

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

DEISY TELES DE ARAÚJO

**CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR POR FILTRAÇÃO HÍBRIDA DO
MATERIAL PARTICULADO PROVENIENTE DA INDÚSTRIA
SIDERÚRGICA**

São Carlos - SP

2024

DEISY TELES DE ARAÚJO

**Controle da poluição do ar por filtração híbrida de material particulado
proveniente da indústria siderúrgica**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Mônica Lopes Aguiar

Coorientador: Dr. Bruno José Chiaramonte de Castro

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 Deisy Teles de Araújo, realizada em 12/08/2024.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Mônica Lopes Aguiar (UFSCar)

Prof. Dr. Rafael Sartim (UFES)

Profa. Dra. Vádila Giovana Guerra Béttega (UFSCar)

Dedico este trabalho ao Marcelo.

Meu amigo, esposo e parceiro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos Deuses e Orixás por me fazerem forte e paciente com a minha jornada. Ao meu marido, Marcelo, por ter sido tão incrível e ter me apoiado desde sempre (que nos conhecemos).

Aos meus amigos por, que mesmo longe, terem me feito rir e sempre estarem dispostos a estar comigo em momentos que pareciam difíceis, e serem a família que escolhi ter.

A professora Mônica por ter aberto as portas do seu laboratório e ter aceitado me orientar nesses um ano e meio de trabalho. Ao Bruno Castro pela co-orientação, pelos encontros semanais e que mesmo longe foi muito paciente e se mostrou sempre disposto em me ajudar.

Aos colegas de laboratório da salinha da Turma da Mônica.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Química da UFSCar e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química por proporcionarem o ambiente de aprendizagem no qual este trabalho foi desenvolvido. Ao CNPq e à CAPES, pelo suporte financeiro. À ArcelorMittal, por fornecer parte do material necessário ao desenvolvimento deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

A emissão de material particulado pela indústria representa uma grave ameaça ao meio ambiente e à saúde humana. O relatório de Estatísticas Sanitárias Mundiais da Organização Mundial da Saúde (OMS) de 2018, revelou que a poluição atmosférica causou cerca de 7 milhões de mortes prematuras em todo o mundo até 2016 e dados de 2022, também da OMS, mostraram que mais de 99% da população mundial respira o ar considerado insalubre. Uma alternativa promissora para controlar a poluição do ar é o filtro híbrido. Esses filtros combinam equipamentos tradicionais na separação de gás e partículas sólidas, como precipitadores eletrostáticos e filtros de mangas, em um único dispositivo. Este projeto tem como objetivo analisar o desempenho da filtração híbrida em relação à eficiência de coleta, porosidade da torta, tempo de filtração e queda de pressão em um equipamento em escala de bancada, em diferentes intensidades de campo elétrico aplicado ao precipitador. A velocidade superficial de filtração no sistema foi de $0,047 \text{ m.s}^{-1}$ ($2,8 \text{ m.min}^{-1}$) e no precipitador eletrostático foi de $0,74 \text{ m.s}^{-1}$. Os campos elétricos aplicados ao precipitador eletrostático foram de 0,0, -2,0 e - 4,0 kV.cm^{-1} . Os materiais particulados testados foram a rocha fosfática e o pó de sinterização, sendo este último proveniente das tremonhas de um filtro de mangas industrial. Os materiais filtrantes testados foram polipropileno (PP) e o poliéster (PE). Como resultados, à medida que a tensão aplicada ao precipitador aumentou, foi observado aumento na eficiência de coleta, no precipitador e no filtro, fazendo com que a eficiência no filtro híbrido chegasse a valores de 100% para algumas condições operacionais investigadas. O material filtrante que apresentou melhor eficiência de coleta para os ensaios feitos com a rocha fosfática foi polipropileno, já para o pó de sinterização ambos os materiais filtrantes apresentaram boa performance. Os valores de porosidade para o pó de sinterização foram semelhantes tanto nos ensaios de filtração com polipropileno quanto poliéster. No entanto, ao considerar a rocha fosfática, observou-se que os ensaios com poliéster resultaram em porosidades maiores do que aqueles com polipropileno. Os maiores tempos de filtração para alcançar a queda de pressão de $100 \text{ mmH}_2\text{O}$ nos ensaios do filtro híbrido, aconteceram nas condições de maiores tensões aplicadas ao precipitador. Para filtros industriais, este resultado pode se traduzir em menor frequência de pulsos de limpeza nas mangas, e, conseqüentemente, maior tempo de vida útil, reduzindo os gastos com troca total de mangas.

Palavras: chave- Filtração híbrida; Material particulado; Controle da poluição atmosférica;

ABSTRACT

The transmission of specific material by industry poses a serious threat to the environment and human health. The World Health Organization (WHO) World Health Statistics report of 2018 revealed that air pollution was involved in approximately 7 million premature deaths worldwide by 2016, and data from 2022, also from the WHO, showed that more than 99% of the world's population breathes the air that is considered unhealthy. A promising alternative to control air pollution is the hybrid filter. These filters combine traditional gas and solid particle separation equipment, such as electrostatic precipitators and bag filters, in a single device. This project aims to analyze the performance of hybrid filtration in relation to collection efficiency, cake porosity, filtration time and pressure drop in a bench-scale equipment, at different electric field intensities applied to the precipitator. The superficial filtration velocity in the system was $0.047 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($2.8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$) and in the electrostatic precipitator it was $0.74 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The electric fields applied to the electrostatic precipitator were 0.0, -2.0 and -4.0 $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$. The particulate materials tested were phosphate rock and sintering dust, the latter coming from the hoppers of an industrial bag filter. The filter materials tested were polypropylene (PP) and polyester (PE). As a result, as the voltage applied to the precipitator increased, an increase in the collection efficiency was observed in the precipitator and in the filter, causing the efficiency in the hybrid filter to reach values of 100% for some operational conditions investigated. The filter material that presented the best collection efficiency for the tests performed with phosphate rock was polypropylene, while for the sintering powder, both filter materials presented good performance. The porosity values for the sintering powder were similar to both the polypropylene and polyester filtration tests. However, when considering phosphate rock, it is recommended that the tests with polyester resulted in higher porosities than those with polypropylene. The longest filtration time to reach the pressure drop of 100 mmH₂O in the hybrid filter tests occurred under the conditions of greatest electric field applied to the precipitator. For industrial filters, this result can be translated into a lower frequency of cleaning pulses in the bags, and, consequently, a longer useful life, reducing the costs with the total bag replacement.

Keywords: Hybrid filtration; Particulate matter; Air pollution control;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Piccadilly Circus, Londres sob neblina em 1929.....	18
Figura 2 - Comparativo entre um dia limpo (a) e com Smog (b) em Xangai, na China.....	18
Figura 3 - Esquemática forja Catalã.....	20
Figura 4 - Esquemática de produção de aço pela rota clássica do alto-forno.....	20
Figura 5 - Processo da sinterização.....	22
Figura 6 - Esquema de um precipitador eletrostático do tipo placa-fio e seus componentes...27	27
Figura 7 - Vista esquemática superior da região do precipitador eletrostático do tipo placa-fio compreendida entre duas placas coletoras.....	28
Figura 8 - Filtro de mangas industrial com indicações de seus principais componentes.....	30
Figura 9 - Esquema de funcionamento de um filtro de mangas.....	31
Figura 10 - Processo de filtração por meio de um material filtrante.....	32
Figura 11 - Mecanismo de remoção do material particulado.....	34
Figura 12 - Número de artigos sobre precipitadores eletrostáticos, filtros de mangas e filtros híbridos no período entre 2004 e 2024 (Science Direct).....	37
Figura 13 - Unidade experimental para avaliação da eficiência de coleta de nanopartículas..	43
Figura 14 - Pós de (a) Rocha Fosfática e (b) Sinterização.....	44
Figura 15 - Unidade experimental para avaliação da eficiência de coleta de micropartículas....	47
Figura 16 - Esquema do sistema utilizado nos ensaios de filtração híbrida.....	48
Figura 17 - Exemplos de imagens obtidas em MEV das superfícies dos materiais filtrantes PE e PP, e medidas feitas para obtenção do diâmetro médio de fibra.....	55
Figura 18 - Eficiência dos materiais filtrantes para nanopartículas.....	57
Figura 19 - Exemplos de imagens obtidas em MEV dos materiais rocha fosfática, com magnificação de 2500x (a) e pó de sinterização, com magnificação de 5000x.....	59
Figura 20 - Imagens 3D e 2D das topografias das superfícies do (a) pó de sinterização e (b) rocha fosfática.....	60
Figura 21 - Distribuição granulométrica volumétrica da (a) rocha fosfática e (b) pó de sinterização.....	61
Figura 22 - Curvas de distribuição aerodinâmica em %massa da (a) rocha fosfática e (b) pó de sinterização.....	63
Figura 23 - Caracterização elétrica do sistema híbrido.....	66
Figura 24 - Interior do precipitador eletrostático (a) antes dos ensaios, após ensaios para o pó de sinterização, (b) 0,0 kV/cm, (c) -2,0 kV/cm e (d) -4,0 kV/cm.....	67
Figura 25 - Interior do precipitador eletrostático (a) antes dos ensaios, após ensaios para a rocha fosfática a (b) 0,0 kV/cm, (c) -2,0 kV/cm e (d) -4,0 kV/cm.....	68
Figura 26 - Queda de pressão em função do tempo de filtração para os ensaios realizados com	

pó de sinterização com os filtros PE (a) e PP (b), e com rocha fosfática com PE (c) e PP (d)....
69

Figura 27 - Evolução da porosidade da torta em função da queda de pressão para os ensaios realizados com pó de sinterização com os filtros PE (a) e PP (b), e com rocha fosfática com PE (c) e PP (d)..... 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Padrões de qualidade do ar segundo a resolução 491/2018 em que PI são os padrões de qualidade do ar intermediários (padrões estabelecidos como valores temporários a serem cumpridos em etapas 1, 2, 3 e final).....	25
Tabela 2- Permeabilidade dos materiais filtrantes de acordo com a variação da pressão.....	41
Tabela 3 - Leituras de espessura do material filtrante PE.....	53
Tabela 4 - Leituras de espessura do material filtrante PP.....	53
Tabela 5 - Espessuras médias dos materiais filtrantes PP e PE.....	54
Tabela 6 - Gramatura dos materiais filtrantes PE e PP calculados e dos fabricantes.....	54
Tabela 7 - Diâmetro médio de fibra dos materiais filtrantes PE e PP.....	56
Tabela 8 - Permeabilidade ao ar dos materiais filtrantes.....	56
Tabela 9 - Valores da porosidade calculados através das equações de Ergun e Davies.....	57
Tabela 10 - Valores de circularidade para os pós de sinterização e rocha fosfática.....	59
Tabela 11 - Rugosidade média dos pós de sinterização e rocha fosfática.....	60
Tabela 12 - Diâmetros volumétricos medianos ($d_{v,0,5}$), médios ponderados em área ($d_{3,2}$) e médios ponderados em volume ($d_{4,3}$) dos dois materiais particulados utilizados.....	62
Tabela 13 - Composições químicas dos materiais particulados utilizados.....	64
Tabela 14 - Valores de constantes dielétricas de acordo com os elementos presentes nas composições químicas dos pós de sinterização e rocha fosfática.....	65
Tabela 15 - Tempo total de filtração dos ensaios.....	70
Tabela 16 - Eficiência de filtração do sistema híbrido (ηH), do precipitador eletrostático (ηESP) e do material filtrante (ηF) para os testes realizados com pó de sinterização com os materiais filtrantes PP e PE.....	71
Tabela 17 - Eficiência de filtração do sistema híbrido (ηH), precipitador eletrostático (ηESP) e material filtrante (ηF) para os testes realizados com a rocha fosfática com os materiais filtrantes PP e PE.....	72
Tabela 18 - Diâmetro volumétrico mediano do pó de sinterização coletado na base e nas placas do precipitador e nos materiais filtrantes PP e PE.....	74
Tabela 19 - Diâmetro volumétrico mediano da rocha fosfática coletado na base e nas placas do precipitador e nos materiais filtrantes PP e PE.....	74
Tabela 20 - Porosidade da torta de filtração (ϵc) da rocha fosfática e pó de sinterização utilizando os materiais filtrantes PP e PE.....	77

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade no SI
A_f	Área superficial do filtro	m^2
A_p	Área superficial da partícula	m^2
A_{placa}	Área superficial da placa de cobre	m^2
C_{in}	Concentração mássica de partículas na entrada	$kg.m^{-3}$
C_{out}	Concentração mássica de partículas na saída	$kg.m^{-3}$
d_f	Diâmetro da fibra	m
d_p	Diâmetro da partícula	m
$d_{v,0,5}$	Diâmetro volumétrico mediano	m
$d_{3,2}$	Diâmetro volumétrico médio ponderado em área	m
$d_{4,3}$	Diâmetro volumétrico médio ponderado em volume	m
E	Intensidade de campo elétrico	$V.m^{-1}$
f_{circ}	Fator de forma de circularidade	-
m	Massa	kg
$m_{f,abs}$	Massa do filtro absoluto ao final do ensaio	kg
$m_{f,ESP}$	Massa do precipitador eletrostático ao final do ensaio	kg
$m_{f,F}$	Massa do filtro com torta ao final do ensaio	kg
$m_{i,abs}$	Massa do filtro absoluto antes do ensaio	kg
$m_{i,ESP}$	Massa do precipitador eletrostático antes do ensaio	kg
$m_{i,F}$	Massa do filtro antes do ensaio	kg
P_p	Perímetro da partícula	m
$Q_{pó}$	Vazão volumétrica	$m^3.s^{-1}$
s	Distância entre o eletrodo de descarga e a placa coletora	m
t_f	Tempo de filtração	s
U_{ESP}	Tensão elétrica aplicada ao precipitador eletrostático	V
v_{ESP}	Velocidade do escoamento no precipitador eletrostático	$m.s^{-1}$
V_f	Velocidade superficial de filtração	$m.s^{-1}$
G	Gramatura do meio filtrante	$kg.m^{-2}$
Z_m	Espessura do meio filtrante	m
ΔP_c	Queda de pressão através da torta	Pa
ΔP_f	Queda de pressão através do filtro	Pa
ΔP_m	Queda de pressão através do meio filtrante	Pa

ε	Porosidade de um meio poroso	-
ε_c	Porosidade da torta	-
ε_d	Constante dielétrica	$C^2.N^{-1}.m^{-2}$
$\varepsilon_{d,ar}$	Constante dielétrica do ar	$C^2.N^{-1}.m^{-2}$
$\varepsilon_{d,f}$	Constante dielétrica da fibra	$C^2.N^{-1}.m^{-2}$
$\varepsilon_{d,r}$	Constante dielétrica relativa (Permissividade relativa)	-
$\varepsilon_{d,0}$	Constante dielétrica do vácuo	$C^2.N^{-1}.m^{-2}$
ε_m	Porosidade do material filtrante	-
η_{ESP}	Eficiência de coleta do precipitador eletrostático	-
η_F	Eficiência de coleta do filtro	-
η_H	Eficiência de coleta do filtro híbrido	-
μ	Viscosidade dinâmica	Pa.s
ρ_g	Densidade do gás	$kg.m^{-3}$
ρ_p	Densidade da partícula	$kg.m^{-3}$

ABREVIACÕES

AHPC	Coletor de partículas híbrido avançado
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária

APS	Aerodynamic Particle Sizer
COHPAC	Coletor de Partículas Híbrido Compacto
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ESP	Precipitador eletrostático
F	Filtro
HEPA	High Efficiency Particulate Arrestance
H	Filtro híbrido
LCA	Laboratório de Controle Ambiental
LCE	Laboratório de Caracterização Estrutural
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
OMS	Organização Mundial da Saúde
PAN	Poliacrilonitrila
PE	Poliéster
MP _{2,5}	Partículas superfinas, com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 µm
MP ₁₀	Partículas finas, com diâmetro aerodinâmico menor que 10 µm
PP	Polipropileno
PTFE	Politetrafluoretileno
SMPS	Scanning Mobility Particle Size

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA POR GASES NÃO TRATADOS.....	17
3.2 INDÚSTRIA SIDERÚRGICA.....	19
<i>Processo de Sinterização.....</i>	<i>21</i>
3.3 CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO.....	22
3.3.1 Precipitadores eletrostáticos.....	26
3.3.2 Filtro de mangas.....	29
3.3.2.1 <i>Material Filtrante.....</i>	<i>32</i>
3.3.2.2 <i>Mecanismos de coleta.....</i>	<i>33</i>
3.3.2.3 <i>Eficiência de coleta.....</i>	<i>35</i>
3.3.3 Filtração Híbrida.....	35
3.4 ESTADO DA ARTE.....	36
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
4.1 MATERIAIS FILTRANTES.....	39
4.1.1 Espessura.....	39
4.1.2 Gramatura.....	39
4.1.3 Diâmetro médio de fibras.....	40
4.1.4 Permeabilidade.....	40
4.1.5 Porosidade do material filtrante.....	41
4.1.6 Eficiência do material filtrante para nanopartículas.....	42
4.2 MATERIAIS PARTICULADOS.....	44
4.2.1 Circularidade.....	45
4.2.2 Rugosidade Superficial Média.....	45
4.2.3 Distribuição Granulométrica Volumétrica.....	46
4.2.4 Diâmetro Granulométrica Aerodinâmica.....	46
4.2.5 Densidade.....	47
4.2.6 Composição Química.....	47
4.2.7 Permissividade relativa.....	47
4.3 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO SISTEMA.....	48
4.4 FILTRAÇÃO HÍBRIDA DO MATERIAL PARTICULADO.....	48
4.4.1 Eficiência de coleta da filtração híbrida.....	50
4.4.2 Porosidade da torta.....	51
5. RESULTADOS.....	52
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS FILTRANTES.....	52

5.1.1 Espessura.....	52
5.1.2 Gramatura.....	54
5.1.3 Diâmetro médio de fibras.....	55
5.1.4 Permeabilidade.....	56
5.1.5 Porosidade Material Filtrante.....	56
5.1.6 Eficiência do material filtrante para nanopartículas.....	57
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PARTICULADOS.....	58
5.2.1 Circularidade.....	58
5.2.2 Rugosidade Superficial média.....	59
5.2.3 Distribuição granulométrica volumétrica.....	61
5.2.4 Diâmetro granulométrico aerodinâmico.....	62
5.2.5 Densidade.....	63
5.2.6 Composição Química.....	64
5.2.7 Permissividade relativa.....	65
5.3 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO SISTEMA.....	66
5.4 EVOLUÇÃO DA QUEDA DE PRESSÃO.....	68
5.5 EFICIÊNCIA DE COLETA.....	71
5.5.1 Eficiência de coleta do pó de sinterização.....	71
5.5.2 Eficiência de coleta da rocha fosfática.....	72
5.5.3 Distribuição Granulométrica Volumétrica.....	73
5.6 POROSIDADE DA TORTA.....	75
6. CONCLUSÕES.....	78
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	79
REFERÊNCIAS.....	80

1. INTRODUÇÃO

A emissão de gases poluentes em grande escala representa uma ameaça séria ao meio ambiente e à saúde humana. O relatório de Estatísticas Sanitárias Mundiais da Organização Mundial da Saúde (OMS) de 2018, revelou que a poluição atmosférica causou cerca de 7 milhões de mortes prematuras em todo o mundo até 2016 e dados, também da OMS, mostraram que mais de 99% da população mundial respira o ar considerado insalubre (OPAS/OMS, 2022). As principais causas de morte prematura relacionadas à poluição atmosférica são doenças respiratórias, como asma, bronquite e pneumonia, bem como doenças cardíacas, derrames e câncer (OMS, 2018).

