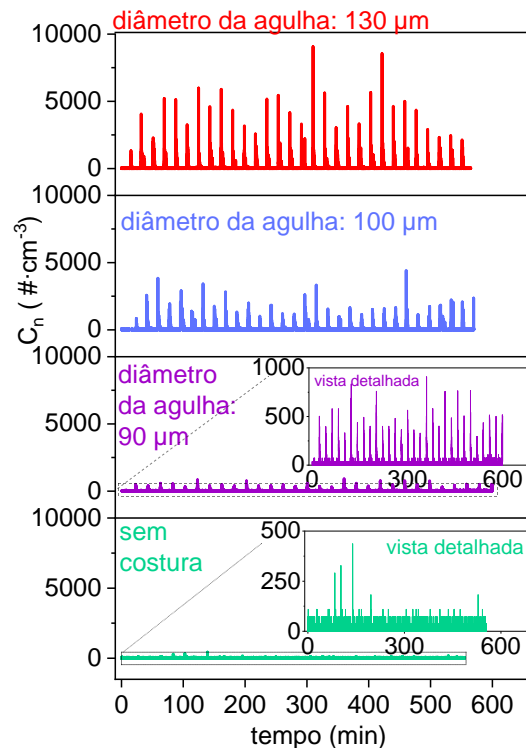


Fonte: Acervo pessoal.

Além disso, observa-se que para as amostras com diâmetro de agulha de 100  $\mu\text{m}$  e 130  $\mu\text{m}$  ainda ocorreu um pico de emissão de partículas devido à penetração inicial no início do ciclo, mostrado pelos retângulos rosas, antes do primeiro pulso de limpeza. Isto mostra que, nesta fase, os orifícios da costura ainda estavam abertos e propensos à penetração direta mesmo após o envelhecimento. Durante o pulso de limpeza, possivelmente os orifícios da costura expandiram-se, o que levou a picos mais altos (maior pico de emissão) e mais amplos (emissão detectada durante um período mais longo). As concentrações médias durante 30 ciclos foram 4,33  $\# \cdot \text{cm}^{-3}$ , 9,36  $\# \cdot \text{cm}^{-3}$ , 60,74  $\# \cdot \text{cm}^{-3}$  e 105,65  $\# \cdot \text{cm}^{-3}$  para as amostras sem costura, com diâmetros de agulha de 90  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , e 130  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

Na Figura 44, etapa de medição, última etapa do procedimento de filtração adaptado da norma VDI 3926, não são observadas grandes alterações nas amostras sem costura e com diâmetro de agulha de 90  $\mu\text{m}$ , quando comparado à etapa de estabilização (Figura 43).

**Figura 44 - Concentração em número de partículas ao longo do tempo para as amostras sem costura (verde) e com diâmetros de agulha de 90  $\mu\text{m}$  (roxo), 100  $\mu\text{m}$  (azul) e 130  $\mu\text{m}$  (vermelho), durante o estágio de medição. Os retângulos rosas representam os picos antes do primeiro pulso de limpeza.**



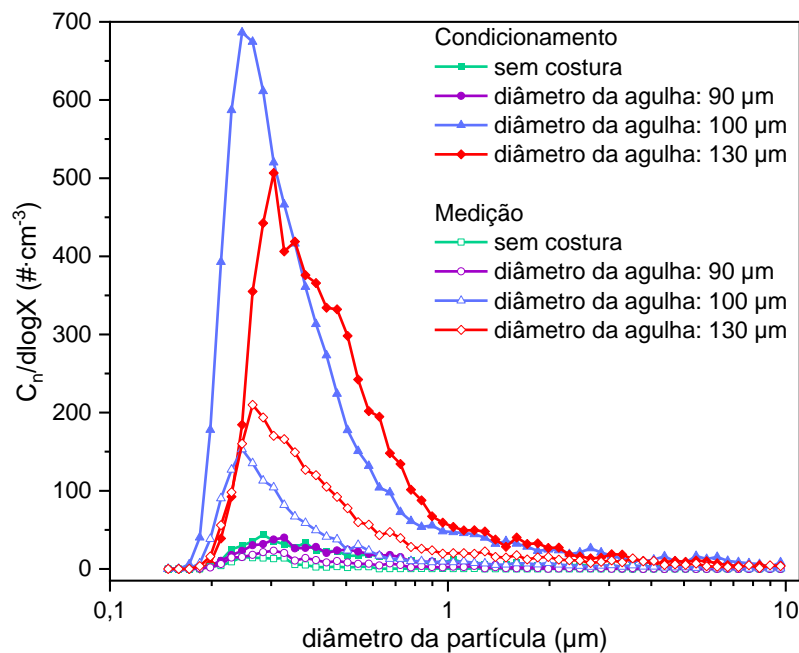
Fonte: Acervo pessoal.

