

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

ANA CRISTINA COELHO VIEIRA

**ANÁLISE DE MEIOS FILTRANTES EM FILTROS DE MANGAS DO
PROCESSO DE DESSULFURAÇÃO DA SIDERURGIA**

São Carlos - SP
2024

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

ANA CRISTINA COELHO VIEIRA

**ANÁLISE DE MEIOS FILTRANTES EM FILTROS DE MANGAS DO PROCESSO
DE DESSULFURAÇÃO DA SIDERURGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos em 18 de julho de 2024, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientação: Prof.^a Dr.^a Mônica Lopes Aguiar
Coorientação: Prof. Dr. Rafael Sartim

São Carlos - SP
2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Ana Cristina Coelho Vieira, realizada em 18/07/2024.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Mônica Lopes Aguiar (UFSCar)

Profa. Dra. Bárbara Karolinne Silva Araújo Andrade (ArcelorMittal)

Profa. Dra. Vádila Giovana Guerra Béttega (UFSCar)

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

*“Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível, e de repente você
estará fazendo o impossível”.*

São Francisco de Assis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que iluminou meu caminho nos momentos de dúvida e me dar forças para enfrentar os desafios. Por sempre cuidar de mim e proporcionar-me chegar até este momento.

À professora Dr^a. Mônica Lopes Aguiar, agradeço a oportunidade, por sua orientação, apoio, paciência e por compartilhar sua sabedoria ao longo deste tempo.

Aos meus pais, Maria Aparecida e Raimundo que me ajudaram e apoiaram desde o início, com muito amor e confiança. A meu irmão Felipe e minha cunhada Jussara, companheiros de profissão e de vida, obrigada por todo apoio, incentivo e amor que me deram nessa jornada.

A toda a minha família e amigos. Mesmo à distância, vocês estiveram sempre ao meu lado, me apoiando e oferecendo todo o suporte necessário. Seu amor, incentivo e presença foram essenciais para que eu pudesse alcançar este momento.

Ao Dr. Rafael Sartim pela coorientação e a Arcelor Mittal pelo apoio financeiro e pelo fornecimento dos materiais utilizados no projeto.

Ao técnico do Laboratório de Controle Ambiental, Marcos, pela disponibilidade, atenção e ajuda durante todo o período da pesquisa.

A todos da salinha, minha sincera gratidão. Cada um de vocês contribuíram para tornar essa jornada mais leve e significativa. Agradeço pelos momentos de descontração, pelos ensinamentos compartilhados e pelo apoio mútuo, que foram essenciais para enfrentar a distância e a saudade de casa.

Ao Departamento de Engenharia Química (DEQ) da UFSCar, ao Laboratório de Controle Ambiental (LCA/DEQ/UFSCar) e ao Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE/DEMa/UFSCar) pela generosa disponibilidade das instalações e equipamentos necessários para a realização dos experimentos e análises.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo nº 131790/2022-6 e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES/PROEX - Código Financeiro 001, pelo auxílio financeiro.

Agradeço a todos que, de alguma maneira, contribuíram para tornar este momento possível. Sua ajuda e apoio foram fundamentais.

RESUMO

As emissões de partículas ultrafinas no ar são consideradas um problema global. O aumento está ligado ao desenvolvimento econômico e da extensa expansão urbana. Essas partículas são inaláveis e a exposição a elas pode causar diversos tipos de doenças, ou até mesmo levar à morte. Como resultado, houve a necessidade de desenvolver e otimizar métodos e equipamentos para controlar as suas emissões. Neste contexto, o filtro de mangas destaca-se como um dos filtros mais utilizados atualmente, devido à sua alta eficiência de filtração e estabilidade. No entanto, o tipo de meio filtrante utilizado interfere diretamente na eficiência de filtração e a forma como o meio filtrante é fabricado, como feltro agulhado e hidrojetado, também afeta na eficiência e vida útil. Diante da lacuna existente na literatura sobre a influência da técnica de fabricação do meio filtrante na eficiência de filtração e do impacto dos mesmos no meio industrial, o objetivo desta pesquisa é analisar e comparar o desempenho de filtração de meios filtrantes fabricados pelas técnicas de feltro agulhado e hidrojetado, virgens e com tempos de uso de 3 e 4 anos, no filtro de mangas do processo de dessulfuração da indústria siderúrgica. O material particulado e os meios filtrantes utilizados foram caracterizados, para compreender seu comportamento nos testes de filtração. Os testes de filtração foram realizados em um filtro teste baseado na norma VDI 3926, com limpeza por jato pulsante, avaliando a eficiência de coleta e a evolução da queda de pressão durante 30 ciclos de filtração. Os resultados de caracterização do material particulado mostraram que ele é composto predominantemente por cálcio e ferro, e apresenta um diâmetro aerodinâmico mediano de 2,64 μm . O meio filtrante hidrojetado apresentou espessura e permeabilidade menores em relação ao agulhado, além de um diâmetro de fibra maior. Consequentemente, a penetração do material particulado no interior do hidrojetado foi menor, facilitando o processo de limpeza das mangas e aumentando a eficiência da filtração. Após 30 ciclos de filtração, o meio filtrante hidrojetado usado alcançou eficiência de cerca de 99,9%, enquanto o meio filtrante agulhado atingiu aproximadamente 99,7%. Quanto à vida útil ao longo dos anos, as mangas com 4 anos de uso apresentaram maior queda de pressão residual que as mangas com 3 anos de uso, como esperado, devido ao acúmulo das partículas no meio filtrante ao longo do tempo. Porém, o aumento da queda de pressão residual foi menor para a manga hidrojetada do que para a agulhada, resultando em uma maior vida útil. Portanto, nas condições analisadas, o meio filtrante hidrojetado demonstrou-se mais eficaz, com uma longa vida útil e uma menor queda de pressão residual durante a filtração.

Palavras-chave: Filtração de Gases; Filtro de manga; Meios Filtrantes; Feltro agulhado; Hidrojateamento.

ABSTRACT

The emissions of ultrafine particles in the air are considered a global problem. The increase is linked to economic development and extensive urban expansion. These particles are inhalable, and exposure to them can cause various diseases or even lead to death. As a result, there has been a need to develop and optimize methods and equipment to control their emissions. In this context, bag filters stand out as one of the most commonly used filters due to their high filtration efficiency and stability. However, the filter medium used directly affects filtration efficiency, and how the filter medium is manufactured—such as needle felt and hydroentangled felt—also impacts efficiency and lifespan. Given the existing gap in the literature regarding the influence of filter medium manufacturing techniques on filtration efficiency and their impact in industrial settings, the objective of this research is to analyze and compare the filtration performance of filter media manufactured using needle felt and hydroentangled felt techniques, both virgin and with 3- and 4-year usage, in the bag filter system of the desulfurization process in the steel industry. The particulate material and filter media used were characterized to understand their behavior during filtration tests. Filtration tests were conducted using a test filter based on the VDI 3926 standard, with pulse-jet cleaning, evaluating collection efficiency and pressure drop evolution over 30 filtration cycles. The results of particulate material characterization showed that it is predominantly composed of calcium and iron, with a median aerodynamic diameter of 2.64 μm . The hydroentangled filter medium, along with a larger fiber diameter, exhibited lower thickness and permeability compared to the needle felt. Consequently, the penetration of particulate material into the hydroentangled medium was lower, facilitating the cleaning process of the filter bags and increasing filtration efficiency. After 30 filtration cycles, the used hydroentangled filter medium achieved an efficiency of approximately 99.9%, while the needle-felt filter medium reached approximately 99.7%. Regarding lifespan over the years, the 4-year-old filter bags showed greater residual pressure drop than the 3-year-old bags, as expected due to particle accumulation in the filter medium over time. However, the increase in residual pressure drop was smaller for the hydroentangled bags than for the needle-felt bags, resulting in a longer lifespan. Therefore, under the analyzed conditions, the hydroentangled filter medium demonstrated greater effectiveness, with a longer lifespan and lower residual pressure drop during filtration.

Keywords: Gas Filtration; Bag filter; Filter Media; Needle-felt; Hydroentangled.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo Geral	16
2.2. Objetivo Específico	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1. Poluição atmosférica.....	17
3.2. Indústria Siderúrgica.....	18
3.3. Materiais Particulados	19
3.4. Filtração	20
3.5. Equipamentos para filtração de gases.....	21
3.6. Filtro Manga	23
3.7. Limpeza do meio filtrante.....	24
3.7.1 Vibração Mecânica.....	25
3.7.2 Ar Reverso.....	26
3.7.3 Pulso de Ar Reverso (ou jato pulsante).....	26
3.8. Ciclos de filtração	27
3.9. Meios Filtrantes	29
3.9.1 Fibras Naturais e Sintéticas	29
3.9.2 Produção dos meios filtrantes	30
3.10. Parâmetros de filtração	32
3.10.1 Queda de Pressão	32
3.10.2 Velocidade de Filtração.....	33
3.10.3 Permeabilidade	34
3.10.4 Porosidade do meio filtrante	35
3.10.5 Temperatura e Umidade	36
3.10.6 Eficiência de Coleta	36
3.11. Mecanismo de coleta de partículas.....	37
3.12. Norma VDI 3926	39
3.13. Estado d'arte	39
4. MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1. Caracterização do Material Particulado.....	42

4.2.	Caracterização do Meio Filtrante	47
4.3.	Testes de Filtração	54
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
6.	CONCLUSÃO	70
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
8.	REFERÊNCIAS	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de produção do aço.....	18
Figura 2 - Estrutura das mangas.	23
Figura 3 - Sistema de filtração do filtro de mangas.....	24
Figura 4 - Limpeza por vibração mecânica.	25
Figura 5 - Mecanismo de limpeza por jato pulsante.....	27
Figura 6 - Ciclo de filtração real e ideal.	28
Figura 7 - Processo de fabricação por feltro agulhado.	30
Figura 8 - Processo de fabricação por hidrojateamento das fibras.	31
Figura 9 - Mecanismo de coleta das partículas.....	37
Figura 10 - Número de publicações por ano de (a) meios filtrantes utilizados em filtros de mangas e (b) meios filtrantes em filtros de manga no meio industrial.....	40
Figura 11 - Amostra do pó de dessulfuração.....	42
Figura 12 - Distribuição granulométrica em volume de material particulado.....	43
Figura 13 - Distribuição granulométrica aerodinâmica (em massa) do material particulado. .	44
Figura 14 - MEV de quatro regiões do pó de dessulfuração, em escala de: 5 μm (a), 10 μm (b), 20 μm (c) e 50 μm (d).....	45
Figura 15 - Composição química do material particulado por EDS.....	46
Figura 16 - Meio filtrante feltro agulhado (a) e hidrojateado (b) virgens.	47
Figura 17 - Meio filtrante feltro agulhado (a) e hidrojateado (b) com 3 anos de uso.....	48
Figura 18 – Meio filtrante feltro agulhado (a) e hidrojateado (b) com 4 anos de uso.....	48
Figura 19 - Imagens do MEV dos meios filtrantes virgens agulhado (a) e hidrojateado (b). ..	49
Figura 20 – Imagens obtidas no MEV dos meios filtrantes agulhado de 3 (a) e 4 (c) anos e hidrojateado de 3 (b) e 4 (d) anos.	50
Figura 21 – Exemplo do modelo para realizar as medições do diâmetro das fibras.	51
Figura 22 – Histogramas de distribuição dos diâmetros de fibras dos meios filtrantes virgens agulhado (a) e hidrojateado (b).....	52
Figura 23 – Histogramas da média de distribuição dos diâmetros de fibras dos meios filtrantes agulhado de 3 (a) e 4 (c) anos e hidrojateado de 3 (b) e 4 (d) anos.....	52
Figura 24 - Esquema de funcionamento do filtro de acordo com o VDI 3926.	55
Figura 25 – Alimentador de pó na plataforma da balança.....	56
Figura 26 – Representação das amostras retiradas das mangas usadas.....	56
Figura 27 – Suporte do meio filtrante desmontado.	57
Figura 28 - Queda de pressão por tempo nos meios filtrantes virgens de feltro agulhado (a) e hidrojateado (b), considerando 30 ciclos de filtração.....	58
Figura 29 - Queda de pressão por tempo no meio filtrante feltro agulhado de 3 anos (a) e 4 anos (b), considerando 30 ciclos de filtração.....	60
Figura 30 - Queda de pressão por tempo no meio filtrante hidrojateado de 3 anos (a) e 4 anos (b), considerando 30 ciclos de filtração.....	62
Figura 31 - Queda de pressão residual por ciclo nos meios filtrantes virgens (a), com 3 anos (b) e com 4 anos (c), considerando 30 ciclos de filtração.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estrutura do índice de qualidade do ar.	17
Tabela 2 - Distribuição granulométrica volumétrica da amostra de material particulado.....	43
Tabela 3 - Análise de composição química do pó de dessulfuração.	47
Tabela 4 – Diâmetro médio dos meios filtrantes usados.	51
Tabela 5 - Caracterizações dos meios filtrantes usados de feltro agulhado e hidrojateado.....	53
Tabela 6 - Valores padrões dos testes de filtração.....	54
Tabela 7 - Dados do teste de filtração das mangas virgens, considerando os 30 ciclos.....	66
Tabela 8 - Dados do teste de filtração das mangas usadas, considerando os 30 ciclos.....	67

LISTA DE NOMECLATURA

ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnica
APS	<i>Aerodynamic Particle Sizer</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DEMa	Departamento de Engenharia da Materiais
DEQ	Departamento de Engenharia Química
EDS	Espectroscopia de Raios-X por Dispersão de Energia
FEG	<i>Field Emission Gun</i>
FRX	Fluorescência de raio X
LCA	Laboratório de Controle Ambiental I
LCE	Laboratório de Caracterização Estrutural
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MP	Material Particulado
NBR	Norma Brasileira
OMS	Organização Mundial da Saúde
PM _{2,5}	Partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 µm
PM ₁₀	Partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 10 µm
PTFE	Politetrafluoretileno
SE	Elétrons secundários
SI	Sistema Internacional de Unidades
TermoSep	Laboratório de Termodinâmica
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de filtração	$[L^2]$
C_f	Concentração de partículas no final	$[ML^{-3}]$
C_i	Concentração de partículas no início	$[ML^{-3}]$
d_p	Diâmetro médio da partícula	$[L]$
K_1	Constante de permeabilidade viscosa	$[L^2]$
K_2	Constante de permeabilidade inercial	$[L]$
K_C	Resistência da torta	$[LM^{-1}]$
K_M	Resistência específica do meio filtrante virgem	$[L^{-1}]$
L	Espessura do meio filtrante	$[L]$
L_T	Espessura da torta	$[L]$
M	Massa contida pelo meio filtrante	$[M]$
M_{FA}	Massa do material particulado no filtro absoluto	$[M]$
M_{FT}	Massa do material particulado retido no filtro em teste	$[M]$
Q	Taxa de fluxo	$[L^3t^{-1}]$
V	Velocidade de filtração	$[Lt^{-1}]$
ΔP	Queda de pressão	$[ML^{-1}t^{-2}]$
ΔP_C	Queda de pressão total do sistema	$[ML^{-1}t^{-2}]$
ΔP_i	Queda de pressão inicial	$[ML^{-1}t^{-2}]$
ΔP_M	Queda de pressão no meio filtrante	$[ML^{-1}t^{-2}]$
ΔP_R	Queda de pressão residual	$[ML^{-1}t^{-2}]$
ΔP_T	Quedas de pressões da torta de filtração	$[ML^{-1}t^{-2}]$
ε	Porosidade	$[-]$
ρ	Massa específica do gás	$[ML^{-3}]$
ρ_g	Densidade do gás	$[ML^{-3}]$
μ	Viscosidade do gás	$[ML^{-1}t^{-1}]$
η	Eficiência de coleta	$[-]$
η_L	Eficiência de limpeza por pulso de ar reverso	$[-]$

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a poluição do ar é reconhecida como maior ameaça à saúde humana e ambiental. Juntamente com a urbanização em larga escala e o desenvolvimento econômico, que necessitava da queima de combustíveis fósseis. Dentre as diversas fontes de poluição do ar, as indústrias, atualmente, são os principais responsáveis pela emissão de material particulado, além dos poluentes gasosos como dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), ozônio (O₃), chumbo (Pb) e dióxido de nitrogênio (NO₂) (WHO, 2021).

Com o aumento da poluição, conseqüentemente, o volume de doenças relacionadas à sua exposição também cresceu. A morbidade e a mortalidade por doenças cardiovasculares e respiratórias são as principais causas da exposição à poluição do ar, além também do aumento de partos prematuros e mortes de crianças lactantes (WHO, 2021).

De modo geral, a poluição do ar pode provocar o câncer de pulmão, asma, infecções pulmonares, doença pulmonar, doença arterial, insuficiência cardíaca e várias outras doenças. O sistema respiratório é muito vulnerável aos poluentes atmosféricos devido a boa parte dele ser formado por membranas expostas. Os pulmões são responsáveis por conduzir altas quantidades de ar para o interior do corpo humano, entrando em contato com o sistema sanguíneo. Apesar de possuir um sistema de defesa na via respiratória, diversas partículas finas podem infiltrar nos tecidos pulmonares, tornando difícil o controle da entrada dessas partículas (MUKHOPADHYAY, 2009).

O relatório da Organização Mundial da Saúde (OMS) de 2005 mostra a presença de diversos poluentes no ar, com concentrações significativas e excedendo os padrões estabelecidos. Em sua atualização de 2021, retrata diretrizes de qualidade do ar exclusivas para os PM_{2,5} (material particulado com um diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 2,5µm), PM₁₀ (material particulado com um diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 10µm), ozônio, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e monóxido de carbono (WHO, 2021). Em 2022, a OMS estabeleceu níveis anuais recomendados de qualidade do ar de 5 µg/m³ para PM_{2,5}, 15 µg/m³ para PM₁₀ e 10 µg/m³ para NO₂ (WHO, 2023).

A Resolução do CONAMA nº 436, de 22 de dezembro de 2011, determina os limites máximos de emissão de materiais particulados, gerados pelas indústrias, como por exemplo na Indústrias Siderúrgicas, onde é limitado em 40 mg/Nm³ para as estações de dessulfuração de gusa e despoeiramento.

Com o avanço da ciência, novos métodos e equipamentos foram desenvolvidos para as medições dos níveis de concentrações de poluentes atmosféricos no nível do solo, como por exemplo, instrumentos de sensoriamento remoto por satélite em combinação com produtos químicos avançados e transportes para medições terrestres. Em vista disso, foi possível obter uma maior compreensão das condições e tendências de poluição atmosférica no mundo todo (CETESB, 2021).

Para o controle de emissão de gases e materiais particulados as indústrias têm utilizado principalmente o filtro de mangas, devido a sua alta eficiência de remoção das partículas, a sua resistência a altas temperaturas e diferentes condições químicas. O filtro de mangas é o mais usual filtro de tecido e os meios filtrantes de suas mangas podem ser produzidos com diversos materiais e diferentes métodos, conforme o tipo de gás e material particulado escolhido para se utilizar, a fim de aumentar a eficiência e a vida útil do filtro. Os meios filtrantes mais utilizados atualmente são o poliéster, polipropileno, poliamidas, vidro, politetrafluoretileno (PTFE), entre outros (MUKHOPADHYAY, 2009).

No processo de união das fibras, existem uma variedade de métodos para o tratamento, incluindo abordagens mecânicas, físicas e químicas. Entre os métodos mecânicos, destacam-se o feltro agulhado, a ligação por pontos e o hidrojateado. Neste estudo, serão explorados com mais detalhes os métodos de feltro agulhado e hidrojateado (KARTHIK; C.; RATHINAMOORTHY, 2016).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar e comparar o desempenho de meios filtrantes compostos de meta-aramida, fabricados por métodos distintos de tratamento de superfície, nomeadamente feltro agulhado e hidrojateado. Para isso, serão conduzidas análises do material particulado e dos meios filtrantes, além de testes de filtração em acordo com a norma VDI 3926, utilizando o sistema de limpeza por jato pulsante. O objetivo é avaliar a eficiência de coleta e a vida útil dos meios filtrantes no processo de dessulfuração de gusa e despoeiramento.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é a análise e comparação da performance de meios filtrantes constituídos de meta-aramida, que possuem métodos distintos de fabricação, feltro agulhado e hidrojateado, e utilizados na indústria siderúrgica, no processo de dessulfuração de gusa e despoeiramento, com o jato pulsante como sistema de limpeza no filtro de mangas.

2.2. Objetivo Específico

- Analisar as características químicas e físicas do material particulado, visando compreender sua composição e comportamento;
- Analisar fisicamente os meios filtrantes utilizados, a fim de avaliar seu comportamento na filtração;
- Realizar testes de filtração seguindo os parâmetros estipulados pela norma VDI 3926, assegurando a conformidade com padrões reconhecidos e a consistência dos resultados;
- Avaliar o desempenho dos meios filtrantes ao longo de ciclos de filtração, incluindo a comparação de quedas de pressão total e residual, eficiência de filtração e a determinação da vida útil dos meios filtrantes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Poluição atmosférica

O Conselho Nacional Do Meio Ambiente (CONAMA) em sua resolução N° 491, de 19/11/18 define poluente atmosférico como “qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade”.

A respeito da procedência dos poluentes, eles podem ser classificados como primários e secundários. Os primários são os propagados diretamente das fontes de transmissão, e os secundários são aqueles das quais sua formação no ar se deve às reações químicas entre os componentes naturais da atmosfera e/ou os poluentes (CETESB, 2021).

No Estado de São Paulo, o monitoramento das condições atmosféricas é feito pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Na Tabela 1 é possível ver a estrutura do índice de qualidade do ar, publicada no site da CETESB, em acordo com a Resolução CONAMA n° 491/2018.

Tabela 1 - Estrutura do índice de qualidade do ar.

Estrutura do índice de qualidade do ar							
Qualidade	Índice	PM ₁₀ (µg/m ³) 24h	PM _{2,5} (µg/m ³) 24h	O ₃ (µg/m ³) 8h	CO (ppm) 8h	NO ₂ (µg/m ³) 1h	SO ₂ (µg/m ³) 24h
N1 – Boa	0 – 40	0 – 50	0 – 25	0 – 100	0 – 9	0 – 200	0 – 20
N2 – Moderada	41 – 80	>50 – 100	>25 – 50	>100 – 130	>9 – 11	>200 – 240	>20 – 40
N3 – Ruim	81 – 120	>100 – 150	>50 – 75	>130 – 160	>11 – 13	>240 – 320	>40 – 365
N4 – Muito Ruim	121 – 200	>150 – 250	>75 – 125	>160 – 200	>13 – 15	>320 – 1130	>365 – 800
N5 – Péssima	>200	>250	>125	>200	>15	>1130	>800

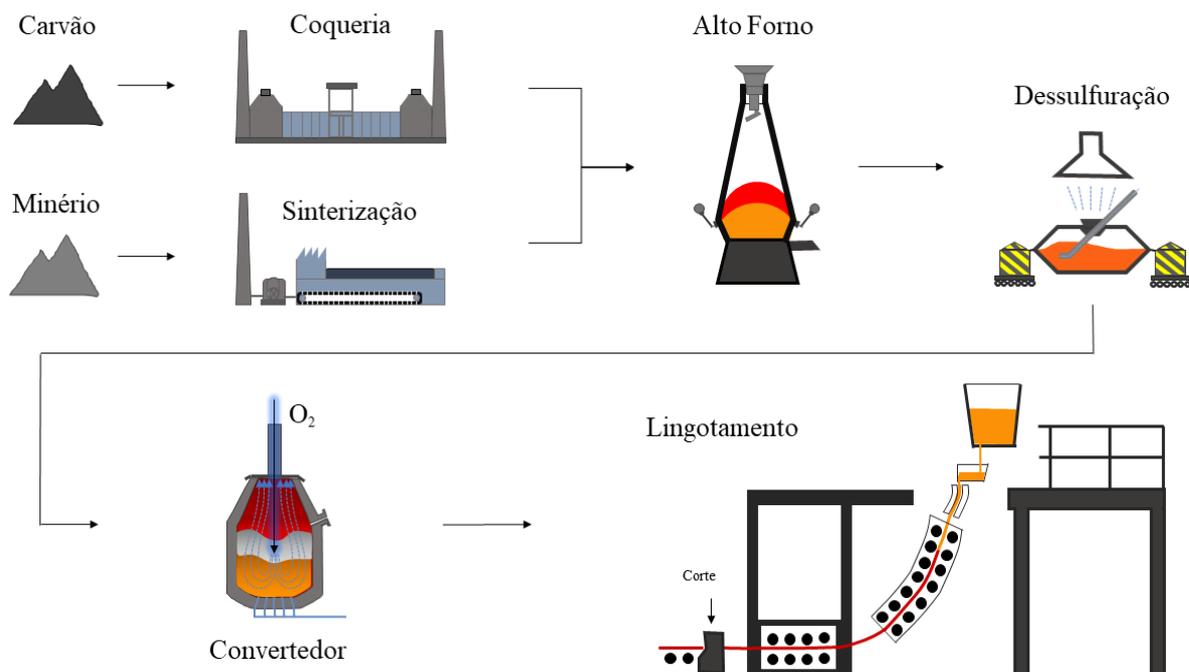
Fonte: CETESB, 2022.