O ar é considerado poluído quando há presença de substâncias poluidoras na sua composição como materiais particulados, compostos orgânicos voláteis e gases como NO_x, CO₂ e SO_x (Jacobson, 2010). Muitos destes poluentes soltos na atmosfera, são provenientes de veículos automotores, queima de biomassa e principalmente indústrias (ANVISA, 2023).

A poluição atmosférica no setor industrial é um tema de grande relevância mundial, com organizações e órgãos ambientais alertando sobre os sérios riscos à saúde pública e ao meio ambiente. No Brasil, a indústria siderúrgica se destaca, já que o país está entre os dez maiores produtores de aço do mundo e ocupa a 1ª posição na América Latina, tendo produzido sozinho mais de 55% do total da região (Aço Brasil, 2020). Controlar o material particulado nessa indústria é crucial, embora seja um desafio complexo que envolve a redução da emissão de gases e aerossóis poluentes provenientes de diversas fontes, como altos-fornos, fornos elétricos a arcos e aciarias. Além das questões ambientais, as técnicas de recuperação de partículas emitidas são essenciais devido ao valor agregado ao produto recuperado, que não é liberado na atmosfera, aumentando assim os lucros totais da indústria (Tanabe et al., 2011).

Uma das tecnologias promissoras para o controle da poluição do ar na indústria siderúrgica é a filtração híbrida. Essa tecnologia combina dois tipos de filtros para remover o material particulado do ar. Os tipos mais comuns de filtros utilizados na filtração híbrida são os precipitadores eletrostáticos e os filtros de manga. Na filtração híbrida, o aerossol que entra no precipitador eletrostático, tem as partículas carregadas eletricamente e acabam sendo atraídas para placas de coleta, que apresentam cargas opostas, assim as partículas são separadas do ar. O material particulado que não fica retido pelo precipitador eletrostático vai

para o filtro de mangas, que captura o pó através do meio filtrante por diferentes mecanismos de coleta e têm eficiência expressiva na coleta de partículas finas.

Zhang (2016) verificou que a filtração híbrida resultou em um melhor desempenho em termos de aumento da eficiência do filtro e redução da queda de pressão do mesmo. Além disso, é observado que o desempenho do filtro de tecido melhorou quando as partículas foram carregadas durante a filtração. A filtração híbrida apresenta diversas vantagens em relação aos outros métodos de controle da poluição do ar na indústria siderúrgica. Ela é capaz de remover uma ampla gama de partículas, incluindo partículas finas ($> MP_{2,5}$) e ultrafinas ($> MP_{0,1}$). A filtração híbrida é relativamente eficiente e pode ser facilmente integrada aos sistemas de controle existentes (Wang et al., 2018). No entanto, o desempenho desses equipamentos pode ser limitado dependendo das características do material particulado e das condições do processo. Devido a essas especificidades, a quantidade de trabalhos publicados sobre filtração híbrida aplicada à indústria siderúrgica é bastante reduzida quando comparado com o volume de trabalhos publicados para o filtro de mangas e precipitador eletrostático, indicando que há muitos aspectos a serem explorados neste campo.

Nesse sentido, investigações sistemáticas são necessárias para avaliar a viabilidade da filtração híbrida em processos de despoeiramento da indústria siderúrgica, uma vez que a filtração híbrida combina as vantagens dos precipitadores eletrostáticos e dos filtros de mangas, sendo capaz de capturar partículas de diferentes tamanhos e com diferentes características.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho da eficiência de coleta na filtração híbrida utilizando equipamento em escala de bancada com pó de rocha fosfática e o pó proveniente da sinterização de uma indústria siderúrgica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar a influência do material particulado proveniente de rocha fosfática e do pó de sinterização na filtração híbrida.
- Avaliar a queda de pressão, eficiência e porosidade da torta nas condições estudadas e como isso impacta na formação da torta e na eficiência de coleta das partículas.
- Estudar os efeitos da variação da intensidade do campo elétrico aplicado ao precipitador eletrostático e como influencia no filtro híbrido.
- Investigar a influência do material filtrante e qual seria mais adequado para filtração com os materiais filtrantes investigados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo está dividido em: Poluição atmosférica por gases não tratados (3.1), Indústria siderúrgica (3.2), Controle de Material particulado (3.3) e Estado da arte (3.4).

3.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA POR GASES NÃO TRATADOS

A poluição do ar, conforme definida por Wang *et al.* (2004), refere-se à presença de contaminantes como poeira, fumaça, gases, névoa, odor, fumaça ou vapor na atmosfera externa, em quantidades, características e duração prejudiciais à saúde humana, vegetal e à propriedade, ou que interfiram de maneira irrazoável no desfrute confortável da vida e da propriedade.

Foi apenas durante a Revolução Industrial do século XIX, no Reino Unido, que a poluição do ar pela emissão de grande quantidade de material particulado tornou-se uma ameaça séria. O rápido desenvolvimento de altos -fornos para atender à demanda industrial, a produção em larga escala de produtos químicos e a transição da energia hidráulica para o vapor, produzido pela queima de combustíveis carbonáceos, agravaram o problema (Parker, 1997). Já no século XX, as atividades industriais aliadas ao crescente uso de veículos automotores causaram episódios de poluição atmosférica extrema e aumento das taxas de mortalidade em cidades dos Estados Unidos e da Europa (Braga et al., 2002).

Em 1911, a queima de carvão industrial em Londres resultou na morte de 154.000 pessoas, levando à cunhagem do termo "smog" (a junção das palavras *smoke* (fumaça) e *fog* (neblina)) pelo Dr. Harold Des Vouex, este termo refere-se a uma grande neblina de fumaça no ambiente atmosférico próximo à superfície (Braga et al., 2002). Embora muitos considerem este termo como um conceito moderno, a história revela medidas iniciais no Reino Unido nos anos 1600, quando o Parlamento proibiu a queima de carvão marinho betuminoso em Londres para combater o "smog" (Clean Air Act, 1956). A Figura 1 mostra a *Piccadilly Circus*, de Londres, sob neblina em 1929.

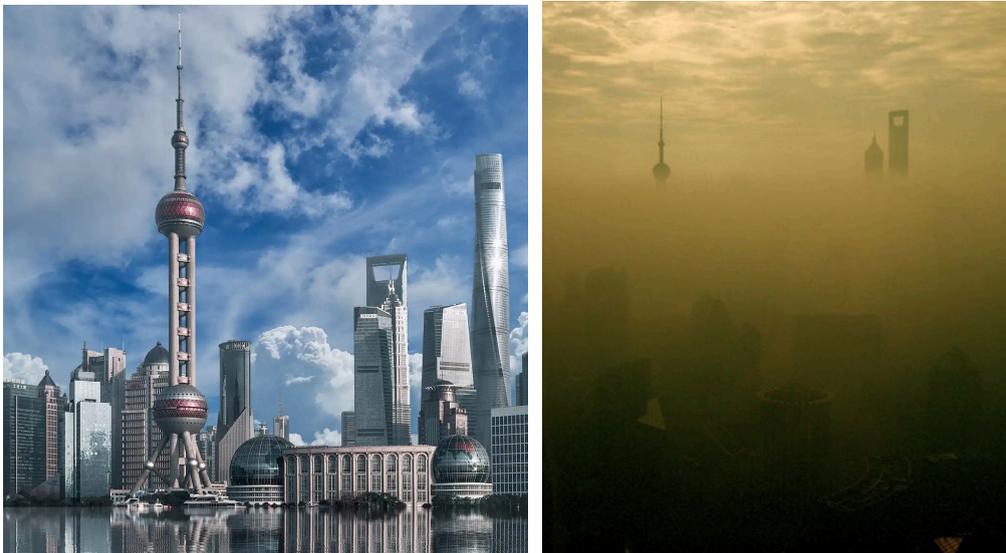
Figura 1 - Piccadilly Circus, Londres sob neblina em 1929



Fonte: *Climate Home News*, 2017.

Atualmente, a problemática da poluição do ar ainda persiste e ainda é mais presente no dia a dia não só de cidades europeias, como era no século XX, mas em todo o mundo, como mostra a Figura 2, que ilustra a diferença entre um dia claro e um dia com alta emissão de gases poluentes em uma cidade chinesa no ano de 2022.

Figura 2 - Comparativo entre um dia limpo (a) e com *Smog* (b) em Xangai, na China.



(a)

(b)

Fonte: *National Geographic*, 2022 (a) e *Infomoney*, 2022(b)

Enquanto no passado o carvão era a principal fonte de poluentes, hoje, compostos como flúor, mercúrio e amianto, liberados em áreas industriais, representam riscos

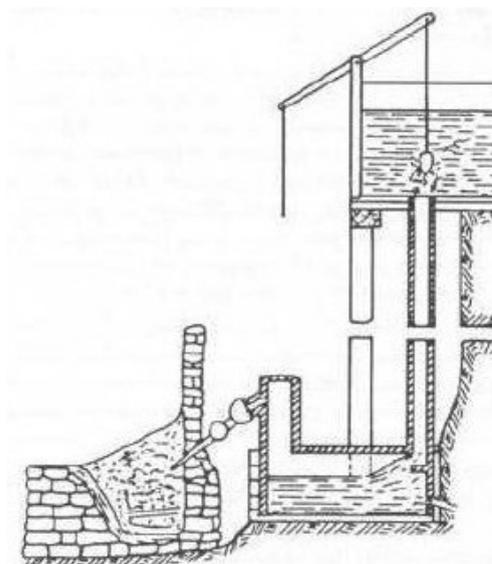
significativos para a saúde humana e o meio ambiente. Compostos de flúor, provenientes de fundições de ferro ou alumínio e processamento de rocha fosfatada em fábricas de fertilizantes, prejudicam o crescimento vegetal e afetam a saúde humana e animal. Isolantes, utilizados em construções, revestimentos à prova de fogo e freios automotivos, são uma substância com potencial cancerígeno, aumentando a incidência de câncer de pulmão entre os trabalhadores dessa indústria. Desde 1999 as regulamentações ambientais mais rigorosas em muitos países estão estabelecendo normas mais rígidas para a emissão de partículas finas na atmosfera de todas as fontes (Environment agency, 1999).

3.2 INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

O Brasil ocupa atualmente uma posição de destaque entre os 10 principais produtores de aço do mundo. Desde 2010, o país tem mantido uma produção anual superior a 30 milhões de toneladas de aço. Em 2021, a produção nacional atingiu um marco significativo, registrando 36,2 milhões de toneladas, a maior quantidade já produzida em um único ano (Logcomex, 2023). Além disso, o país ocupa a 1ª posição dentre os países produtores de aço na América Latina, tendo produzido sozinho mais de 55% do total da região (Aço Brasil, 2020).

Um dos primitivos métodos de obtenção do aço foi a forja catalã, representada na Figura 3, que dominou a produção de ferro na Europa do século XI ao século XV, onde o minério de ferro era reduzido pelo carvão em uma instalação de pedra onde incidia um sopro de ar. O produto obtido era uma mistura pastosa de metal com escória, sendo esta eliminada por martelamento. A partir do século XV surgiram os primeiros altos-fornos, onde através do aumento da quantidade de ar soprado foi possível o aumento da temperatura e a consequente obtenção da mistura em estado líquido. Basicamente é este processo que produz 71,6% do aço utilizado no mundo até os dias de hoje (Environment Agency, 1999; Pandit, Watson, & Qader, 2020).

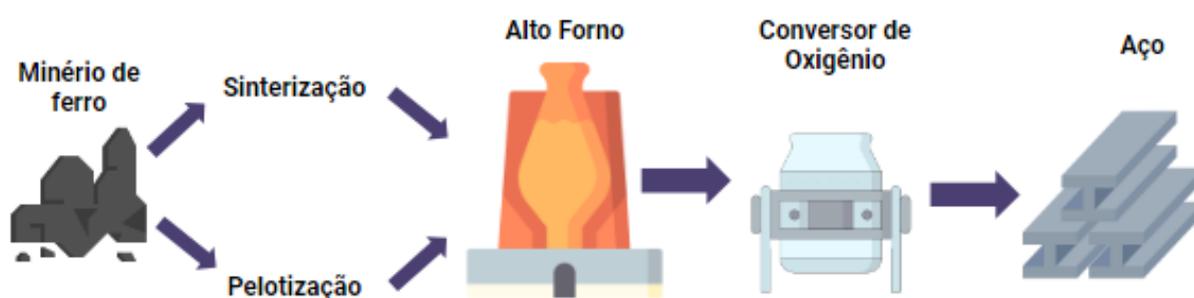
Figura 3 - Esquemática forja Catalã.



Fonte: CECI, 2007.

Na siderurgia, a matéria prima para produção de aço é o minério de ferro, mais especificamente, o ferro gusa. As principais etapas para produção do aço estão ilustradas na Figura 4.

Figura 4 - Esquemática de produção de aço pela rota clássica do alto-forno.



Fonte: Adaptado de Remus et al., 2013.

Na primeira etapa do processo produtivo do aço, o minério de ferro é aglomerado, através do processo de sinterização ou pelotização, utilizando cal e finos de coque. O material segue para o alto forno, o que acaba gerando teores elevados de carbono, enxofre, fósforo e outras impurezas. Ao sair do alto forno, o ferro gusa (teor de carbono entre 3,0 e 4,5%) pode ter três destinos: a fundição dos lingotes, destinados às aciarias de segunda fusão, a execução de grandes peças por vazamento direto nos moldes e a fabricação do aço. Para transformar a

gusa em aço é preciso tirar uma parte de carbono, do silício, do manganês, e a totalidade do fósforo e impurezas, para isto é utilizado oxigênio puro ou o oxigênio presente no ar. Depois da eliminação dessas impurezas por oxidação seletiva, obtêm-se o aço (ENVIRONMENT AGENCY, 1999).

O material pulverulento utilizado neste estudo foi proveniente das tremonhas do filtro de mangas que faz o despoeiramento primário do processo de sinterização, o qual será explicado em maiores detalhes no subtópico 3.2.1. A sinterização permite que o desempenho do alto forno seja melhorado, pois aumenta a permeabilidade e a redutibilidade da carga, por meio da aglomeração do minério de ferro (Remus et al., 2013).

Processo de Sinterização

A planta de sinterização é usada para processar finos de minério de ferro e diversos materiais reciclados, que são pequenos demais para serem alimentados diretamente no alto-forno. O processo de sinterização aglomera o material fino como minérios de ferro, finos de carvão ou coque e finos fundentes (ex. cal), de modo que a temperatura atinja entre 1200 a 1400 °C, temperatura suficiente para que a umidade evapore e um material resistente e poroso seja obtido com faixa de tamanho aceitável para o alto-forno. A utilização de sinter no alto-forno melhora a permeabilidade, homogeneidade e composição química da carga, aumentando assim a produtividade e a consistência da operação e melhorando a eficiência energética (Environment Agency, 1999). Na Figura 5 é esquematizado o processo de sinterização.

O sinter que sai da esteira de sucção é quebrado em um britador até uma faixa de tamanho de 5 mm a 50 mm, e alimentado em um resfriador de onde sai a cerca de 60°C. Depois, o sinter é enviado para o alto-forno, onde é transformado em ferro gusa, matéria prima para a posterior obtenção do aço (Environment Agency, 1999). Durante a produção do aço, também são produzidos rejeitos indesejados, como emissões de material particulado no ar nas plantas de sinterização, geradas pelo manuseio e transporte de matérias-primas, exaustão da caixa de vento (*windbox*), extremidade de descarga (britadores de sinter, associados e peneiras quentes), resfriador e peneira fria.

de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO₂), ozônio (O₃), dióxido de nitrogênio (NO₂) e outros (Neto et al., 2015).

Apesar das diferenças na composição química e na forma, o material particulado (MP) é principalmente classificado por seu diâmetro aerodinâmico que indica o impacto e o local onde a partícula pode chegar no sistema respiratório humano.

O MP é usualmente classificado como partículas ultrafinas (MP_{0,1}), que possuem diâmetro aerodinâmico inferior a 0,1 µm e cujos efeitos sobre a saúde humana ainda estão sendo estudados. Partículas finas ou respiráveis (MP_{2,5}) que possuem diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5µm e que geralmente se alojam nos pulmões nos alvéolos. Partículas inaláveis (MP₁₀) que possuem diâmetro aerodinâmico inferior a 10µm, e que penetram o sistema respiratório, mas podem ficar retidas no nariz e nasofaringe, podendo ainda posteriormente serem eliminadas pelos mecanismos de defesa do organismo humano (Environmental Protection Agency - EPA, 2013). Partículas com diâmetros maiores que 50 µm tendem a se depositar rapidamente e não permanecem em suspensão no ar ambiente (Wang et al., 2004).

Quanto à sua origem, o material particulado pode ser categorizado em poeira (como poeira de cimento, amianto, algodão e rua), fumo (de chumbo, alumínio, zinco e cloreto de amônia), fumaça (gerada pela combustão de combustíveis fósseis, asfálticos ou madeira, contendo fuligem, partículas líquidas e, no caso de madeira e carvão, uma fração mineral - cinzas) e névoa (partículas líquidas).

Muitas das ações de controle em âmbito nacional estão concentradas na existência de padrões de qualidade ambiental estabelecidos pelas resoluções do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente). Segundo a resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018 do CONAMA, os padrões de qualidade global são classificados como:

- Padrões Intermediárias (PI) - estabelecidas como valores temporários a serem cumpridos em etapas, visando à melhoria gradativa da qualidade do ar, baseada na busca pela redução das emissões de fontes fixas e móveis, em linha com os princípios do desenvolvimento sustentável;
- Padrões Finais (PF) - Padrões determinados pelo melhor conhecimento científico para que a saúde da população seja preservada ao máximo em relação aos danos causados pela poluição atmosférica.

Os padrões primários de qualidade do ar são as concentrações de poluentes que se ultrapassadas poderão afetar a saúde da população. Podem ser entendidos como níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes atmosféricos, constituindo-se em meta de curto e médio prazo. São padrões secundários de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, flora, materiais e ao meio ambiente em geral. Podem ser entendidos como níveis desejados de concentração de poluentes, constituindo-se em meta de longo prazo (Neto et al., 2015). Da Tabela 1, observa-se que os materiais particulados MP_{10} e $MP_{2,5}$ são os que devem apresentar menores valores de concentração no ar, isso se deve pois a inalação destas partículas pode trazer efeitos adversos à saúde humana.

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2006), há evidência da associação do material particulado de tamanho MP_{10} e $MP_{2,5}$ presente no ar com os efeitos no sistema respiratório, câncer e doenças cardiovasculares na população exposta. Além disso, a exposição ao MP também foi associada a resultados perinatais adversos, anormalidades imunológicas, hipertensão pulmonar e função renal anormal (Liang et al., 2024). Isto se dá porque partículas inaláveis são capazes de penetrar no sistema respiratório, enquanto as mais finas, respiráveis, podem também afetar o coração e o pulmão, causando sérios impactos à saúde (EPA, 2013). Para uma indústria de aço, as emissões atmosféricas provenientes da planta de sinterização podem representar uma proporção importante das emissões totais autorizadas de uma siderurgia integrada (Environment, 1999).

Na Tabela 1, são mostrados os padrões de qualidade do ar segundo a resolução 491/2018 do CONAMA, para diferentes poluentes atmosféricos .

Tabela 1- Padrões de qualidade do ar segundo a resolução 491/2018 em que PI são os padrões de qualidade do ar intermediários (padrões estabelecidos como valores temporários a serem cumpridos em etapas 1, 2, 3 e final).