Entretanto, as amostras com diâmetro de agulha de 100  $\mu\text{m}$  e 130  $\mu\text{m}$  continuaram a apresentar um declínio nas emissões de partículas, principalmente em relação aos picos de concentração. As concentrações médias durante 30 ciclos foram de 5,43  $\# \cdot \text{cm}^{-3}$ , 10,30  $\# \cdot \text{cm}^{-3}$ , 55,15  $\# \cdot \text{cm}^{-3}$  e 85,91  $\# \cdot \text{cm}^{-3}$  para as amostras sem costura, com diâmetros de agulha de 90  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  e 130  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Após as quatro etapas do procedimento de filtração (condicionamento, envelhecimento, estabilização e medição), a costura das amostras com maiores diâmetros de agulha, 100  $\mu\text{m}$  e 130  $\mu\text{m}$ , ainda apresentaram impacto nas emissões. As amostras sem costura e com diâmetro de agulha de 90  $\mu\text{m}$  apresentaram valores similares aos da fase de estabilização, mostrando que essas amostras atingiram uma estabilidade média de emissões, ou seja, houve fechamento dos furos da costura e dos poros do meio filtrante.

#### 5.2.4 DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS NO GÁS FILTRADO DURANTE AS ETAPAS DE CONDICIONAMENTO E DE MEDIÇÃO

A Figura 45 apresenta a distribuição granulométrica no lado do gás filtrado para cada amostra avaliada, sem costura e com costura (com diâmetros de agulha de 90  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  e 130  $\mu\text{m}$ ), no primeiro e último estágios do procedimento de filtração adaptado da norma VDI 3926, condicionamento e medição.

**Figura 45 - Distribuição do tamanho de Pural SB® nas emissões medidas via sistema Palas® no lado do gás limpo durante os primeiros 90 minutos dos estágios de condicionamento e medição.**



Fonte: Acervo pessoal.

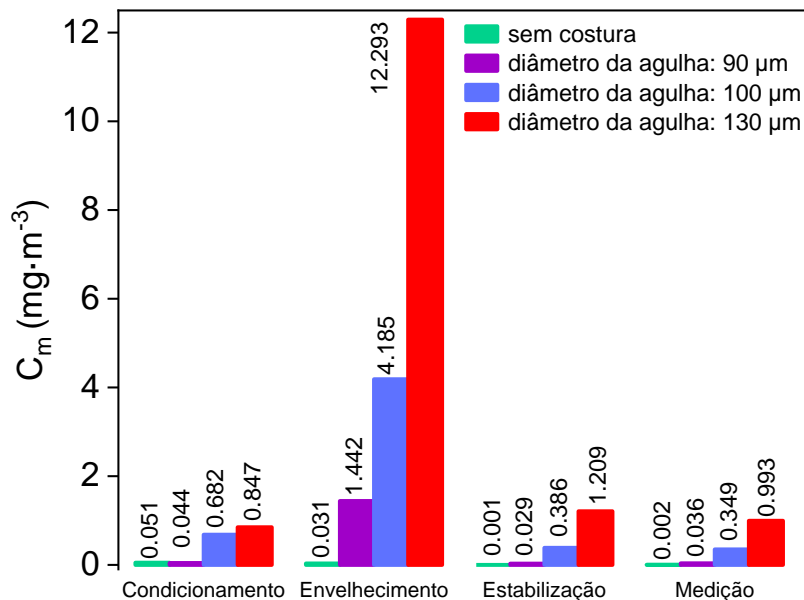
Ao analisar a distribuição granulométrica nessas duas etapas, as emissões principalmente submicrômicas mudaram ao longo do procedimento para os diferentes diâmetros de agulha. As concentrações no gás filtrado são maiores para as amostras com furos de costura maiores, em ambos os estágios. Em comparação à amostra sem costura, nessas amostras com costura ocorre o mecanismo de penetração direta através dos poros do meio filtrante e através dos orifícios da costura. Para os orifícios maiores, há menos impactação inercial e, portanto, partículas maiores podem penetrar o meio filtrante e chegar até o lado do gás filtrado. Estes resultados concordam com os resultados encontrados por Bach; Schmidt (2007) ao analisar *pinholes* com diâmetros definidos. Ao avaliar diferentes tamanhos de furos, os autores descobriram que furos maiores levaram a distribuições de tamanho com partículas mais grosseiras. As amostras sem costura e com costura com diâmetro de agulha de 90  $\mu\text{m}$  apresentaram distribuição de tamanho muito semelhante em ambas as fases. Na amostra com diâmetro de agulha de 90  $\mu\text{m}$ , a velocidade intersticial