O controle de emissão dos materiais particulados presentes no ar pode ser realizado por sistemas de filtração gás-sólido, utilizando diferentes tipos de filtros disponíveis no mercado.

3.2. Indústria Siderúrgica

A compreensão do processo de produção do aço é de fundamental importância para o escopo deste trabalho, devido aos materiais que serão utilizados, bem como à significativa emissão de partículas gerada pelas indústrias siderúrgicas. O processo produtivo do aço pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Processo de produção do aço.



Fonte: Arquivo pessoal.

As matérias primas utilizadas são selecionadas e dispostas em pilhas no pátio das usinas. Os minérios são transportados para a sinterização e os carvões minerais para a coqueria. Na sinterização ocorre o agrupamento dos minérios de ferro, através de uma esteira rolante contendo o minério de ferro, finos de coque ou carvão vegetal, fundentes, sínter de retorno e água, onde é submetido a um aquecimento conhecido como “frente de combustão” e succionado no decorrer da camada, originando uma ligação primária que causará a união das partículas de minério de ferro, formando o sínter. E na coqueria, os carvões são misturados e aquecidos, e sofrem o processo de coqueificação, formando o coque. Os subprodutos originados desse processo uma parte pode ser reaproveitada na usina e a outra pode ser vendida.

O alto-forno é um reator vertical cilíndrico que opera em contracorrente, nele ocorre a combinação do coque com o sinter do minério de ferro. Essa fase requer um consumo significativo de energia, resultando na obtenção do ferro gusa, em estado líquido, escória e gás. Esse material é removido e posteriormente utilizado nas etapas subsequentes do processo nas aciarias. Antes de ser encaminhado para a aciaria, campo da usina responsável por refinar o gusa e obter o aço, o ferro gusa passa por um tratamento prévio especializado, a dessulfuração, com o objetivo de reduzir a presença de silício (Si), fósforo (P) e enxofre (S). Os materiais utilizados nesse trabalho foram retirados das câmaras do filtro de mangas, utilizado para o controle da emissão de material particulado do processo de dessulfuração de uma siderurgia.

Na etapa de aciaria, o processo amplamente utilizado nas usinas siderúrgicas é o processo de conversão do ferro gusa por meio do processo a oxigênio, também conhecido como processo LD. Nesse método, o ferro gusa passa por uma oxidação controlada, na qual um fluxo de oxigênio é introduzido na superfície do banho de metal líquido por meio de uma lança.

O processo de lingotamento e laminação representa etapas finais na produção do aço. No processo de lingotamento, o aço em estado líquido é depositado nos moldes e resfriado para formar lingotes. Estes lingotes são encaminhados para as lingoteiras e, posteriormente, seguem para a fase inicial da laminação. No lingotamento contínuo obtém-se uma placa, um produto intermediário que pode ser comercializado tanto no mercado nacional como internacional, ou então submetido a processamento interno na própria usina. Na laminação, por sua vez, o processo ocorre em várias fases para dar origem a uma variedade de produtos finais, como por exemplo chapas grossas, tiras finas e bobinas (MOURÃO *et al.*, 2007; NOGUEIRA; MADUREIRA, 2022).

3.3. Materiais Particulados

As partículas microscópicas suspensas no ar, por transportarem alguns elementos tóxicos, afetam não somente a nitidez e o clima, mas também a saúde humana. Essas partículas podem ser de diversos tipos, como partículas de solo ressuspensas, fumaça proveniente da geração de energia, partículas formadas fotoquimicamente, partículas de sal formadas do spray do oceano e nuvens atmosféricas de gotículas de água ou partículas de gelo. Em várias indústrias, essas partículas também são geradas como subprodutos não desejados nas caldeiras, na fabricação de aço e cimento e em incineradores e combustores, que se utiliza dos combustíveis fósseis (HINDS; ZHU, 2022; MUKHOPADHYAY, 2009).

Os materiais particulados são classificados como um tipo de aerossol. O termo aerossol foi criado aproximadamente no ano de 1920 e é definido como um sistema bifásico formado, basicamente, por um conjunto de partículas sólidas ou líquidas suspensas em um gás. A parcela correspondente à parte particulada dos aerossóis é muito pequena em relação a massa e volume total, menos de 0,0001%. Apesar do termo aerossol ser comumente relacionado a produtos spray, ele é uma palavra universalmente aceita para se referir a partículas suspensas em meio gasoso, por se tratar de um termo científico (HINDS; ZHU, 2022).

A medida referência para o tamanho das partículas é o micrômetro (μm) ou o micron (μ) e remete-se ao diâmetro da partícula. Um micrômetro equivale a 10^{-6}m , 10^{-4}cm ou 10^{-3}mm . Atualmente, o micron não é mais aceito como uma unidade no Sistema Internacional de Unidades (SI). As partículas com diâmetro menor que $2,5\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) são consideradas partículas finas e as que estão na faixa de $0,001$ a $0,1\mu\text{m}$ são as ultrafinas. Partículas menores que 50 nanômetros (nm) já são consideradas nanopartículas ou partículas nanométricas. As unidades comumente utilizadas para concentração de massa de partículas, ou seja, a massa por uma unidade de volume de aerossol, são g/m^3 , mg/m^3 e $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (HINDS; ZHU, 2022; MUKHOPADHYAY, 2009).

O material particulado empregado neste estudo é derivado do processo de dessulfuração e despoejamento do ferro gusa na indústria siderúrgica. Durante o processo de dessulfuração, o enxofre é parcialmente removido através da adição de calcário, carbureto de cálcio ou outros agentes ao metal líquido. O despoejamento tem como objetivo a captura e o tratamento para a remoção do material particulado gerado durante a dessulfuração (CONAMA, 2010). Em um estudo preliminar conduzido por Peroni (2022), do qual o presente trabalho é uma continuação, o mesmo aerossol foi utilizado. Os resultados revelaram um diâmetro médio de $3,5\mu\text{m}$, com todas as partículas encontradas na faixa abaixo de PM_{10} , aproximadamente.

3.4. Filtração

A filtração é uma operação unitária na qual ocorre a separação mecânica entre duas fases: particulada e fluida, utilizando-se de um meio poroso, chamado filtro ou meio filtrante, para reter a fase particulada e permitir transpassar à fase fluida, chamada filtrado (CREMASCO, 2014). A filtração pode ser classificada em duas categorias, conforme o método de separação das partículas: filtração superficial (ou de torta) e filtração em profundidade (ou leito profundo) (TIEN, 2012).

Na filtração superficial (ou de torta), ocorre a formação de uma borra denominada “torta” de filtração, em razão da concentração de partículas sobre a superfície do meio filtrante. Em função disso, o processo é chamado de “filtração em superfície” ou “filtração com formação de torta”. A torta necessita ter uma porosidade que possibilite a passagem do fluido, no qual o filtrado irá conter, independente do fato da sua espessura aumentar constantemente durante a filtração. O meio filtrante só atua nas etapas iniciais do processo de filtração, subsequentemente, a retenção de partículas ocorre pela própria torta (PECANHA, 2014; TIEN, 2012). Atualmente, alguns meios filtrantes dispensam a formação inicial da torta para se obter uma filtração eficiente do material particulado, como é o caso do meio filtrante com membrana de politetrafluoretileno (PTFE), devido a sua fina camada de fibras superfina (ANDRADE, 2019).

Na filtração em profundidade (ou leito profundo), as partículas são depositadas na superfície interna do meio filtrante à medida que a suspensão flui através dele. O acúmulo de partículas no interior do meio provoca uma alteração estrutural gradual, afetando tanto a taxa de filtração quanto a resistência ao fluxo. Assim, o desempenho da filtração em profundidade é avaliado com base na concentração do efluente, na queda de pressão e na frequência e condições de limpeza do filtro (TIEN, 2012).

Dos mais diversos métodos de separação de fases, os mais comuns são: sólido/gás, utilizados como por exemplo, no tratamento de exaustão de caldeiras em mangas; sólido/líquido, sendo o que possui maior diversidade em tipos de filtros, a contar dos mais simples aos mais complexos, como por exemplo o filtro de tambor rotativo de pressão (SUTHERLAND; CHASE, 2008). A área de interesse desta pesquisa é a filtração voltada a separação sólido/gás.

3.5. Equipamentos para filtração de gases

Os filtros utilizados no tratamento do ar podem ser divididos em três categorias: filtros primários, filtros de segundo estágio e filtros ultrafinos ou de estágio final. Os filtros primários são planejados para reter as partículas com tamanhos de 5 a 10 μm (micrómetro) e são qualificados para lidar com altas vazões de ar. Os filtros de segundo estágio retêm partículas mais finas, de 0,5 a 5 μm , que passam pelo filtro primário e são consideradas as mais prejudiciais em máquinas e equipamentos sob pressão; normalmente, as velocidades máximas do ar são baixas, em torno de 0,12 m/s ou menos. Os filtros de estágio final, retêm partículas sub-micrométricas e atinge eficiências bem altas, em torno de 99,95%; utiliza um meio filtrante composto de fibras sintéticas de alta densidade, com um diâmetro sub-micrométrico e limitada

a uma velocidade do ar de aproximadamente 0,03 m/s. Um sistema completo pode conter os filtros primário, filtros de segundo estágio e os filtros ultrafinos, respectivamente, sendo capaz de filtrar quase toda a poluição atmosférica, porém também requer um maior investimento de capital (SUTHERLAND; CHASE, 2008).

Os lavadores de gases, o ciclone, o precipitador eletrostático e o filtro de mangas são exemplos de filtros que podem ser utilizados para filtração de gases, sendo operados de acordo com as demandas econômicas, normas ambientais e as características de cada processo (LISBOA; SCHIRMER, 2007; PEUKERT; WADENPOHL, 2001).

Os lavadores de gases possuem como principal mecanismo de coleta a impactação inercial, em outros casos também é utilizado a força centrífuga. É aplicado sobretudo para material particulado úmido, porém pode ser utilizado também no controle dos gases e vapores. As suas desvantagens são a baixa eficiência de coleta para partículas finas, sub-micrômicas, e a formação de resíduos, o que requer um tratamento desse resíduo, aumentando o custo no processamento (CARVALHO, 2018; LISBOA; SCHIRMER, 2007; MELO, 2021; PEUKERT; WADENPOHL, 2001).

Os ciclones possuem um corpo cônico cilíndrico e seu método para coletar as partículas sólidas se dá pelas forças centrífugas. O seu processo de coleta ocorre pelo choque do material particulado contra as paredes do ciclone e sua deposição na parte inferior do equipamento. As desvantagens é que o ciclone possui uma baixa eficiência de coleta para partículas pequenas, diâmetros menores que 5 μm , e um alto consumo de energia devido à alta resistência na operação (BALTRÊNAS; CHLEBNIKOVAS, 2019; LISBOA; SCHIRMER, 2007).

O precipitador eletrostático possui uma eficiência de coleta, para partículas com diâmetro maior que 1,0 μm , de 99,5 a 99,9%. Pode ser utilizado tanto para processos úmidos quanto secos e seu mecanismo de coleta é a força elétrica, com a formação dos íons gasosos no eletrodo de descarga. Além da alta eficiência, os precipitadores possuem baixo custo operacional, quedas de pressões menores, fácil manutenção e operam a temperaturas de até 650°C. Porém o investimento inicial é alto e requer um grande espaço para sua instalação, além da dificuldade em coletar partículas muito finas, por causa da resistividade muito baixa ou muito alta (LISBOA; SCHIRMER, 2007; PARK *et al.*, 2019).

O filtro manga é capaz de filtrar partículas ultrafinas, abaixo de 0,1 μm , e são muito empregados no tratamento da emissão de material particulado, em virtude da sua alta eficiência

na separação, estabilidade e confiabilidade, além de obter um bom rendimento na purificação do ar a baixos custos (CIRQUEIRA; TANABE; AGUIAR, 2019; SALEEM; KRAMMER, 2007a; SUTHERLAND; CHASE, 2008).

Usualmente, esse tipo de filtro é confeccionado com material de tecido e vem sendo muito utilizado nas indústrias na coleta de cinzas volantes de gases de combustão, dioxinas, partículas de carbono provenientes do gás de combustão e materiais particulados em geral, quando são o objetivo de interesse (PARK *et al.*, 2019).

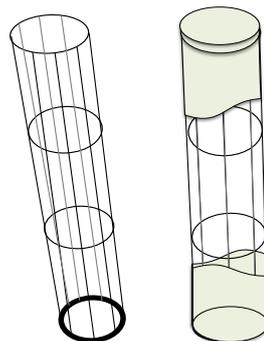
Cada processo possui suas características próprias, portanto é muito importante a seleção correta do filtro e a manutenção apropriada do sistema, para evitar a perda de eficiência do processo e entupimento dos filtros (SUTHERLAND; CHASE, 2008).

3.6. Filtro Manga

Devido às vantagens do filtro de manga, abordadas anteriormente, e por ser o objetivo deste trabalho, seu estudo será aprofundado neste tópico.

O filtro de mangas tradicional utiliza um conjunto de câmaras filtrantes, com sacos cilíndricos colocados em série, suspensos verticalmente no teto da carcaça, enquanto a parte inferior pode estar livre para a passagem do ar, dependendo do design específico do filtro. Os sacos, também chamados de mangas, são envoltas por gaiolas, com hastes metálicas e com anéis de suporte, colocados em intervalos do seu comprimento, como apresentado na Figura 2. As gaiolas permitem um suporte estrutural as mangas, mantendo-a esticada e garantindo que o ar flua através dela. São projetadas para serem removíveis, facilitando a manutenção e substituição das mangas (SALEEM; KRAMMER, 2007b; SUTHERLAND; CHASE, 2008).

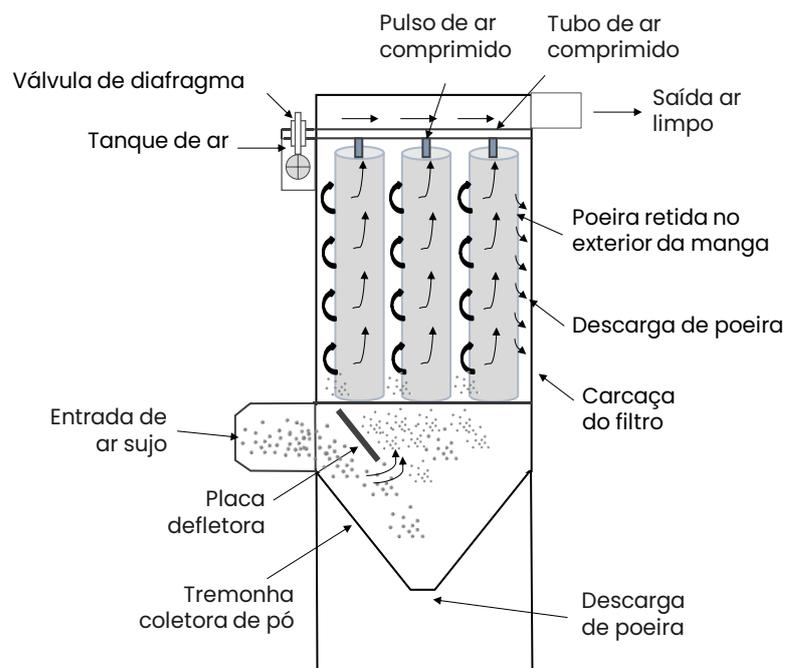
Figura 2 - Estrutura das mangas.



Fonte: Adaptado de SCHMIDT; CERON, 2019; LISBOA; SCHIRMER, 2007.

Dentre outros sistemas de filtração, o filtro de mangas é um dos que possui um sistema de operação mais simples. O gás pulverulento passa pelas mangas dos compartimentos e as partículas ficam retidas na superfície das fibras do meio filtrante, permitindo a passagem do gás limpo, que é conduzido para a parte superior do filtro, como mostra na Figura 3 (MUKHOPADHYAY, 2009; PARK *et al.*, 2019). O sistema de filtração pode atuar tanto com o gás escoando de dentro para fora, quanto de fora para dentro. No primeiro a partícula é coletada dentro da manga e no segundo se acumula na superfície externa, ambos possuem sistemas de remoção de sólidos bem distintos (SUTHERLAND; CHASE, 2008).

Figura 3 - Sistema de filtração do filtro de mangas.



Fonte: Adaptado de MORRIS; ALLEN, 1997.

Com a filtração em profundidade e superficial e devido ao acúmulo das partículas dentro e na superfície do meio filtrante, forma-se uma torta de filtro. Essa torta causa um aumento gradativo da queda de pressão no filtro, sendo necessário a limpeza frequente do meio filtrante, com o auxílio de diferentes métodos (CIRQUEIRA; TANABE; AGUIAR, 2019).

3.7. Limpeza do meio filtrante

A limpeza do meio filtrante ou limpeza da torta é um processo muito importante pois pode impactar no custo, na manutenção e no tamanho das mangas. Se realizada de maneira irregular, resulta em um aumento da queda de pressão geral, redução da eficiência e um aumento

da velocidade de filtração local, que tem como consequência o rápido acúmulo da torta nas áreas recuperadas (MATTESON; ORR, 1987; SALEEM; KRAMMER, 2007b).

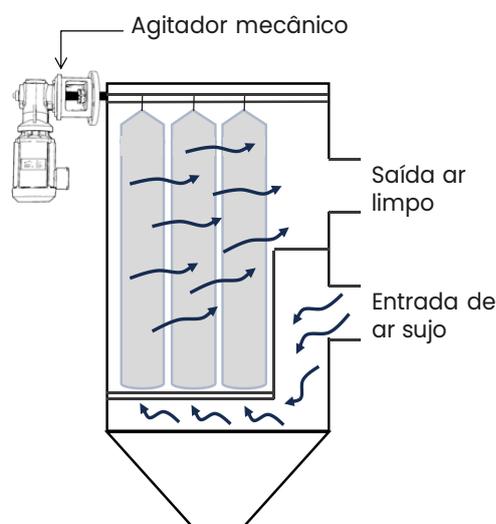
Os métodos de limpeza mais utilizados são os a vibração mecânica, ar reverso e o pulso de ar reverso (ou jato pulsante). A escolha do método a ser empregado depende do tipo de tecido, da configuração e da estrutura dos elementos filtrantes e do sistema de limpeza das mangas (FURUMOTO *et al.*, 2021).

Normalmente, os tecidos feltrados requerem uma limpeza com jato pulsante, devido à dificuldade em realizar a sua limpeza. Já os tecidos lisos, podem ser limpos utilizando qualquer método, por causa da fácil liberação da torta na sua superfície (SUTHERLAND; CHASE, 2008).

3.7.1 Vibração Mecânica

O método de limpeza por vibração mecânica (ou agitação) é muito antigo e consiste em um processo simples e direto de remoção da torta. Com o auxílio de um motor, as partículas são removidas pela agitação mecânica das mangas, como representado na Figura 4 (MATTESON; ORR, 1987; TIEN, 2012).

Figura 4 - Limpeza por vibração mecânica.



Fonte: Adaptado de SUTHERLAND; CHASE, 2008.

As mangas podem se soltar dos suportes devido a agitação em excesso quando utilizados materiais particulados aderentes, não obtendo muito sucesso na limpeza (LISBOA; SCHIRMER, 2007; MATTESON; ORR, 1987).

3.7.2 Ar Reverso

A remoção da torta por ar reverso ocorre por uma troca na direção do escoamento do ar, isto é, o ar limpo passa no sentido contrário ao da filtração. Esse método é mais usual para trabalhar com baixas vazões (LISBOA; SCHIRMER, 2007; MELO, 2021).

O sistema de remoção da torta por ar reverso consiste, basicamente, na inversão da direção do escoamento do ar, oposta ao da filtração, utilizando uma combinação de válvulas para conduzir o ar em alta velocidade para a limpeza. Esta técnica requer a suspensão da filtração durante a limpeza e o tempo para a remoção da torta varia entre 2 e 5 minutos, conforme o tipo de pó e do tecido filtrante utilizado. Devido a falhas mecânicas, a ação abrasiva ocasionada por excesso de pó e por anéis de sopro mal localizados, tornou-se necessário o desenvolvimento dos sistemas de jato pulsante, atualmente muito popular (MATTESON; ORR, 1987).

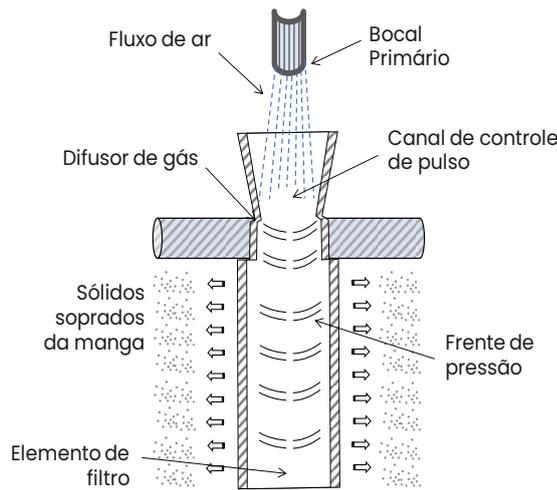
3.7.3 Pulso de Ar Reverso (ou jato pulsante)

A limpeza da torta ocorre por meio de uma injeção de gás comprimido em alta pressão e em um curto período, normalmente realizado por um tubo de Venturi posicionado na parte superior de cada manga. O pulso de ar é conduzido no sentido inverso ao de filtração, do lado limpo (interno) para o lado sujo (externo) da manga, como representado pela Figura 5. No decorrer da etapa de limpeza não é necessário interromper a coleta do pó, uma vantagem se comparado aos outros métodos. Atualmente é o sistema mais aplicado na limpeza da torta (FURUMOTO *et al.*, 2021; LISBOA; SCHIRMER, 2007; SALEEM; KRAMMER, 2007a).

O pulso de ar pode operar na faixa de 1 a 5 m/min em proporções de ar e tecido, de acordo com o tipo de pó utilizado. Os pulsos têm aproximadamente 0,1s de duração, com frequências que podem se alterar de 1 a 3 vezes por minuto, conforme a carga de pó (MATTESON; ORR, 1987). Em geral, somente 10% do tecido é limpo por vez, o que facilita o uso de elevadas velocidades de filtração, se considerado também, os curtos ciclos de limpeza (SUTHERLAND; CHASE, 2008).