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	
		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	μ/m^3	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ppm
Material Particulado - MP_{10}	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual	40	35	30	20	-
Material Particulado - $\text{MP}_{2,5}$	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre - SO_2	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO_2	1 hora	260	240	220	200	-
	Anual	60	50	45	40	-
Ozônio - O_3	8 horas	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb	Anual	-	-	-	0,5	-

Fonte: Diário Oficial da União (2018)

O gerenciamento adequado é fundamental para as empresas atenderem às regulamentações ambientais estabelecidas pelos órgãos competentes. Nesse contexto, destacam-se os precipitadores eletrostáticos, filtros de mangas e a filtração híbrida como equipamentos que podem auxiliar as indústrias no tratamento para o ar poluído. Estes dispositivos serão o foco central deste estudo, devido à sua relevância na manutenção da conformidade ambiental.

3.3.1 Precipitadores eletrostáticos

Segundo Song *et al.* (2023), um precipitador eletrostático (ESP) é um dispositivo de purificação do ar amplamente utilizado no processo de tratamento de gases residuais de usinas termelétricas, fábricas de cimento e outras indústrias. Sua principal função é a redução de emissões de partículas na atmosfera, papel que desempenha muito bem devido à sua versatilidade, alta eficiência de coleta e baixa queda de pressão (Andrade & Guerra, 2021).

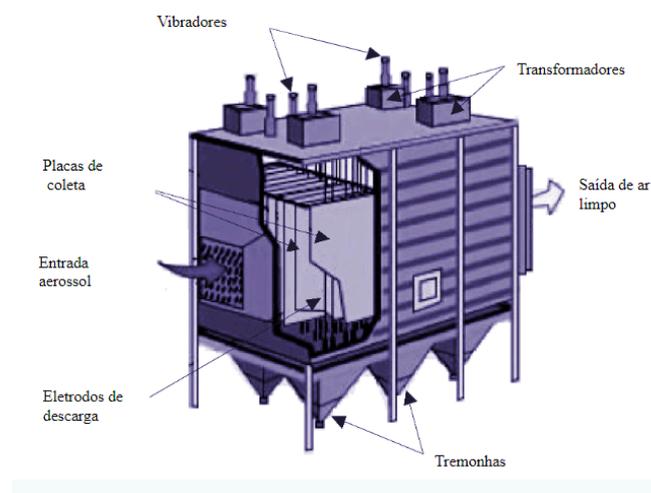
Em 1824, M. Hohlfeld, professor de matemática em Leipzig, descreveu pela primeira vez a precipitação de partículas de fumaça pela eletricidade. O primeiro processo comercialmente bem sucedido foi patenteado em 1908, após experimentos do químico americano Frederick Gardner Cottrell, da Universidade da Califórnia, Berkeley. As primeiras unidades foram usadas para remover a névoa de ácido sulfúrico e os vapores de óxido de chumbo emitidos pelas atividades de produção de ácido e fundição. Os dispositivos ajudaram a proteger os vinhedos no norte da Califórnia das emissões de chumbo (Hosansk, 2021).

Comercialmente, os precipitadores eletrostáticos têm sido usados há quase um século para a coleta de partículas de poeira, fumaça e névoa de vários tipos de processos. As aplicações iniciais, principalmente de aplicações químicas/metalúrgicas, foram tanto para a redução da poluição do ar como para a recuperação de subprodutos valiosos, por exemplo, a limpeza de gases combustíveis ou perdas de materiais em processos de fundição de metais. A capacidade de dimensionar precipitadores para uma eficiência específica foi ideal neste aspecto e a economia ditou eficiências de cerca de 90% para este tipo de aplicação de recuperação, uma vez que o material coletado normalmente tinha um valor positivo.

Mais recentemente, a principal aplicação tem sido o controle da poluição atmosférica para atender a legislações ambientais cada vez mais restritivas e, conseqüentemente, as eficiências de coleta podem agora aproximar-se, e por vezes exceder, 90% para partículas MP_{10} e partículas com diâmetros entre 2,5 e 10 μm . No entanto, a eficiência de coleta dos ESPs não é tão eficiente para partículas mais finas, menores que 2,5 μm , e altas velocidades de escoamento (Parker, 1997; Park et al., 2019; Qi et al., 2023; Jang et al., 2018).

Na Figura 6 está a representação do precipitador eletrostático do tipo placa-fio de simples estágio, constituído de eletrodos de descarga, que são espaçados uniformemente entre grandes placas chamadas eletrodos de coleta, vibradores e tremonhas.

Figura 6 - Esquema de um precipitador eletrostático do tipo placa-fio e seus componentes.

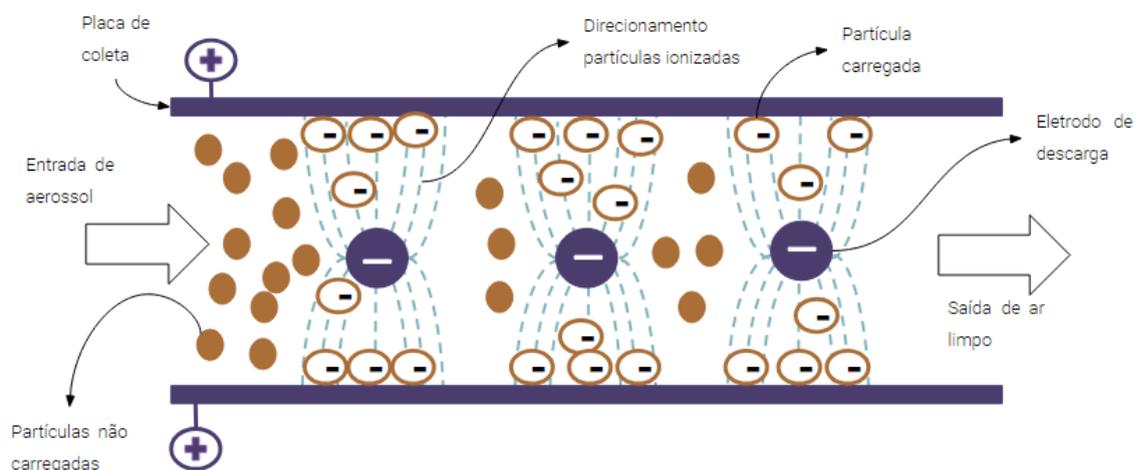


Fonte: Adaptado de Popa; Diniz; Iagâr (2023)

Os vibradores do ESP, são empregados para transmitir vibrações aos eletrodos, removendo a poeira acumulada nos eletrodos de coleta e descarga. A remoção do material particulado das placas também pode ser feita por batimento mecânico, por meio de martelos instalados na base das placas. Quanto às tremonhas, elas estão situadas na parte inferior do precipitador e têm a função de coletar e temporariamente armazenar a poeira removida durante o processo.

Já os eletrodos de descarga consistem em fios metálicos de pequeno diâmetro posicionados verticalmente no precipitador eletrostático. Eles podem se apresentar de duas maneiras: como uma série de fios interligados em estruturas rígidas ou como um único eletrodo rígido fabricado a partir de uma única peça de metal. A principal função dos eletrodos de descarga é gerar um campo elétrico de intensidade suficientemente capaz de eletrizar as partículas presentes no gás. Estas partículas carregadas são, então, coletadas pelos eletrodos de coleta, que podem ser placas planas ou tubos com carga oposta à dos eletrodos de descarga. Para estabelecer o campo elétrico entre os eletrodos de descarga e coleta e, assim, carregar as partículas do precipitador, são utilizadas fontes de alta tensão. A vista esquemática superior da região do equipamento compreendida entre duas placas coletoras é apresentada na Figura 7, onde podem ser visualizados os eletrodos de descarga, as linhas de campo elétrico e a camada de pó que se forma nos eletrodos de coleta.

Figura 7 - Vista esquemática superior da região do precipitador eletrostático do tipo placa-fio compreendida entre duas placas coletoras.



Fonte: Adaptado de Riverglennapts (2023)

Na Figura 7 o gás composto de partículas suspensas entra no espaço entre as placas em que as partículas são carregadas negativamente pelo campo elétrico e são atraídas para as placas de coleta que têm carga oposta. A voltagem aplicada aos eletrodos faz com que o ar entre os eletrodos se quebre eletricamente, uma ação conhecida como “efeito corona”. Os eletrodos geralmente recebem uma polaridade negativa porque uma coroa negativa suporta uma tensão mais alta do que uma coroa positiva antes que ocorra a faísca. Os íons gerados na coroa seguem linhas de campo elétrico desde os fios até as placas coletoras. Portanto, cada fio estabelece uma zona de carga através da qual as partículas devem passar. As partículas que passam pela zona de carga interceptam alguns dos íons, que se fixam. Pequenas partículas de aerossol ($<1 \mu\text{m}$ de diâmetro) podem absorver dezenas de íons antes que sua carga total se torne grande o suficiente para repelir outros íons, e partículas grandes ($>10 \mu\text{m}$ de diâmetro) podem absorver dezenas de milhares. As forças elétricas são, portanto, muito mais fortes nas partículas grandes (EPA,2002)

Limitado pelo comprimento e área superficial dos eletrodos coletores, o ESP tem baixa eficiência de filtração para partículas finas. Portanto, a combinação de ESP e filtros fibrosos foi proposta como uma maneira promissora de alcançar alta eficiência de retenção de MP. De fato, adicionar um filtro a jusante de um ESP é uma tecnologia denominada filtração eletrostática híbrida (Tian;Gao & Mo, 2023).

Eficiência de coleta

Nos precipitadores eletrostáticos, a energia elétrica é empregada para ionização de gás, carregamento elétrico de partículas de poeira e para a precipitação de partículas no eletrodo de coleta. A baixa eficiência de coleta dos precipitadores eletrostáticos para partículas $MP_{0,1}$ é resultado da baixa carga elétrica, que as partículas submicrométricas podem adquirir na descarga corona. Devido a esta baixa carga, a força elétrica que conduz as partículas em direção ao eletrodo de coleta também é baixa e as partículas são transportadas para fora do precipitador pelo fluxo de ar. Várias medições mostraram que a eficiência de coleta para partículas $MP_{2,5}$ diminuem com a diminuição do tamanho das partículas porém para partículas menores que cerca de 0,2 μm até 0,03 μm , a eficiência de coleta aumenta novamente porque as partículas pequenas aderem às maiores sob o movimento browniano, embora a maioria dessas partículas não esteja carregada (Jaworek et al., 2018).

O desempenho de um precipitador eletrostático, independente de seu tipo, é caracterizado pela eficiência geral de coleta em massa, que é definido pela Equação:

$$\eta_{esp} = 1 - \frac{m_{out}}{m_{in}} \quad (1)$$

em que m_{out} e m_{in} é a quantidade de massa que sai e entra do precipitador, respectivamente (Jaworek et al., 2018).

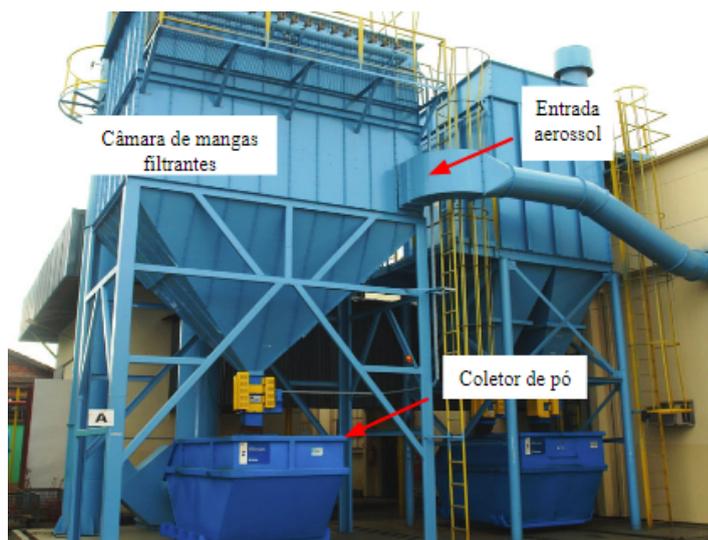
3.3.2 Filtro de mangas

Os filtros de mangas são reconhecidos como uma das tecnologias mais eficazes para a remoção de partículas finas do ar, especialmente em ambientes industriais, devido à sua alta eficiência de coleta para uma ampla gama de tamanhos de partículas. Esse método envolve a passagem do ar através de um meio filtrante, onde as partículas presentes são retidas, formando uma camada semelhante a uma torta sobre a superfície do filtro (Zhou et al., 2023).

Com uma eficiência de coleta muitas vezes superior a 99,99%, os filtros de mangas são geralmente confeccionados em tecido e têm sido empregados em diversas indústrias para capturar partículas sólidas de correntes de gás de processo. Por exemplo, esses filtros têm

vido adotados como uma alternativa eficaz para a coleta de poeira, incluindo cinzas volantes de gases de combustão, dioxinas (dibenzo-p-dioxinas policloradas) e partículas de carbono dispersas nos gases de combustão (Park et al., 2019). A Figura 8 ilustra um filtro de mangas, destacando seus principais componentes.

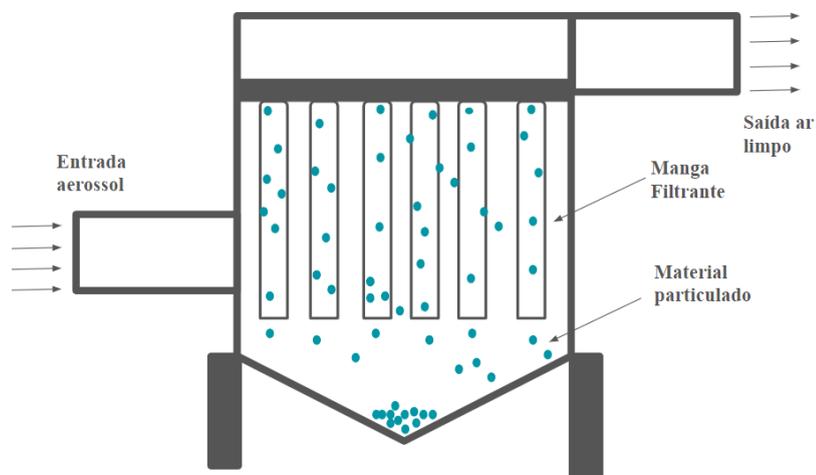
Figura 8 - Filtro de mangas industrial com indicações de seus principais componentes.



Fonte: Adaptado de WEG, 2024.

O princípio de funcionamento do filtro de mangas é mais simples em comparação com outros sistemas de filtração. O gás empoeirado é direcionado para um compartimento onde mangas filtrantes estão instaladas para coletar as partículas. O fluxo de gás limpo é então liberado pela saída do compartimento, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Esquema de funcionamento de um filtro de mangas.

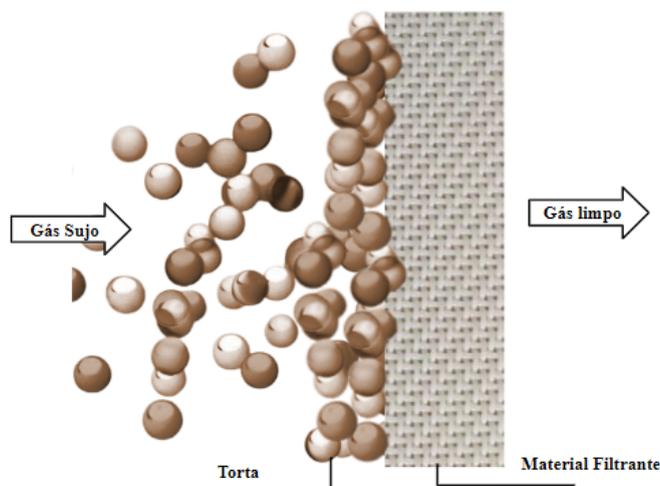


Fonte: Acervo pessoal (2023).

As mangas filtrantes, geralmente, possuem formato cilíndrico, permitindo que até mesmo unidades de pequeno volume tenham uma grande área de filtração. No entanto, ao aumentar a vazão de gás, a velocidade de filtração também aumenta. Esse aumento na velocidade pode reduzir a eficiência de coleta e aumentar a queda de pressão através dos filtros de mangas devido à passagem de partículas pelo meio poroso. Como resultado, o exaustor montado após o compartimento de mangas precisa consumir mais energia para compensar a queda de pressão, além de ser necessária uma limpeza mais frequente das mangas, o que impacta a vida útil das mangas (Park et al., 2019).

Embora os filtros de ar industriais raramente possuam aberturas menores do que as partículas mais finas que são capturadas, sua eficácia muitas vezes se assemelha a ter aberturas menores do que as partículas retidas. Isso se deve ao fenômeno pelo qual as partículas finas, ao se depositarem nas superfícies das aberturas do material filtrante, contribuem para o estreitamento aparente dessas aberturas, resultando em uma filtração mais eficiente, porém aumentando a queda de pressão. Conseqüentemente, à medida que a quantidade de partículas retidas aumenta, forma-se uma camada de material coletado, transformando essa camada no elemento de filtração principal. A Figura 10 ilustra o processo pelo qual as partículas são coletadas no material filtrante e como a torta de filtração se forma.

Figura 10 - Processo de filtração por meio de um material filtrante.



Fonte: Acervo pessoal (2023).

A torta formada pelas partículas coletadas possui poros de tamanho médio menor que o diâmetro das partículas na corrente de gás, o que a torna eficaz, como uma peneira. As partículas se acumulam na superfície do tecido filtrante, o que é classificado como um filtro de superfície. Essa camada desempenha um papel crucial na otimização da eficiência de coleta para partículas micrométricas, proporcionando facilidade na operação e manuseio, além de economia (Heumann, 1997; Donovan, 1985; Nevers, 1995).

Durante o processo de filtração, à medida que as partículas são depositadas no meio filtrante, tanto a queda de pressão quanto a eficiência de coleta tendem a aumentar. A queda de pressão cresce devido ao aumento da resistência à passagem do ar, provocada pela deposição das partículas. Simultaneamente, a eficiência aumenta devido à formação de cadeias de partículas (dendritos) sobre as fibras, as quais passam a atuar como coletores (Cai, 1989).