aumentou consideravelmente nos furos da costura e favoreceu o mecanismo de coleta por impactação inercial, o que tornou a coleta de partículas mais eficiente. A razão para o maior nível de concentração da amostra de 100  $\mu\text{m}$  em comparação à amostra de 130  $\mu\text{m}$  durante o condicionamento corresponde aos picos de emissão inicialmente maiores detectados durante essa fase (comparar com Figura 41).

### 5.2.5 DESENVOLVIMENTO DA CONCENTRAÇÃO MÉDIA EM MASSA DURANTE O PROCEDIMENTO DE FILTRAÇÃO ADAPTADO DA NORMA VDI 3926

As concentrações médias em massa em cada etapa do procedimento de filtração adaptado da norma VDI 3926 (Figura 32) são apresentadas para cada amostra na Figura 46, em que os diferentes níveis de emissão das quatro amostras podem ser claramente distinguidos. As concentrações médias em massa das amostras com costura foram maiores para diâmetros de agulha maiores em todas as etapas do procedimento de teste.

**Figura 46 - Concentração média em massa durante as etapas de condicionamento, envelhecimento, estabilização e medição para cada amostra avaliada.**



Fonte: Acervo pessoal.

A amostra sem costura apresentou uma redução na concentração média em massa porque os poros e defeitos menores da membrana do meio filtrante foram fechados durante o procedimento de filtração e as partículas maiores não foram mais capazes de penetrar o meio filtrante. Nas amostras com costura, além do mecanismo de penetração direta através do meio filtrante, houve também a penetração através dos orifícios da costura. A amostra com diâmetro de agulha de 130  $\mu\text{m}$  apresentou aumento na concentração média em massa desde o estágio de condicionamento até o estágio de medição, o que indica que essa amostra ainda apresenta uma forte influência da costura nas emissões. Esse resultado apontou que o procedimento de

filtração adaptado da norma VDI 3926, incluindo os quatro estágios esquematizados na Figura 32, não foi suficiente para selar permanentemente os orifícios da costura ou mesmo aumentar a separação das partículas na amostra com diâmetro de agulha de 130  $\mu\text{m}$ .

### 5.2.6 POROSIDADE DA TORTA DE FILTRAÇÃO

A porosidade da torta em cada amostra (sem costura, com diâmetro da agulha de 90, 100 e 130  $\mu\text{m}$ ) foi determinada pelo método indireto, utilizando as equações de *Ergun*, *McDonald* e *Kozeny-Carman*, com os dados do último ciclo da etapa de medição pertencente ao procedimento de filtração adaptado da norma VDI 3926. Os valores obtidos por cada equação estão apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12 - Porosidade da torta pelo método indireto, utilizando as equações de Ergun, McDonald e Kozeny-Carman, para as amostras sem costura, com diâmetros de agulha de 90, 100 e 130  $\mu\text{m}$ , no trigésimo ciclo da etapa de medição.**

Amostra	<i>Ergun</i>	<i>McDonald</i>	<i>Kozeny-Carman</i>
Sem costura	0,566	0,605	0,599
Diâmetro da agulha: 90 $\mu\text{m}$	0,574	0,613	0,608
Diâmetro da agulha: 100 $\mu\text{m}$	0,569	0,609	0,603
Diâmetro da agulha: 130 $\mu\text{m}$	0,569	0,608	0,603

Fonte: Acervo pessoal.

Para avaliar os resultados obtidos na Tabela 12, fez-se necessário explicitar o tempo de filtração deste último ciclo e a queda de pressão inicial de cada meio filtrante no início do trigésimo ciclo da etapa de medição. Os valores estão mostrados na Tabela 13.