Além da vantagem de operação contínua, o processo de limpeza por jato pulsante possibilita um baixo consumo de ar comprimido, devido a limpeza possuir uma maior eficiência na remoção. Porém, uma limpeza carregada pode prejudicar o tecido e reduzir sua vida útil (ANDRADE, 2019; SEVILLE, 1997).

Figura 5 - Mecanismo de limpeza por jato pulsante.



Fonte: Adaptado de SUTHERLAND; CHASE, 2008.

A eficiência de limpeza está relacionada com a forma em que as partículas se depositam no meio filtrante e em como o pulso de ar é utilizado, considerando a pressão e o período de duração do pulso de limpeza. Embora as pressões de pulso mais altas permitam o aumento da eficiência, se muito elevadas, são capazes de danificar o meio filtrante durante a limpeza (BERBNER; PILZ, 1996; CHI *et al.*, 2008).

Mediante a parâmetros como a queda de pressão no meio filtrante (ΔP_M), a queda de pressão residual (ΔP_R) e a queda de pressão inicial (ΔP_i), é possível determinar a eficiência de limpeza por pulso de ar reverso (η_L), utilizando a equação (LEE; SOHN; PARK, 2015):

$$\eta_L = \frac{\Delta P_M - \Delta P_R}{\Delta P_M - \Delta P_i} \cdot 100 \quad \text{Eq. (1)}$$

3.8. Ciclos de filtração

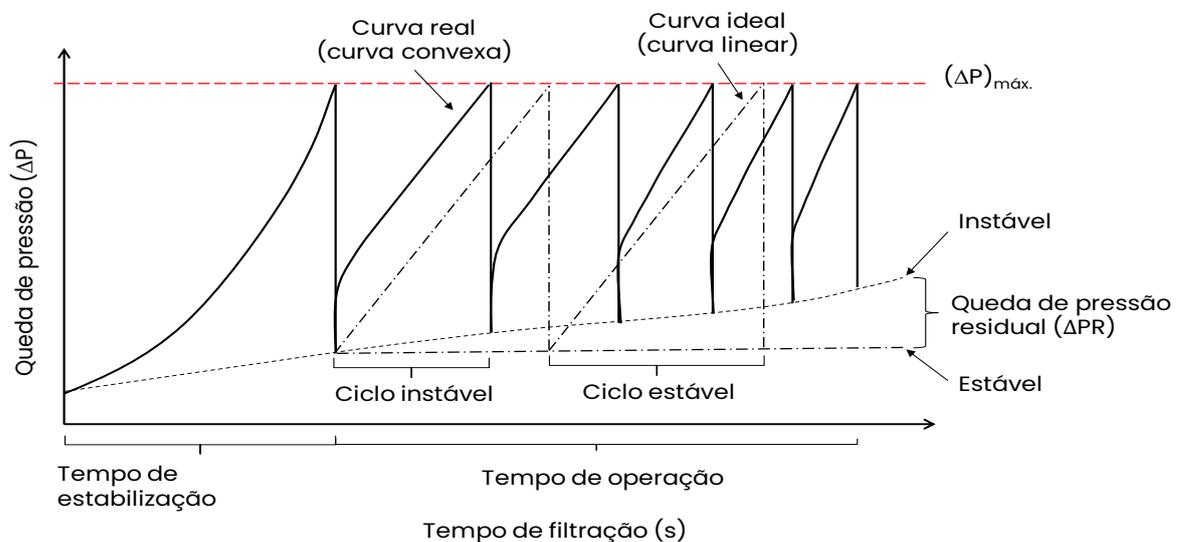
O tempo de filtração somado à limpeza do meio filtrante é denominado como um ciclo de filtração (ANDRADE, 2019; FURUMOTO *et al.*, 2021). Normalmente, os intervalos entre os ciclos de filtração são sistematizados e necessários para o controle da queda de pressão (ΔP) e em determinados sistemas de controle é possível controlar os ciclos de limpeza com uma queda de pressão máxima no filtro (MORRIS; ALLEN, 1997).

A queda de pressão aumenta pouco a pouco no sistema de filtração, por causa da retenção das partículas no meio filtrante e na fase operacional normal, verifica-se uma alteração pequena

e imperceptível, ainda que em regime permanente. Para um tempo de ciclo de filtração menor é necessária uma limpeza frequente do tecido, o que demanda um maior consumo de energia na unidade e a crescente constante da emissão de pó no fluxo de gás limpo.

A queda de pressão no filtro após o ciclo de limpeza, chamada queda de pressão residual (ΔP_R), ultrapassa a queda de pressão (ΔP) no componente filtrante virgem por causa de um revestimento de pó residual, da limpeza irregular e/ou da penetração de partículas no meio filtrante e que não foram removidos no processo de limpeza. Esta queda de pressão total e residual do sistema crescerá constantemente de ciclo para ciclo. Em circunstâncias normais, alcançará um valor consideravelmente estável depois da etapa de estabilização ou condicionamento (MUKHOPADHYAY, 2009). Na Figura 6 pode-se observar a queda de pressão por tempo nos ciclos de filtração real e ideal.

Figura 6 - Ciclo de filtração real e ideal.



Fonte: Adaptado de MUKHOPADHYAY, 2009.

A limpeza irregular da torta de filtro ou a formação de “fendas”, causa uma progressão da curva convexa após alguns ciclos de limpeza, o que ocasiona uma redução considerável nos ciclos de filtração. Alguns tipos de pó não conseguem obter a estabilidade de operação, como por exemplo as poeiras sintetizadas, que atingem rapidamente uma pressão inadequada, devido a sua difícil capacidade de desprender do tecido. Além da seleção incorreta do tecido, da limpeza insuficiente e da acumulação de partículas no tecido, as altas velocidades de filtração também contribuem para uma maior queda de pressão mesmo antes da estabilização do filtro (MUKHOPADHYAY, 2009; VDI, 2004).

3.9. Meios Filtrantes

Uma das condições fundamentais para o desempenho adequado dos filtros de tecido é a escolha apropriada do material da fibra usada no meio filtrante, caso contrário, pode resultar em complicações como, retração severa do material, degradação da fibra após fragilização da estrutura, fadiga acelerada por flexão de pulso, etc. Diversos tipos de materiais de fibras estão disponíveis no mercado (MUKHOPADHYAY, 2009).

A escolha adequada do material de fibra, para uma utilização específica, requer diversas características como resistência química, resistência a altas temperaturas e à umidade; concentração de partículas, permeabilidade do meio filtrante, preço relativo, etc. As primeiras fibras fabricadas eram de origem vegetal, animal ou mineral, isto é, originários da natureza, similar às fibras utilizadas na produção de tecidos e cordas (DONOVAN, 1985; MATTESON; ORR, 1987).

3.9.1 Fibras Naturais e Sintéticas

As fibras naturais de alta qualidade ainda são utilizadas em várias aplicações de filtração, apesar de apresentarem restrições nas suas propriedades físicas e não gerarem efeito na filtração para processos originados da combustão sobretudo por causa das suas restrições com relação a temperatura (DONOVAN, 1985).

Dentre as diversas fontes de fibras naturais aplicadas na produção dos tecidos, as mais importantes são as celulósicas como o algodão, o linho, a juta, a casca de noz e o coco; as proteicas como a lã de ovelha, camelo, caxemira e lhama; as de secreção animal como as sedas; as fibras minerais como os asbestos e as borrachas naturais (DONOVAN, 1985; THILAGAVATHI; PERIYASAMY, 2020).

As fibras sintéticas, hoje em dia, são mais empregadas do que as fibras naturais. Os tecidos à base dessas fibras só começaram a ser desenvolvidos nos últimos 50 anos, possibilitando a alta qualidade nos filtros. Dentre as suas vantagens estão o baixo custo, maior resistência química e mecânica e um diâmetro menor das fibras, além de resistir às altas temperaturas necessárias para operar os gases de combustão (DONOVAN, 1985; RODRIGUES, 2004).

Para a produção dos tecidos as fibras artificiais mais utilizadas, dentre a variedade presente, são o poliéster, nylon, acrílico, polipropileno, aramida, politetrafluoretileno (PTFE),

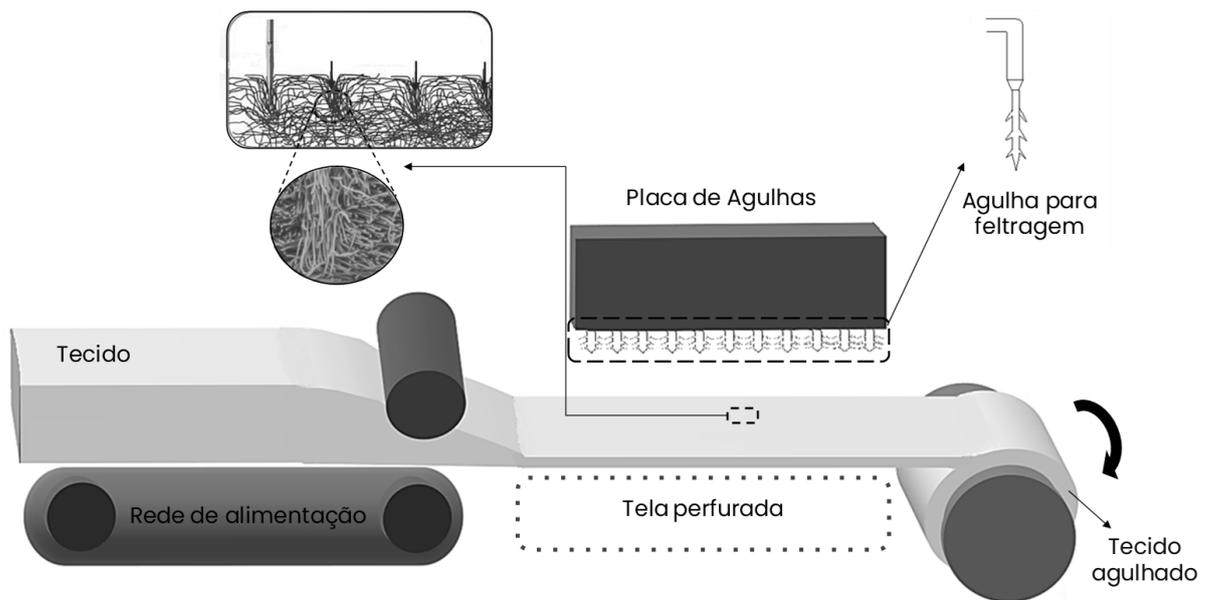
fibras de carbono e vidro, sendo essa uma das mais importantes fibras do século XX (DONOVAN, 1985; MUKHOPADHYAY, 2009).

3.9.2 Produção dos meios filtrantes

O método de produção dos meios filtrantes tem uma influência significativa na qualidade e nos parâmetros de filtração, com diferentes técnicas disponíveis para a fabricação desses materiais a partir de fibras. Este trabalho estuda especificamente dois tipos de entrelaçamento de fibras: o feltro agulhado e o hidrojetado.

No processo de perfuração por agulha, as fibras são unidas pelo entrelaçamento mecânico com agulhas farpadas especiais, com aproximadamente 100 perfurações por cm^2 em velocidades de até 2.000 agulhadas/minuto, a fim de diminuir a espessura do meio filtrante para a medida desejada. A perfuração pode ocorrer por ambos os lados do feltro, para obter uma melhor uniformidade no feltro, ou de apenas um lado (CORNIER; PURSCHE, 2023; HUTTEN, 2016). Essa técnica é a mais utilizada nos meios filtrantes e seu processo de fabricação está representado na Figura 7.

Figura 7 - Processo de fabricação por feltro agulhado.



Fonte: Arquivo pessoal.

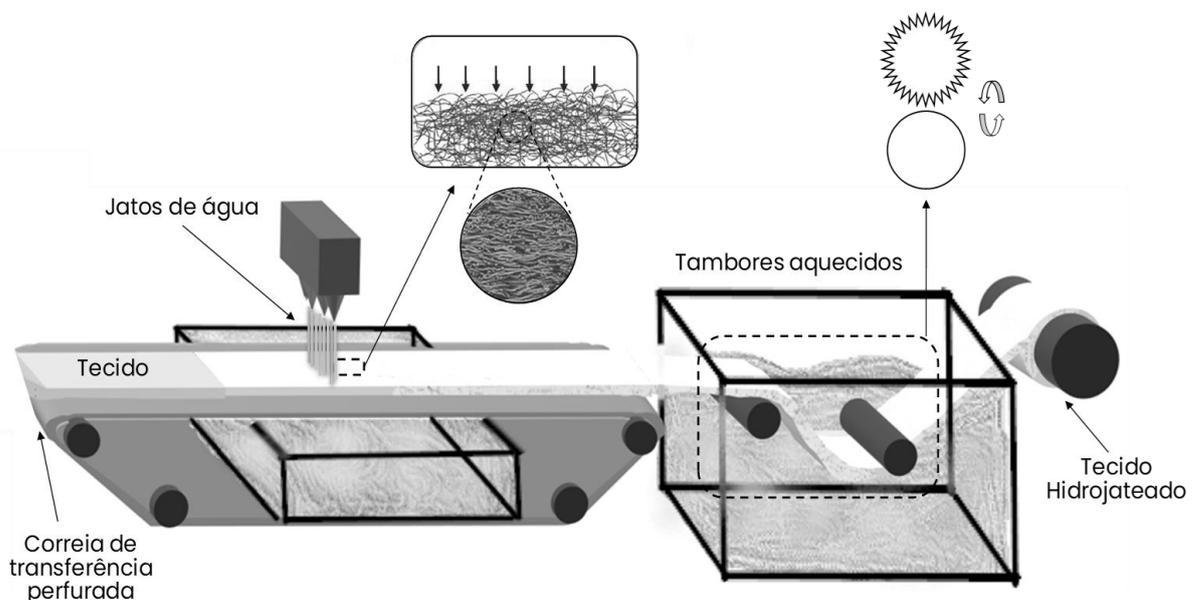
A rede de alimentação inicia o processo, por meio de rolos de aperto, as mantas são movidas por entre as placas do leito inferior e de decapagem superior, enquanto um outro

sistema de rolo puxa o tecido para distanciar da zona de agulhamento. Conforme o tecido é movido, as fibras são perfuradas por agulhas farpadas, que se encontram fixadas em uma placa que se move verticalmente entre as placas contendo a manta. Fendas proporcionais são formadas em cada placa e a estrutura do tecido é moldada (RUSSELL, 2006). A intensidade de penetração das agulhas, a quantidade de perfurações por minuto e a taxa de avanço do tecido por entre as placas, podem determinar a densidade e a resistência do tecido (HUTTEN, 2016).

No filtro de mangas, os feltros agulhados são muito utilizados na filtração de gases e materiais particulados, por causa da sua alta eficiência de coleta. Das suas diversas aplicações no meio industrial, o feltro agulhado é muito aplicado também nas indústrias siderúrgicas, na fabricação do aço e do alumínio.

O hidrojateamento ou hidroentrelaçamento é uma variação da técnica de feltros agulhados, onde é empregado jatos de água muito finos, de alta pressão e em alta velocidade, para estabilizar as fibras no local (POURDEYHIMI; FEDOROVA; MAZE, 2022; SUTHERLAND; CHASE, 2008). Essas pressões normalmente podem variar de 0,5 a 25 MPa e os furos feitos pelos jatos alternam o diâmetro entre 100 a 120 μm , e em cada linha pode ter de 30 a 80 furos por 25 cm (HUTTEN, 2016). O processo hidrojateamento pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Processo de fabricação por hidrojateamento das fibras.



Fonte: Arquivo pessoal.

Assim como nos feltros agulhados, o hidrojateamento também pode ser empregado de um lado ou dos dois lados e é capaz de acrescentar, ao meio filtrante, dimensão e profundidade. Normalmente, o entrelaçamento das fibras mais longas e macias possui uma melhor performance se comparado às fibras mais curtas e rígidas (HUTTEN, 2016).

Apoiado em um transportador móvel plano ou cilíndrico, o tecido pré-formado recebe jatos de água em alta velocidade. As fibras são entrelaçadas pela combinação dos impactos desses jatos d'água e pela turbulência da água criada no tecido, que auxilia no entrelaçamento das fibras vizinhas. A água utilizada nos jatos é puxada para a caixa de vácuo, através da correia de transferência perfurada do transportador, que devido a sua permeabilidade possibilita a sua passagem, sendo possível a sua reciclagem e reutilização. Uma fração da água ainda permanece no pré-tecido e segue para outra etapa (RUSSELL, 2006). Por último, o tecido passa por um processo de termorretração, um tratamento térmico que ocorre nos tambores aquecidos, onde as fibras são encolhidas e unidas, preparando assim o tecido (DUO *et al.*, 2022). A velocidade e pressão do jato, a velocidade do tecido, o número de cabeçotes e o ângulo dos jatos também podem influenciar nas propriedades do tecido.

Os meios filtrantes hidrojateados estão ganhando espaço no mercado e se tornando aplicações muito importantes nos filtros de mangas industriais. Além disso, estão sendo utilizados em outros tipos de filtros, como em filtros de mangas para líquidos e filtros de entrada de turbina (HUTTEN, 2016).

3.10. Parâmetros de filtração

A filtração é influenciada por alguns parâmetros operacionais, como queda de pressão, velocidade de filtração, permeabilidade, porosidade do meio filtrante, temperatura e umidade e eficiência de coleta (MUKHOPADHYAY, 2009).

3.10.1 Queda de Pressão

O volume de pó acumulado no tecido durante a filtração aumenta, tornando-o menos poroso e aumentando a queda de pressão (ΔP). O valor da ΔP é definida pela diferença na pressão estática na entrada e saída do filtro, após deslocar-se pelo meio filtrante. Geralmente, a unidade de medida utilizada para expressar a ΔP é pascal (Pa) ou milímetros de coluna d'água (mmca) (PERONI, 2022; SEVILLE, 1997). Na maior parte dos casos, os filtros de pó utilizam,

na prática, quedas de pressões entre 5 e 20 cm de coluna de água, devido demonstrar um melhor desempenho no sentido econômico, dado que ΔP altas necessitam de equipamentos com um maior consumo de energia, ou seja, mais potentes e mais caros (RODRIGUES, 2004).

A queda de pressão total do sistema (ΔP_T) é determinada pela soma das quedas de pressões da torta de filtração (ΔP_C) e do meio filtrante (ΔP_M) (SEVILLE, 1997):

$$\Delta P_T = \Delta P_C + \Delta P_M \quad \text{Eq. (2)}$$

As quedas de pressões da torta de filtração (ΔP_C) e do meio filtrante (ΔP_M) são expressas, respectivamente:

$$\Delta P_C = \frac{K_C \cdot V \cdot M}{A} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\Delta P_M = K_M \cdot V \quad \text{Eq. (4)}$$

sendo V é a velocidade de filtração, o M é a massa contida pelo meio filtrante, A é a área de filtração, K_C é a resistência da torta e K_M é a resistência específica do meio filtrante virgem.

3.10.2 Velocidade de Filtração

A velocidade de filtração (V) é a velocidade de deslocamento do gás na interface do meio filtrante. É expressa pela razão entre a taxa de fluxo (Q) e a unidade de área do tecido (A), como representado na equação 5. A velocidade é que define a área total do meio filtrante necessária para a limpeza do fluxo de gás contendo o material particulado (MORRIS; ALLEN, 1997; SEVILLE, 1997).

$$V = \frac{Q}{A} \quad \text{Eq. (5)}$$

A velocidade pode ser expressa pelas unidades de medidas de m/min ou cm/min e, em sua maioria, sua aplicação está entre 0,3 e 3,7 m/min. A velocidade de filtração pode ser afetada por algumas propriedades do material particulado, por exemplo, como o diâmetro das partículas, a concentração do pó na entrada e a temperatura do gás, além também das propriedades do meio filtrante. Além disso, a velocidade também afeta outros parâmetros de filtração, como a queda de pressão, a condensação da torta de filtração e a sua porosidade.

Valores altos de velocidade de filtração podem reduzir o tempo de filtração, porém são capazes, também, de provocar a penetração das partículas no meio filtrante, dificultando sua remoção pelo processo de limpeza e causando um aumento na queda de pressão residual (ΔP_R), o que reduzirá a vida útil do tecido (ANDRADE, 2019; MORRIS; ALLEN, 1997; SEVILLE, 1997).

3.10.3 Permeabilidade

O parâmetro de permeabilidade corresponde a dificuldade em que o fluido se encontra ao percorrer o meio filtrante, conduzido por uma diferença de pressão. Considera-se, para este parâmetro, não apenas as propriedades do fluido, mas a sua interação com o meio filtrante. O deslocamento do fluido no meio filtrante influencia no modo em que a queda de pressão se comporta, devido à perda de energia do processo (HUTTEN, 2016; PERONI, 2022).

Valores menores de permeabilidade resultam, em suas aplicações, uma redução das taxas de filtração, não sendo benéfico para o processo em questões econômicas. Porém, a penetração de fontes indesejáveis, podem ser evitados por essa baixa da permeabilidade, evitando a danificação do material. Este parâmetro é essencial para definir o desgaste das mangas e para se obter um melhor rendimento nos filtros de mangas. O propósito de um filtro ao ser fabricado é manter sua permeabilidade alta, tanto limpo quanto carregado de pó, levando em conta nenhuma quantidade de pó ou a mínima possível (ANDRADE, 2019).

Para analisar o escoamento de fluidos incompressíveis em meios porosos, correlacionando os valores de queda de pressão com a velocidade de filtração, é utilizado a equação de Forchheimer:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K_1} V + \frac{\rho}{K_2} V^2 \quad \text{Eq. (6)}$$

sendo, ΔP é a queda de pressão, L é a espessura do meio filtrante, V é a velocidade de filtração, μ é a viscosidade do gás, K_1 é a constante de permeabilidade viscosa, K_2 é a constante de permeabilidade inercial e ρ é a massa específica do gás.

Considerando um escoamento laminar viscoso, com velocidades de filtração menores, que é geralmente o cenário das filtrações práticas, pode-se desprezar a expressão inercial da equação anterior. Sendo assim, a permeabilidade, isto é, a queda de pressão provocada pelo escoamento do gás na interface do meio filtrante, pode ser representada pela equação de Darcy (SEVILLE, 1997):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K_l} V \quad \text{Eq. (7)}$$

Normalmente, o fabricante indica a permeabilidade do produto em sua ficha técnica, referindo-se a vazão volumétrica que percorre uma área útil do meio filtrante, o que resulta em uma certa queda de pressão no filtro. Pode ser utilizado, por exemplo, as seguintes unidades: (m³/min)/m² para 125Pa ou (L/min)/dm² para 20mmH₂O (CARVALHO, 2018).

3.10.4 Porosidade do meio filtrante

A porosidade é um parâmetro estrutural muito relevante e é determinada pela razão entre o volume de espaços vazios e o volume total existentes no meio filtrante, normalmente, este parâmetro é informado pelo fabricante. Com o decorrer do tempo de filtração, a porosidade do meio filtrante diminui e a queda de pressão aumenta, devido ao acúmulo das partículas nos poros. A vida útil do tecido e a vazão obtida aumentará de acordo com a porosidade do filtro (CARVALHO, 2018; HUTTEN, 2016; RODRIGUES, 2004).