3.3.2.1 *Material Filtrante*

O meio filtrante é a chave para uma filtragem eficaz do tecido, e o próprio tecido define o meio filtrante, pelo menos inicialmente. Os filtros de tecido são construídos a partir de fibras têxteis, mas, diferem dos filtros de fibra em diversas características importantes, portanto entre propriedades. A diferença estrutural mais óbvia é o tecido e a fibra. Uma fibra é qualquer material longo e fino com comprimento ou diâmetro semelhante a um cabelo. Já

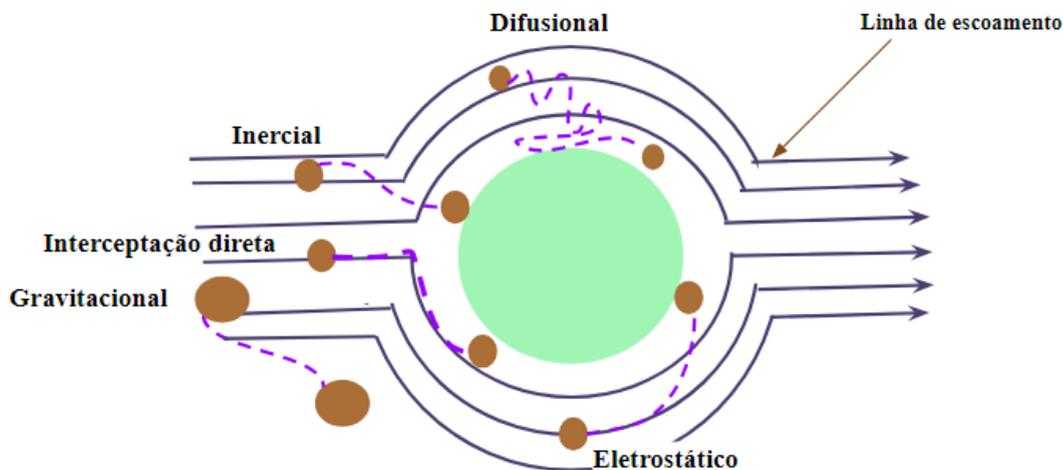
um tecido é uma coleção estável de fibras unidas umas às outras de modo a reter uma estrutura permanente, geralmente plana. Um filtro de fibra, portanto, implica qualquer empacotamento solto de fibras não conectadas ou laços de uma fibra contínua através da qual passa o fluido que está sendo filtrado. Frequentemente, as fibras ficam presas entre grades de suporte (como em um filtro típico de forno doméstico). Um filtro de fibra é geralmente tridimensional e funciona como um filtro de profundidade, operando em alta velocidade nominal (taxa de fluxo de gás/área de superfície do filtro). A regeneração do filtro geralmente significa substituição. Um filtro de tecido, por outro lado, é uma estrutura auto sustentável, principalmente bidimensional, de fibras interligadas e fixadas em posição de modo a formar um plano de fibra fino através do qual o ar sujo passa. A filtração geralmente ocorre na superfície do tecido através da formação de uma torta em operação, que é conhecida como filtração primária (Donavan, 1985)

A escolha do material filtrante depende da consideração de três parâmetros fundamentais: temperatura, umidade e composição química do gás em questão. Os filtros de tecido demonstram notável eficiência quando se trata de retenção de partículas finas, com diâmetro acima de 0,1 micron. Eles encontram aplicação em diversas áreas, tais como na coleta de poeira gerada durante processos como moagem, mistura e pesagem de grãos, trituração de pedra, argila e minerais, fabricação de cimento, operações de limpeza por abrasão, pesagem e peneiramento de produtos químicos em grãos, bem como em atividades relacionadas à madeira, curtumes, produção de fertilizantes, e indústria siderúrgica, entre outras (Macintyre, 1990).

3.3.2.2 Mecanismos de coleta

A deposição das partículas em um meio filtrante deve-se aos mecanismos de coleta. Dentre os principais mecanismos atuantes, destacam-se o gravitacional, interceptação direta, inercial, atração eletrostática e difusional. Na Figura 11 são apresentados como ocorre cada mecanismo de coleta, em que as linhas azuis são as linhas de fluxo do fluido, as esferas são as partículas e o coletor representado por uma área fibrosa.

Figura 11 - Mecanismo de remoção do material particulado



Fonte: Adaptado de Wang et al., 2004.

Na Figura 11, é ilustrada a sedimentação gravitacional, um mecanismo que ocorre quando partículas, especialmente aquelas com diâmetro superior a $100\ \mu\text{m}$, depositam-se fora do fluxo gasoso. Já as partículas um pouco menores seguem o fluxo do gás e colidem diretamente com a parede do coletor, representando a interceptação direta, nele as partículas são grandes suficientes, geralmente maiores que $0,1\ \mu\text{m}$, para passar através dos poros do material filtrante. A impactação inercial, envolve desvios das correntes do fluxo devido às forças inerciais, levando as partículas a colidirem eventualmente com as fibras do coletor, geralmente maiores que $0,5\ \mu\text{m}$. No processo de difusão, as partículas movem-se em um padrão de movimento browniano, apresentando uma probabilidade finita de colidir com o coletor durante seu caminho aleatório, ocorre predominantemente em partículas submicrônicas ($d_p < 1\ \mu\text{m}$) e/ou baixas velocidades de filtração. Por fim, na atração eletrostática, as cargas elétricas presentes nas partículas ou no coletor geram uma atração eletrostática entre as fibras e as partículas, promovendo sua captura (Donavan, 1985). A eficiência de coleta depende do mecanismo dominante para partículas de diferentes tamanhos. Partículas grandes ($> 2,5\ \mu\text{m}$) são removidas do gás devido à impactação inercial, interceptação e sedimentação gravitacional ($> 100\ \mu\text{m}$). A eficiência de coleta devido a esses mecanismos diminui com a diminuição do tamanho das partículas. No outro extremo, as nanopartículas ($< 100\ \text{nm}$) são removidas devido ao movimento browniano (Jaworek et al., 2019).

3.3.2.3 Eficiência de coleta

A expressão que melhor representa os cálculos para eficiência de coleta está descrita na Equação:

$$E(\%) = 100\left(\frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}}\right) \quad (2)$$

Em que a E é a eficiência de coleta, C_{in} e C_{out} são as concentrações das partículas na entrada e saída do processo.

3.3.3 Filtração Híbrida

A filtração híbrida do ar é um processo que combina duas tecnologias de filtração para remover partículas, gases ou vapores do ar. Essa abordagem surgiu da necessidade de obter uma maior eficiência na coleta de partículas nocivas ao meio ambiente, com perda de carga menor que a de filtros de mangas tradicionais, pois permite que partículas de diferentes tamanhos e propriedades sejam removidas com maior eficiência. Esse sistema combina dois dispositivos com diferentes princípios de funcionamento, como um precipitador eletrostático colocado em série com um filtro de mangas (Park et al., 2019).

O filtro de mangas apresenta eficiência de filtração muito alta para partículas finas/ultrafinas. No entanto, apresenta queda de pressão relativamente alta e, conseqüentemente, consumo de energia. Além disso, as mangas possuem vida útil limitada, seja pela saturação do meio filtrante, aumentando a queda de pressão do sistema, ou pelo aparecimento de furos ou rasgos. Já o precipitador eletrostático remove partículas transportadas pelo ar pela força eletrostática que atua sobre as partículas carregadas. Comparado com o filtro de mangas de alta eficiência, a queda de pressão do ESP pode ser insignificante. No entanto, a eficiência de remoção em passagem única do ESP tradicional é baixa, especialmente para partículas finas e ultrafinas. Além disso, o ESP gera poluentes atmosféricos secundários, causando efeitos negativos na saúde humana. Portanto, é necessário desenvolver sistemas avançados de filtragem de ar com alta eficiência e baixo consumo de energia (Park et al., 2019. Feng; Cao; Long, 2023).

Espera-se que a carga eletrostática das partículas após passagem pelo ESP promova um aumento na coleta pelo filtro híbrido uma vez que a atração eletrostática entre as partículas e as fibras pode ser intensificada pelo mecanismo de atração eletrostática. A filtração de tecido em um filtro híbrido é, portanto, considerada assistida eletrostaticamente. Nos filtros assistidos eletrostaticamente, as partículas são coletadas não apenas pelos mecanismos mecânicos de coleta – interceptação, impactação inercial, difusão browniana, mas também pela ação da atração de Coulomb, força de imagem ou dieletroforese. A atração de Coulomb ocorre entre partículas eletricamente carregadas e fibras com carga oposta e depende fortemente da carga da partícula (Castro et al., 2021).

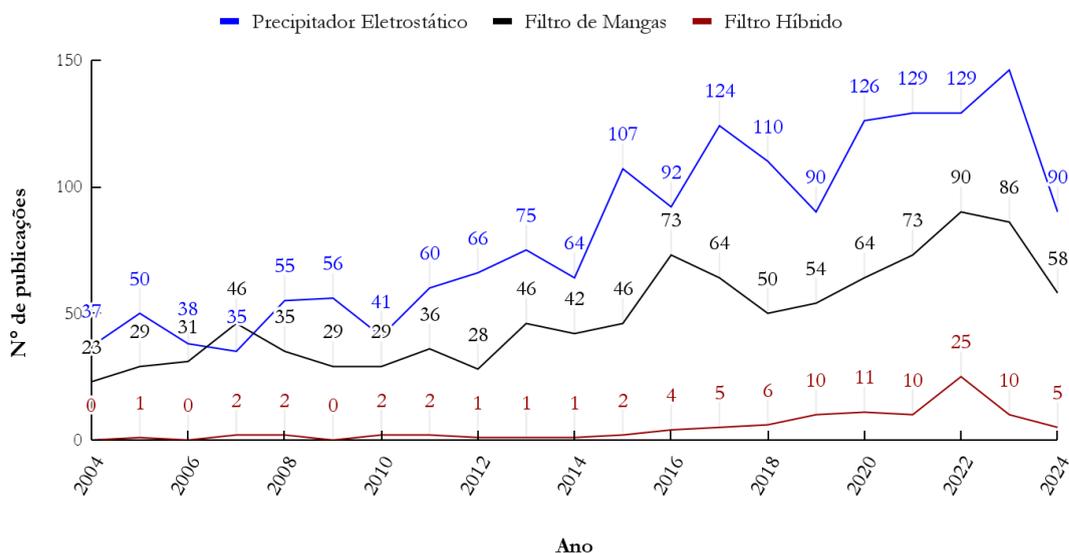
A filtração híbrida do ar apresenta benefícios como maior eficiência de remoção de partículas, maior vida útil dos filtros de manga e menor custo operacional. A filtração híbrida é uma tecnologia em constante desenvolvimento. Novos avanços estão sendo feitos para melhorar a eficiência desse processo.

Existem vários sistemas híbridos que foram desenvolvidos, nomeadamente o Coletor Híbrido Avançado (AHPC), Coletor Híbrido Compacto de Partículas (COHPAC), Filtro de Tecido Estimulado Eletrostaticamente (ESFF), Coletor Multiestágio (MSC), Tecido Eletrostático Coletor Integrado (EFIC) e sistema híbrido ESP-FF (EFF). Destes, COHPAC, EFIC e EFF estão disponíveis comercialmente (Zhang, 2016).

3.4 ESTADO DA ARTE

Um levantamento realizado na base de dados do *ScienceDirect* abrangendo o período de 2004 a maio de 2024 revelou um total de 132.480 estudos relacionados à filtração de ar ou gases. Dentro desse conjunto, 1.720 trabalhos foram identificados como utilizando precipitadores eletrostáticos, enquanto 1.032 estudos se concentraram no uso de filtros de mangas. Além disso, foram registrados 100 estudos sobre filtração híbrida aplicada a esse contexto. A Figura 12 apresenta uma linha do tempo que ilustra a quantidade de trabalhos ao longo do tempo, juntamente com suas respectivas palavras-chave de pesquisa.

Figura 12 - Número de artigos sobre precipitadores eletrostáticos, filtros de mangas e filtros híbridos no período entre 2004 e 2024 (*Science Direct*).



Fonte: Acervo pessoal (2024).

De acordo com os dados apresentados na Figura 12, tanto as publicações anuais sobre filtros de manga quanto sobre precipitadores eletrostáticos exibem uma tendência de crescimento, sendo este último o maior em número de publicações. A queda no número de artigos publicados em 2024 está relacionada apenas ao fato de que apenas metade do ano havia se passado quando este levantamento foi realizado. Notavelmente, o interesse em pesquisar a tecnologia de filtro híbrido para a filtração do ar começou a ganhar impulso a partir de 2014, passando de uma publicação em média por ano para 25 em 2022. Isso reflete um aumento gradual no interesse por essa tecnologia ao longo dos anos. No entanto, ao examinar-se especificamente a pesquisa sobre filtração híbrida aplicada à indústria siderúrgica, há uma queda nos resultados, com apenas 4 publicações durante o período analisado. Essa escassez de trabalhos sugere a necessidade de um maior entendimento e exploração dessa tecnologia em um contexto específico, ressaltando uma área de pesquisa com lacunas a serem preenchidas.

O trabalho de Oliveira Da Silva *et al.* (2023) investigou a eficiência dos filtros híbridos, que combinaram filtros de manga com precipitadores eletrostáticos, na filtração de partículas de cimento. O estudo analisou o comportamento das partículas de cimento carregadas eletrostaticamente durante a formação da torta de filtração em filtros de tecido. O

objetivo era melhorar a retenção de partículas, reduzir a queda de pressão e aumentar a eficiência e a durabilidade dos filtros de manga. A pesquisa concluiu que a aplicação de cargas eletrostáticas nas partículas de cimento melhorou significativamente a eficiência da filtração do ar, reduzia a queda de pressão e aumentava a porosidade da torta de filtração, resultando em uma vida útil mais longa dos filtros de manga e em redução de custo para as empresas. Além disso, traz redução no impacto ambiental devido à menor frequência de substituição das mangas filtrantes.

Já o trabalho de Castro *et al.* (2021) avalia a eficiência de um filtro híbrido em escala de bancada na coleta de nanopartículas. O estudo comparou o desempenho de diferentes filtros, destacando a importância dos filtros híbridos em termos de eficiência de coleta sem aumentar a queda de pressão, característica que resultou em menor consumo de energia e custos de manutenção. A pesquisa utiliza como metodologia, a análise de mobilidade diferencial (DMA), para avaliar a eficiência de coleta e a resistência ao fluxo de ar dos filtros. Concluiu-se que os filtros híbridos apresentaram uma alta eficiência na coleta de nanopartículas em comparação com filtros tradicionais, podendo assim oferecer benefícios econômicos e ambientais.

Sung *et al.* (2019) investigou a aplicação de carvão ativado em pó (PAC) em filtros de tecido para melhorar a remoção de mercúrio (Hg⁰) de gases de combustão em plantas termelétricas a carvão. Como resultados, a eficiência de remoção de Hg⁰ aumentou de 4,3% para 15,8% com a aplicação de PAC, enquanto a queda de pressão permaneceu abaixo de 30 Pa quando partículas menores que 45 µm foram usadas. Já a eficiência de remoção de Hg⁰ do filtro híbrido aumentou de 66,35% para 79,79% com o revestimento de PAC. Houve uma redução temporária na remoção de Hg, que foi resolvida com um ciclo de limpeza.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico tem por objetivo detalhar a metodologia utilizada com o intuito de atender os objetivos propostos. Os ensaios experimentais foram realizadas no Laboratório de Controle Ambiental (LCA) do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e, as caracterizações do material filtrante e particulado, no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE/UFSCar) do Departamento de Engenharia de Materiais (DeMa/UFSCar).

4.1 MATERIAIS FILTRANTES

Os materiais filtrantes foram caracterizados em função da espessura (4.1.1), gramatura (4.1.2), diâmetro médio de fibras (4.1.3), permeabilidade (4.1.4), porosidade (4.1.5), eficiência de coleta de nanopartículas (4.1.6).

4.1.1 Espessura

As medidas de espessura dos materiais filtrantes foram realizadas de acordo com a metodologia apresentada na norma ASTM D1777 (2015). Foram coletadas 7 amostras de cada material, escolhidos 3 lugares aleatórios e medida a espessura utilizando equipamento digital da marca Digimess com resolução 0,001 mm.

4.1.2 Gramatura

A gramatura foi determinada conforme a norma ASTM D3776 (2017), que estipula que a área total das amostras, retiradas de locais distintos do tecido, deve ser no mínimo 130 cm². Para calcular a gramatura, um pedaço de tecido filtrante com área de 150 cm² foi recortado. O material filtrante selecionado foi recortado em quadrados de de dimensões 5,0 x 5,0 cm, que foram retiradas de cada meio filtrante, distantes das bordas dos tecidos, e tiveram suas massas aferidas em balança analítica Shimadzu AY220, com resolução de 0,1 mg. As gramaturas dos materiais, G , foram, então, calculadas a partir da Equação:

$$G = \frac{m}{A} \quad (3)$$

Em que m é massa do material filtrante selecionado, em gramas, e A a área material filtrante em m^2 .

4.1.3 Diâmetro médio de fibras

O diâmetro médio das fibras foi determinado por meio da metodologia proposta por Bortolassi; Guerra e Aguiar (2017). Para isso, amostras quadradas dos materiais filtrantes, com dimensões aproximadas de 1 x 1 cm foram enviadas para o Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE/UFSCar), que realizou a captura das imagens das superfícies filtrantes através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Magellan 400L. A partir dessas imagens, foram selecionadas duas amostras de cada material para análise por meio do software *Image J*, versão 1.54d. As imagens foram divididas em 10 porções de igual tamanho por linhas verticais, e as espessuras das fibras em cada intersecção com as linhas verticais foram medidas no *software*. Foram realizadas, no mínimo, 100 medições em cada imagem, a partir das quais foram calculados os diâmetros médios de fibra e os respectivos desvios padrão.

4.1.4 Permeabilidade

Para os ensaios de determinação da permeabilidade dos materiais filtrantes, foram retiradas duas amostras de cada material e as leituras realizadas utilizando o equipamento Testex Air Permeability Tester TF164B localizado no Laboratório de Controle Ambiental (LCA/UFSCar). Para a realização do procedimento, o ar comprimido que passa pelo equipamento, foi conduzido verticalmente através de uma área conhecida da amostra do material filtrante, enquanto uma diferença de pressão entre os dois lados do material foi ajustada pelo equipamento para um valor específico. Isso permite a determinação da taxa de fluxo de ar e, conseqüentemente, da permeabilidade do material, que é fornecida diretamente pelo instrumento de teste em unidades do Sistema Internacional (SI) de $cm^3/s.cm^2$. Todas as medições para os materiais filtrantes foram realizadas em triplicata e conforme as diretrizes

da norma ASTM D737 (2018), a qual especifica uma queda de pressão de 125 Pa e uma área de leitura de 38,3 cm² para cada amostra.

4.1.5 Porosidade do material filtrante

Para determinação da porosidade, foram realizados ensaios em que foi variada a queda de pressão em 125 Pa para 7 pontos em uma área de leitura de 38,3 cm² no equipamento Air Permeability Tester TF164B localizado no Laboratório de Controle Ambiental (LCA/UFSCar). Assim foram obtidos os valores de permeabilidade em m³/m².s, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2- Permeabilidade dos materiais filtrantes de acordo com a variação da pressão.

ΔP (Pa)	Permeabilidade Poliéster (m ³ /m ² .s)	Permeabilidade Polipropileno (m ³ /m ² .s)
125	0,21	0,226
250	0,40	0,424
375	0,61	0,612
500	0,79	0,796
625	0,97	0,975
750	1,11	1,084
875	1,27	1,259

Fonte: Acervo pessoal (2024).

As porosidades dos materiais filtrantes foram estimadas utilizando a Equação de Ergun (ERGUN, 1952) aplicada a meios filtrantes (Equação 4) e a Equação de Davies (Davies, 1952 *apud* Tian; Mo; Li, 2018)(Equação 5)

$$\frac{\Delta P_m}{Z_m} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_m)^2 \mu V_f}{\varepsilon_m^3 \overline{d_f}^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_m) \rho_g V_f^2}{\varepsilon_m^3 \overline{d_f}} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta P_m}{Z_m} = 64(1 - \varepsilon_m)^{3/2} \frac{1 + 56(1 - \varepsilon_m)^3}{d_f^2} \mu V_f \quad (5)$$

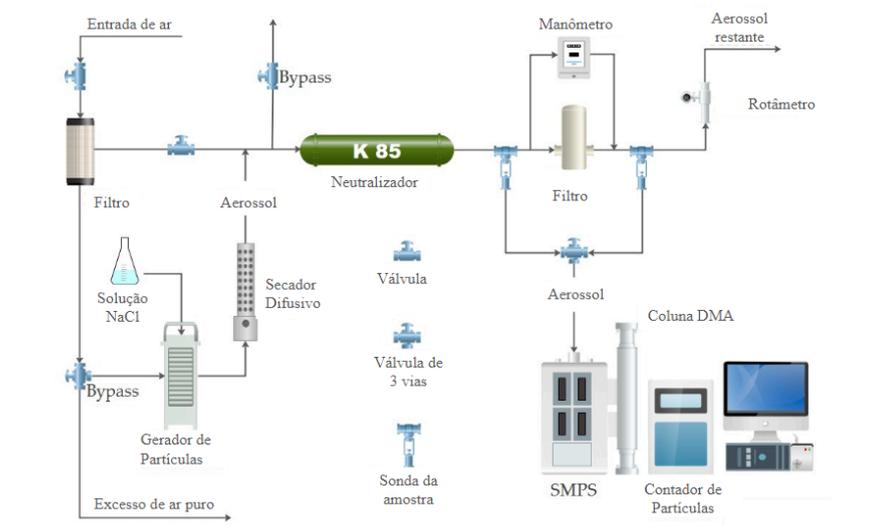
Em que V_f é velocidade superficial de filtração, ΔP_m é queda de pressão através do material filtrante com espessura Z_m , ε_m é a porosidade do meio filtrante e d_f é o diâmetro médio das fibras do meio filtrante, ρ densidade do material particulado, μ é a viscosidade do ar. As espessuras, Z_m , e os diâmetros médios de fibras dos materiais filtrantes, d_f , utilizados nos cálculos das porosidades foram os determinados nos subtópicos 4.1.1 e 4.1.3, respectivamente. Os valores foram calculados indiretamente utilizando uma extensão do solver no Google planilhas que utiliza Levenberg-Marquardt, também conhecido como método dos mínimos quadrados amortecidos (MQA), usado para resolver problemas não lineares de mínimos quadrados.