**Tabela 13 - Tempo para completar o trigésimo ciclo na etapa de medição e queda de pressão inicial no início desse ciclo, para as amostras sem costura, com diâmetros de agulha de 90, 100 e 130  $\mu\text{m}$ .**

Amostra	Tempo de filtração do 30° ciclo / min	$\Delta p_0$ do meio filtrante no início do 30° ciclo / Pa
Sem costura	18,25	286,19
Diâmetro da agulha: 90 $\mu\text{m}$	20,00	264,59
Diâmetro da agulha: 100 $\mu\text{m}$	19,08	274,36
Diâmetro da agulha: 130 $\mu\text{m}$	19,18	271,28

Fonte: Acervo pessoal.

Comparando os valores de porosidade da torta da amostra sem costura, que é a de menor permeabilidade, mostrado pelo maior  $\Delta p_0$  na Tabela 13, e as amostras com costura com diferentes diâmetros de agulha, tem-se que a amostra sem costura é a de menor

porosidade para todas as equações utilizadas, seguindo a mesma tendência discutida na seção 4.1.5: meios filtrantes com menor permeabilidade formam tortas mais compactas. Esse resultado também corrobora o que foi encontrado para o tempo para completar 30 ciclos na fase de medição, no qual a amostra sem costura foi a que apresentou o menor tempo (Tabela 13). Comparando os valores apenas entre as amostras com costura, nota-se que a amostra com diâmetro de agulha igual a 90  $\mu\text{m}$  foi a que apresentou a maior porosidade. Já as amostras com diâmetros de agulha de 100 e 130  $\mu\text{m}$  apresentaram o mesmo valor de porosidade e este foi inferior à amostra com 90  $\mu\text{m}$ , para todas as equações avaliadas. Esse resultado pode ser justificado pela maior permeabilidade da amostra com 90  $\mu\text{m}$  nesta fase de medição. Ao comparar a queda de pressão dos meios filtrantes no início do trigésimo ciclo, tem-se que a amostra com 90  $\mu\text{m}$  apresentou a menor queda de pressão, o que aponta para uma permeabilidade maior (Tabela 13).

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho investigou a influência da costura no desempenho de filtração de amostras retiradas de mangas filtrantes P84 em diferentes estágios da vida útil e de amostras de meios filtrantes PE/PTFE costurados com agulhas de diferentes diâmetros (90, 100 e 130  $\mu\text{m}$ ). A partir dos objetivos propostos no capítulo 2 e dos resultados apresentados no capítulo 5, pode-se concluir:

Em relação aos ensaios realizados com as amostras de mangas P84 virgem, com 10 meses e com 3 anos de uso:

- ✓ quanto maior o tempo de uso da manga menos pronunciada é a diferença nos valores das constantes de permeabilidade das amostras sem e com costura, o que indica que os furos já não são mais reabertos pelo pulso de limpeza e que a manga alcançou uma estabilidade na resistência ao escoamento de ar;
- ✓ em relação à eficiência de coleta de micropartículas, obteve-se que o tempo de uso da manga leva ao fechamento dos poros e furos da costura, de modo que as partículas são coletadas com eficiência muito próxima a 100% nas amostras com 10 meses de uso, sem e com costura. Entretanto, quando as amostras ainda estão virgens, há uma maior diferença na eficiência de coleta entre as amostras sem e com costura, pois a torta formada não cobre homogeneamente a região da costura e os furos são caminhos preferenciais;
- ✓ nos experimentos de eficiência de coleta de nanopartículas, as amostras sem e com costura apresentaram o mesmo comportamento da curva de eficiência, na qual as partículas menores foram capturadas eficientemente pelo mecanismo de difusão e à medida em que o diâmetro das partículas aumentou a eficiência reduziu devido à competição entre os mecanismos de deposição;
- ✓ nos ensaios de filtração no equipamento VDI 3926, os resultados mostraram que as amostras usadas com costura levaram maior tempo para completar os 30 ciclos da fase de medição. Com o tempo de uso, as amostras sem e com costura tornaram-se mais semelhantes, já que tanto os poros do meio filtrante quanto os furos da costura foram preenchidos com o pó. Além disso, o tempo de uso das mangas apresentou maior influência nas amostras com costura, já que a diferença entre o tempo para completar 30 ciclos das amostras com costura com 10 meses de uso e com 3 anos de uso foi aproximadamente três vezes superior à diferença das amostras sem costura;



- ✓ com relação à porosidade da torta, as três equações utilizadas (*Ergun*, *MacDonald* e *Kozeny-Carman*) mostraram que amostras com maior constante de permeabilidade ao ar proporcionaram a formação de tortas menos compactas, ou seja, com maior porosidade, o que conseqüentemente induziu uma queda de pressão reduzida na torta e proporcionou ciclos de filtração mais longos.