A Equação de Ergun (1952) é muito utilizado para estimar a porosidade de meios porosos, em especial para a torta formada no meio filtrante, com partículas na faixa de tamanho de 10²-10⁴ μm, porosidade entre 0,1-0,75 e número de Reynolds da partícula maior que a unidade. Embora também pode ser usada para partículas muito menores (1-10 μm) e números de Reynolds na ordem de 10⁻². No entanto, para uso desta equação é necessário o conhecimento da vazão mássica do gás e da queda de pressão por tempo de filtração.

A Equação de Ergun pode ser descrita da seguinte forma:

$$\frac{\Delta P}{L_T} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu V}{d_p^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_g V^2}{d_p} \quad \text{Eq. (8)}$$

em que ε é a porosidade, V a velocidade de filtração, d_p o diâmetro médio da partícula, L_T a espessura da torta, ρ_g a densidade do gás e μ a sua viscosidade. As contribuições inerciais e viscosas são representadas pelo primeiro e o segundo termo, respectivamente.

Aguiar e Coury (1996) compararam os valores de porosidade da torta utilizando a equação de Ergun, denominado “método indireto” com os obtidos através de análise de imagens de seções transversais da torta de filtração, denominado “método direto”, concluíram que ambos os métodos produziram resultados similares. Geralmente, a correlação de Ergun é considerada confiável para meios filtrantes porosos, desde que a torta não seja muito fina.

3.10.5 Temperatura e Umidade

A temperatura é um parâmetro que desempenha um grande papel na filtração, interferindo em outros parâmetros como a queda de pressão, resistência específica da torta e/ou emissão de material particulado.

Em uma pesquisa conduzida por Mukhopadhyay, Pandit e Dhawan (2016), empregando meios filtrantes compostos por poliamida aromática com tela de teflon e poliamida aromática com tela de poliamida aromática, constatou-se que, à medida que a temperatura aumentou, observou-se uma redução na emissão de material particulado. Entretanto, esse aumento de temperatura também resultou em um acréscimo na queda de pressão.

A presença de umidade induz a aglomeração das partículas no meio filtrante, mantendo-as unidas através de pontes líquidas. Essas pontes são proporcionais às forças de coesão e adesão: quando uma partícula se fixa à superfície do meio filtrante, a força resultante é denominada adesão; e quando as partículas se unem umas às outras, essa força é chamada de coesão. O aumento das pontes líquidas está diretamente ligado ao aumento das forças de coesão e adesão. O uso de níveis mais baixos de umidade resultará em forças menos intensas, resultando em uma dispersão maior do material particulado, o que o torna mais suscetível a aderir às fibras do meio filtrante. Além disso, a umidade impacta diretamente no aumento da queda de pressão do filtro e na redução da eficiência de limpeza das mangas (MORRIS; ALLEN, 1996; SHI *et al.*, 2022).

3.10.6 Eficiência de Coleta

A eficiência de coleta representa a quantidade de partículas que ficam retidas no meio filtrante, em porcentagem. É o parâmetro mais importante no desempenho dos filtros de manga e é influenciada pelas propriedades do filtro, como a fibra ou o tamanho dos poros do meio filtrante. A escolha do melhor meio filtrante provém daquele que possui a maior eficiência de coleta e menor queda de pressão.

A eficiência de coleta (η) é calculada com base nas concentrações das partículas antes e depois do filtro, utilizando a equação seguinte:

$$\eta(\%) = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \cdot 100 \quad \text{Eq. (9)}$$

sendo C_i a concentração de partículas no início e C_f a concentração de partículas no final da passagem pelo filtro. Com esta equação é possível obter um valor de eficiência para cada fração de diâmetro aerodinâmico. As concentrações das partículas são dadas pelo número de partículas por centímetro cúbico (N/cm^3), porém, geralmente é retratada na forma normalizada ($dN/d\log D_p$), devido ao fato de cada espectrômetro poder operar com uma resolução e tamanho de canal estabelecido.

Em um filtro absoluto, a jusante do filtro em teste, pode-se calcular a eficiência de coleta pela seguinte equação:

$$\eta(\%) = \left(\frac{M_{FT}}{M_{FT} + M_{FA}} \right) \cdot 100 \quad \text{Eq. (10)}$$

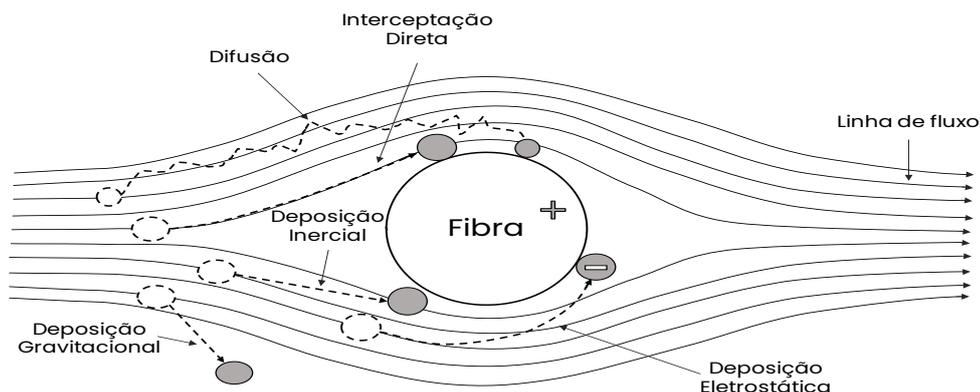
sendo M_{FT} representa a massa do material particulado retido no filtro em teste e M_{FA} a massa do material particulado no filtro absoluto, pesados no início e no final da filtração.

À medida que se avança a filtração a eficiência de coleta aumenta, em razão da formação da torta, que amplia a área de filtração atuando como um novo meio filtrante e aumentando as possibilidades de coletar novas partículas. No entanto, com a formação da torta, aumenta-se a queda de pressão no filtro (CARVALHO, 2018; HINDS; ZHU, 2022).

3.11. Mecanismo de coleta de partículas

Diversos mecanismos operam na deposição de partículas em escoamento e são chamados mecanismos de coleta de partículas. Dentre os mais importantes estão a difusão, interceptação direta, deposição inercial, deposição gravitacional e deposição eletrostática (MATTESON; ORR, 1987). Na Figura 9 é possível observar os mecanismos de coleta de partículas.

Figura 9 - Mecanismo de coleta das partículas.



Fonte: Adaptado de HINDS; ZHU, 2022; MATTESON; ORR, 1986.

- Deposição por difusão

Por causa do movimento browniano, o curso das partículas é diferente das linhas de fluxo do fluido e a força desse movimento cresce com a redução do diâmetro das partículas, o que também causa o aumento na força da deposição de difusão (MATTESON; ORR, 1987). As partículas pequenas se movimentam continuamente, assim como acontece com as moléculas de um gás, por isso a deposição de difusão tem importância apenas para partículas cujo diâmetro é inferior a $1\mu\text{m}$ (HINDS; ZHU, 2022; LISBOA; SCHIRMER, 2007).

- Intercepção Direta

A intercepção direta acontece por causa do tamanho finito das partículas. O percurso da partícula segue as linhas de fluxo de fluido e ela é interceptada conforme aproxima-se da superfície de coleta com uma distância correspondente ao seu raio (MATTESON; ORR, 1987; TIEN, 2012). Devido ao tamanho das partículas, a sua captura pode ocorrer em determinadas linhas de corrente e em outras não (HINDS; ZHU, 2022).

- Deposição Inercial

A deposição inercial acontece quando, devido a sua inércia, a partícula não consegue adaptar-se à velocidade necessária às linhas de fluxo e as cruzam para alcançar a fibra. Nesse mecanismo, o aumento da intensidade ocorre com o aumento na velocidade do fluxo e do tamanho da partícula. O número de Stokes é o indicador principal da deposição inercial e ele é determinado pela razão da distância de parada da partícula e o diâmetro da fibra (DONOVAN, 1985; HINDS; ZHU, 2022; MATTESON; ORR, 1987).

- Deposição Gravitacional

Na deposição gravitacional as partículas são capturadas pela fibra no sentido da força gravitacional, caso a densidade da partícula for maior que a do fluido. Por causa da gravidade, as partículas possuem uma determinada velocidade de sedimentação e elas deslocam-se em uma direção diferente das linhas de corrente de fluxo. Para esse mecanismo ocorrer, o diâmetro da partícula deve ser maior que $5\mu\text{m}$. (DONOVAN, 1985; MATTESON; ORR, 1987; TIEN, 2012).

- Deposição Eletrostática

A deposição eletrostática ocorre pela atração das cargas elétricas da partícula e/ou fibra devido às forças eletrostáticas (DONOVAN, 1985; MATTESON; ORR, 1987). O campo de atração é gerado pela indução de carga, igual ou oposta, da partícula na superfície da fibra. A eficiência de coleta deste mecanismo aumenta com a redução na velocidade de face ou o aumento da carga das partículas ou fibras. Esse mecanismo pode ser muito relevante, porém é difícil a quantificação das cargas das partículas e das fibras e seu conhecimento é necessário (HINDS; ZHU, 2022).

3.12. Norma VDI 3926

A norma VDI 3926 consiste em um teste padrão para avaliação de meios filtrantes laváveis e é muito importante para uma melhor caracterização e classificação de filtros. A instalação e execução do teste padrão são estabelecidas de forma que a verificação do filtro possa ser desenvolvida com uma boa oportunidade de reprodução e frequência.

Tanto os valores alcançados com os métodos usuais de verificação para filtros quanto os dados técnicos fornecidos pelos fabricantes dos materiais, são insuficientes para uma antecipação do desempenho na operação, principalmente a longo prazo, resultando na necessidade da otimização de métodos para a caracterização e avaliação de materiais de filtros purificadores.

A norma descreve 2 exemplos de esquemas de realização do filtro, para serem utilizados na elaboração dos testes, onde cada um corresponde os requisitos operacionais da norma. Além disso ela estabelece as variáveis e as possíveis reações durante as filtrações.

Para a operação do teste padrão, a norma determina uma concentração média da massa de pó de $5 \text{ g/m}^3 \pm 10\%$, sendo o material particulado padrão utilizado o Pural NF; um pulso de limpeza que se inicia quando a queda de pressão na amostra excede 1.000 Pa, possuindo um tempo de impulso de 60 ms, com uma pressão excessiva de 0,5 MPa (5 bar) no tanque; uma de área de filtro de $120 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h}) \pm 3\%$ e a velocidade de filtração de $2 \text{ m/min} \pm 3\%$ (VDI, 2004).

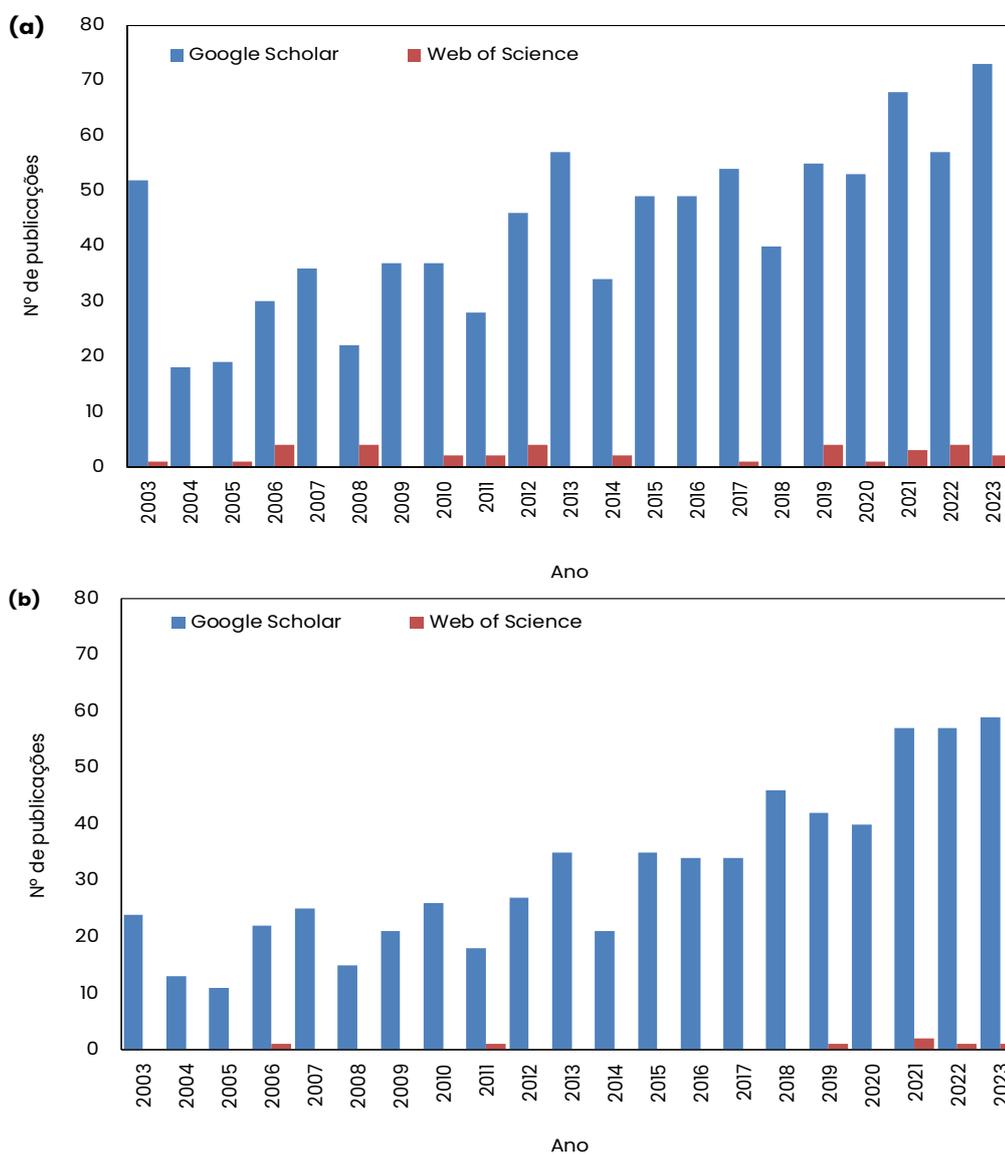
3.13. Estado d'arte

A maioria dos estudos dedicados ao controle de materiais particulados na filtração de gases utiliza tecidos como poliéster, polipropileno, nylon e acrílico. Essa escolha se fundamenta, em grande parte, em seu custo mais baixo e maior disponibilidade em comparação

com outros materiais. Vale ressaltar que são insuficientes as pesquisas que analisam meios filtrantes sob condições e parâmetros de operações industriais.

Com o propósito de comparar a quantidade de pesquisas realizadas nos últimos 20 anos sobre o uso de meios filtrantes em filtros de mangas, foram criados dois gráficos de barras, utilizando o Google Scholar e o Web of Science como bases de pesquisa, conforme demonstrado na Figura 10. No gráfico (a), a pesquisa abordou o uso de meios filtrantes em filtros de mangas de maneira geral, enquanto no gráfico (b), a ênfase foi nas pesquisas relacionadas à aplicação desses meios filtrantes em filtros de mangas no contexto industrial.

Figura 10 - Número de publicações por ano de (a) meios filtrantes utilizados em filtros de mangas e (b) meios filtrantes em filtros de manga no meio industrial.



Fonte: Google Scholar; Web of Science, 2023.

Observa-se uma disparidade significativa no volume de publicações entre as bases de dados empregadas, um dado que pode ser atribuído, possivelmente, à abrangência do Google Scholar, caracterizado por oferecer acesso a artigos mais amplos e publicações com variados níveis de fatores de impacto e influência, além de acesso a apenas resumos. Essa diferença é evidente em comparação com o Web of Science, cujas publicações são menos acessíveis e exibem maiores índices de fatores de impacto.

Assim, torna-se cada vez mais necessário a investigação dos meios filtrantes empregados nos filtros de mangas, especialmente alinhada com as condições operacionais específicas nas indústrias, no caso deste estudo, indústria siderúrgica. O objetivo é identificar meios que proporcionem uma eficiência aprimorada no controle de material particulado, atendendo integralmente às exigências estabelecidas pelas legislações ambientais vigentes.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho foi realizada nos laboratórios do Departamento de Engenharia Química (DEQ) e do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Com a finalidade de cumprir com as propostas apresentadas nos objetivos, realizou-se análises de caracterização dos materiais particulados e dos meios filtrantes utilizados, testes de filtração com ciclos de limpeza por jato pulsante, em escala laboratorial para obtenção da eficiência de coleta e a penetração de partículas, micro e nanométricas.

4.1. Caracterização do Material Particulado

O material particulado utilizado para este trabalho, apresentado na Figura 11, foi fornecido por uma indústria siderúrgica e coletado na câmara do filtro de mangas, do sistema de despoejamento da dessulfuração do ferro gusa. Para a sua caracterização foi realizada as análises de massa específica, distribuição granulométrica, composição química, forma e circularidade.

Figura 11 - Amostra do pó de dessulfuração.



Fonte: Arquivo pessoal.

Antes de iniciar a caracterização do material particulado, ele foi peneirado com uma peneira granulométrica com abertura de 32 *mesh* (0,5 mm) e levado para estufa a uma temperatura de 70°C por 72 horas, a fim de retirar a umidade.

Para a massa específica, utilizou-se a picnometria a hélio, através do equipamento *AccuPyc 1330 Micromeritics* disponível no Laboratório de Controle Ambiental I (LCA) do DEQ/UFSCar. Antes da análise, uma amostra de $5,4842 \pm 0,0001$ g foi separada e levada ao dessecador, com o objetivo de atingir a temperatura ambiente e manter a umidade baixa, para

não ocorrer variação na densidade. A massa específica foi medida em triplicata e a média apresentada para a amostra foi de $2,8477 \pm 0,0036 \text{ g/cm}^3$.

Para a distribuição granulométrica volumétrica, utilizou-se o equipamento *Malvern Mastersizer Microplus* disponível no Laboratório de Termodinâmica (TermoSep) do DEQ/UFSCar. A análise foi realizada em triplicata e os resultados obtidos estão expressos na Tabela 2. É possível observar que 90% das partículas apresentaram diâmetros menores que $63,72 \mu\text{m}$, 50% são menores que $18,30 \mu\text{m}$ e 10% são menores que $0,26 \mu\text{m}$.

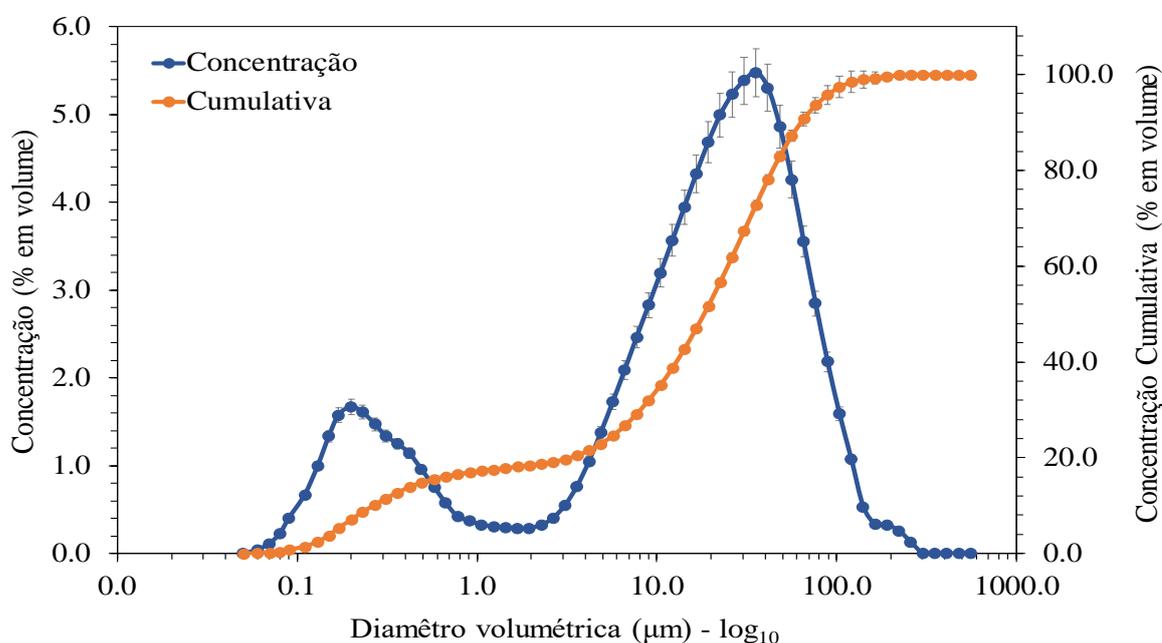
Tabela 2 - Distribuição granulométrica volumétrica da amostra de material particulado.

Distribuição granulométrica volumétrica (μm)	
D(v0.1)	$0,2667 \pm 0,0153$
D(v0.5)	$18,3067 \pm 0,3669$
D(v0.9)	$63,7233 \pm 4,1271$

Fonte: Arquivo pessoal.

Os gráficos apresentados na Figura 12 mostra a distribuição em função do diâmetro volumétrico, que varia entre $0,05$ e $555,71 \mu\text{m}$. Observa-se uma curva que apresenta mais de um pico de concentração e um material particulado polidisperso.

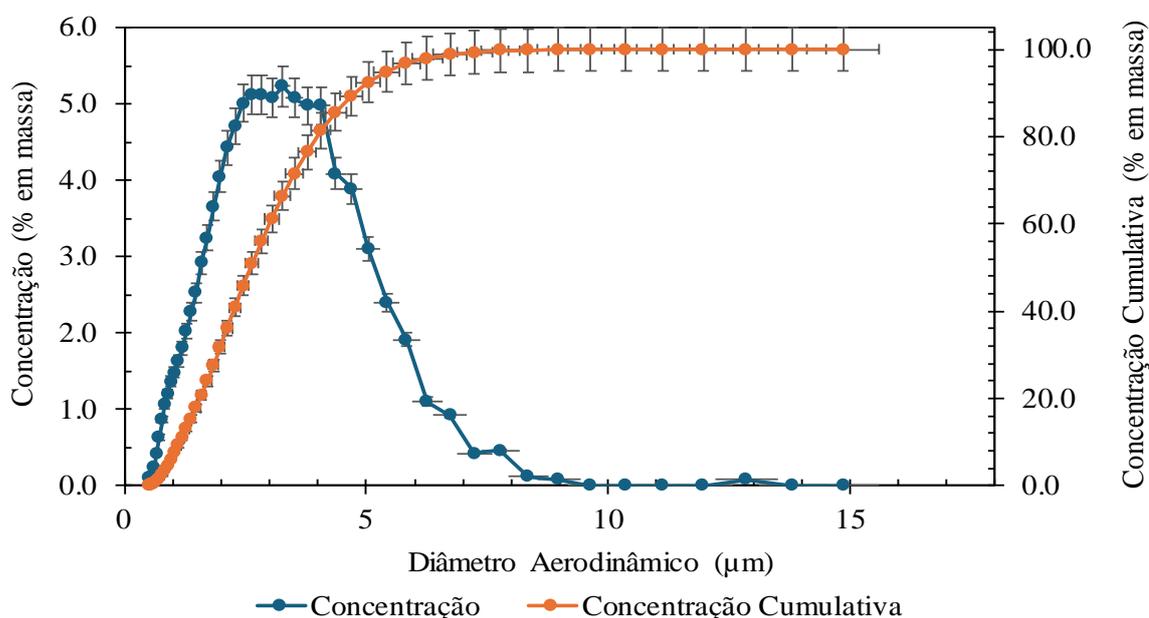
Figura 12 - Distribuição granulométrica em volume de material particulado.



Fonte: Arquivo pessoal.

A distribuição granulométrica e o valor médio do diâmetro aerodinâmico das amostras foram determinados utilizando o equipamento *Aerodynamic Particle Sizer* (APS) 3320 da TSI, disponível no Laboratório de Controle Ambiental I (LCA) do DEQ/UFSCar. O cálculo do valor médio foi baseado na média das triplicatas e o gráfico da distribuição granulométrica em relação ao diâmetro aerodinâmico pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 - Distribuição granulométrica aerodinâmica (em massa) do material particulado.