4.1.6 Eficiência do material filtrante para nanopartículas

A eficiência de coleta de nanopartículas foi avaliada para os meios filtrantes poliéster e polipropileno. Para isso, foram preparadas amostras circulares aleatórias de cada material filtrante, com diâmetro de 7,15 cm. Essas amostras foram submetidas a ensaios na unidade experimental, representada esquematicamente pela Figura 13, para determinação da eficiência de coleta de nanopartículas em função dos diâmetros de mobilidade elétrica. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, na faixa de 36,0–37,0 °C, pressão ambiente na faixa de 92,0–92,1 kPa e umidade do ar comprimido em torno de 20 %. Para a produção de partículas nanométricas, é essencial empregar um processo capaz de gerar partículas com tamanho uniforme e distribuição adequada. Um método amplamente utilizado para esse fim é a nebulização, que envolve a conversão de um líquido em uma suspensão de gotículas extremamente finas. Para os ensaios propostos, uma solução foi preparada a partir de NaCl puro com uma concentração de 1,0 g.L⁻¹, da marca Synth, com uma densidade de 2,165 g.cm⁻³, e água deionizada obtida do purificador Milipore Simplicity Ultrapure Water System. Para a pesagem do NaCl, utilizou-se uma balança analítica Shimadzu AY220, com uma resolução de 0,1 mg. Posteriormente, a solução de NaCl foi introduzida no gerador de

partículas TSI 3079A, sendo então misturada com ar comprimido fornecido por um compressor interno presente no próprio gerador.

Figura 13 - Unidade experimental para avaliação da eficiência de coleta de nanopartículas.



Fonte: Adaptado de Mata et al., 2023.

O aerossol gerado com nanopartículas, com vazão de $2,4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ajustada no gerador, passou por um secador difusivo TSI 3062, contendo sílica-gel para remoção da umidade. Em seguida, foi misturado à corrente de ar previamente filtrada em filtros TSI 3074B e HEPA TSI 1602051. O ar purificado, juntamente com as nanopartículas de NaCl, passou por um neutralizador de aerossol de criptônio-85 (Kr-85) TSI 3054. Por fim, seguiu para o dispositivo onde estava alocada a amostra do material filtrante. Uma válvula de 3 vias era manipulada para que a amostragem fosse realizada 3 medidas antes e 3 medidas depois da passagem do aerossol pelo filtro.

No final da linha, o aerossol passou por um rotâmetro Gilmont nº 14 CP90533 e foi liberado para a atmosfera. A vazão observada no rotâmetro foi controlada pelo manuseio da válvula existente no início da linha, e foi ajustada de acordo com a velocidade superficial de filtração desejada de $2,8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, que é o mesmo valor utilizado na filtração híbrida, e que está dentro da faixa que é comumente utilizada em filtros de mangas industriais, de $0,3\text{--}3,7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ (MORRIS; ALLEN, 1997). Para atingir a velocidade superficial de filtração desejada, a vazão real requerida era de $11,2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. As amostras de aerossol coletadas seguiram para um neutralizador de amerício 241 (Am-241) e, depois, para um sistema de

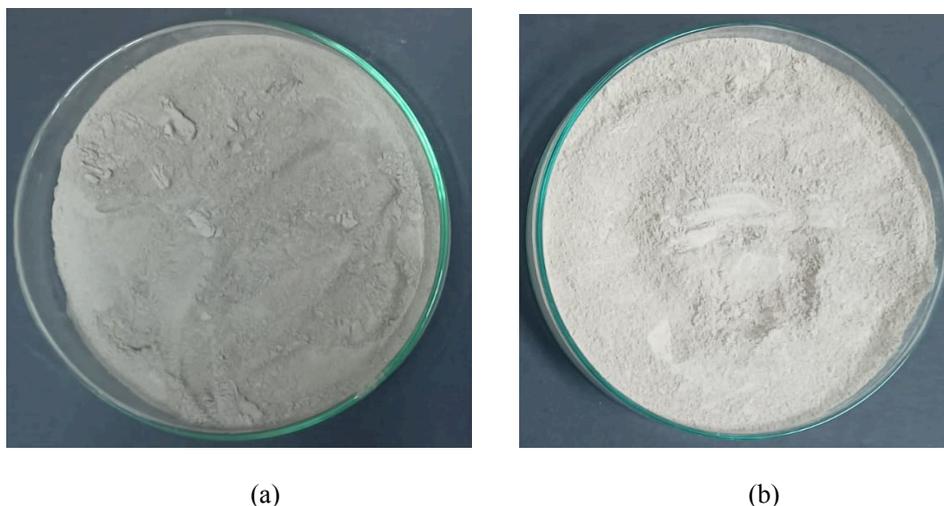
análise de partículas por diferencial de mobilidade elétrica (Scanning Mobility Particle Sizer – SMPS), composto por um classificador eletrostático TSI 3080, acoplado a um analisador de mobilidade diferencial (DMA) TSI 3081, e um contador de partículas TSI 3776.

Os dados coletados eram enviados para um computador, onde o software Aerosol Instrument Manager (versão 8.0) os exibiu. Dessa forma, as concentrações numéricas de partículas ($\#.cm^{-3}$) foram registradas por faixa de tamanho, entre 10 e 300 nm. No software, os parâmetros de tempo de amostragem (*scan up*) foi de 300 segundos, tempo de descarregamento do sistema para nova aferição (*retrace*) para 15 segundos e as vazões *sheath* e *sample* foram definidos como 10,0 e 1,0, respectivamente. As vazões *sheath* e *sample* devem seguir a razão 10-1, por recomendação do fabricante, e sua escolha determina a faixa de diâmetros a serem contabilizados. Para alcançar a vazão de amostragem desejada, foi utilizada uma bomba de vácuo auxiliar GAST 0523-V5424Q-G588DX. Com os resultados, as eficiências fracionárias foram calculadas em triplicata. A partir desses dados, curvas de eficiência de coleta em função do diâmetro de mobilidade elétrica das partículas foram construídas e as eficiências totais médias e desvios padrão para a faixa de tamanho de 10–300 nm foram calculadas.

4.2 MATERIAIS PARTICULADOS

Os materiais particulados utilizados neste estudo incluem o pó de rocha fosfática e pó de sinterização da ArcelorMittal, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Pós de (a) Rocha Fosfática e (b) Sinterização



Com o objetivo de eliminar partículas grosseiras que poderiam obstruir ou danificar os equipamentos de caracterização e/ou experimentação, e para alcançar uma distribuição granulométrica volumétrica mais próximo de 10 μm , ambos os materiais particulados foram peneirados utilizando uma peneira da marca Solotest USBS 100, Tyler/Mesh 100, com abertura de 0,149 mm. No entanto, a rocha fosfática exigiu duas etapas adicionais de processamento devido ao seu tamanho de partícula inicial de $43,30 \pm 1,64 \mu\text{m}$. Após o peneiramento inicial, a rocha fosfática foi submetida a um processo de moagem por 4 horas em um moinho de bolas da marca *U.S. Stoneware East Palestine* Modelo OH 4413, seguido por um segundo peneiramento utilizando uma peneira Fobras Tyler/Mesh 270, com abertura de 0,053 mm.

Além disso, para remover a umidade de ambos materiais particulados, eles foram armazenados em estufa a 80 °C por no mínimo 24 horas antes da realização das caracterizações e dos ensaios experimentais. Os pós foram caracterizados em função da circularidade (4.2.1), distribuição granulométrica volumétrica (4.2.2) e aerodinâmica (4.2.3), densidade (4.2.4), composição química (4.2.5), permissividade relativa (4.2.6) e resistividade elétrica (4.2.7).

4.2.1 Circularidade

Imagens dos pós foram obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) Modelo Magellan 400L, localizado no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE/UFSCar). Para avaliação do formato dos pós, 2 imagens de cada material foram selecionadas e analisadas por meio do software *Image J*, versão 1.54d. O fator de forma de circularidade, f_{circ} , é função da área superficial, A_p , e do perímetro da partícula, P_p (ULUSOY, 2008) e foi calculado de acordo com a Equação:

$$f_{Circ} = \frac{4\pi A_p}{P_p^2} \quad (6)$$

4.2.2 Rugosidade Superficial Média

A rugosidade do material foi analisada utilizando o microscópio de força atômica da marca Bruker, modelo Nanoscope V, disponível no Laboratório de Caracterização Estrutural

(LCE/UFSCar). As imagens foram processadas utilizando o software *Gwyddion*, na versão 2.65. Foram escolhidas quatro imagens de cada amostra de pó que continha pelo menos uma partícula, e a rugosidade superficial média foi calculada pelo programa através da média aritmética dos valores absolutos das alturas dos pontos que compõem o perfil, em relação à linha média (LM). A linha média é uma linha de referência que divide o perfil de rugosidade, de forma que a soma das áreas superiores seja igual à soma das áreas inferiores. O parâmetro *Ra* é o mais utilizado na indicação da rugosidade superficial. Vale ressaltar, no entanto, que ele apresenta baixa sensibilidade para indicar a presença de picos e vales ao longo dos perfis rugosímetros (Fernandes et al., 2011).

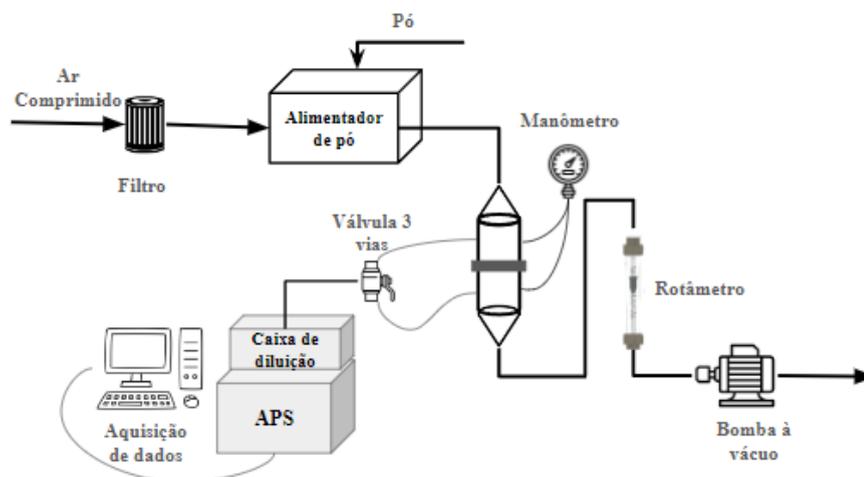
4.2.3 Distribuição Granulométrica Volumétrica

As distribuições granulométricas volumétricas das amostras de cada pó foram determinadas utilizando o método de difração a laser no equipamento Malvern Mastersizer MicroPlus, localizado no Laboratório de Controle Ambiental (LCA/UFSCar). O Mastersizer MicroPlus é um medidor de tamanho de partículas que emprega o princípio de difração a laser, abrangendo uma escala de medida de 0,05 a 550 μm .

4.2.4 Diâmetro Granulométrica Aerodinâmica

A distribuição granulométrica aerodinâmica foi possível através do equipamento Aerodynamic Particle Sizer (APS) 3320, disponível no Laboratório de Controle Ambiental (LCA/UFSCar). Os ensaios foram realizados na unidade experimental representada esquematicamente pela Figura 15, em temperatura ambiente na faixa de 27–30 °C, pressão ambiente de 91,9–92,4 kPa, umidade relativa do ar ambiente entre 27–38 % e umidade relativa do ar comprimido utilizado na linha entre 20–25 %. O sistema é alimentado por ar comprimido que passa por uma coluna de sílica gel para remover a umidade e em um filtro, para remover impurezas. Em seguida, avança para o dispersor de pó, que suga o pó do disco rotatório por uma agulha, formando um aerossol. O aerossol é direcionado ao meio filtrante pelo auxílio da bomba de sucção e levado ao interior do APS pelo auxílio da bomba integrada ao equipamento.

Figura 15 - Unidade experimental para avaliação da eficiência de coleta de micropartículas.



Fonte: Acervo pessoal (2023)

4.2.5 Densidade

Para aferição da densidade, uma amostra de cada material particulado teve sua massa aferida em balança analítica Shimadzu de modelo AY220, com resolução de 0,1 mg, e seu volume medido por picnometria a hélio, por meio do equipamento Micromeritics AccuPyc 1330, disponível no Laboratório de Controle Ambiental da (LCA/UFSCar).

4.2.6 Composição Química

As composições químicas dos materiais particulados foram determinadas pela técnica de fluorescência de raios X (FRX) por energia dispersiva em espectrômetro Shimadzu EDX-720, localizado no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE/UFSCar).

4.2.7 Permissividade relativa

A permissividade relativa, $\epsilon_{d,r}$, que é definida como a constante dielétrica do material dividida pela constante dielétrica do vácuo, $\epsilon_{d,0}$, foi estimada para ambos os materiais particulados a partir de suas composições químicas, com base na Equação 7, em que x_i é a fração mássica e $\epsilon_{d,ri}$ é a constante dielétrica relativa do componente i .

$$\varepsilon_{d,r} = \sum_{i=1}^n x_i \varepsilon_{d,r} \quad (7)$$

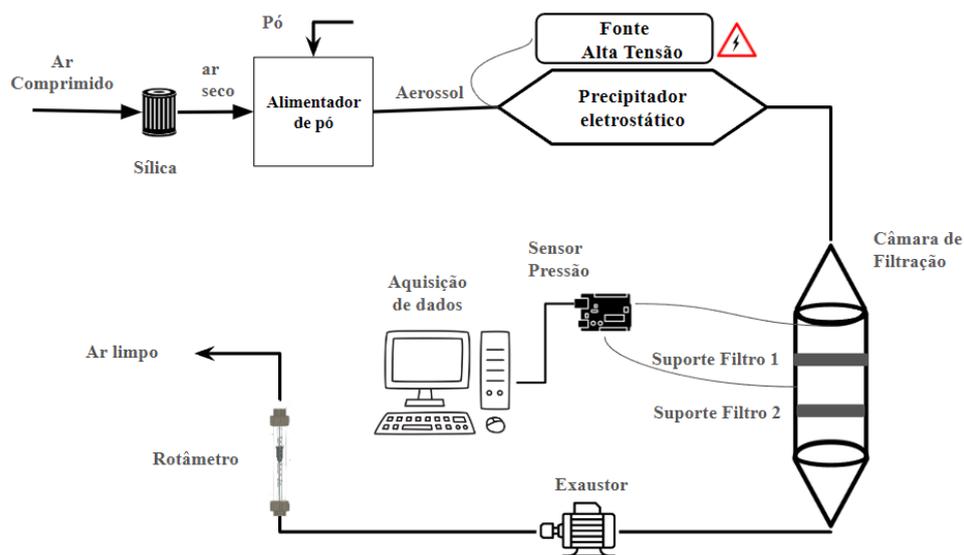
4.3 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO SISTEMA

Para a caracterização elétrica do sistema, a corrente elétrica foi medida no precipitador eletrostático para diferentes tensões elétricas aplicadas, nas seguintes condições: sem material particulado, com rocha fosfática e com pó de sinterização. As tensões elétricas foram variadas desde 0,0 kV até o rompimento dielétrico, e a vazão de ar foi mantida em 71 L.min⁻¹, o que corresponde a uma velocidade de escoamento no precipitador eletrostático de 0,74 m/s e uma velocidade superficial de filtração de 0,047 m/s (2,8 m.min⁻¹).

4.4 FILTRAÇÃO HÍBRIDA DO MATERIAL PARTICULADO

A unidade híbrida de filtração está demonstrada na Figura 16. Ela é composta por um sistema de alimentação de pó composto por uma câmara com prato giratório, precipitador eletrostático, fonte de alta tensão, câmara de filtração e exaustor.

Figura 16 - Esquema do sistema utilizado nos ensaios de filtração híbrida.



Fonte: Acervo pessoal (2023)

O sistema funciona através da alimentação de ar comprimido, o qual é previamente desumidificado ao passar por uma caixa de sílica. Este ar tratado é então direcionado para a caixa de alimentação de pó. Por sua vez, o pó é alimentado por um cone em constante agitação, garantindo um fluxo contínuo para o sulco do prato giratório. Nesse ponto, o pó é combinado com o ar comprimido, sendo sugado e misturado para formar o aerossol.

Da caixa de alimentação, o aerossol seguia então, para o precipitador eletrostático, do tipo placa-fio de simples estágio, construído em acrílico, com placas de cobre de altura de 4,0 cm e comprimento de 15,0 cm, a distância entre as placas coletoras era de 4,0 cm, os quatro eletrodos de descarga tinham diâmetros de 0,30 mm e estavam espaçados de 3,7 cm uns dos outros. A energização dos eletrodos de descarga era feita por meio de fonte de alta tensão HIPOT DC HP5432, com resolução de 0,1 kV.

Após passar pelo precipitador, o ar e as partículas que não foram coletadas seguiam para a câmara de filtração, que continha dois suportes de aço inoxidável, o primeiro para alocação da amostra de material filtrante a ser analisada, e o segundo para alocação de filtro absoluto para retenção das partículas que passaram pelo primeiro material filtrante. Os suportes apresentavam área circular com diâmetro de 18,0 cm para alocação dos filtros. A medição da queda de pressão através do filtro foi realizada através do sensor de pressão diferencial NXP MPXV7002DP que era conectado a uma placa Arduino. A placa Arduino era, por sua vez, conectada a um computador por meio de um cabo USB para aquisição dos dados. A escrita e o carregamento do código à placa Arduino foram feitos utilizando o software Arduino IDE 1.8.16.

Como a área superficial de filtração era circular com diâmetro de 18,0 cm, a vazão volumétrica do aerossol em todos os ensaios foi mantida em $0,071 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, ou $71 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, que foi o valor de vazão máxima alcançado pelo sistema. A velocidade de escoamento no precipitador eletrostático foi, portanto, igual a $44,54 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, ou $0,74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, relativamente próximo dos valores tipicamente utilizados em precipitadores industriais, da ordem de $90 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, ou $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Parker, 2003).