Em relação aos ensaios dos meios filtrantes PE/PTFE costurados com diferentes diâmetros de agulha (90, 100 e 130  $\mu\text{m}$ ):

- ✓ na eficiência de separação fracionária, os resultados indicaram que agulhas com diâmetros maiores levaram a menores eficiências, e a amostra sem costura apresentou a maior eficiência (separação de quase 100%);
- ✓ a comparação das quatro amostras nas etapas de condicionamento e medição mostrou que os diâmetros de agulha avaliados tiveram uma influência pouco significativa no tempo necessário para completar os ciclos de filtração e na queda de pressão, entretanto, houve uma pequena influência comparando a amostra sem costura com as outras com furos de costura;
- ✓ quando analisando as quatro amostras em relação às emissões (concentração em número ao longo do tempo durante as quatro fases do procedimento de filtração adaptado da norma VDI 3926), foi observado que as amostras sem costura e com diâmetro de agulha de 90  $\mu\text{m}$  atingiram uma estabilidade média de emissão (menor flutuação em altura de pico) durante todo o procedimento. As amostras com diâmetros de agulha de 100 e 130  $\mu\text{m}$  continuaram a mostrar uma maior influência da costura nas emissões;
- ✓ quanto à distribuição do tamanho das partículas no gás filtrado durante o primeiro e o último estágios do procedimento de filtração, condicionamento e medição, foi observado que o número de partículas no lado do gás filtrado foi maior para as duas amostras com maiores diâmetros de agulha (100 e 130  $\mu\text{m}$ ), enquanto o número de partículas das amostras sem costura e com diâmetro de agulha de 90  $\mu\text{m}$  foi bastante similar devido ao mecanismo de coleta de impactação inercial, favorecido na amostra com diâmetro de agulha de 90  $\mu\text{m}$ ;
- ✓ quanto ao desenvolvimento da concentração em massa no procedimento de filtração, os níveis de emissão de cada meio filtrante foram claramente distinguidos devido aos diferentes comportamentos de penetração através dos poros e dos furos de costura. Os resultados indicaram uma forte influência do diâmetro da agulha utilizada para costurar o meio filtrante nas emissões.

- ✓ a amostra sem costura apresentou a menor porosidade para todas as equações utilizadas; comparando os valores apenas entre as amostras com costura, nota-se que a amostra com diâmetro de agulha igual a 90  $\mu\text{m}$  foi a que apresentou a maior porosidade.

# SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros propõe-se avaliar mangas filtrantes soldadas e com fitas adesivas selantes, de modo a obter a perda de área filtrante e o aumento na queda de pressão, para correlacionar com as emissões de mangas filtrantes com costura aberta. Além disso, podem ser investigadas outros tipos de costura, como por exemplo costuras cruzadas, para avaliar a influência da disposição da linha no tecido nas emissões.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AccuPyc 1330 Quick Reference Guide. 1990.

AGUIAR, M. L.; COURY, J. R. Cake formation in fabric filtration of gases. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 35, n. 10, p. 3673–3679, 1996.

ALEKSANDROV, V. P.; BARANOVA, R. B.; VALDBERG, A. Y. Filter materials for bag filters with pulsed regeneration. **Chemical and Petroleum Engineering**, v. 46, n. 1, p. 33–39, 2010.

ALLEN, T. **Particle Size Measurement**. London, UK.

BACH, B.; SCHMIDT, E. Influence of leaks in surface filters on particulate emissions. **Filtration**, v. 7, n. 3, p. 235–239, 2007.

BÄCHLER, P.; SZABADI, J.; MEYER, J.; DITTLER, A.. Simultaneous measurement of spatially resolved particle emissions in a pilot plant scale baghouse filter applying distributed low-cost particulate matter sensors. **Journal of Aerosol Science**, v. 150, 2020.

BÄCHLER, P.; LÖSCHNER, V.; MEYER, J.; DITTLER, A. Process integrated monitoring of spatially resolved particle emissions of a baghouse filter using a network of low-cost PM-sensors. **Process Safety and Environmental Protection**, 2022.

BÄCHLER, P.; MEYER, J.; DITTLER, A. Characterization of the emission behavior of pulse-jet cleaned filters using a low-cost particulate matter sensor. v. 79, p. 443–450, 2019.