Fonte: Arquivo pessoal.

Com base na análise da curva cumulativa em massa da Figura 13, observa-se que o material particulado proveniente da dessulfuração apresenta um diâmetro aerodinâmico mediano de $2,642 \pm 0,18 \mu\text{m}$, indicando que metade das partículas tem um tamanho inferior a esse valor. Além disso, 100% das partículas desse material são menores do que PM_{10} , com 45,85% delas sendo menores do que $\text{PM}_{2,5}$ e 7,56% menores do que PM_1 .

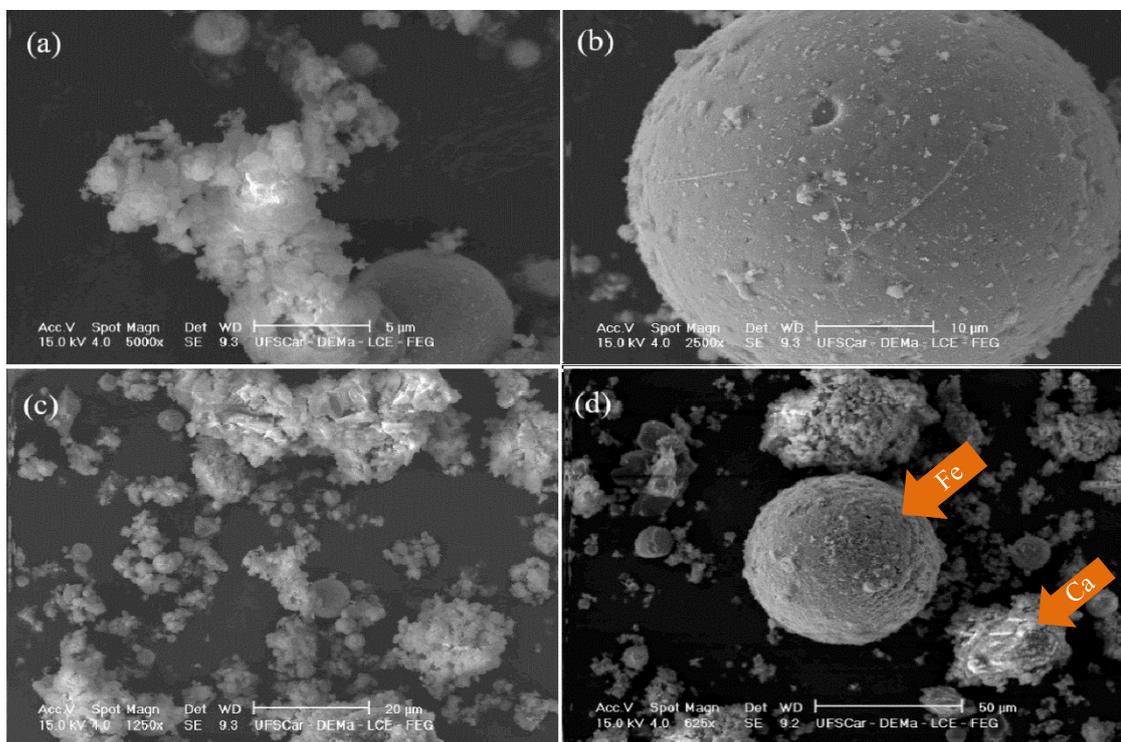
As análises para composição química, forma e circularidade foram realizadas no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do DEMa/UFSCar, utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), para obter a forma e calcular a circularidade do material particulado, e a fluorescência de raio X (FRX) para obter a composição química.

O MEV utilizado foi o Philip XL-30 FEG (Field Emission Gun). Inicialmente, a amostra foi revestida com uma fina camada de ouro, com o intuito de melhorar a emissão dos elétrons.

As imagens foram obtidas por meio de elétrons secundários (SE) e analisou-se quatro regiões distintas, em diferentes escalas, apresentadas na Figura 14.

A circularidade representa a relação entre o perímetro da esfera que possui a mesma área projetada que a partícula e o perímetro da área projetada da própria partícula quando está em sua condição de estabilidade máxima. Para calcular esse valor, utilizou-se o software ImageJ para analisar as imagens obtidas por MEV, na escala de 50 μm . Dado que o método é conduzido manualmente, a fim de minimizar possíveis erros, procedeu-se à avaliação de três partículas distintas em cada imagem, executando três medições circulares para cada uma delas. A circularidade média das partículas obtida foi de $0,77 \pm 0,13$.

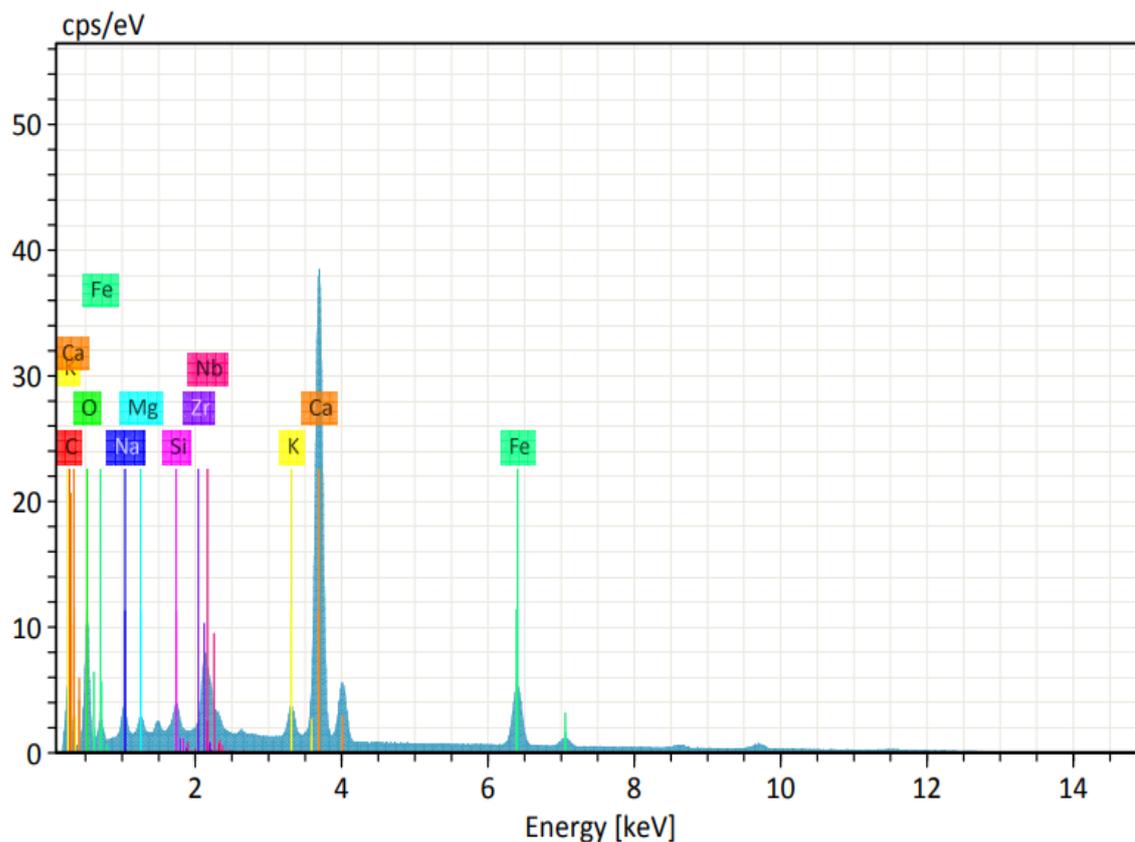
Figura 14 - MEV de quatro regiões do pó de dessulfuração, em escala de: 5 μm (a), 10 μm (b), 20 μm (c) e 50 μm (d).



Fonte: Arquivo Pessoal.

Através da utilização da técnica EDS (Espectroscopia de Raios-X por Dispersão de Energia), da marca Bruker, acoplado ao MEV, conseguiu-se realizar uma análise quantitativa e mapear a composição química do material particulado, como demonstrado na Figura 15. Nesta análise, identificou-se a presença de elementos como Cálcio (Ca), Ferro (Fe), Magnésio (Mg), Potássio (K), Sódio (Na), Silício (Si), e outros.

Figura 15 - Composição química do material particulado por EDS.



Fonte: Arquivo Pessoal.

A predominância dos elementos cálcio (Ca) e ferro (Fe) na composição química do material particulado, juntamente com a porcentagem em massa dos demais componentes, foi confirmada pelos resultados obtidos por meio do Espectrômetro de fluorescência de raios X (FRX) por Energia Dispersiva da marca Shimadzu e modelo EDX-720, como observado na Tabela 3.

O cálcio obteve uma % em massa de $58,366 \pm 0,179$, enquanto o ferro apresentou $30,514 \pm 0,110$. Além deles, foram identificados outros compostos químicos, como enxofre, cloro e alumínio, embora estes não tenham sido especificamente identificados no Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS).

Tabela 3 - Análise de composição química do pó de dessulfuração.

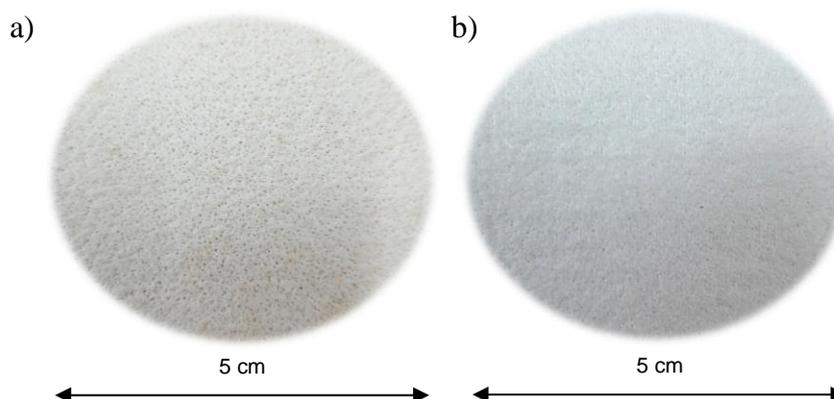
Composto químico	% em massa	Desvio
Ca	58,366	0,179
Fe	30,514	0,110
K	3,938	0,048
S	3,269	0,115
Mg	1,385	0,140
Si	1,327	0,019
Cl	0,725	0,063
Al	0,476	0,053

Fonte: Arquivo Pessoal.

4.2. Caracterização do Meio Filtrante

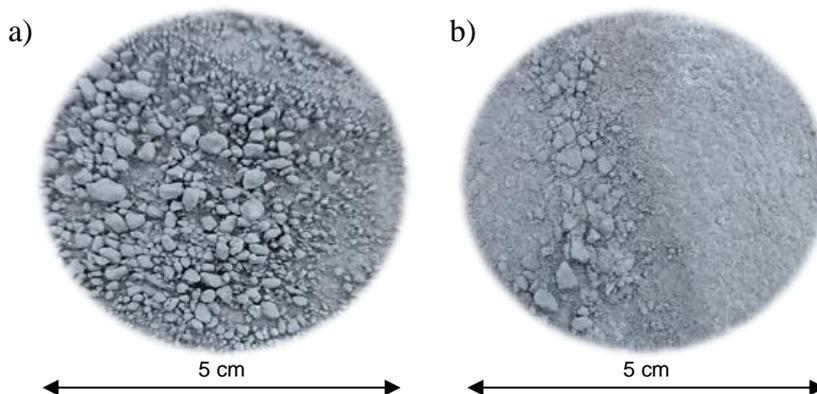
Os meios filtrantes utilizados consistem em materiais 100% meta-aramida, produzidos por meio de técnicas para tratamento de superfície, feltro agulhado e hidrojetado, com acabamento termofixado e chamuscado, além de tratamento contra desgaste e abrasão. Os materiais foram disponibilizados por uma indústria siderúrgica, compreendendo tanto mangas virgens quanto mangas com um histórico de utilização de 3 e 4 anos. As mangas usadas foram retiradas do processo de dessulfuração 2 da indústria siderúrgica, da câmara 1 (hidrojetado com 3 e 4 anos de uso), câmara 2 (agulhado com 4 anos de uso) e câmara 3 (agulhado com 3 anos de uso). As Figuras 16, 17 e 18 apresentam imagens dos meios filtrantes utilizados.

Figura 16 - Meio filtrante feltro agulhado (a) e hidrojetado (b) virgens.



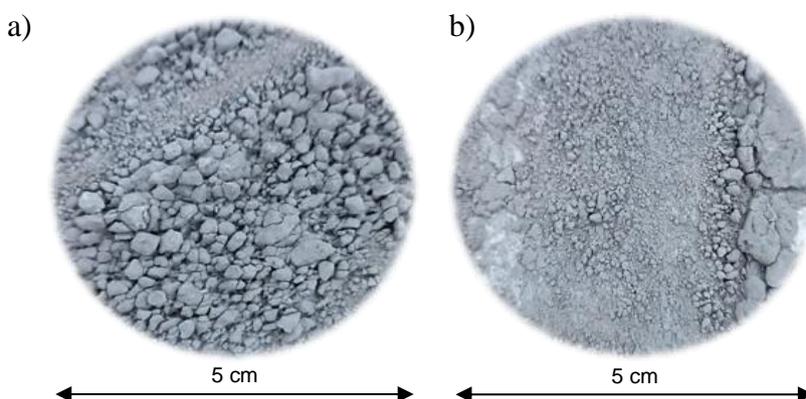
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 17 - Meio filtrante feltro agulhado (a) e hidrojetado (b) com 3 anos de uso.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 18 – Meio filtrante feltro agulhado (a) e hidrojetado (b) com 4 anos de uso.



Fonte: Arquivo pessoal.

Nos meios filtrantes virgens, o feltro agulhado se destaca visualmente por apresentar uma quantidade maior de poros, conferindo-lhe uma aparência mais porosa e com aberturas maiores em comparação com o hidrojetado. Ao analisar os meios filtrantes após o uso, nota-se que o agulhado apresenta uma torta com maior acúmulo de material particulado em sua superfície, correlacionado com a abertura dos poros. A comparação entre meios filtrantes com 3 e 4 anos de uso também revela uma quantidade superior de material particulado nos meios filtrantes com 4 anos, o que é coerentemente esperado devido ao longo tempo de uso.

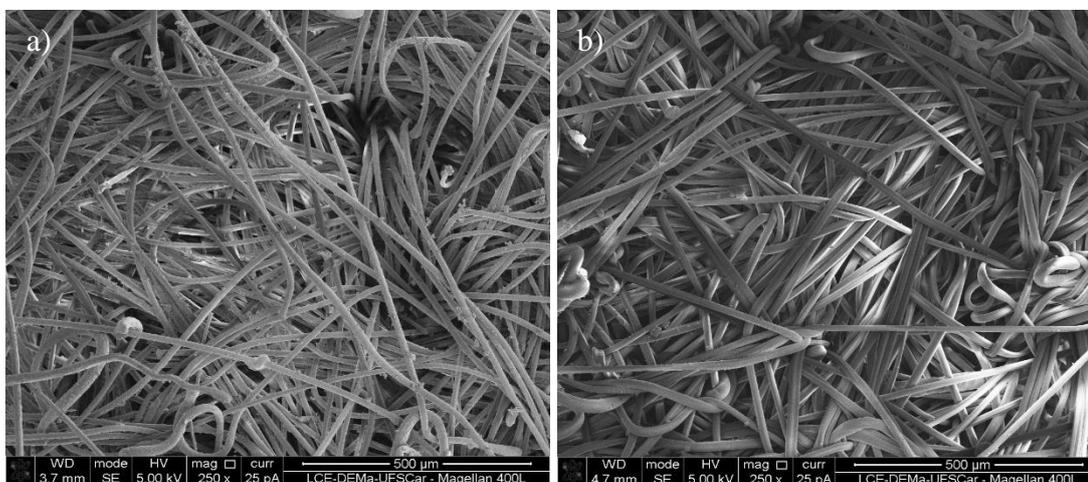
Para realizar as caracterizações retirou-se três amostras ao longo do comprimento de cada manga usada de 3 e 4 anos, representando os pontos do topo, meio e fundo da manga. Nas mangas virgens foi retirada uma amostra em cada. As análises dos meios filtrantes englobam uma série de características, incluindo o diâmetro médio das fibras, a gramatura, a espessura e a permeabilidade do meio filtrante.

A espessura foi determinada utilizando o medidor de espessura digital de alta precisão *Digimess* 130.403 e realizou-se 5 medidas em cada amostra. Para gramatura, que determina a massa por unidade de área, utilizou-se uma balança semi-analítica e um paquímetro digital *Starret* 727-8/200 para realizar as medições, em acordo com a norma NBR 12984 de 01/2009 (ABNT, 2009).

A permeabilidade foi obtida utilizando o equipamento Air Permeability Tester *Testex* TF164B, em triplicata para cada amostra e seguindo a norma ASTM D737-96. A norma pré-determina uma área de teste de 38,3 cm² e uma diferença de pressão de 125 Pa.

O diâmetro das fibras foi analisado utilizando o software ImageJ. As imagens analisadas dos meios filtrantes virgens foram obtidas pelo MEV-FEI Magellan 400 L, disponível no LCE/DEMA da UFSCar, e podem ser visualizadas na Figura 19.

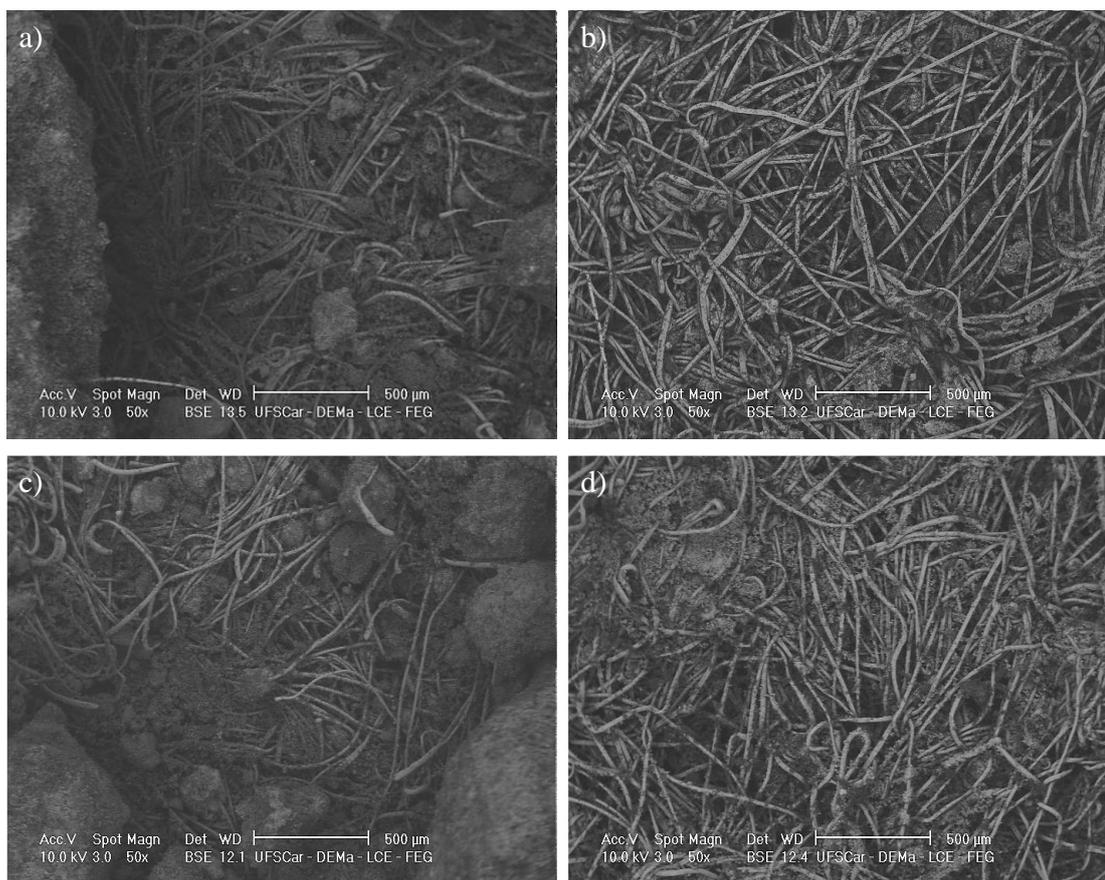
Figura 19 - Imagens do MEV dos meios filtrantes virgens agulhado (a) e hidrojetado (b).



Fonte: Arquivo Pessoal.

Para os meios filtrantes usados, as imagens foram registradas pelo MEV- 30 FEG (Field Emission Gun) também disponível no LCE/DEMA da UFSCar, com o objetivo de realizar o mapeamento quantitativo dos elementos químicos em todas as amostras dos meios filtrantes, além do cálculo do diâmetro das fibras. Esse processo visava observar se algum composto químico estava mais presente em uma amostra do que em outra. No entanto, não foram identificadas diferenças significativas nos resultados, que acabaram por não ser incluídos neste trabalho. Algumas imagens dos meios filtrantes podem ser visualizadas na Figura 20.

Figura 20 – Imagens obtidas no MEV dos meios filtrantes agulhado de 3 (a) e 4 (c) anos e hidrojetado de 3 (b) e 4 (d) anos.



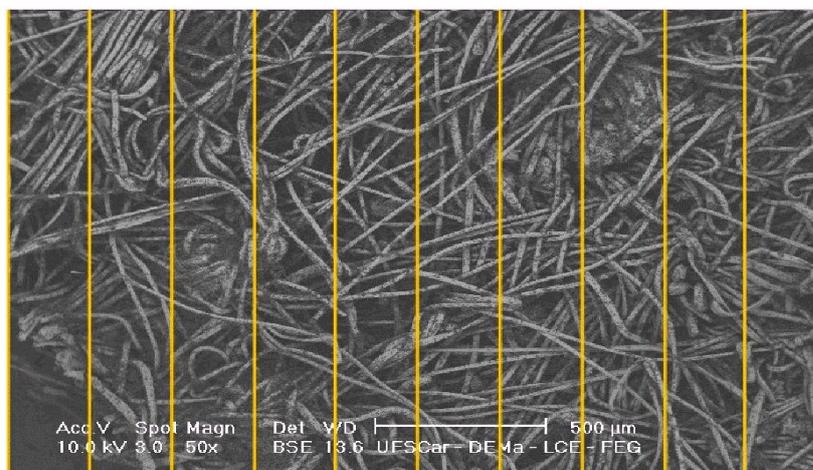
Fonte: Arquivo Pessoal.

Ao analisar as imagens, é possível observar que o meio filtrante hidrojetado apresenta uma distribuição mais uniforme e uma densidade de fibras aparentemente maior em comparação com o agulhado. Além disso, os meios filtrantes de feltro agulhado utilizados aparentam conter uma quantidade superior de material particulado em seu interior. Adicionalmente, uma distinção no tamanho das fibras entre os dois meios filtrantes é observável, diferença esta que foi confirmada ao calcular o diâmetro das fibras.

Para o cálculo do diâmetro, em cada amostra de meio filtrante, as imagens foram divididas em 10 sessões verticais iguais e realizou-se 100 medições em cada imagem, seguindo o método descrito e adaptado de Bortolassi, Guerra e Aguiar (2017), como apresentado na Figura 21. As imagens selecionadas para as medições foram obtidas a uma ampliação de 50x e em uma escala de 500 µm para os meios filtrantes usados, enquanto para os meios filtrantes virgens, a ampliação foi de 250x e a escala de 500 µm. Essas imagens foram obtidas em três regiões

distintas de cada amostra, permitindo assim a análise de uma grande quantidade de fibras em cada meio filtrante. A diferença na ampliação ocorre devido ao fato do equipamento utilizado para capturar as imagens dos meios filtrantes virgens não permitir ampliações muito baixas.