O sulco do prato giratório era capaz de acomodar $(2,04 \pm 0,13) \text{ g}$ do pó de sinterização e $(5,36 \pm 0,09) \text{ g}$ de pó de rocha fosfática. A partir desses valores, foram calculadas as concentrações desejadas de pó no aerossol de acordo com os tempos de rotação do prato giratório. O período máximo de rotação do prato era de 244 s, e o período mínimo, de 63 s. Dessa forma, a faixa de vazão mássica de pó de sinterização possível de ser alimentada ao

sistema era de 0,51–1,94 g.min⁻¹, enquanto a faixa de vazão mássica para a rocha fosfática era de 1,34–5,36 g.min⁻¹. A faixa de concentrações possíveis para o pó de sinterização era de 7,0–27,3 g.m⁻³, enquanto a faixa de concentrações possíveis para o pó de rocha fosfática era de 18,5–71,6 g.m⁻³. A concentração de 20,0 g.m⁻³ foi escolhida por estar dentro de ambas as faixas possíveis e por ser superior às concentrações de material particulado normalmente observadas nas indústrias. Dessa forma, nos ensaios com pó de sinterização, o período de rotação do prato giratório foi ajustado para 86 s, enquanto nos ensaios com pó de rocha fosfática o período de rotação foi de 226 s.

E as tensões aplicadas ao precipitador eletrostático foram de 0,0, -4,0 e -8,0 kV, o que corresponde às intensidades de campo elétrico de 0,0, -2,0 e -4,0 kV/cm.. Para cada tensão e material particulado, foram realizados três ensaios de filtração, com velocidade superficial no filtro de 0,047 m/s (2,8 m.min⁻¹) e concentração de material particulado no aerossol de 20,0 g.m⁻³. Os materiais filtrantes utilizados em todos os ensaios foram o poliéster (PE) e o polipropileno (PP). Como filtro absoluto, foi utilizado o filtro PAN/PTFE para os 6 primeiros ensaios. Como o material filtrante acabou, foi utilizado para o restante dos ensaios o P-84/PTFE da marca Solaft. Os ensaios descritos neste subtópico foram realizados à temperatura na faixa de 26–38 °C, pressão ambiente de 91,9–92,3 kPa, umidade relativa do ar na cabine de alimentação do pó em 18–20 %.

4.4.1 Eficiência de coleta da filtração híbrida

As Equações 8–10 foram utilizadas para calcular as eficiências de coleta do precipitador eletrostático, η_{ESP} , do filtro PE e PP, η_F , e a eficiência do filtro híbrido, η_H , respectivamente. As eficiências calculadas dessa forma desconsideram a massa de material particulado que se depositava por ação da gravidade nas tubulações.

$$\eta_{ESP} = \frac{m_{f,ESP} - m_{i,ESP}}{(m_{f,ESP} - m_{i,ESP}) + (m_{f,F} - m_{i,F}) + (m_{f,abs} - m_{i,abs})} \quad (8)$$

$$\eta_F = \frac{m_{f,F} - m_{i,F}}{(m_{f,F} - m_{i,F}) + (m_{f,abs} - m_{i,abs})} \quad (9)$$

$$\eta_H = 1 - (1 - \eta_{ESP})(1 - \eta_F) \quad (10)$$

As primeiras e segundas equações são calculadas através das massas do material filtrante, filtro absoluto e precipitador medidas antes dos ensaios ($m_{i,F}$, $m_{i,abs}$ e $m_{i,ESP}$) e depois dos ensaios ($m_{f,F}$, $m_{f,abs}$ e $m_{f,ESP}$), para o cálculo da eficiência híbrida, η_H , são utilizadas as eficiências calculadas para o precipitador e para o material filtrante.

4.4.2 Porosidade da torta

A porosidade da torta foi calculada utilizando a equação de Ergun, apresentada no subtópico 4.3.5, adaptada para o meio poroso conforme a Equação 11, que foi encontrada no trabalho de Silva et al. (1999).

$$\frac{\Delta P}{Z} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \mu V_f}{\varepsilon^3 d_{3,2}^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon) \rho_g V_f^2}{\varepsilon^3 d_{3,2}} \quad (11)$$

Em que ρ_g a densidade do ar dada em kg.m^3 , V_f a velocidade de filtração em m.s^{-1} , $d_{3,2}$ é diâmetro volumétrico médio em volume dado em m. Diferentemente da espessura do meio filtrante, a espessura da torta não é constante, e aumenta com o decorrer da filtração. Assim a equação foi adaptada para que a espessura da torta em determinado momento da filtração fosse descrita em função da massa de pó depositada na superfície do meio filtrante por unidade de área superficial do meio, como mostra a equação 12.

$$\Delta P_c = 150 \frac{(1 - \varepsilon_c) \mu V_f (m_{f,F} - m_{i,F})}{A_f \rho_p \varepsilon_c^3 d_{3,2}^2} + 1,75 \frac{\rho_g V_f^2 (m_{f,F} - m_{i,F})}{A_f \rho_p \varepsilon_c^3 d_{3,2}} \quad (12)$$

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T_{real}}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + S}{T_{real} + S} \quad (13)$$

A queda de pressão através da torta, ΔP_c , foi considerada como a queda de pressão final dos ensaios de filtração, descontada a queda de pressão inicial do meio filtrante. A viscosidade dinâmica, μ , é calculada através da lei de Sutherland (Equação 13), nesta

equação, μ_0 é a viscosidade de referência à temperatura T_0 , igual a $1,716 \cdot 10^{-5}$ Pa.s, T_0 é a temperatura de referência, igual a 273,11 K, e S é a constante de Sutherland, com valor de 110,56 K.J. A densidade do ar, ρ_g , foi estimada pela lei dos gases ideais. Para a densidade do material particulado, ρ_p , foram utilizados os valores determinados por picnometria a hélio para cada pó, expostos no subtópico 4.2.5. A área superficial de filtração, A_f , foi igual a $0,0254 \text{ m}^2$ para todos os ensaios. Como diâmetro médio de Sauter das partículas, foram utilizados os diâmetros volume-superfície, $d_{3,2}$, das distribuições granulométricas volumétricas das amostras de material particulado coletadas no filtro PP e PE. Os resultados foram obtidos por meio do método simplex do Solver do Excel e estão apresentados no subtópico 5.6.

5. RESULTADOS

Este tópico descreve os resultados obtidos das caracterizações dos materiais filtrantes (subtópico 5.1) e materiais particulados (subtópico 5.2). Além disso, este tópico apresenta os resultados obtidos dos ensaios experimentais, referentes à caracterização elétrica do sistema (subtópico 5.3), evolução da queda de pressão ao longo dos ensaios de filtração (subtópico 5.4), eficiência de coleta de partículas pelo sistema híbrido (subtópico 5.5) e porosidade da torta formada (subtópico 5.6).

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS FILTRANTES

Neste subtópico são apresentados os resultados das caracterizações dos materiais filtrantes realizadas em função da espessura (5.1.1), gramatura (5.1.2), diâmetro médio de fibras (5.1.3), permeabilidade (5.1.4), porosidade (5.1.5), eficiência de coleta de nanopartículas (5.1.6).

5.1.1 Espessura

Os resultados das leituras realizadas para cada material filtrante são mostradas nas Tabelas 3 e 4, e na Tabela 5 estão representadas as espessuras médias e desvios padrão de cada material filtrante.

Tabela 3 - Leituras de espessura do material filtrante PE.

Amostra	Medição 1 (mm)	Medição 2 (mm)	Medição 3 (mm)
1	1,750	1,820	1,750
2	1,790	1,945	1,750
3	1,755	1,785	1,785
4	1,645	1,680	1,710
5	1,730	1,725	1,970
6	1,735	1,675	1,695
7	1,680	1,705	1,725

Fonte: Acervo pessoal (2024)

Tabela 4 - Leituras de espessura do material filtrante PP.

Amostra	Medição 1 (mm)	Medição 2 (mm)	Medição 3 (mm)
1	2,340	2,295	2,265
2	2,140	2,165	2,240
3	2,330	2,370	2,305
4	2,300	2,295	2,300
5	2,170	2,100	2,130
6	2,230	2,165	2,170
7	2,125	2,355	2,900

Fonte: Acervo pessoal (2023)

Tabela 5 - Espessuras médias dos materiais filtrantes PP e PE.

Material Filtrante	Espessura (mm)
PP	$2,271 \pm 0,152$
PE	$1,753 \pm 0,080$

Fonte: Acervo pessoal (2023)

Comparando os dois materiais, o PP apresentou uma espessura média 22% maior que o PE.

5.1.2 Gramatura

Os resultados das gramaturas calculadas junto aos dados enviados pelo fabricante estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Gramatura dos materiais filtrantes PE e PP calculados e dos fabricantes

Material Filtrante	Gramatura (g/m²)	
	Resultados experimentais	Dados do fabricante
PP	$561,74 \pm 5,29$	550,0
PE	$536,16 \pm 17,29$	550,0

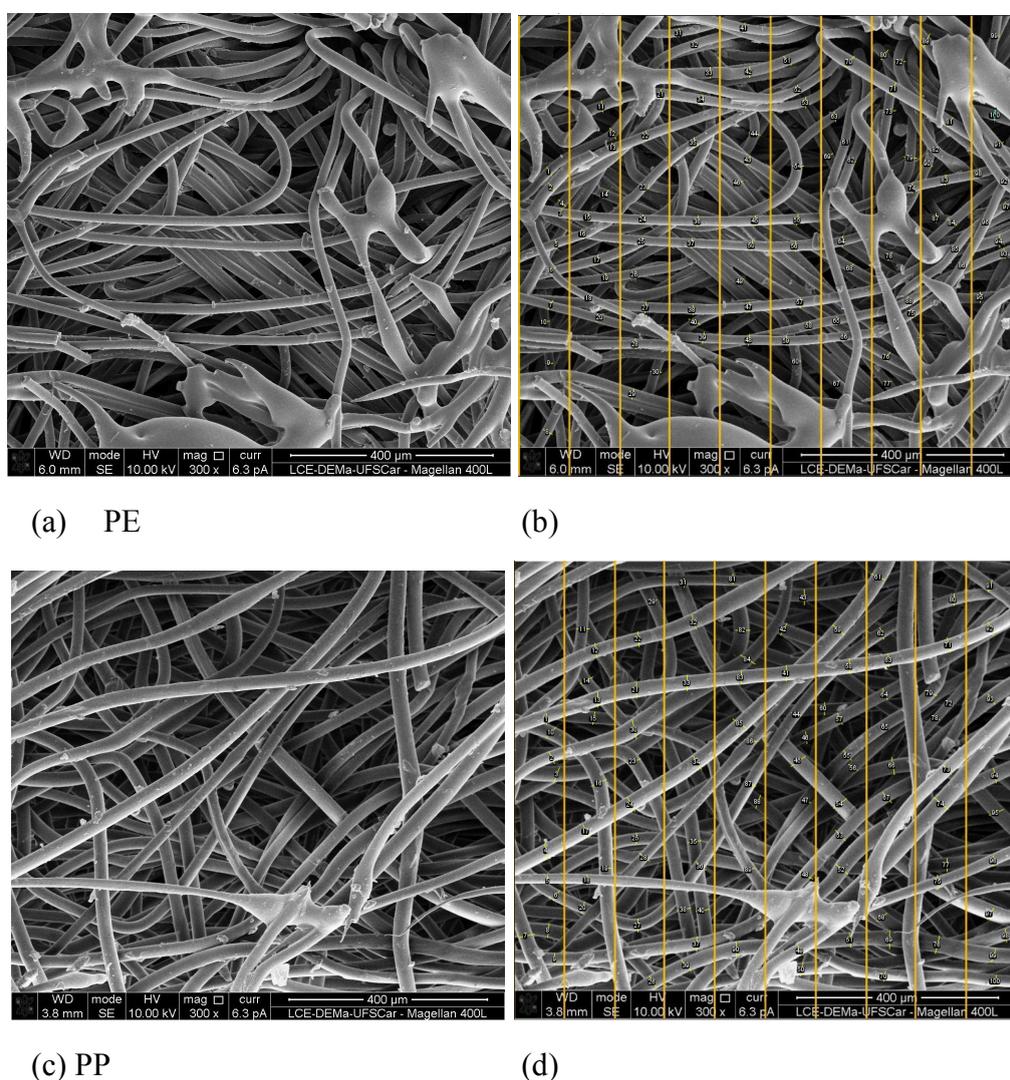
Fonte: Acervo pessoal (2023)

A gramatura foi determinada conforme a norma ASTM D3776 (2017). Embora os fabricantes forneçam os mesmos valores de gramatura para ambos os materiais filtrantes, as medições realizadas indicam que o polipropileno possui uma gramatura ligeiramente superior ao poliéster. De acordo com Mukhopadhyay (2009), um meio filtrante com maior gramatura geralmente resulta em maior espessura. Esta afirmação está em consonância com o resultado apresentado no subtópico 5.1.1.

5.1.3 Diâmetro médio de fibras

A Figura 17 apresenta exemplos de imagens obtidas em MEV das superfícies filtrantes dos materiais PE (a, b) e PP (c, d). As Figuras (b) e (d) mostram as imagens após tratamento no software *Image J* para determinação do diâmetro médio de fibras. A Tabela 7 apresenta os resultados de diâmetros médios de fibra de cada material filtrante.

Figura 17 - Exemplos de imagens obtidas em MEV das superfícies dos materiais filtrantes PE e PP, e medidas feitas para obtenção do diâmetro médio de fibra.



Fonte: Acervo pessoal (2023)

Tabela 7 - Diâmetro médio de fibra dos materiais filtrantes PE e PP

Material Filtrante	Diâmetro médio de fibra (μm)
PP	$26,96 \pm 3,90$
PE	$18,34 \pm 2,08$

Fonte: Acervo pessoal (2023)

A comparação dos diâmetros de fibras de dois materiais filtrantes, o PP e o PE, mostrou que o primeiro apresentou um tamanho médio aproximadamente 32% maior que o PE.

5.1.4 Permeabilidade

Os resultados dos ensaios estão dispostos na Tabela 8.

Tabela 8 - Permeabilidade ao ar dos materiais filtrantes.

Material Filtrante	Permeabilidade ($\text{cm}^3/\text{cm}^2.\text{s}$ a 125 Pa)
PP	$22,75 \pm 1,26$
PE	$21,63 \pm 1,96$

Fonte: Acervo pessoal (2023)

Comparando os resultados de permeabilidade da Tabela 8, ambos os materiais apresentaram valores próximos de permeabilidade.

5.1.5 Porosidade Material Filtrante

As porosidades dos materiais filtrantes foram estimadas a partir dos ensaios de permeabilidade descritos no subtópico 4.1.5, utilizando a Equação de Ergun aplicada a meios filtrantes (Equação 3) e a Equação de Davies (Equação 4). Os resultados da porosidade obtidos pelas equações de Ergun e Davies estão na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores da porosidade calculados através das equações de Ergun e Davies

Material Filtrante	ϵ (Ergun)	ϵ (Davies)
PP	0,81 \pm 0,00	0,78 \pm 0,01
PE	0,84 \pm 0,00	0,82 \pm 0,00

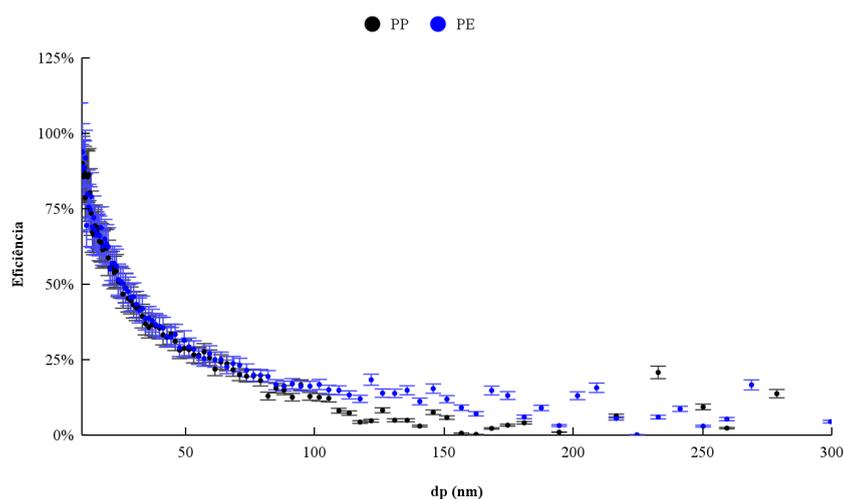
Fonte: Acervo pessoal (2023)

Ao comparar os resultados das equações de Ergun e Davies para ambos os materiais filtrantes, observou-se que os valores de porosidade foram muito semelhantes. Além disso, o poliéster apresentou porosidade maior que o polipropileno.

5.1.6 Eficiência do material filtrante para nanopartículas

As eficiências de coleta dos filtros PP e PE em função do diâmetro de mobilidade elétrica das partículas são apresentadas na Figura 18.

Figura 18 - Eficiência dos materiais filtrantes para nanopartículas.



Fonte: Acervo pessoal (2023)

De acordo com a Figura 18, as duas amostras apresentaram comportamentos semelhantes, em que a eficiência de coleta diminuiu com o aumento do diâmetro das partículas, levando a valores mínimos de eficiência para partículas com diâmetros a partir de 100 nm. Os filtros apresentaram alta eficiência para partículas abaixo de 15 nm, entre 75 % e 100%, e um comportamento decrescente com o aumento do diâmetro da partícula, chegando a valores mínimos próximos de 0%.

As altas eficiências de coleta de partículas com diâmetros no início da faixa avaliada podem ser atribuídas ao mecanismo difusional, o qual perde sua eficácia conforme o tamanho das partículas aumenta. Para partículas maiores, a partir de 100 nm, ocorre um ponto de mínima eficiência, cuja eficiência varia de acordo com as características do material particulado e do meio filtrante. Após esse ponto, a coleta de partículas por difusão enfraquece, e a interceptação direta passa a predominar, sendo esta última influenciada pelo tamanho das partículas (Hinds, 1982). Entretanto, as partículas nessa faixa de tamanho ainda são muito pequenas para que o mecanismo de interceptação direta atue a ponto de aumentar a eficiência de coleta.

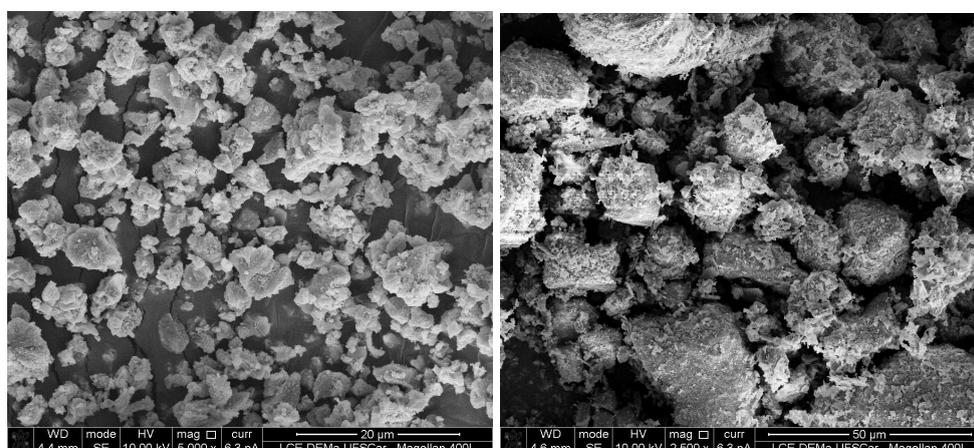
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PARTICULADOS

Neste subtópico, são apresentados os resultados das caracterizações do material particulado realizadas em função da circularidade (5.2.1), rugosidade (5.2.2), distribuição granulométrica volumétrica (5.2.3), distribuição granulométrica aerodinâmica (5.2.4), densidade (5.2.5), composição química (5.2.6) e permissividade relativa (5.2.7).