BÄCHLER, P.; MEYER, J.; DITTLER, A. Measurement of transient nanoparticle emissions of pulse-jet cleaned filters applying an engine exhaust particle sizer. **Aerosol Science and Technology**, v. 0, n. 0, p. 1–9, 2022.

BAO, L.; MUSADIQ, M.; KIJIMA, T.; KENMOCHI, K.. Influence of fibers on the dust dislodgement efficiency of bag filters. **Textile Research Journal**, v. 84, n. 7, p. 764–771, 2014.

BARROS, P. M.; TANABE, E. H.; AGUIAR, M. L. Performance of fibrous filters during nanoparticle cake formation. **Separation Science and Technology (Philadelphia)**, v. 51, n. 6, p. 1042–1052, 2015.

BORTOLASSI, A. C. 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, 2017.

BOUDHAN, R.; JOUBERT, A.; GUERAOU, K.; DURÉCU, S.; VENDITTI, D.; TRAN, D. T.; LE COQ, L. Pulse-Jet Bag Filter Performances for Treatment of Submicronic and Nanosized Particles from Waste Incineration. **Waste and Biomass Valorization**, v. 9, n. 5, p. 731–737, 2018.

Boudhan, R.; Joubert, A.; Durécu, S.; Gueraoui, K.; Le Coq, L. Influence of air humidity on particle filtration performance of a pulse-jet bag filter. v. 130, n. November 2018, p. 1–9, 2019.

CARR, R. C. Fabric Filter Technology for Coal-Fired Power Plants. **Journal of the Air Pollution Control Association**, v. 36, n. 6, p. 763–770, 1986.

CHENG, Y.-H.; TSAI, C.-J. Factors Influencing Pressure Drop through a Dust Cake during Filtration. **Aerosol Science and Technology**, v. 29, n. 4, p. 315–328, 1998.

CIRQUEIRA, S. S. R.; TANABE, E. H.; AGUIAR, M. L. Evaluation of operating conditions during the pulse jet cleaning filtration using different surface treated fibrous filters. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 105, p. 69–78, 2017.

CIRQUEIRA, S. S. R.; TANABE, E. H.; AGUIAR, M. L. Experimental investigation of particle deposition in filter media during filtration cycles with regeneration by pulse jet cleaning. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 127, p. 288–298, 2019.

CONAMA. Resolução CONAMA n°5/1989. 1989.

CONAMA. Resolução CONAMA n° 3/1990. 1990.

CONAMA. Resolução CONAMA n° 8/1990. 1990.

CONAMA. Resolução CONAMA n° 382/2006. 2006.

CONAMA. Resolução CONAMA n° 436/2011. 2011.

CONAMA. Resolução CONAMA n° 491/2018. 2018.

COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. **Air Pollution Control: A Design Approach**. [s.l: s.n.].

CORA, M. G.; HUNG, Y. T. Controlling industrial particulate emissions: A practical overview of baghouse technology. **Environmental Quality Management**, v. 11, n. 4, p. 53–64, 2002.

DE BARROS, P. M.; TANABE, E. H.; AGUIAR, M. L. Characterization and efficiency evaluation of regenerated filter media. **Materials Science Forum**, v. 727–728, p. 1643–1647, 2012.

DITTLER, A.; UMHAUER, H. F. The influence of conditioning and regeneration on the separation behaviour of rigid surface filters for the separation of particles from gases. **Powder Technology**, v. 120, n. 3, p. 223–231, 2001.

DONOVAN, R. P. Fabric filtration for combustion sources: Fundamentals and basic technology. New York: Marcel Dekker, Inc., 1985.

ENDO, Y.; CHEN, D.-R.; PUI, D. Y. H. Effects of particle polydispersity and shape factor during dust cake loading on air filters. **Powder Technology**, v. 98, n. 3, p. 241–249, 1998.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, v. 48, p. 89–94, 1952.

FEITOSA, N. R. Desempenho de meios filtrantes na remoção de partículas nanométricas de aerossóis. Universidade Federal de São Carlos, 2009.

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

HUTTEN, I. M. *Handbook of nonwoven filter media*. Waltham, MA, USA: Elsevier, 2016.

ITO, L. X.; AGUIAR, M. L. A study of the porosity of gas filtration cakes. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 26, n. 2, p. 307–315, 2009.

JAWOREK, A.; SOBCZYK, A. T.; KRUPA, A.; MARCHEWICZ, A.; CZECH, T.; ŚLIWIŃSKI,

L.Hybrid electrostatic filtration systems for fly ash particles emission control. A review. **Separation and Purification Technology**, v. 213, p. 283–302, 2019.