Figura 21 – Exemplo do modelo para realizar as medições do diâmetro das fibras.



Fonte: Arquivo pessoal.

Portanto, procedeu-se ao cálculo dos diâmetros das fibras em cada amostra analisada e calculou-se a média desses diâmetros em cada meio filtrante. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.

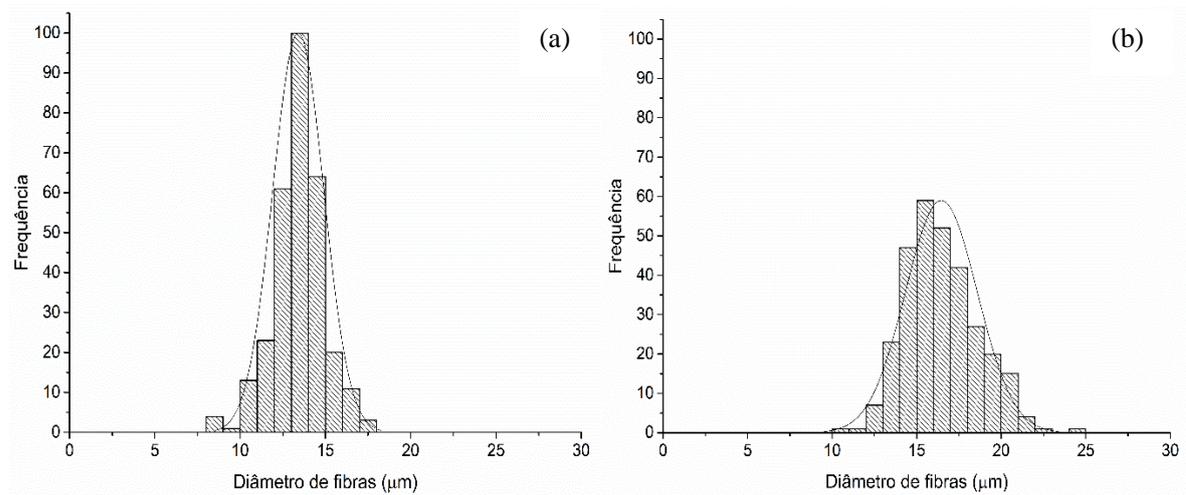
Tabela 4 – Diâmetro médio dos meios filtrantes usados.

Meio Filtrante	Diâmetro médio das fibras (μm)		
	Virgem	3 anos de uso	4 anos de uso
Agulhado	$13,41 \pm 1,50$	$12,58 \pm 2,22$	$12,77 \pm 2,32$
Hidrojateado	$16,46 \pm 2,13$	$16,47 \pm 2,74$	$15,31 \pm 2,46$

Fonte: Arquivo pessoal.

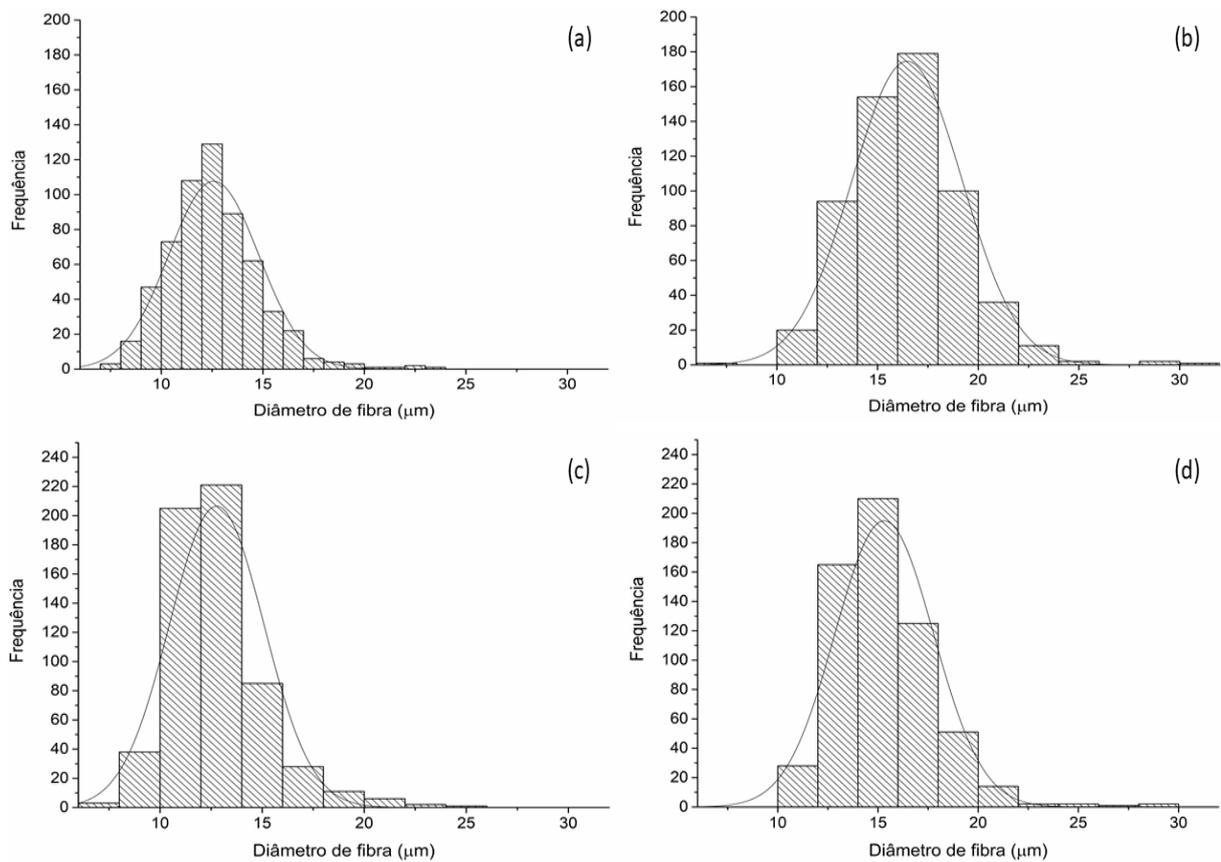
Observa-se uma diferença nos diâmetros das fibras entre os meios filtrantes, com o hidrojateado apresentando diâmetro maior em comparação com o agulhado. Em relação ao tempo de uso dos meios filtrantes, a diferença observada é praticamente desprezível, levando em conta o desvio. Os histogramas da distribuição de diâmetros das fibras dos meios filtrantes em função da frequência podem ser observados nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 – Histogramas de distribuição dos diâmetros de fibras dos meios filtrantes virgens agulhado (a) e hidrojetado (b).



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 23 – Histogramas da média de distribuição dos diâmetros de fibras dos meios filtrantes agulhado de 3 (a) e 4 (c) anos e hidrojetado de 3 (b) e 4 (d) anos.



Fonte: Arquivo pessoal.

Observa-se que tanto as amostras dos meios filtrantes virgens quanto os usados exibiram uma distribuição normal do diâmetro das fibras, sem diferenças significativas na faixa de diâmetros ao longo dos anos. No caso do meio filtrante agulhado, há uma concentração mais alta de fibras com diâmetros entre 10 e 15 μm , aproximadamente, enquanto no meio hidrojetado, as fibras estão distribuídas de forma mais ampla, com diâmetros aproximadamente entre 13 e 18 μm . A maior frequência observada nos meios filtrantes usados é atribuída ao cálculo da média da distribuição ao longo do comprimento das mangas.

Os resultados das caracterizações dos meios filtrantes como espessura, gramatura e permeabilidade estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterizações dos meios filtrantes usados de feltro agulhado e hidrojetado.

Meio filtrante	Caracterizações		
	Espessura (mm)	Gramatura (g/m^2)	Permeabilidade ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ a 125 Pa)
Virgem	$2,33 \pm 0,01$	$703,31 \pm 0,02$	$8,91 \pm 0,02$
Agulhado	3 anos	$3,45 \pm 0,55$	$2199,80 \pm 424,94$
	4 anos	$3,38 \pm 0,68$	$2215,39 \pm 911,76$
Virgem	$2,04 \pm 0,05$	$639,22 \pm 0,01$	$7,48 \pm 0,03$
Hidrojetado	3 anos	$2,34 \pm 0,15$	$996,94 \pm 65,68$
	4 anos	$2,40 \pm 0,14$	$1032,02 \pm 42,41$

Fonte: Arquivo pessoal.

Observa-se que o meio filtrante de feltro agulhado demonstra valores superiores em termos de espessura, gramatura e permeabilidade quando comparado ao meio hidrojetado. Esses resultados sugerem uma maior facilidade de fluxo de ar através do meio agulhado. A elevada gramatura dos meios filtrantes usados pode estar associada à presença da torta já acumulada, conferindo maior peso ao meio filtrante, enquanto o considerável desvio pode ser resultado de medições realizadas em diferentes regiões da manga, assim como da distribuição heterogênea das fibras no meio filtrante.

Ao comparar os meios filtrantes ao longo do período de 3 e 4 anos, observa-se um aumento nos valores de gramatura e permeabilidade. Essa variação pode ser associada ao acúmulo gradual de material particulado no meio filtrante, contribuindo para o aumento da gramatura. Além disso, a penetração das partículas no meio filtrante pode ocasionar danos às fibras e alterar sua distribuição, resultando em uma maior abertura para o fluxo de ar e, por conseguinte, um aumento na permeabilidade. O maior desvio na permeabilidade foi observada no agulhado de 4 anos, as amostras de topo, meio e fundo apresentaram respectivas permeabilidades de 3,11, 6,61 e 8,10 ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ a 125 Pa), demonstrando uma diferença significativa ao longo do comprimento da manga, afetando na penetração de partículas no meio filtrante.

Materiais com elevada gramatura geralmente exibem maior espessura. No que diz respeito à eficácia de filtração, meios filtrantes mais espessos com poros de dimensões reduzidas têm a tendência de alcançar uma eficiência superior. Entretanto, é importante considerar que uma maior espessura pode impactar a flexibilidade do material, tornando o processo de limpeza mais desafiador e ocasionando um aumento na queda de pressão através do tecido (MUKHOPADHYAY, 2009).

4.3. Testes de Filtração

Os ensaios de filtração foram conduzidos no filtro de teste localizado no Laboratório de Controle Ambiental I (LCA) do DEQ/UFSCar, conforme às diretrizes especificadas pela norma VDI 3926. Os valores normativos estabelecidos, seguidos durante os ensaios, estão apresentados na Tabela 6.

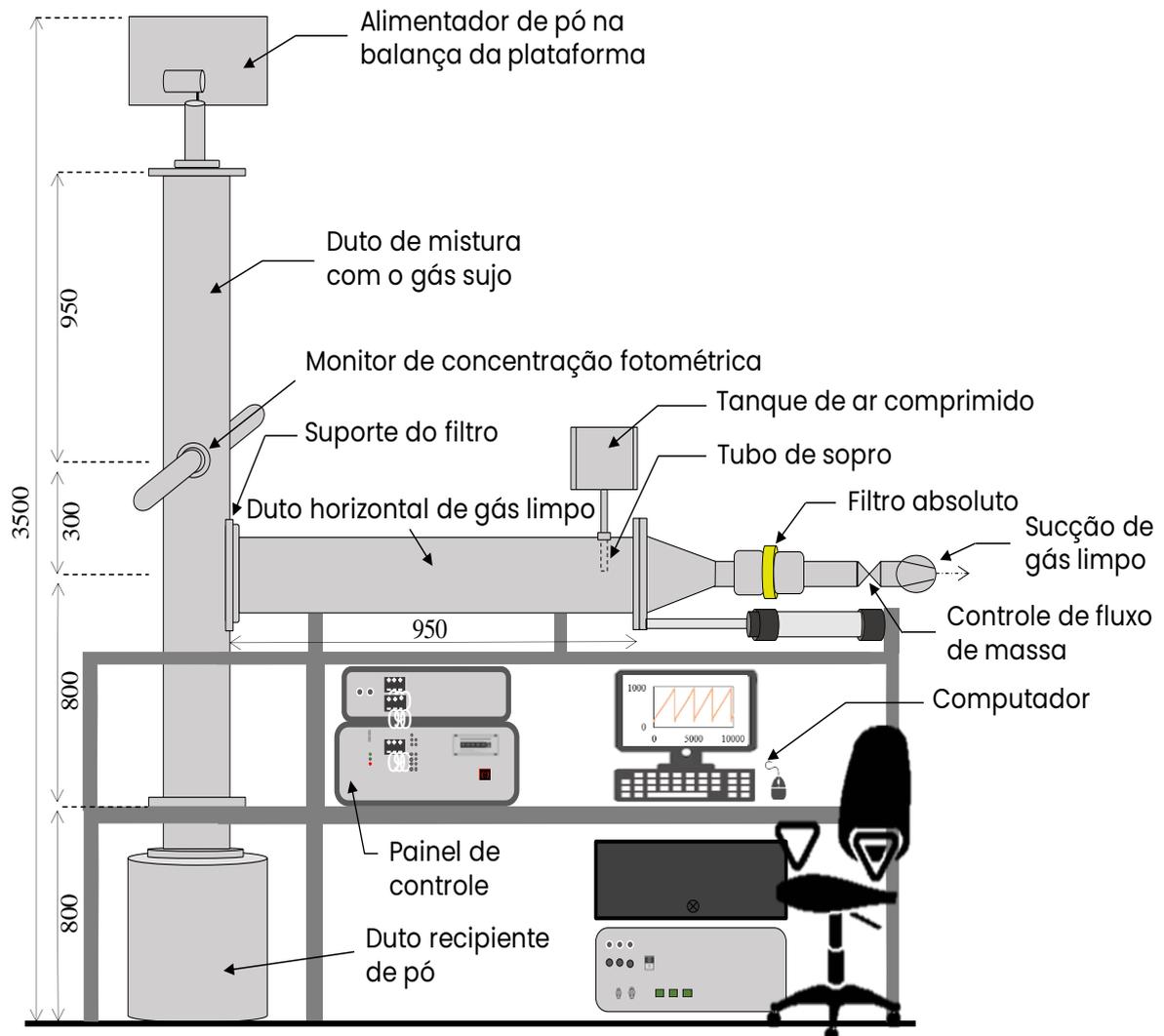
Tabela 6 - Valores padrões dos testes de filtração.

Parâmetros	Valor
Velocidade de filtração	2 m/min
Concentração de partículas no filtro	$5,0 \text{ g/m}^3 \pm 10 \%$
Temperatura	Entre 20°C e 25°C
Umidade relativa do ar	< 50%
Pressão no tanque de limpeza	$5 \text{ bar} \pm 3 \%$
Queda de pressão máxima	1000 Pa

Fonte: Adaptado da Norma VDI 3926.

Os ensaios com ciclos de limpeza têm o propósito de avaliar o desempenho dos meios filtrantes ao longo do tempo, sua eficiência e a evolução da queda de pressão residual. O filtro teste, em escala reduzida, replica o funcionamento de um filtro de mangas industrial, reproduzindo algumas condições operacionais próximas de um processo real. Isso proporciona a análise da viabilidade e das limitações técnicas do filtro. A Figura 24 apresenta o esquema de funcionamento do equipamento utilizado, segundo a norma do VDI 3926.

Figura 24 - Esquema de funcionamento do filtro de acordo com o VDI 3926.



Fonte: Arquivo Pessoal.

O material particulado é inserido no alimentador de pó, localizado na plataforma da balança, conforme apresentado na Figura 25, e é transportado por um parafuso interno ao alimentador. Em seguida, é direcionado para o duto de mistura com ar comprimido. O ar inserido no sistema é proveniente da linha de ar comprimido do laboratório, sendo submetido a

uma etapa prévia de desumidificação, através de um secador, antes de entrar na caixa de alimentação. O gás pulverulento é succionado por um exaustor posicionado na extremidade do filtro, atravessando o meio filtrante fixado no suporte do filtro, onde as partículas ficam retidas. O fluxo de ar prossegue através do duto horizontal e passa por um filtro absoluto, onde será realizada a análise da eficiência gravimétrica. No painel de controle controla-se a velocidade de rotação do parafuso e outros parâmetros para manter os padrões especificados na norma. O gás limpo é então liberado para o ambiente, enquanto o computador recebe os dados relativos à queda de pressão no meio filtrante e os outros parâmetros.

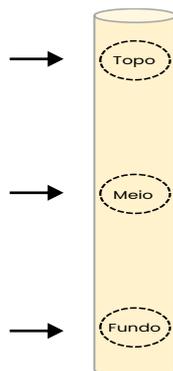
Figura 25 – Alimentador de pó na plataforma da balança.



Fonte: Arquivo Pessoal.

A indústria siderúrgica disponibilizou dois tipos de mangas, uma hidrojateada e outra de feltro agulhado, virgens e com tempos de uso de 3 anos e 4 anos, totalizando 6 mangas. Em cada manga usada foi retirada 3 amostras no seu comprimento, uma do topo, do meio e do fundo, para realização dos ensaios de filtração, como ilustrado na Figura 26. Nas mangas virgens foi retirada uma amostra de cada.

Figura 26 – Representação das amostras retiradas das mangas usadas.



Fonte: Arquivo pessoal.

Os meios filtrantes foram cortados utilizando um molde ajustado às dimensões do suporte, conforme representado na Figura 27. Após a fixação do meio filtrante no suporte, procedeu-se à pesagem prévia e posterior aos ensaios de filtração, juntamente com o filtro absoluto utilizado, filtro HEPA (*High Efficiency Particulate Arrestance*) MN 85/70 BF, a fim de avaliar a concentração que atingiu o meio filtrante e, logo após calcular a eficiência gravimétrica de coleta.

Figura 27 – Suporte do meio filtrante desmontado.



Fonte: Arquivo Pessoal.

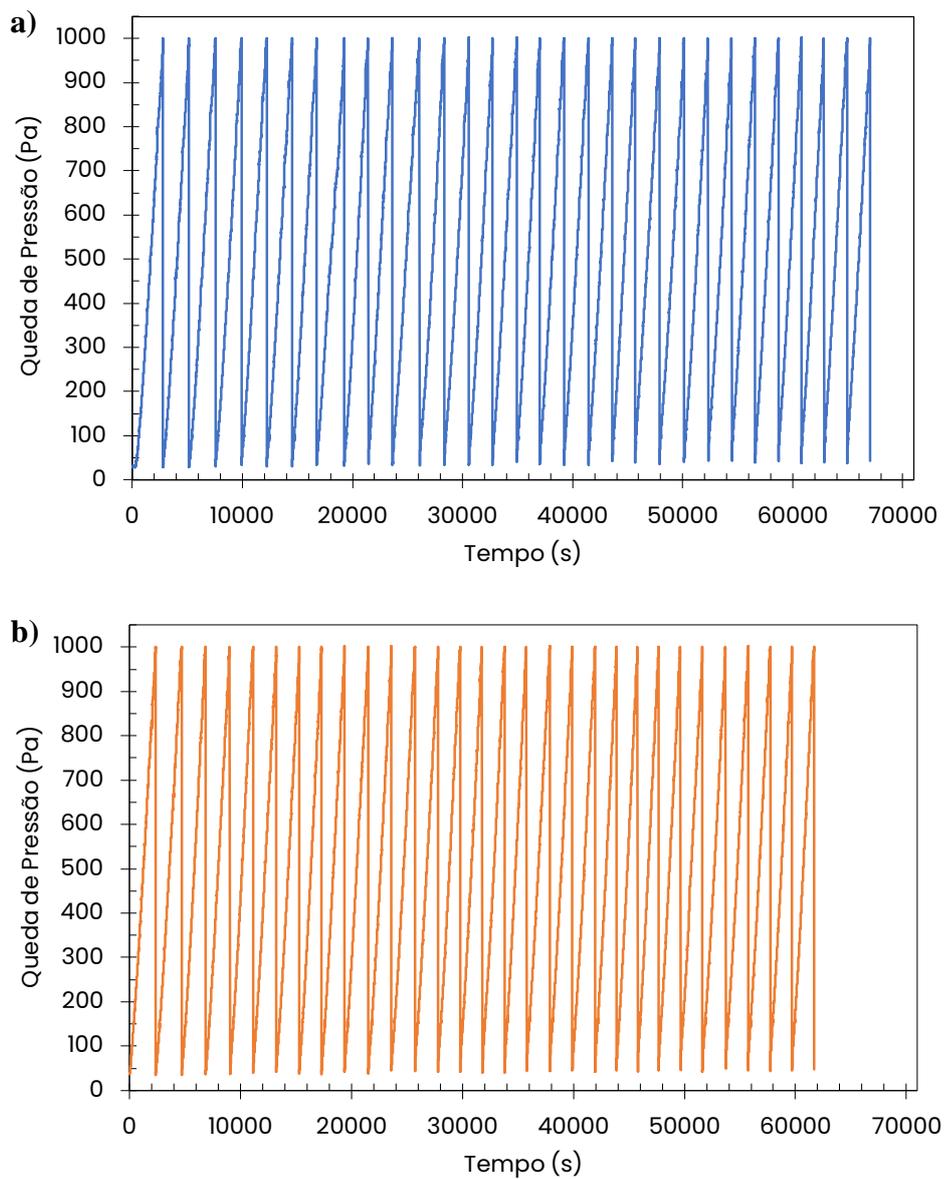
O controle da concentração de pó que entra no filtro, foi regulado por meio da alteração na velocidade de rotação do parafuso no alimentador de pó, monitorado através do painel de controle e do computador.

Realizou-se 30 ciclos de filtração, com a limpeza por jato pulsante, em cada amostra de meio filtrante. Cada ciclo foi ajustado em acordo com a norma, ao atingir a queda de pressão máxima de 1000 Pa o pulso era acionado, com duração de 60 milissegundos. Em seguida, a eficiência de coleta gravimétrica foi calculada utilizando a Equação (10).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 28, 29 e 30 ilustram os resultados de queda de pressão por tempo, obtidos dos trinta ciclos de filtração, com a queda de pressão máxima estabelecida em 1000 Pa para cada ciclo. Os dados foram obtidos no filtro teste destacado na Figura 24, o qual empregou-se o pó proveniente do processo de dessulfuração e os meios filtrantes compostos por feltro agulhado e hidrojetado, ambos virgens e com 3 e 4 anos de uso.

Figura 28 - Queda de pressão por tempo nos meios filtrantes virgens de feltro agulhado (a) e hidrojetado (b), considerando 30 ciclos de filtração.



Fonte: Arquivo pessoal.

Ao analisar a Figura 28, na qual representa os dados da filtração dos meios filtrantes virgens, nota-se que o feltro agulhado apresentou um maior tempo de filtração, essa diferença no tempo de filtração entre meio filtrante agulhado e o hidrojateado foi de aproximadamente 5390s. Nos estágios iniciais, o meio filtrante agulhado demonstrou uma melhor performance, sua maior permeabilidade e porosidade permite com que o fluxo atravessasse mais facilmente o meio, levando um maior tempo para atingir a queda de pressão máxima. No entanto, à medida que os ciclos avançaram e a torta se depositou, o tempo de filtração reduziu e a diferença em relação ao hidrojateado foi diminuindo, resultando em uma menor diferença de performance entre os meios filtrantes.