5.2.1 Circularidade

Exemplos de imagens obtidas no MEV dos materiais pó de sinterização (a) e rocha fosfática (b), utilizadas para aferição do fator de forma de circularidade, são apresentadas na Figura 19. As médias das medidas e os desvios padrão encontram-se na Tabela 10.

Figura 19 - Exemplos de imagens obtidas em MEV dos materiais rocha fosfática, com magnificação de 2500x (a) e pó de sinterização, com magnificação de 5000x.



(a)

(b)

Fonte: Acervo pessoal (2023).

Tabela 10 - Valores de circularidade para os pós de sinterização e rocha fosfática.

Material Particulado	f_{circ}
Sinterização	$0,66 \pm 0,08$
Rocha Fosfática	$0,75 \pm 0,08$

Fonte: Acervo pessoal (2023)

A circularidade de partículas pode variar de 0 a 1. Uma circularidade de valor 1 indica que a partícula é perfeitamente circular. Uma circularidade de valor 0 indica que a partícula é completamente irregular (Wang, Zhang & Chen, 2018). Com base nos dados da Tabela 10, observa-se que os pós analisados exibem valores de circularidade próximos, considerando os desvios padrão das medidas.

5.2.2 Rugosidade Superficial média

As forças de adesão entre partículas e superfícies, predominantemente eletrostáticas, capilares e de van der Waals, desempenham um papel crucial em diversos processos industriais (Petean; Aguiar, 2015). Entre eles, a filtração se destaca, onde a adesão entre partículas e fibras impacta diretamente na eficiência e no custo do processo. A adesão

excessiva leva à formação de tortas mais espessas e resistentes, dificultando a limpeza dos filtros e acelerando a abrasão do tecido filtrante. Conseqüentemente, os custos de manutenção e operação são elevados. A rugosidade da superfície do filtro influencia significativamente a força de adesão entre as partículas e o material filtrante. Uma maior compreensão da relação entre adesão e rugosidade pode auxiliar no desenvolvimento de estratégias mais eficazes para a limpeza dos filtros, como a otimização da superfície do filtro ou a utilização de fluidos de limpeza mais eficientes (Silva et al.,1999).

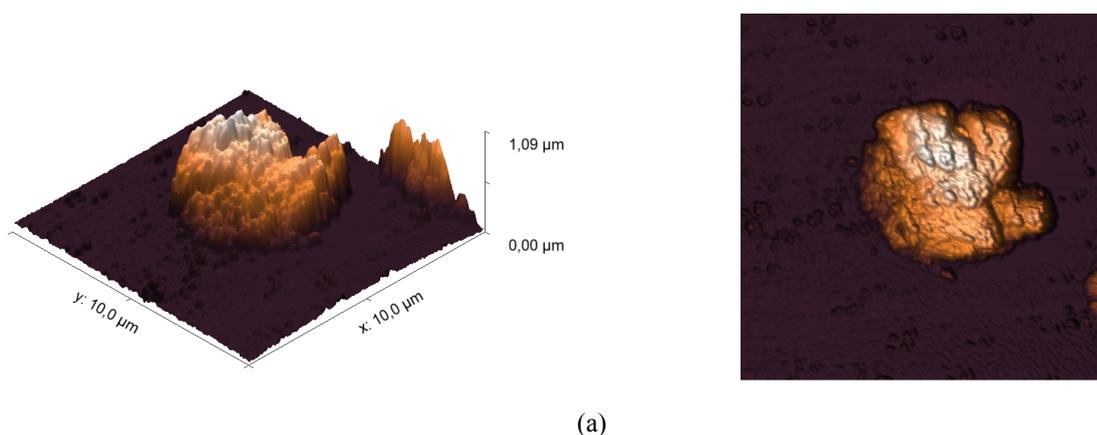
Sabe-se que a maioria dos materiais possui superfície irregular, essa irregularidade é chamada rugosidade. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 11, e na Figura 20, estão exemplos das imagens topográficas de cada pó em 3D e 2D.

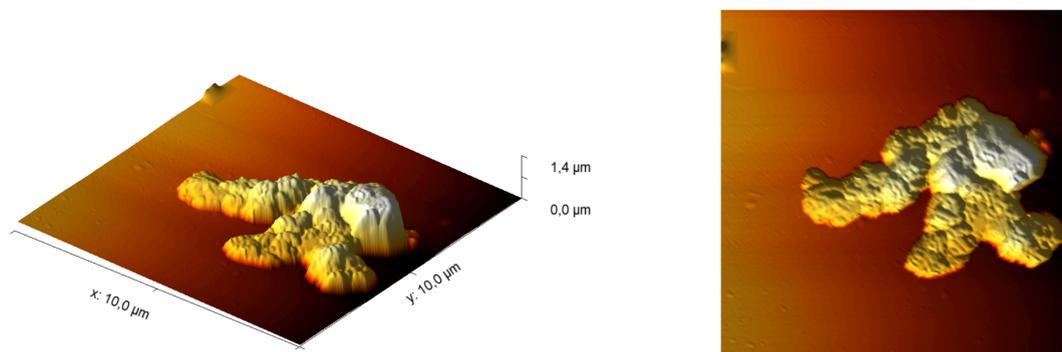
Tabela 11 - Rugosidade média dos pós de sinterização e rocha fosfática

Pó	Rugosidade média (μm)
Sinterização	$0,36 \pm 0,03$
Rocha Fosfática	$0,26 \pm 0,04$

Fonte: Acervo pessoal (2023)

Figura 20 - Imagens 3D e 2D das topografias das superfícies do (a) pó de sinterização e (b) rocha fosfática.





(b)

Fonte: Acervo pessoal (2023)

O pó de sinterização apresentou rugosidade aproximadamente 26% superior à da rocha fosfática. Maiores valores de rugosidade implicam em maiores picos de rugosidades, assim as regiões de contato entre as superfícies dos corpos são menores, e eles ficam aderidos uns aos outros com uma intensidade de força mais fraca (Faustino, 2010).

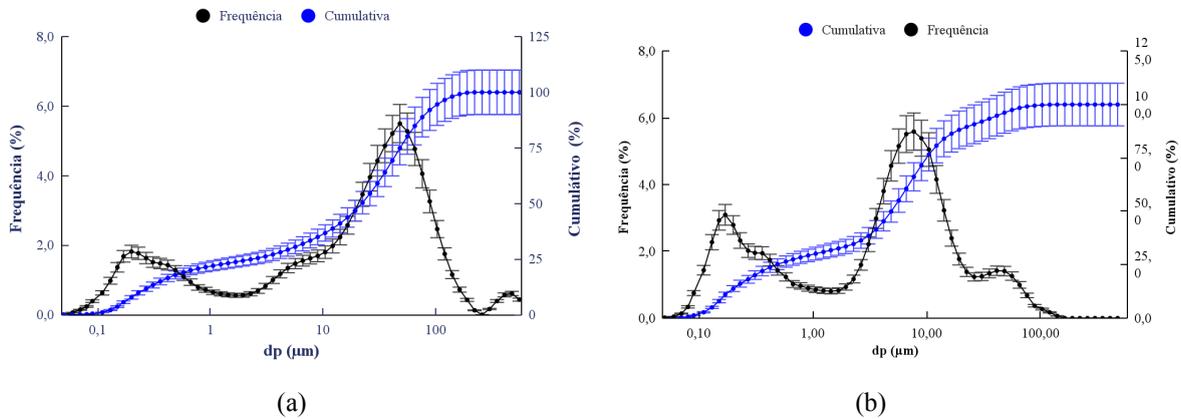
Além disso, o pó de sinterização possui uma faixa de tamanho de partícula menor em comparação com a rocha fosfática, o que contribui para uma maior rugosidade. Em contraste, a rugosidade diminui significativamente com o aumento da faixa de tamanho da partícula (Zhang et al., 2024).

De acordo com Zhang et al. (2024), análises teóricas demonstraram que quando dois objetos com superfícies rugosas se aproximam, eles tendem a se separar devido à presença de picos côncavos e convexos em suas superfícies. Isso resulta em uma redução na área de contato e na energia superficial, afetando a magnitude da força de adesão. É importante destacar que a adesão aumenta conforme o tamanho das partículas aumenta (Xie et al., 2023). Além disso, a adesão partícula-substrato depende apenas das geometrias e propriedades mecânicas da partícula e do substrato. Na realidade, a adesão partícula-substrato também é influenciada por vários outros fatores, como as rugosidades da superfície da partícula e do substrato, a carga eletrostática e a umidade relativa do ambiente (Petean; Aguiar, 2015)

5.2.3 Distribuição granulométrica volumétrica

A Figura 21 ilustra as distribuições granulométricas volumétricas da rocha fosfática após moagem (a) e do pó de sinterização (b).

Figura 21 - Distribuição granulométrica volumétrica da (a) rocha fosfática e (b) pó de sinterização



Fonte: Acervo pessoal (2023)

A curva em formato de “S” de cor azul, na Figura 21 representa a curva cumulativa, com escala de 0 a 100%, e corresponde ao resultado acumulado abaixo de um determinado diâmetro de partícula. A curva de cor preta com um ou mais picos é denominada curva de frequência, com escala de 0 a 8%, obtida por derivação da curva cumulativa.

Os dois materiais particulados apresentaram uma distribuição com dois picos mais expressivos, indicando uma distribuição bimodal. Isso indica também que o pó é polidisperso, ou seja, apresenta populações de partículas com diferentes tamanhos.

Os diâmetros volumétricos medianos ($d_{v,0,5}$), médios ponderados em área ($d_{3,2}$) e médios ponderados em volume ($d_{4,3}$) dos pós em estudo estão expostos na Tabela 12. Por meio do tratamento adicional de moagem e peneiramento, foi possível diminuir o tamanho da rocha fosfática em 55,25%, em média. O pó de sinterização apresenta um tamanho de partícula 47,32% mais fino que o pó de rocha fosfática.

Tabela 12 - Diâmetros volumétricos medianos ($d_{v,0,5}$), médios ponderados em área ($d_{3,2}$) e médios ponderados em volume ($d_{4,3}$) dos dois materiais particulados utilizados.

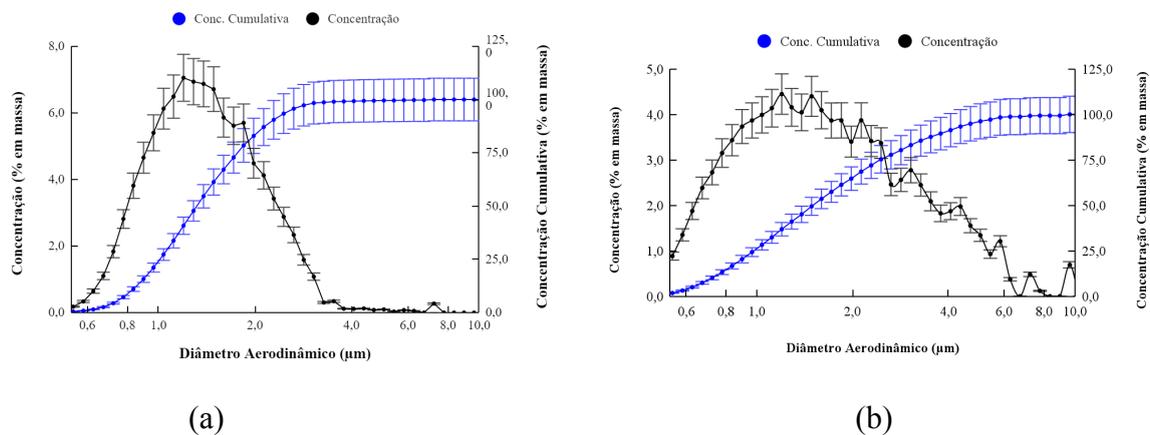
Material Particulado	$d_{v,0,5}$ (μm)	$d_{3,2}$ (μm)	$d_{4,3}$ (μm)
Rocha Fosfática	19,38 ± 0,44	1,24 ± 0,06	64,92 ± 7,18
Sinterização	10,21 ± 0,36	1,10 ± 0,00	22,55 ± 0,58

Fonte: Acervo pessoal (2023)

5.2.4 Diâmetro granulométrico aerodinâmico

A Figura 22 apresenta a distribuição granulométrica em função do diâmetro aerodinâmico da rocha fosfática e do pó de sinterização, respectivamente.

Figura 22 - Curvas de distribuição aerodinâmica em %massa da (a) rocha fosfática e (b) pó de sinterização



Fonte: Acervo pessoal (2023)

A curva de cor preta representa a concentração em massa (%) do material particulado e a curva em formato de “S” na cor azul, representa a curva cumulativa em massa. A curva de concentração tanto para rocha fosfática quanto para o pó de sinterização apresentaram uma distribuição monomodal, indicando que as partículas são pouco polidispersas apesar que a curva para a rocha fosfática se apresenta mais uniforme que o pó de sinterização, que apresenta algumas nuances na sua curva. O valor de diâmetro aerodinâmico médio da rocha fosfática foi de aproximadamente $1,37 \pm 0,07 \mu\text{m}$ e o do pó de sinterização de $1,55 \pm 0,63 \mu\text{m}$. Estes valores de diâmetro aerodinâmico estão dentro da faixa de tamanho do material particulado fino ($\text{MP}_{2,5}$), indicando que o material em estudo é capaz de se alojar nos pulmões no bronquíolo terminal, sendo muito perigoso se inalado por trabalhadores e população. Segundo o Relatório Estado do Ar Global (2024) mais de 90% do total global das mortes por poluição do ar são provocadas pelo contato com partículas finas ($\text{MP}_{2,5}$).

5.2.5 Densidade

A densidade para amostra de rocha fosfática apresentou um valor médio igual a $3,05 \pm 0,00 \text{ g/cm}^3$. Já a amostra do pó de sinterização apresentou um menor valor de densidade média de $2,38 \pm 0,00 \text{ g/cm}^3$.

5.2.6 Composição Química

A Tabela 13 apresenta a composição química dos dois pós. O cálcio foi o elemento presente em maior quantidade em ambos, seguido de fósforo no caso da rocha fosfática, e de cloro no caso do pó de sinterização.

Tabela 13 - Composições químicas dos materiais particulados utilizados.

Componente	Rocha Fosfática	Pó de Sinterização
Cálcio (Ca)	59,06 %	74,70 %
Fósforo (P)	20,27 %	-
Silício (Si)	10,62 %	0,21 %
Ferro (Fe)	3,65 %	3,66 %
Alumínio (Al)	3,17 %	0,30 %
Potássio (K)	1,48 %	6,00 %
Estrôncio (Sr)	1,14 %	0,43 %
Titânio (Ti)	0,39 %	-
Cloro (Cl)	-	10,42 %
Enxofre (S)	-	3,48 %
Outros	0,61 %	1,12 %

Fonte: Acervo pessoal (2023)

A alta porcentagem de cálcio (Ca) na rocha fosfática pode ser explicada já na sua formulação, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$, em que há uma maior quantidade de cálcio que de outros elementos. Na rocha fosfática, os elementos raros do solo se apresentam principalmente na forma de substituição isomórfica de Cálcio (Ca) e depositam-se como os elementos de terras raras francólita que podem ser facilmente liberados na solução de lixiviação por minerais ácidos (WU *et. al.*, 2018).

Já o pó de sinterização exibe uma elevada concentração de cálcio devido à adição contínua de cal hidratada. A cal hidratada é adicionada ao ar que entra no filtro de mangas do despoeiramento primário da sinterização, com o propósito de formar uma pré-camada (*pre-coating*) no filtro industrial e promover a dessulfurização do gás, de forma a evitar a formação de plumas visíveis na chaminé. A camada de pré-coating reduz a penetração de partículas no meio filtrante, facilita a remoção da torta durante os pulsos de limpeza, resultando assim em uma melhoria no desempenho do filtro e contribuindo para a extensão de sua vida útil (Remus *et al.*, 2013; Environmental Agency, 1999).

5.2.7 Permissividade relativa

As constantes dielétricas relativas dos componentes utilizados para o cálculo da permissividade relativa estão na Tabela 14.

Quanto maior a permissividade relativa do material, maior sua capacidade de acumular cargas elétricas para uma determinada diferença de potencial. Os resultados mostraram valores de permissividade relativa para a rocha fosfática e o pó de sinterização de 3,83 e 2,57, respectivamente. A proximidade se deve, em parte, ao alto teor mássico de cálcio presente em ambos os materiais, componente com constante dielétrica relativa igual a 3.

Tabela 14 - Valores de constantes dielétricas de acordo com os elementos presentes nas composições químicas dos pós de sinterização e rocha fosfática.

Elementos	$\epsilon_{d,0}$	Elementos	$\epsilon_{d,0}$
Cálcio (Ca)	3,0	Potássio (K)	-
Fósforo (P)	3,6	Estrôncio (Sr)	-
Silício (Si)	12,0	Titânio (Ti)	1,7
Ferro (Fe)	-	Cloro (Cl)	3,6
Alumínio (Al)	1,7	-	-

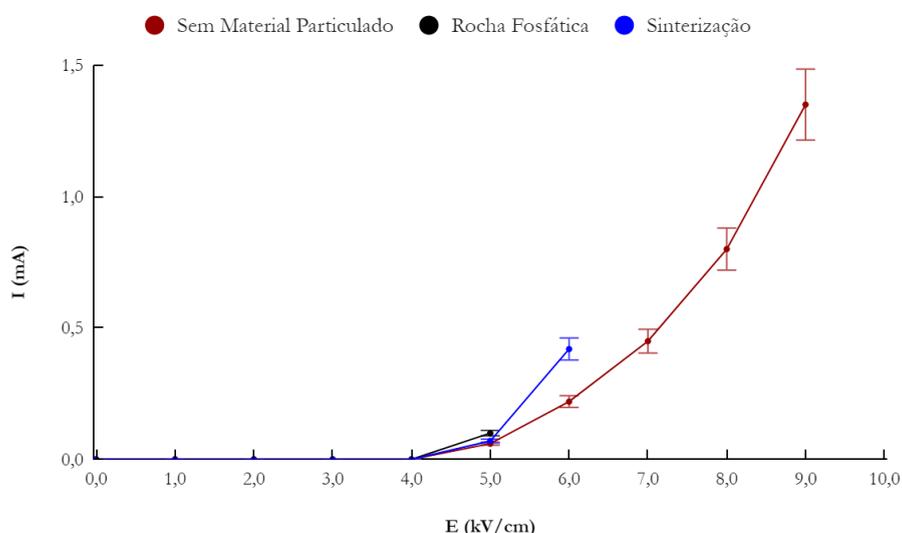
Fonte: Dixon (2023)

5.3 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO SISTEMA

Os resultados de caracterização elétrica do sistema híbrido estão apresentados na Figura 23.

O fenômeno do efeito corona começou a ser observado em todos os materiais a partir de uma intensidade de campo elétrico de aproximadamente -4 kV.cm^{-1} . A partir deste ponto, a corrente elétrica passou a ser detectável, e aumentou à medida que a tensão aplicada ao precipitador aumentava, até que ocorresse o rompimento dielétrico (Martínez; Katz, 2014). O rompimento ocorreu quando as partículas isolantes presentes no meio, submetidas a intenso campo elétrico, tornaram-se condutoras. Como resultado, formou-se um arco voltaico dentro do precipitador, o que acionou a proteção dos circuitos, levando à desenergização do equipamento, pois a corrente elétrica nesse meio tenderia ao infinito.

Figura 23 - Caracterização elétrica do sistema híbrido.