KANAOKA, C. Fine particle filtration technology using fiber as dust collection medium. **KONA Powder and Particle Journal**, v. 36, n. 36, p. 88–113, 2019.

KURTZ, O.; MEYER, J.; KASPER, G. The contribution of small leaks in a baghouse filter to dust emission in the PM<sub>2.5</sub> range—A system approach. **Particuology**, v. 30, p. 40–52, 2017.

LEE, K. W.; LIU, B. Y. W. On the minimum efficiency and most penetrating particle size for fibrous filters. **Journal of Air Pollution Control Association**, v. 30, p. 377–381, 1980.

LI, J.; WU, Q.; HUANG, Y. SUN, Z.; LI, J.; WU, D. Particulate matters filtration by a filter medium with pin holes: modeling and experimental verification. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 158, p. 282–290, 2022.

LI, S.; WANG, F.; XIN, J.; XIE, B.; HU, S.; JIN, H.; ZHOU, F. 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.

LUPION, M.; RODRIGUEZ-GALAN, M.; ALONSO-FARIÑAS, B.; GUTIERREZ ORTIZ, F. J. Investigation into the parameters of influence on dust cake porosity in hot gas filtration. **Powder Technology**, v. 264, p. 592–598, 2014.

MACDONALD, I. F.; EL-SAYED, M. S.; MOW, K.; DULLIEN, F. A. L. Flow through Porous Media—the Ergun Equation Revisited. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 18, n. 3, p. 199–208, 1979.

MEDEIROS, S. F. Curso de Operação do Medidor de Tamanho de Partículas Malvern Mastersizer Micro / Mastersizer MicroPlus Sérgio Fernando de Medeiros Enigma Key Informática e Eletrônica Ltda. 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/fontes-fixas.html>>. Acessado em Ago. 2022.

MOURET, G.; THOMAS, D.; CHAZELET, S.; APPERT-COLLIN, J. C.; BEMER, D. Penetration of nanoparticles through fibrous filters perforated with defined pinholes. **Journal of Aerosol Science**, v. 40, n. 9, p. 762–775, 2009.

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, 2009.

MUKHOPADHYAY, A.; CHOUDHARY, A. K. Characterization of dust particles emitted through pulse-jet fabric filters during industrial pollution control. **Particulate Science and Technology**, v. 31, n. 6, p. 632–642, 2013.

MUKHOPADHYAY, A.; MAHAWAR, G. Effect of leaks on performance of a fabric filter in pulse jet cleaning assisted filtration system. **Indian Journal of Fibre & Textile Research**, v. 45, p. 326–331, 2020.

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.

NETO, O. G. S.; AGUIAR, M. L.; COURRY, J. R. R. Filtração de gás em filtro de manga: estudo da porosidade. **Revista Universidade Rural**, v. 21, p. 187–195, 2002.

PACHECO, T. A. Filtros de manga: Como obter o rendimento máximo dos filtros de manga. **Química e Derivados**, 2002.

PACHECO, T. A. DE ALMEIDA. A história do controle da poluição atmosférica. v. 4, 2006.

PATNAIK, A.; ANANDJIWALA, R. D. Reasons for filter bag failure and method development to improve its life span. **Chemical Engineering and Technology**, v. 39, n. 3, p. 529–534, 2016.

QIN, W.; DEKERMENJIAN, M.; MARTIN, R. J. Prediction of particulate loading in exhaust from fabric filter baghouses with one or more failed bags. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 56, n. 8, p. 1177–1183, 2006.

Remus, R.; Monsonet, M. A. A.; Roudier, S.; Sancho, L. D. Best available techniques - reference document for iron and steel production, 2013.

ROCHA, S.M.S.; VASCONCELOS, C.B.; VIEIRA, L. G. M.; AGUIAR, M.L.; DAMASCENO, J. J. R. The influence of the velocity of filtration in the formation and removal the dust cake. **Materials Science Forum**, v. 660–661, p. 46–51, 2010.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**.

SANCHEZ, J. R.; RODRIGUEZ, J. M.; ALVARO, A.; ESTEVEZ, A. M. Comparative study of different fabrics in the filtration of an aerosol using more complete filtration indexes. **Filtration & Separation**, v. 34, n. 6, p. 593–598, 1997.

SCHILLER, S.; SCHMID, H. J. Ultrafine dust filtration using precoat materials considering the influence of filter media. **Chemical Engineering and Technology**, v. 37, n. 6, p. 1009–1020, 2014.