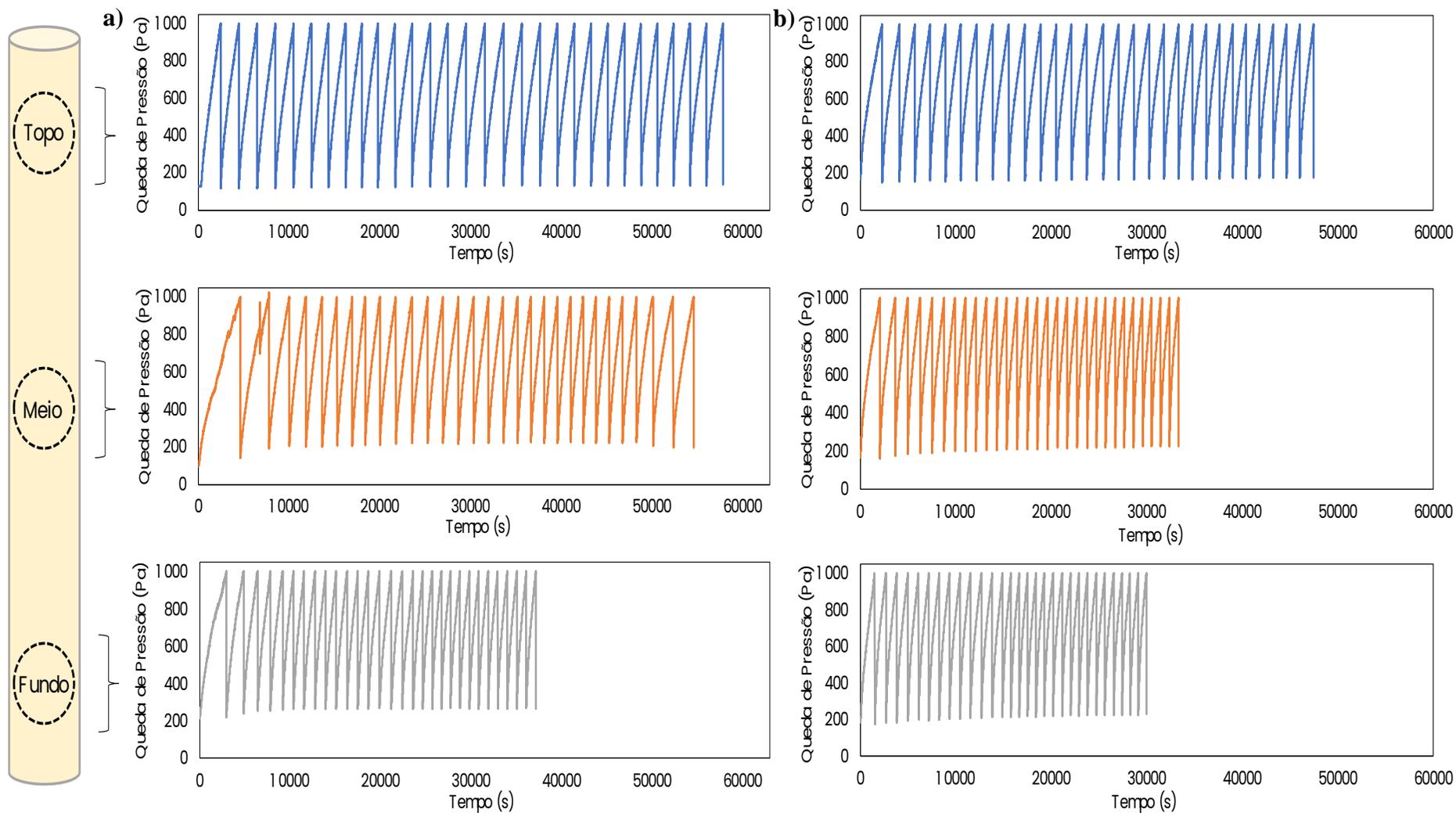
Para os meios filtrantes agulhado com 3 e 4 anos de uso, conforme apresentado na Figura 29, nota-se uma diferença significativa no comportamento de filtração ao longo do comprimento da manga. As amostras do fundo, obteve um menor tempo de filtração total e uma maior queda de pressão residual, em comparação com as amostras do meio e do topo. Essa diferença pode ser atribuída à distribuição do material particulado ao entrar no filtro de mangas, que entra com uma concentração mais elevada na parte inferior do filtro.

Dutta *et al.* (2023) analisaram a queda de pressão em tecidos de poliéster agulhado em uma unidade de filtro piloto com jato pulsante, em condições próximas às industriais, e utilizando cinzas volantes. Eles observaram que, devido às maiores dimensões do meio filtrante, a deposição das partículas é irregular ao longo do comprimento devido ao movimento instável do fluxo de ar. Além disso, notaram que a eficiência da limpeza é mais forte na parte superior do meio filtrante e diminui gradualmente conforme o ar desce, resultando em um crescimento mais lento da queda de pressão no topo da manga, devido ao menor acúmulo de pó.

Como apresentado na metodologia, o meio filtrante agulhado apresenta um diâmetro de fibras menor e uma permeabilidade maior. O menor diâmetro das fibras facilita a penetração das partículas no interior do meio filtrante e a maior permeabilidade pode levar a uma obstrução mais intensa dos poros, com a deposição das partículas ocorrendo no interior do meio filtrante, tornando o processo de limpeza mais difícil. Isso resulta em um menor tempo de filtração, devido a queda de pressão aumentar de modo mais rápido.

Na Figura 29 – a), no gráfico referente à amostra do meio, é possível notar que nos dois primeiros ciclos de filtração houve picos incomuns, possivelmente associados ao desprendimento de uma parte da torta que já estava presente no momento dos testes de filtração. No entanto, após o terceiro ciclo, observa-se uma estabilização de torta.

Figura 29 - Queda de pressão por tempo no meio filtrante feltro agulhado de 3 anos (a) e 4 anos (b), considerando 30 ciclos de filtração.



Fonte: Arquivo Pessoal.

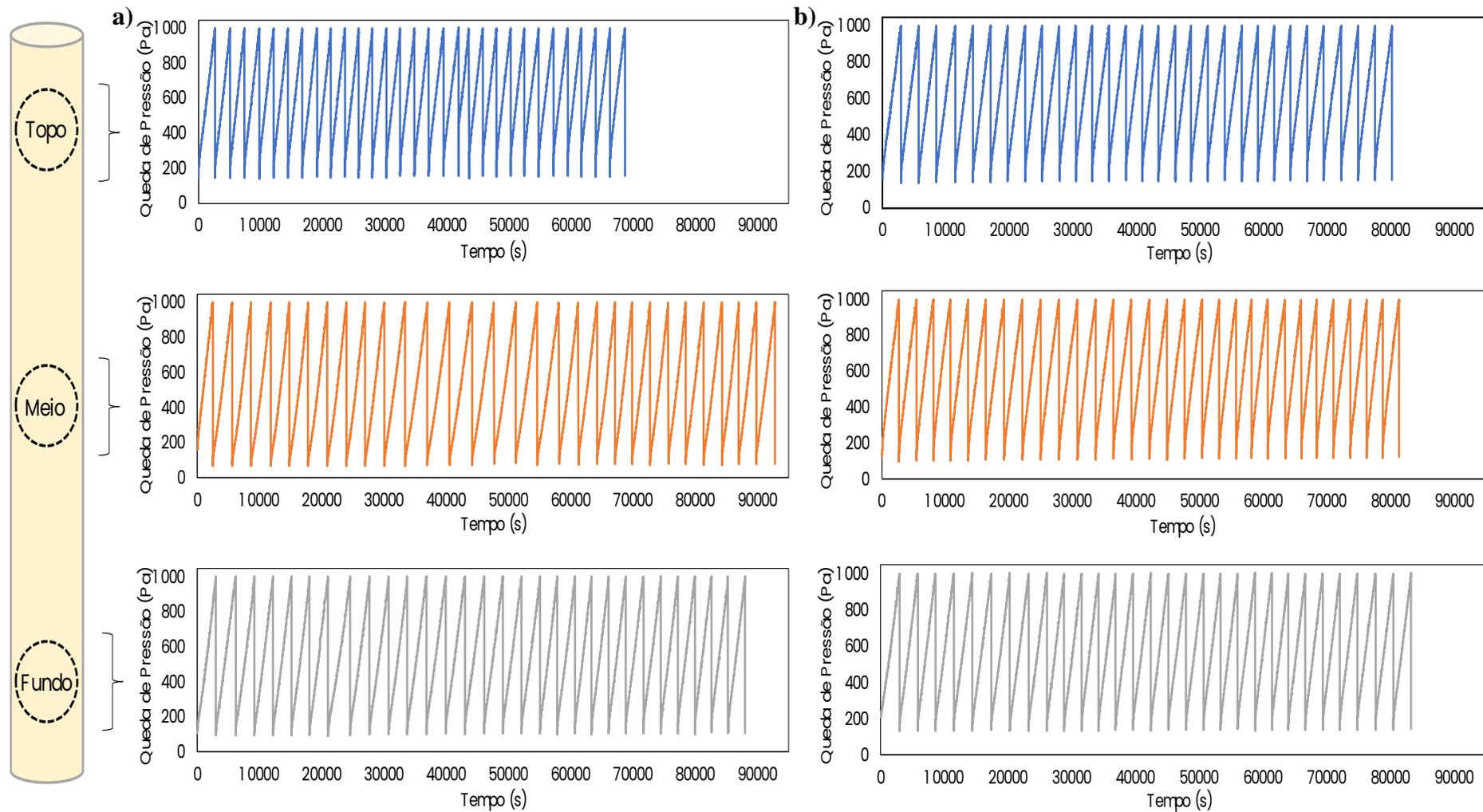
Em relação ao período de uso, observando o intervalo de 3 para 4 anos, nota-se uma redução no tempo de filtração e uma maior queda de pressão residual em todas as amostras do meio filtrante de feltro agulhado. Esse resultado já era esperado, uma vez que a queda de pressão tende a aumentar mais rapidamente ao longo de cada ciclo de uso. A característica observada ao longo do comprimento da manga também se mantém nas amostras com 4 anos de uso, reforçando uma constância no comportamento dos meios filtrantes agulhados no sistema de filtro de mangas industrial em estudo.

Ao analisar os meios filtrantes hidrojetado usados, como mostrado na Figura 30, nota-se que seu comportamento ao longo do comprimento da manga difere do agulhado. Mesmo diante das altas concentrações de material particulado na parte inferior da manga, o hidrojetado não aparenta ter sido afetado como o agulhado. Isso confere ao método hidrojetado uma melhor estabilidade, resultando em um maior tempo de filtração e um aumento mais lento da queda de pressão em toda o comprimento da manga. Além disso, o hidrojetado apresentou um tempo de filtração mais prolongado em comparação com o agulhado. Ao comparar o intervalo de 3 a 4 anos, observa-se que a diferença no tempo de filtração não é tão significativa, mesmo após um ano a mais de uso o meio filtrante hidrojetado se demonstrou bastante estável e com um desempenho satisfatório na filtração.

O maior diâmetro das fibras e a menor permeabilidade do meio filtrante hidrojetado reduzem os espaços vazios disponíveis para a penetração das partículas. Isso teoricamente resultaria em uma maior queda de pressão residual ao longo do tempo. No entanto, isso não é observado na prática, possivelmente devido à deposição da torta ocorrer principalmente na superfície do meio filtrante. Isso torna a limpeza mais fácil e eficiente, resultando em uma menor queda de pressão residual no meio filtrante e um tempo de filtração maior.

A amostra do topo, com 3 anos de uso, apresentou uma queda de pressão residual mais significativa (média acima de 150Pa) e um tempo de filtração mais curto, com 68.662,8s, em relação as outras amostras do mesmo comprimento de manga, que alcançaram tempos acima de 88.000s, bem como com as amostras de 4 anos de uso. Esse comportamento é considerado anômalo em relação ao padrão esperado. Uma possível explicação para esse fenômeno pode estar associada a formação da torta; o meio filtrante hidrojetado parece demandar um tempo de filtração maior para uma formação mais estável da torta, devido à eficácia aparentemente maior do processo de limpeza, e devido a concentração de material particulado ser maior na parte inferior da manga, demorou mais para formar a torta no topo da manga.

Figura 30 - Queda de pressão por tempo no meio filtrante hidrojetado de 3 anos (a) e 4 anos (b), considerando 30 ciclos de filtração.



Fonte: Arquivo Pessoal.

No entanto, mesmo apresentando um menor tempo de filtração e uma queda de pressão residual mais alta, a amostra do topo com 3 anos de uso apresentou um desempenho superior em comparação com as amostras dos meios filtrantes agulhado usados e a amostra virgem do hidrojateado, em relação ao tempo de filtração e a queda de pressão residual.

De um modo geral, o material sujeito a concentrações mais altas de poeira retém uma quantidade maior de partículas no seu interior, mesmo após o processo de limpeza. A possibilidade de obstrução dos poros do meio filtrante por essas partículas, pode ser responsável pelo aumento mais rápido da queda de pressão. Além disso, uma penetração mais profunda de material particulado tende a reduzir a vida útil do meio filtrante e a aumentar o consumo de energia utilizada no processo, devido à resistência imposta pelo meio filtrante ao fluxo de ar, resultando também em um aumento da queda de pressão residual (SINGH; MUKHOPADHYAY; GUPTA, 2023). Esse aumento acelerado da queda de pressão através do material filtrante de mangas pode exigir um consumo maior de energia no ventilador posicionado depois do compartimento das mangas, para compensar (PARK *et al.*, 2019).

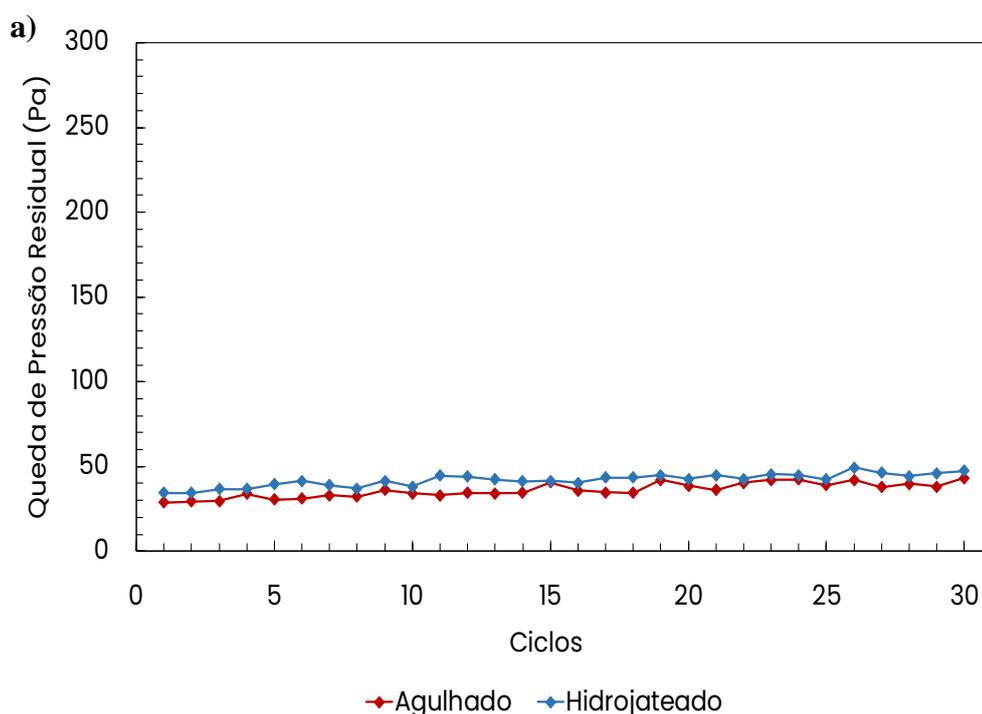
A diferença entre o agulhado e hidrojateado pode ser atribuída às características únicas de cada meio filtrante, no caso do hidrojateado inclui menor espessura, gramatura e permeabilidade, além de um diâmetro de fibras maior. A formação da torta nos diferentes meios filtrantes também desempenhou um papel importante na eficácia da filtração. Essas particularidades, juntamente com a maior densidade de fibras por área e o entrelaçamento delas, conforme observado nas imagens obtidas pelo MEV (Figuras 19 e 20), sugerem que as fibras do meio filtrante hidrojateado estejam mais compactadas e que suas fibras se encontrem mais unidas, resultando em poucos espaços vazios para a passagem do fluxo de ar. Essa compactação resulta em uma retenção superficial das partículas no meio filtrante hidrojateado, que contribui para a filtração e facilita o processo de limpeza.

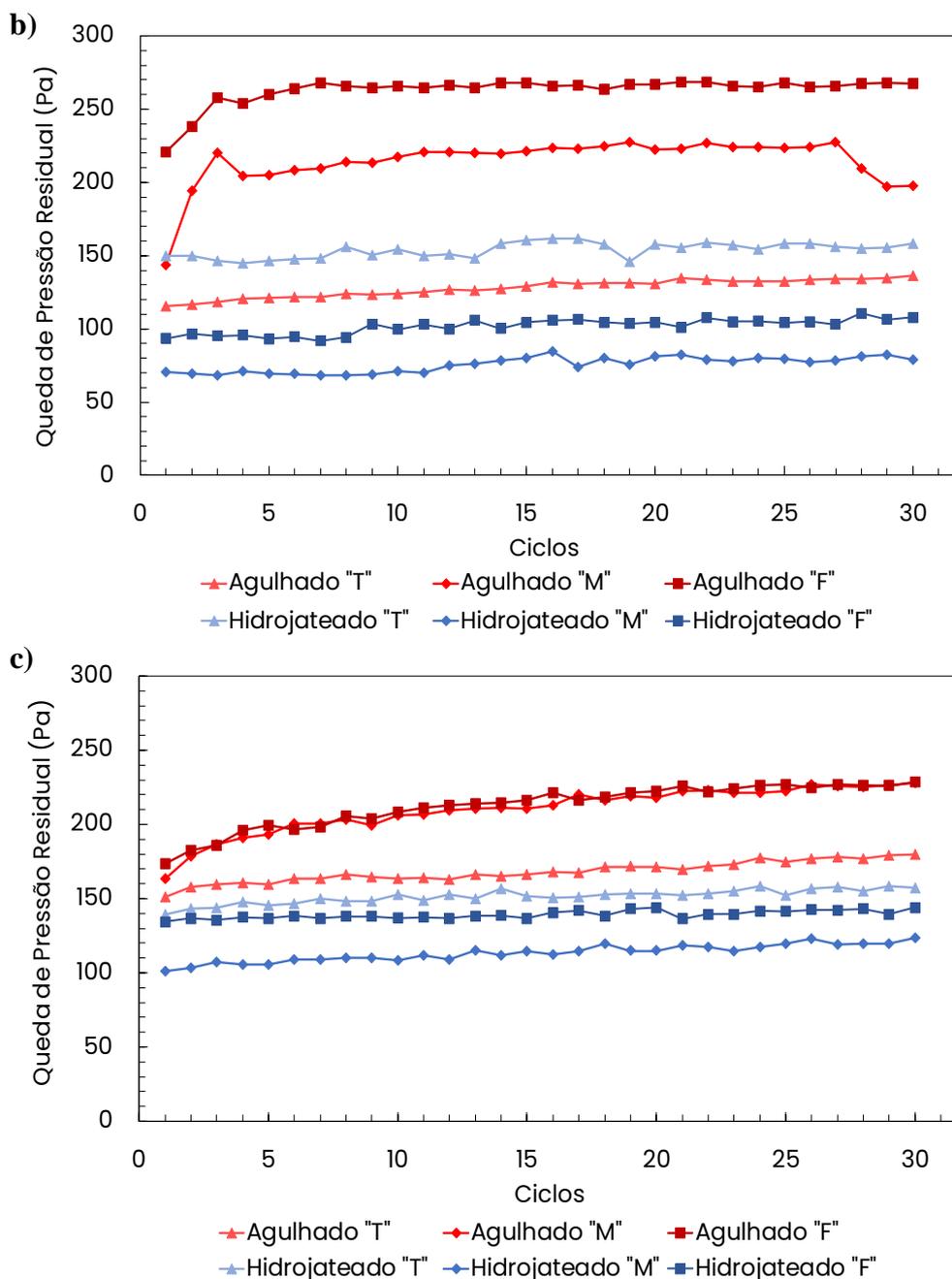
O aumento da penetração do material particulado no meio filtrante contribui para a remoção desigual da torta na superfície durante os ciclos de filtração. Consequentemente, uma quantidade maior de partículas permanece retida no meio filtrante, o que resulta em uma queda de pressão residual relativamente alta em um curto intervalo de tempo entre os pulsos de limpeza posteriores. Ocasionalmente, o meio filtrante atinge um ponto em que a limpeza se torna mais frequente devido a obstrução dos poros, conhecido como estágio de entupimento (DUTTA *et al.*, 2023).

A Figura 31 ilustra a queda de pressão residual nos meios filtrantes ao longo dos 30 ciclos de filtração, proporcionando uma análise mais detalhada da vida útil do meio filtrante após os ciclos de limpeza.

Como esperado, os meios filtrantes virgens apresentados na Figura 31 - a), obtiveram uma queda de pressão residual baixa ao longo dos 30 ciclos, com uma média de queda de pressão residual que não ultrapassou 50 Pa. Comparando ambos os meios filtrantes virgens, observa-se uma diferença praticamente insignificante, os dois alcançaram quedas de pressão residual bem semelhantes. No entanto, o meio filtrante hidrojetado apresentou uma queda de pressão residual ligeiramente maior, atingindo 34,6 Pa no primeiro ciclo de filtração, em comparação com os 28,8 Pa do agulhado. Ao analisar o último ciclo de filtração, verifica-se um aumento de 37,1% (12,84 Pa) na queda de pressão residual para o meio filtrante hidrojetado, enquanto para o agulhado esse aumento foi de 50,0% (14,41 Pa). Isso evidencia que ao longo dos ciclos de filtração, a queda de pressão no meio filtrante agulhado tende a aumentar mais rapidamente, devido a sua maior permeabilidade e porosidade comparadas ao meio filtrante hidrojetado, corroborando com as análises realizadas para as mangas com 3 e 4 anos de uso, apresentados na Figura 31 - b) e c).

Figura 31 - Queda de pressão residual por ciclo nos meios filtrantes virgens (a), com 3 anos (b) e com 4 anos (c), considerando 30 ciclos de filtração.





Fonte: Arquivo Pessoal.

Na Figura 31 - b), que apresenta as amostras dos meios filtrantes com 3 anos de uso, ao analisar a variação da queda de pressão residual ao longo do comprimento nas mangas hidrojateada e agulhada, nota-se um aumento considerável na queda de pressão residual no agulhado. Esse aumento é mais evidente nas amostras do meio e do fundo da manga. Por outro lado, as amostras do meio filtrante hidrojateado, mantiveram uma queda de pressão residual mais constante ao longo dos 30 ciclos, exceto pela amostra do topo, que como analisado na Figura 30, apresentou um comportamento diferente do esperado, com um aumento mais rápido da queda de pressão.

Na Figura 31 - c), que apresenta as amostras dos meios filtrantes com 4 anos de uso, a queda de pressão residual permaneceu mais elevada durante os 30 ciclos e ao longo do comprimento para o meio agulhado, em comparação com o hidrojateado. No entanto, essa queda de pressão residual foi menor que nas amostras com 3 anos, especialmente nas do meio e fundo, enquanto na amostra do topo houve um aumento na queda de pressão residual ao longo dos ciclos. Por outro lado, as amostras do meio filtrante hidrojateado mantiveram a estabilidade na queda de pressão residual ao longo do comprimento da manga, semelhante a apresentada nas amostras de 3 anos, porém como esperado, houve um aumento na queda de pressão residual, no entanto esse aumento foi menos significativo comparado ao apresentado para o meio filtrante agulhado.

Ao comparar com o meio filtrante virgem, o hidrojateado demonstrou que mesmo após 3 e 4 anos de uso, permaneceu com uma queda de pressão residual constante e consideravelmente baixa, após os 30 ciclos de filtração e ao longo do comprimento da manga, apresentando uma maior vida útil. Em contrapartida, o meio filtrante agulhado apresentou uma queda de pressão residual significativamente mais elevada nesse mesmo período e comprimento da manga, indicando uma vida útil menor.

As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados referentes à concentração de material particulado, tempo total de filtração, massa retida no filtro teste e no absoluto, bem como a eficiência de coleta dos meios filtrantes, dados obtidos ao longo dos 30 ciclos dos testes de filtração. Na Tabela 7 estão apresentados os dados dos meios filtrantes virgens.

Tabela 7 - Dados do teste de filtração das mangas virgens, considerando os 30 ciclos.

Dados	Meios filtrantes	
	Virgens	
	Hidrojateado	Agulhado
Concentração de MP (g/m³)	5,02	5,02
Tempo total em 30 ciclos (min)	1027,86	1117,71
Massa total retida no meio filtrante (g)	159,73	173,73
Massa total retida no filtro absoluto (g)	0,01	0,03
Eficiência de coleta (%)	99,99	99,98

Fonte: Arquivo pessoal.

Assim como comprovado nos gráficos de queda de pressão ao longo do tempo de filtração, os resultados da Tabela 7 revelaram que o meio filtrante agulhado virgem apresentou um desempenho superior durante a filtração em comparação com o hidrojateado, em termos de tempo de filtração total para os 30 ciclos. No entanto, ao longo dos ciclos de filtração, observou-se que a quantidade de massa que passou pelo meio filtrante e foi retida no filtro HEPA (filtro absoluto) foi menor para a amostra do meio filtrante hidrojateado, indicando uma maior penetração de partículas no agulhado.

Quanto à eficiência de coleta, a diferença entre os meios filtrantes foi mínima, sendo que o hidrojateado demonstrou uma melhor performance, alcançando uma eficiência de coleta das partículas de 99,99%.

Os resultados para os meios filtrantes com 3 e 4 anos de uso, estão apresentados na Tabela 8 e representam o resultado da média das amostras do topo, meio e fundo de cada meio filtrante.

Tabela 8 - Dados do teste de filtração das mangas usadas, considerando os 30 ciclos.

Dados	Meios filtrantes			
	3 anos de uso		4 Anos de uso	
	Hidrojateado	Agulhado	Hidrojateado	Agulhado
Concentração de MP (g/m³)	5,10 ± 0,07	5,10 ± 0,01	5,03 ± 0,06	5,17 ± 0,12
Tempo total em 30 ciclos (min)	1386,70 ± 213,60	831,24 ± 185,65	1360,48 ± 25,83	615,26 ± 154,91
Massa total retida no meio filtrante (g)	218,81 ± 31,17	130,91 ± 29,15	211,67 ± 5,08	98,06 ± 22,57
Massa total retida no filtro absoluto (g)	0,19 ± 0,02	0,33 ± 0,26	0,08 ± 0,09	0,21 ± 0,05
Eficiência de coleta (%)	99,91 ± 0,02	99,72 ± 0,24	99,96 ± 0,04	99,78 ± 0,07

Fonte: Arquivo Pessoal.

No caso dos meios filtrantes com 3 e 4 anos de uso, apresentados na Tabela 8, é visível uma maior evolução do meio filtrante hidrojateado ao longo dos anos em comparação com o agulhado. O tempo total de filtração do meio filtrante hidrojateado foi significativamente maior ao longo dos 30 ciclos de filtração, em comparação com o agulhado. Comparando o tempo de filtração total do hidrojateado virgem com o de 3 anos de uso, houve um aumento de

aproximadamente 34,91% (358,82 min), que reduziu cerca de 1,89% (26,20 min) após mais um ano de uso. No entanto ao comparar o agulhado virgem e com 3 anos de uso, observou-se que o tempo total de filtração reduziu consideravelmente durante os anos, cerca de 25,63% (286,46 min), e após mais um ano de uso (com 4 anos) reduziu mais 25,98% (215,95 min) aproximadamente.

Em relação a massa total retida, o meio filtrante hidrojetado apresentou uma maior massa de material particulado retido no seu meio filtrante. Por outro lado, a quantidade de massa que passou pelo meio filtrante e foi retida no filtro HEPA (massa total retida no filtro absoluto) foi maior para a amostra do meio filtrante agulhado, assim como para os meios filtrantes virgens, indicando uma maior penetração de partículas no agulhado ao longo dos anos, mesmo com a formação da torta.

O elevado valor do desvio em relação ao meio filtrante agulhado está associado à diferença observada nas amostras do comprimento da manga em três regiões distintas. Conforme evidenciado nos gráficos de queda de pressão por tempo, apresentados na Figura 29, as amostras provenientes do meio e do fundo apresentaram tempos de filtração mais curtos. Observando a Tabela 8, o meio filtrante agulhado obteve uma menor massa retida no meio filtrante, resultando, portanto, em uma maior quantidade de massa na saída do sistema (retido no filtro absoluto). Quanto ao hidrojetado, a maior instabilidade concentrou-se no meio filtrante de 3 anos, devido ao comportamento anômalo apresentado pela amostra de topo, resultando em um desvio mais acentuado no tempo de filtração. No entanto, mesmo com o alto desvio observado no hidrojetado, não houve diferença significativa na eficiência de filtração em comparação ao hidrojetado com 4 anos de uso.

Conforme esperado, devido ao melhor desempenho apresentado nos testes de filtração, o meio filtrante hidrojetado demonstrou uma eficiência superior a 99,9%. Este resultado sugere uma filtração mais estável e eficaz, com uma melhor retenção das partículas indesejadas. Além disso, notou-se um aumento na eficiência ao longo do tempo, passando de 3 anos para 4 anos de uso, tanto para o meio filtrante hidrojetado quanto para o agulhado. No entanto, para o meio filtrante agulhado, foi observado um desvio maior na eficiência, sugerindo que as variações entre as amostras de topo, meio e fundo impactaram negativamente na estabilidade da filtração. As amostras de 3 anos do agulhado obtiveram eficiências de 99,97%, 99,64% e 99,52%, para as amostras de topo, meio e fundo, respectivamente, justificando o maior desvio.

Ao relacionar os meios filtrantes virgens com os usados por 3 e 4 anos, nota-se que o hidrojateado apresentou maior estabilidade com o passar dos anos de uso. Houve um aumento no tempo de filtração e uma maior retenção de material particulado no meio filtrante ao longo do tempo. Por outro lado, o agulhado obteve uma redução no tempo de filtração e a quantidade de material particulado que passou pelo meio filtrante foi maior, tanto ao longo do tempo quanto no comprimento da manga. Essa melhor estabilidade do hidrojateado pode ser atribuída à filtração ocorrer principalmente na sua superfície, ao contrário do agulhado que apresenta uma filtração maior em profundidade. Além também da formação da torta e às características próprias do meio filtrante hidrojateado, como diâmetro de fibras, permeabilidade e porosidade, que ajudam a alcançar uma filtração mais equilibrada no hidrojateado.

Analisando a eficiência de coleta das partículas nos meios filtrantes usados em comparação aos meios filtrantes virgens, o meio filtrante agulhado apresentou uma redução significativa na eficiência e um aumento da queda de pressão residual, tanto ao longo do tempo de uso e quanto ao longo do comprimento da manga. No entanto, o hidrojateado apresentou um desenvolvimento constante em sua eficiência ao longo do mesmo período, obtendo maiores tempos de filtração com menores quedas de pressão residual, além de não apresentar alterações ao longo do comprimento da manga, como identificado no meio filtrante agulhado.

Ambos os meios filtrantes analisados de 3 e 4 anos foram retirados do mesmo processo da indústria siderúrgica, portanto foram submetidos a condições de filtração iguais na indústria e quando avaliados laboratorialmente. Logo, se faz necessário para a indústria ter um controle maior do processo ao longo dos anos e em diferentes pontos do comprimento da manga, além de uma análise mais detalhada das características do meio filtrante, a fim de se ter uma melhor eficiência durante o processo.

6. CONCLUSÃO

A partir das caracterizações realizadas e dos resultados obtidos no Capítulo 5, foi possível chegar a algumas conclusões importantes.

O material particulado proveniente do processo de dessulfuração e despoeiramento, disponibilizado por uma indústria siderúrgica, apresentou ser predominantemente composto por Cálcio (Ca) e Ferro (Fe), com traços de outros elementos presentes nos resíduos resultantes da operação siderúrgica, como o Potássio (K), Sódio (Na), Silício (Si), e outros. Essa composição reflete os principais componentes dos reagentes e dos produtos gerados durante os processos de remoção do enxofre, essenciais para a produção de aço e a manutenção dos padrões ambientais.

O diâmetro das partículas obtidas foi inferior a 10 μm , com uma mediana de 2,64 μm , ou seja, aproximadamente 50% das partículas são menores que $\text{PM}_{2,5}$. Isso evidencia a predominância de partículas finas nessa faixa de tamanho, o que indica a presença de partículas potencialmente respiráveis e destaca o impacto significativo na qualidade do ar e na saúde pública se forem liberadas ao meio ambiente.

Nas análises de caracterização realizadas com os meios filtrantes de feltro agulhado e hidrojateado, tanto em suas condições virgens quanto após 3 e 4 anos de uso, demonstrou-se que o feltro agulhado apresentou, aproximadamente, diâmetro médio das fibras 24,4% menores em comparação às fibras do hidrojateado. Essa diferença nas dimensões contribui para explicar a maior permeabilidade do meio filtrante agulhado, resultando em uma capacidade distinta de retenção de partículas ao longo do tempo de uso.

Durante os ensaios de filtração dos meios filtrantes virgens, ao longo dos 30 ciclos, foi observada uma maior queda de pressão residual no meio filtrante hidrojateado quando comparado com o agulhado e com relação ao tempo de filtração observou-se um maior tempo para o meio filtrante de feltro agulhado. No entanto, em relação a eficiência de filtração, ambos os meios filtrantes apresentaram eficiências bem próximas, com diferença apenas na segunda casa decimal, com o hidrojateado apresentando uma maior eficiência, alcançando 99,99%. O meio filtrante hidrojateado virgem, apesar de seu menor tempo de filtração e maior queda de pressão, apresentou uma boa eficiência de filtração.

Para os meios filtrantes usados, ao longo de 30 ciclos, foi observada uma maior queda de pressão residual no meio filtrante agulhado. Além disso, observou-se como o agulhado se comporta com a distribuição irregular de partículas ao longo do comprimento da manga. Devido à sua maior permeabilidade, as partículas têm maior facilidade de penetrar o meio filtrante, tornando a limpeza mais difícil e resultando no acúmulo de uma quantidade maior de partículas nas amostras localizadas no fundo da manga. Como consequência, a eficiência e o tempo de filtração foram reduzidos, levando a uma capacidade de filtração menor e uma vida útil mais curta do meio filtrante agulhado.

Em contrapartida, os meios filtrantes hidrojateado usados demonstraram maior estabilidade ao longo do processo de filtração e do comprimento da manga. Embora tenha apresentado uma queda na permeabilidade do meio filtrante, indo de virgem para usado, essa alteração não afetou sua eficiência nem a sua vida útil. Os meios filtrantes hidrojateado mantiveram uma eficiência superior, com tempos de filtração prolongados e uma vida útil mais longa, mesmo após 3 e 4 anos de uso. Observou-se também que os filtros absolutos utilizados nas filtrações com o meio filtrante hidrojateado apresentaram uma massa retida significativamente menor em comparação com os filtros absolutos aplicados nas filtrações do agulhado, destacando a menor penetração de material particulado no meio filtrante hidrojateado e a sua maior eficiência ao longo do tempo de uso.

Além disso, é importante ressaltar a influência nos testes de filtração observada dos diferentes métodos de entrelaçamento das fibras, empregadas nos meios filtrantes hidrojateado e feltro agulhado, particularmente nos meios filtrantes usados. Observou-se que o entrelaçamento das fibras do meio filtrante hidrojateado possui maior uniformidade e menos espaços vazios para a passagem do fluxo, corroborando com uma menor penetração de material particulado no interior das fibras. Consequentemente os meios filtrantes hidrojateado com 3 e 4 anos de uso apresentaram uma maior eficiência de limpeza e uma melhor eficiência na coleta de partículas, com maiores tempos de filtração e menor queda de pressão residual, se comparado aos meios filtrantes de feltro agulhado. Assim, destaca-se a necessidade de considerar o impacto do entrelaçamento das fibras no desempenho do meio filtrante na filtração, principalmente ao longo dos anos de uso do meio filtrante.

Em síntese, nas condições operadas e analisadas nos testes de filtração desse trabalho, o meio filtrante hidrojateado demonstrou-se mais eficaz ao longo dos anos, com uma boa vida útil, um maior tempo de filtração e uma menor queda de pressão residual. Ainda não se tem o

conhecimento de um parâmetro, ou seja, um tempo ideal que determina a troca da manga industrial do filtro, porém, o meio filtrante que apresenta uma maior vida útil sem reduzir sua eficiência de coleta já é um ponto positivo para a indústria. No entanto, também deve-se levar em consideração o custo relacionado a esses meios filtrantes.

Em vista disso, é importante considerar a degradação gradual dos meios filtrantes, como o tempo de uso, sua eficiência prolongada, a sua durabilidade e as características próprias de cada meio filtrante, como permeabilidade, porosidade, diâmetro de fibras, espessura e a técnica de entrelaçamento das fibras. Além disso, sempre é necessário por parte da indústria, um controle detalhado do processo de filtração em diferentes pontos do filtro de mangas.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Realizar o envelhecimento artificial dos filtros conforme a norma VDI 3926, utilizando meios filtrantes virgens, para comparar a eficiência e a vida útil com filtros envelhecidos em ambiente industrial.
- ✓ Realizar testes de filtração para avaliar a eficiência na coleta de nanopartículas, utilizando diferentes meios filtrantes, a fim de determinar qual é mais eficaz na coleta de partículas em escala nanométrica.
- ✓ Analisar o ar filtrado pelo meio filtrante, a fim de analisar a composição química do material particulado e quais partículas foram retidas e quais passaram pelo meio filtrante.
- ✓ Realizar testes de filtração conforme a norma VDI 3926, utilizando meios filtrantes com diferentes métodos de entrelaçamento das fibras e outros tipos de materiais particulados, para comparar a eficiência e a vida útil, além de analisar o desempenho ao longo do comprimento da manga filtrante.
- ✓ Avaliar a influência da posição da manga na carcaça do filtro e das diferentes câmaras filtrantes de onde foram retiradas, na eficiência de filtração e na vida útil do meio filtrante.

8. REFERÊNCIAS

AGUIAR, M. L.; COURY, J. R. Cake Formation in Fabric Filtration of Gases. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 35, n. 10, p. 3673–3679, 1 jan. 1996. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie960042p>>.

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

BALTRÉNAS, P.; CHLEBNIKOVAS, A. Removal of fine solid particles in aggressive gas flows in a newly designed multi-channel cyclone. **Powder Technology**, v. 356, p. 480–492, nov. 2019.

BERBNER, S.; PILZ, T. Characterization of the filtration and regeneration behaviour of rigid ceramic barrier filters at high temperatures. **Powder Technology**, v. 86, n. 1, p. 103–111, jan. 1996. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0032591095030433>>.

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

CETESB. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo 2020.** Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2021/05/Relatorio-de-Qualidade-do-Ar-no-Estado-de-Sao-Paulo-2020.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2022.

CETESB. **Qualidade do ar - Padrões de Qualidade do Ar.** Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>>. Acesso em: 15 set. 2022.

CHI, H.; YU, L.; CHOI, J.-H.; JI, Z. Optimization of Nozzle Design for Pulse Cleaning of Ceramic Filter. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 16, n. 2, p. 306–313, abr. 2008. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1004954108600798>>.

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, jul. 2019.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006 - Anexo XIII. Limites de emissão para poluentes atmosféricos gerados nas indústrias siderúrgicas integradas e semi-integradas e usinas de pelletização de minério de ferro.** Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=documento.download&id=22185>. Acesso em: 8 abr. 2024.

CONAMA. **Resolução nº 430, de 13 de Maio de 2011**.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018.** . Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603>. Acesso em: 9 set. 2022.

CORNIER, J.; PURSCHE, F. (ed.). **Particle Technology and Textiles.** [s.l.] De Gruyter, 2023.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos.** São Paulo: Blucher, 2014.

DONOVAN, R. P. **Fabric Filtration for Combustion Sources: Fundamentals and Basic Technology.** New York: Marcel Dekker, 1985. v. 41448 p.

DUO, Y.; QIAN, X.; ZHAO, B.; GAO, L.; BAI, H.; GUO, X.; SONG, B. Preparation and properties of fluffy high-shrinkage polyester/polyamide 6 hollow segmented pie microfiber nonwovens. **Textile Research Journal**, v. 92, n. 17–18, p. 3221–3233, 1 set. 2022.

DUTTA, S.; MUKHOPADHYAY, A.; CHOUDHARY, A. K.; REDDY, C. C. Comparative analysis of residual pressure drop behavior between electrostatically assisted flat based and pilot pulse jet filter unit using conductive filter media. **Indian Journal of Fibre & Textile Research**, v. 48, n. 4, p. 380–387, 2023. Disponível em: <<https://or.niscpr.res.in/index.php/IJFTR/article/view/7638>>.

ERGUN, S. Fluid Flow through Packed Columns. **Chemical Engineering Progress**, v. 48, n. 2, p. 89–94, 1952.

FURUMOTO, K.; NARITA, T.; FUKASAWA, T.; ISHIGAMI, T.; KUO, H.-P.; HUANG, A.-N.; FUKUI, K. Influence of pulse-jet cleaning interval on performance of compact dust

collector with pleated filter. **Separation and Purification Technology**, v. 279, p. 119688, dez. 2021.

GUILHERME RUFATTO SCHMIDT; LUCIANO PESKE CERON. Evaluation of Operating Conditions of a Sleeve Filter for Coal Emission Control. **Journal of Environmental Science and Engineering A**, v. 8, n. 3, p. 107–112, 28 mar. 2019.

HINDS, W. C.; ZHU, Y. **Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2022. 448 p.

HUTTEN, I. M. **Handbook of Nonwoven Filter Media**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016. 660 p.

KARTHIK, T.; C., P. K.; RATHINAMOORTHY, R. **Nonwovens: Process, structure, properties and applications**. 1st. ed. New Delhi: Woodhead Publishing India Pvt. Ltd., 2016. 1–361 p.

LEE, K.-S.; SOHN, J.-R.; PARK, Y.-O. Filtration performance characteristics of ceramic candle filter based on inlet structure of high-temperature and high-pressure dust collectors. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 21, p. 101–110, jan. 2015.

LISBOA, H. M.; SCHIRMER, W. N. Metodologia de Controle da poluição atmosférica. *In: Controle da poluição atmosférica*. Florianópolis: ENS/UFSC, 2007. p. 93.

MATTESON, M. J.; ORR, C. **Filtration: Principles and Practices**. New York: Marcel Dekker, 1987. v. 27756 p.

MELO, B. R. de. **Precoating: uma alternativa mais econômica para melhorar a performance dos meios filtrantes em filtros de mangas da indústria siderúrgica**. 2021. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

MORRIS, K.; ALLEN, R. W. K. The influence of dust and gas properties on cake adhesion in fabric filters. **Filtration & Separation**, v. 33, n. 4, p. 339–334, abr. 1996.

MORRIS, K.; ALLEN, R. W. K. **Gas cleaning in demanding applications**. London: Blackie Academic & Professional, 1997.

MOURÃO, M. B.; YOKOJI, A.; MALYNOWSKYJ, A.; LEANDRO, C. A. da S.; TAKANO,

C.; QUITES, E. E. C.; GENTILE, E. F.; LENZ E SILVA, G. F. B.; BOLOTA, J. R.; GONÇALVES, M.; FACO, R. J. **Introdução a Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007. 428 p.

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

MUKHOPADHYAY, A.; PANDIT, V.; DHAWAN, K. Effect of high temperature on the performance of filter fabric. **Journal of Industrial Textiles**, v. 45, n. 6, p. 1587–1602, 14 maio 2016.

NOGUEIRA, Í. M.; MADUREIRA, M. T. A indústria siderúrgica no Brasil. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 16, p. e300111638241, 9 dez. 2022.

PARK, S.; JOE, Y. H.; SHIM, J.; PARK, H.; SHIN, W. G. Non-uniform filtration velocity of process gas passing through a long bag filter. **Journal of Hazardous Materials**, v. 365, p. 440–447, mar. 2019.

PECANHA, R. **Sistemas Particulados #: Operações unitárias envolvendo partículas e fluídos**. 1st. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2014. 424 p.

PERONI, B. L. **Avaliação de meios filtrantes com diferentes técnicas de fabricação em filtros de mangas**. 2022. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

PEUKERT, W.; WADENPOHL, C. Industrial separation of fine particles with difficult dust properties. **Powder Technology**, v. 118, n. 1–2, p. 136–148, ago. 2001. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032591001003047>>.

POURDEYHIMI, B.; FEDOROVA, N.; MAZE, B. Micro and Nanofibers. *In: Applications of Polymer Nanofibers*. [s.l.] Wiley, 2022. p. 372–403.

RODRIGUES, A. C. M. **Estudo da formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos de polipropileno e de algodão**. 2004. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

RUSSELL, S. J. **Handbook of Nonwovens**. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 2006. 544 p.

SALEEM, M.; KRAMMER, G. Optical in-situ measurement of filter cake height during bag filter plant operation. **Powder Technology**, v. 173, n. 2, p. 93–106, abr. 2007a.

SALEEM, M.; KRAMMER, G. Effect of filtration velocity and dust concentration on cake formation and filter operation in a pilot scale jet pulsed bag filter. **Journal of Hazardous Materials**, v. 144, n. 3, p. 677–681, jun. 2007b.

SEVILLE, J. P. K. **Gas Cleaning in Demanding Applications**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997. 310 p.

SHI, D.; LI, J.; DU, Y.; WU, Q.; HUANG, S.; HUANG, H.; WU, D. Influence of Relative Humidity on the Characteristics of Filter Cake Using Particle Flow Code Simulation. **Atmosphere**, v. 13, n. 5, p. 770, 10 maio 2022.

SINGH, P.; MUKHOPADHYAY, A.; GUPTA, P. Performance of surface finished polyester filter media exposed to different dust types with the variation of dust concentration. **Powder Technology**, v. 426, p. 118614, ago. 2023.

SUTHERLAND, K. S.; CHASE, G. **Filters and Filtration Handbook**. Oxford: Elsevier Science, 2008. 520 p.

THILAGAVATHI, G.; PERIYASAMY, S. Fibers for filtration. *In: Handbook of Fibrous Materials*. [s.l.] Wiley, 2020. p. 807–830.

TIEN, C. **Principles of Filtration**. Oxford: Elsevier B. V., 2012. 360 p.

VDI. **VDI 3926: Testing of filter media for cleanable filters Standard test for the evaluation of cleanable filter media**. Disponível em: <<https://www.vdi.de/en/home/vdi-standards/details/vdi-3926-blatt-1-testing-of-cleanable-filter-media-standard-test-for-the-evaluation-of-cleanable-filter-media>>. Acesso em: 9 nov. 2022.

WHO. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. Disponível em: <<https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>>. Acesso em: 15 nov. 2022.

WHO. **WHO ambient air quality database, 2022 update**. Disponível em: <<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/368432/9789240047693-eng.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 28 nov. 2023.