SHTYKA, O.; PRZYBYSZ, Ł.; BŁASZCZYK, M.; SEŃK, J. Kozeny-Carman theory for modeling of porous granular structures saturation with emulsion during imbibition process. **Plos One**, v. 12, p. 1-11.

SILVA, C.R.N.; NEGRINI, V. S.; AGUIAR, M.L.; COURY, J.R. Influence of gas velocity on cake formation and detachment.pdf. **Powder Technology**, p. 165–172, 1999.

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

STABILE, L.; Scungio, M.; Frattolillo, A.; Buonanno, G.. Effects of the flue gas treatment of incinerator plants on sub-micron particle concentrations at the stack. **Waste Management**, v. 101, p. 9–17, 2020.

STF. SUPREMO TRIBUNAL FEDERAL. Conama deve editar nova resolução sobre qualidade do ar em dois anos, decide STF. Disponível em: <<https://portal.stf.jus.br/noticias/verNoticiaDetalhe.asp?idConteudo=486515&ori=1>>. Acessado em Ago.2022.

SUTHERLAND, W. The viscosity of gases and molecular force. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, p. 507-531, 1893.

Tanabe, E. H.; Barros, P. M.; Rodrigues, K. B.; Aguiar, M. L.. Experimental investigation of deposition and removal of particles during gas filtration with various fabric filters. **Separation**

**and Purification Technology**, v.80, p. 187-195, 2011.

THOMAS, D.; CHARVET, A.; BARDIN-MONNIER, N.; APPERT-COLLIN, J.-C. *Aerosol Filtration*. London: ISTE Press Ltd, 2017.

TIAN, E.; MO, J.; LI, X. Electrostatically assisted metal foam coarse filter with small pressure drop for efficient removal of fine particles: effect of filter medium. **Building and Environment**, v. 144, p. 419–426, 2018.

TOMANOVICH, J.; KNOTTS, J. **Filter bag seams as a source of particulate matter (PM) emissions**. IEEE Cement Industry Technical Conference (Paper). **Anais...**2013

TSl. Diffusion dryer 3062. 2003.

TSl. Ultrafine Condensation Particle Counter. 2006a.

TSl. Aerodynamic Particle Sizer: user's manual. 2006b.

TSl. Electrostatic Classifiers SERIES 3080. 2008.

TSl. Portable Atomizer Aerosol Generator Model 3079A. n. January, 2014.

Turner, J. H; Mckenna, J. D; Mycock, J. C.; Nunn, A. B.; Vatavuk, W. M. Particulate Matter Controls: baghouses and filters. In: **Handbook of Air Pollution Technology**. New York: [s.n.].

WALSH, D. C. Recent Advances in the Understanding of Fibrous Filter Behaviour under Solid Particle Load. **Filtration and Separation**, v. 33, n. 6, p. 501–506, 1996.

WHEAT, J. A. The airflow resistance of glass fiber filter paper. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 41, p. 67-72, 1963.

WHO. World Health Organization. WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. 2005.

WHO. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, 2021.

WHO. World Health Organization, 2022. Disponível em: <<https://www.who.int/data/gho/data/themes/theme-details/GHO/air-pollution>>. Acessado em Ago.2022.

XIE, B.; LI, S.; CHU, W.; LIU, C.; HU, S.; JIN, H.; ZHOU, F. Improving filtration and pulse-jet cleaning performance of metal web filter media by coating with polytetrafluoroethylene microporous membrane. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 136, p. 105–114, 2020.

ZAPASNYI, V. V.; ASANOV, D. A.; TAKEEV, K. B.; ERMEKOVA, A. T.; IVANOV, A. A. Environmental protection improvement of fabric-filter cleaning of process and ventilation gases at the Kazzinc LLC Ust-Kamenogorsk metallurgical complex. *Metallurgist*, v. 62, n. 7–8, p. 611–617, 2018.

ZHENG, C.; KANAOKA, C. Recent advances in dust collection technology and ISO standardization in bag filtration. **Applied Physics & Engineering**, v. 19, n. 1, p. 21–33, 2018.



ZUKERAN, A.; LOOY, P. C.; CHAKRABARTI, A.; BEREZIN, A. A.; JAYARAM, S.; CROSS, J. D.; ITO, T.; CHANG, J. S. Collection efficiency of ultrafine particles by an electrostatic precipitator under DC and pulse operating modes. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 35, n. 5, p. 1184–1191, 1999.