Fonte: Acervo pessoal (2024)

Observa-se que o rompimento dielétrico ocorreu com intensidades de campo elétrico menores para ambos os pós em comparação com a condição do ar sem material particulado. Isso ocorreu porque as partículas de pó têm resistência elétrica menor que a do ar e, conseqüentemente, se depositam nas paredes do precipitador, como visto na Figura 24, diminuindo a resistência elétrica dentro da câmara e levando ao rompimento dielétrico.

O rompimento dielétrico no experimento com pó de rocha fosfática ocorreu com intensidade de campo elétrico de $-5 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$, menor que a do pó de sinterização, igual a $-6 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$, o que está em concordância com a permissividade relativa calculada. A relação entre a permissividade relativa e a tensão de ruptura dielétrica em um material é geralmente inversa (Madsen; Yu; Skov; 2016). Isso indica que a rocha fosfática possui uma permissividade relativa maior que o pó de sinterização, sugerindo que esse material tem uma tendência a ter uma tensão de ruptura dielétrica mais baixa. Isso ocorre porque materiais com alta permissividade dielétrica geralmente possuem dipolos elétricos mais fortes, o que facilita o rompimento dielétrico quando uma tensão crítica é atingida (Madsen; Yu; Skov; 2016).

O pó de sinterização apresentou diâmetro volumétrico mediano de $(10,21 \pm 0,36) \mu\text{m}$, menor que o diâmetro volumétrico mediano da rocha fosfática, de $(19,38 \pm 0,44) \mu\text{m}$, conforme descrito no tópico 4.2.3. Além disso, a rocha fosfática apresentou densidade 22% maior que o pó de sinterização, como visto no 4.2.5. Por esse motivo, durante os ensaios, boa

parte da rocha fosfática alimentada ao sistema se depositou ao longo das tubulações e na base do precipitador eletrostático por ação gravitacional, enquanto apenas uma parcela menor do pó de sinterização foi coletada dessa forma. Isto pode ser evidenciado na Figura 24, que mostra fotos do interior do precipitador eletrostático antes e após os ensaios com pó de sinterização (Figura 24) e rocha fosfática (Figura 25).

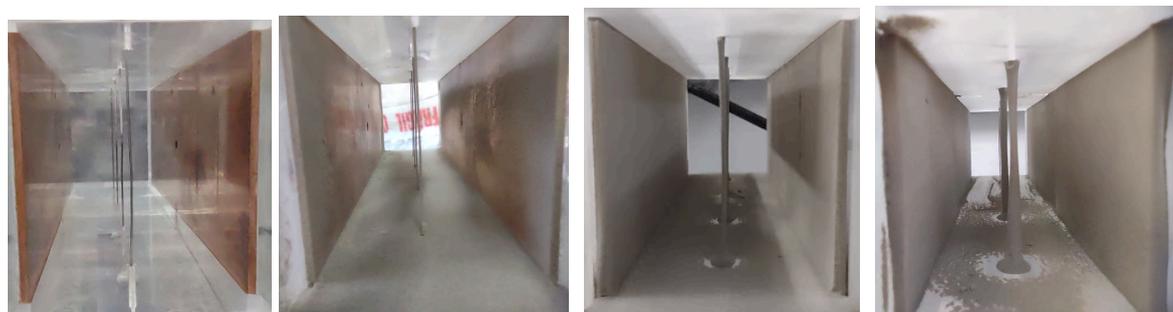
Figura 24 - Interior do precipitador eletrostático (a) antes dos ensaios, após ensaios para o pó de sinterização, (b) 0,0 kV/cm, (c) -2,0 kV/cm e (d) -4,0 kV/cm.



(a) Antes dos ensaios (b) 0,0 kV/cm (c) - 2,0 kV/cm (d) -4,0 kV/cm

Fonte: Acervo pessoal (2024)

Figura 25 - Interior do precipitador eletrostático (a) antes dos ensaios, após ensaios para a rocha fosfática a (b) 0,0 kV/cm, (c) -2,0 kV/cm e (d) -4,0 kV/cm.



(a) Antes dos ensaios (b) 0,0 kV/cm (c) -2,0 kV/cm (d) - 4,0 kV/cm

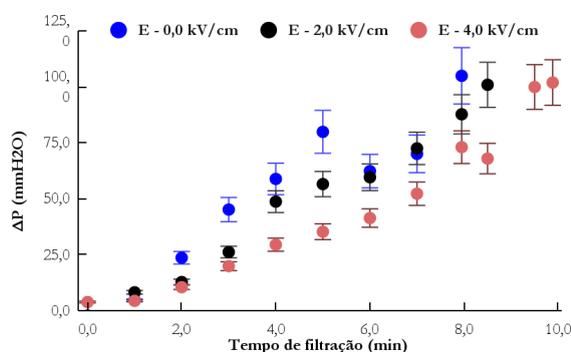
Fonte: Acervo pessoal (2024)

Através das Figuras 24 e 25, é possível observar que a eficiência de coleta no precipitador eletrostático foi alcançada graças a dois mecanismos de coleta. Primeiro, pelo mecanismo de coleta gravitacional, onde as partículas se depositam na base do precipitador pela ação da gravidade. Segundo, pelo mecanismo eletrostático, em que o pó, carregado pelo campo elétrico, foi atraído para as placas e fios de coleta do equipamento.

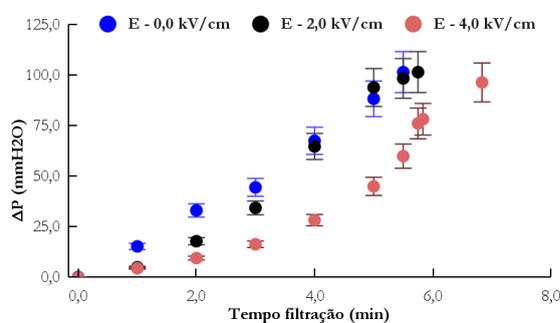
5.4 EVOLUÇÃO DA QUEDA DE PRESSÃO

A evolução da queda de pressão observada nos ensaios está representada nos gráficos da Figura 26. Os tempos totais de filtração, ou seja, os tempos transcorridos até que a queda de pressão através dos filtros e da torta atingisse 100 mmH₂O (ou 1000 Pa) acima da queda de pressão inicial do filtro, estão na Tabela 15.

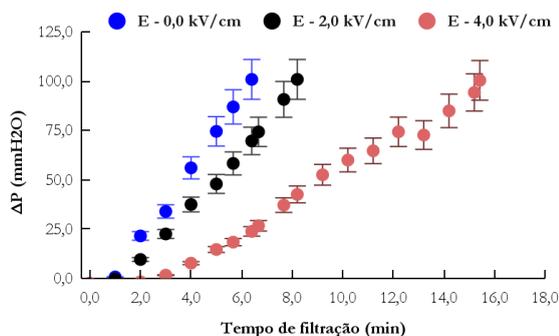
Figura 26 - Queda de pressão em função do tempo de filtração para os ensaios realizados com pó de sinterização com os filtros PE (a) e PP (b), e com rocha fosfática com PE (c) e PP (d).



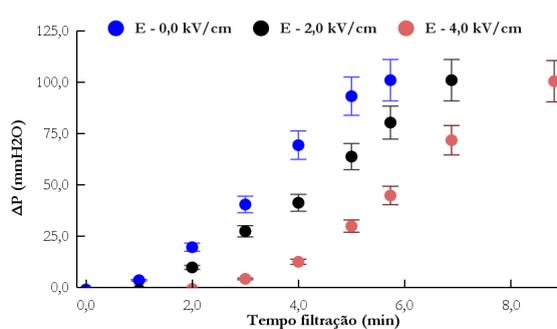
(a) Pó de sinterização, filtro PE



(b) Pó de sinterização, filtro PP



(c) Pó de rocha fosfática, filtro PE



(d) Pó de rocha fosfática, filtro PP

Fonte: Acervo pessoal (2023)

À medida que a tensão aplicada ao precipitador aumentou, as curvas se deslocaram para a direita, ou seja, um maior tempo foi necessário para a queda de pressão chegar a 100 mmH₂O. Isso ocorreu pois, com maior tensão aplicada, uma maior quantidade de pó ficou retida no precipitador e, conseqüentemente, concentrações menores de partículas alcançaram

o filtro. Dessa forma, a queda de pressão no filtro aumentou de maneira mais gradual nas condições de maiores campos elétricos.

O pó de sinterização, por ser de menor tamanho que o pó da rocha fosfática, não apresentou curvas tão distintas de queda de pressão ao longo do tempo quando aplicadas diferentes tensões ao precipitador eletrostático. Isso se deve à sua menor permissividade relativa e tamanho de partícula que acabaram impactando nas curvas de queda de pressão do sistema. Por outro lado, o pó da rocha fosfática exibiu curvas mais facilmente distinguíveis. O pó da sinterização, mais aderente, apresentava falhas durante a alimentação e depositava-se com facilidade nas paredes do equipamento, o que dificultou a manutenção de uma alimentação constante durante os experimentos.

Tabela 15 - Tempo total de filtração dos ensaios.

t_F (min)			
Material Filtrante	E (kV.cm⁻¹)	Pó de sinterização	Rocha Fosfática
PP	0,0	5,55 ± 0,10	8,10 ± 0,12
	-2,0	5,83 ± 0,40	8,75 ± 0,43
	-4,0	6,83 ± 1,43	9,88 ± 0,72
PE	0,0	5,73 ± 1,73	6,40 ± 1,50
	-2,0	6,92 ± 0,80	8,25 ± 2,18
	-4,0	8,82 ± 1,15	15,47 ± 1,25

Fonte: Acervo pessoal (2024)

Para a rocha fosfática, conforme será discutido posteriormente, o filtro de poliéster não é 100% eficiente na coleta das partículas, diferentemente do filtro de polipropileno (PP). Uma parcela das partículas mais finas que atingiram o material filtrante de poliéster (PE) penetraram no filtro e passaram para o filtro absoluto, o que aumentou o tempo de filtração.

Para a intensidade de campo elétrico de -4 kV.cm⁻¹, as partículas de pó de rocha, que possuem uma permissividade maior do que o pó de sinterização, adquiriram mais cargas

elétricas. Como resultado, essas partículas foram mais coletadas pelo precipitador, o que reduziu a concentração que chegou ao filtro e, conseqüentemente, aumentou o tempo de filtração. Além disso, as partículas que chegaram ao filtro PE podiam ter cargas residuais contribuindo para a formação de uma torta mais porosa, o que também aumentou o tempo de filtração, como mostrado no item 5.7.

5.5 EFICIÊNCIA DE COLETA

Os resultados das eficiências de coleta de material particulado, calculados por meio das Equações 6, 7 e 8 apresentadas no tópico 4.4.1, são discutidos nos tópicos 5.5.1, para os experimentos com pó de sinterização, e, 5.5.2, para os ensaios com pó da rocha fosfática.

5.5.1 Eficiência de coleta do pó de sinterização

Os valores de eficiência global de coleta dos testes realizados na unidade híbrida utilizando o pó de sinterização estão dispostos na Tabela 16.

O aumento da tensão elétrica aplicada provocou o aumento da eficiência de coleta no precipitador, como esperado, devido ao aumento da energização das partículas. Este resultado corrobora a discussão sobre a evolução da queda de pressão em função do tempo de filtração do subtópico 5.4. Em condições de campo elétrico mais intenso, e, conseqüentemente, maior eficiência de coleta de partículas pelo precipitador, a concentração de material particulado que chegava até o filtro era menor, fazendo com que a queda de pressão aumentasse de forma mais lenta. As eficiências de coleta nas condições sem aplicação de tensão não foram iguais a zero, devido à deposição de partículas na base e nas paredes do equipamento.

Tabela 16 - Eficiência de filtração do sistema híbrido (η_H), do precipitador eletrostático (η_{ESP}) e do material filtrante (η_F) para os testes realizados com pó de sinterização com os materiais filtrantes PP e PE.

Material Filtrante	E (kV.cm ⁻¹)	η_H (%)	η_{ESP} (%)	η_F (%)
PP	0,0	98,53 ± 1,61	21,21 ± 10,57	98,08 ± 2,34
	-2,0	99,93 ± 0,08	29,96 ± 3,04	99,85 ± 0,11
	-4,0	100,00 ± 0,00	72,56 ± 0,61	100,00 ± 0,00
PE	0,0	98,57 ± 0,96	16,73 ± 7,29	98,32 ± 1,23
	-2,0	99,47 ± 0,60	33,22 ± 5,51	98,73 ± 0,98
	-4,0	100,00 ± 0,00	53,42 ± 2,24	100,00 ± 0,00

Fonte: Acervo pessoal (2024)

As eficiências de coleta dos filtros PP e PE foram bastante elevadas mesmo sem aplicação de tensão, não havendo muita margem para aumentos. Mesmo assim, aumentos discretos foram verificados na eficiência dos filtros com aumento da tensão elétrica aplicada ao precipitador. Este fenômeno pode ser explicado pela existência de cargas elétricas residuais nas partículas que passaram pelo precipitador sem serem coletadas. Tais cargas elétricas residuais podem ter favorecido a coleta de partículas nos filtros pelo mecanismo de atração eletrostática. Este comportamento foi observado no trabalho de Castro (2022), em ensaios de filtração realizados no mesmo equipamento.

5.5.2 Eficiência de coleta da rocha fosfática

Os valores de eficiência de coleta dos testes realizados na unidade híbrida utilizando o pó de rocha fosfática estão dispostos na Tabela 17.

Tabela 17 - Eficiência de filtração do sistema híbrido (η_H), precipitador eletrostático (η_{ESP}) e material filtrante (η_F) para os testes realizados com a rocha fosfática com os materiais filtrantes PP e PE.

Material Filtrante	E (kV.cm⁻¹)	η_H (%)	η_{ESP} (%)	η_F (%)
PP	0,0	100,00 ± 0,00	58,38 ± 5,92	100,00 ± 0,00
	-2,0	100,00 ± 0,00	72,21 ± 6,03	100,00 ± 0,00
	-4,0	100,00 ± 0,00	75,72 ± 4,09	100,00 ± 0,00
PE	0,0	90,07 ± 4,33	42,94 ± 12,80	83,92 ± 8,69
	-2,0	93,55 ± 5,61	56,66 ± 4,30	86,61 ± 11,74
	-4,0	99,83 ± 0,29	76,22 ± 1,35	94,70 ± 7,30

Fonte: Acervo pessoal (2024)

Da mesma forma que nos experimentos com pó de sinterização, descritos no subtópico 5.5.1, houve aumento de coleta das partículas de rocha fosfática por precipitação eletrostática à medida que se aumentou a intensidade de campo elétrico aplicada ao precipitador. Para os ensaios realizados com filtro PP, a eficiência de coleta alcançou valor máximo, independente da intensidade de campo elétrico aplicado.

Já para o material filtrante PE, houve aumento na eficiência de coleta do sistema híbrido com o aumento da tensão no precipitador, e este aumento é maior evidenciado que nos experimentos com pó de sinterização, descritos no subtópico 5.5.1. Este resultado está em concordância com a maior permissividade elétrica do pó de rocha fosfática, discutida nos subtópicos 5.2.7 e 5.3. As partículas de rocha fosfática são mais propensas a adquirir cargas elétricas que as partículas de pó de sinterização. Dessa forma, provavelmente, as partículas de rocha fosfática que passaram pelo precipitador sem serem coletadas continuam mais cargas elétricas que as partículas de pó de sinterização, fazendo com que sua coleta pelo filtro fosse intensificada pelo mecanismo de atração eletrostática.

Para realizar os cálculos de eficiência do precipitador eletrostático, foram pesadas as massas do precipitador, do filtro avaliado e do filtro absoluto antes e depois dos ensaios. Os valores de eficiência do precipitador podem ser avaliados mais qualitativamente do que quantitativamente, devido à variação de pressão na linha de ar comprimido durante os

experimentos, causada pelo compressor externo. Essas variações de pressão influenciaram a vazão de ar, e em momentos de maior vazão, a quantidade de pó depositada na base do precipitador pode ter sido afetada. Como o cálculo considera tanto o pó depositado na placa quanto a base, isso impactou o valor final da eficiência. Além disso, as condições de temperatura e umidade da linha também podiam afetar a eficiência final.

5.5.3 Distribuição Granulométrica Volumétrica

Após os ensaios, foram coletados os pós que estavam na base e nas placas do precipitador e retidos no material filtrante. Os pós foram caracterizados utilizando o método de difração a laser no equipamento Malvern Mastersizer MicroPlus, localizado no Laboratório de Controle Ambiental I (LCA/UFSCar), a fim de determinar a granulometria dos mesmos, os diâmetros volumétricos medianos dos pós coletados na base e nas placas do precipitador, bem como do pó coletado nos filtros ao final dos ensaios experimentais estão nas Tabela 18, para o pó de sinterização, e 19, para o pó de rocha fosfática.

Tabela 18 - Diâmetro volumétrico mediano do pó de sinterização coletado na base e nas placas do precipitador e nos materiais filtrantes PP e PE

Material Filtrante	E (kV.cm ⁻¹)	Base	Placa	Filtro (µm)
		precipitador (µm)	Precipitador (µm)	
PP	0,0	13,44 ± 3,61	-	6,25 ± 1,12
	-2,0	26,84 ± 1,20	8,37 ± 2,06	4,11 ± 0,70
	-4,0	7,07 ± 0,64	5,77 ± 0,43	3,38 ± 0,32
PE	0,0	17,27 ± 1,51	-	5,12 ± 0,86
	-2,0	9,91 ± 0,57	8,86 ± 1,50	4,71 ± 0,57
	-4,0	7,63 ± 1,04	6,15 ± 0,19	4,03 ± 0,52

Fonte: Acervo pessoal (2024)

Tabela 19 - Diâmetro volumétrico mediano da rocha fosfática coletado na base e nas placas do precipitador e nos materiais filtrantes PP e PE.

Material Filtrante	E (kV.cm⁻¹)	Base precipitador (µm)	Placa Precipitador (µm)	Filtro (µm)
PP	0,0	32,23 ± 0,83	-	5,87 ± 0,56
	-2,0	28,71 ± 1,06	22,26 ± 2,57	4,04 ± 0,38
	-4,0	31,52 ± 2,83	23,05 ± 1,55	5,44 ± 0,62
PE	0,0	27,65 ± 0,65	-	4,58 ± 0,81
	-2,0	29,43 ± 1,72	21,78 ± 1,02	5,12 ± 0,19
	-4,0	26,41 ± 1,52	20,57 ± 1,59	3,56 ± 0,02

Fonte: Acervo pessoal (2024)

De forma geral, as partículas de maior tamanho foram naturalmente depositadas na base do precipitador devido à ação gravitacional. Partículas de tamanho intermediário, carregadas pelo campo elétrico, foram atraídas para as placas do precipitador.

As partículas menores, que não foram afetadas pelo campo elétrico no precipitador, ou que foram carregadas mas não com cargas elétricas suficientes que as fizessem ser coletadas pelas placas coletoras, seguiram em direção à câmara contendo o material filtrante. As partículas não carregadas foram coletadas principalmente através dos mecanismos de interceptação direta ou inercial, enquanto as partículas de menor escala, na ordem nanométrica, foram retidas pelo mecanismo difusional.

Já as partículas que saíram do precipitador carregadas tiveram também influência do mecanismo de atração eletrostática ao encontrarem as fibras do meio filtrante. A coleta pelo mecanismo de atração eletrostática contribui para a formação de tortas menos compactas, conseqüentemente de menor porosidade, devido à intensificação da formação de dendritos no filtro.

5.6 POROSIDADE DA TORTA

Na Figura 27, são apresentadas as curvas de evolução da porosidade da torta em função da queda de pressão do sistema de filtração, os valores da porosidade da torta de filtração que foram calculados de acordo com a metodologia do subtópico 4.4.2, estão na Tabela 20.

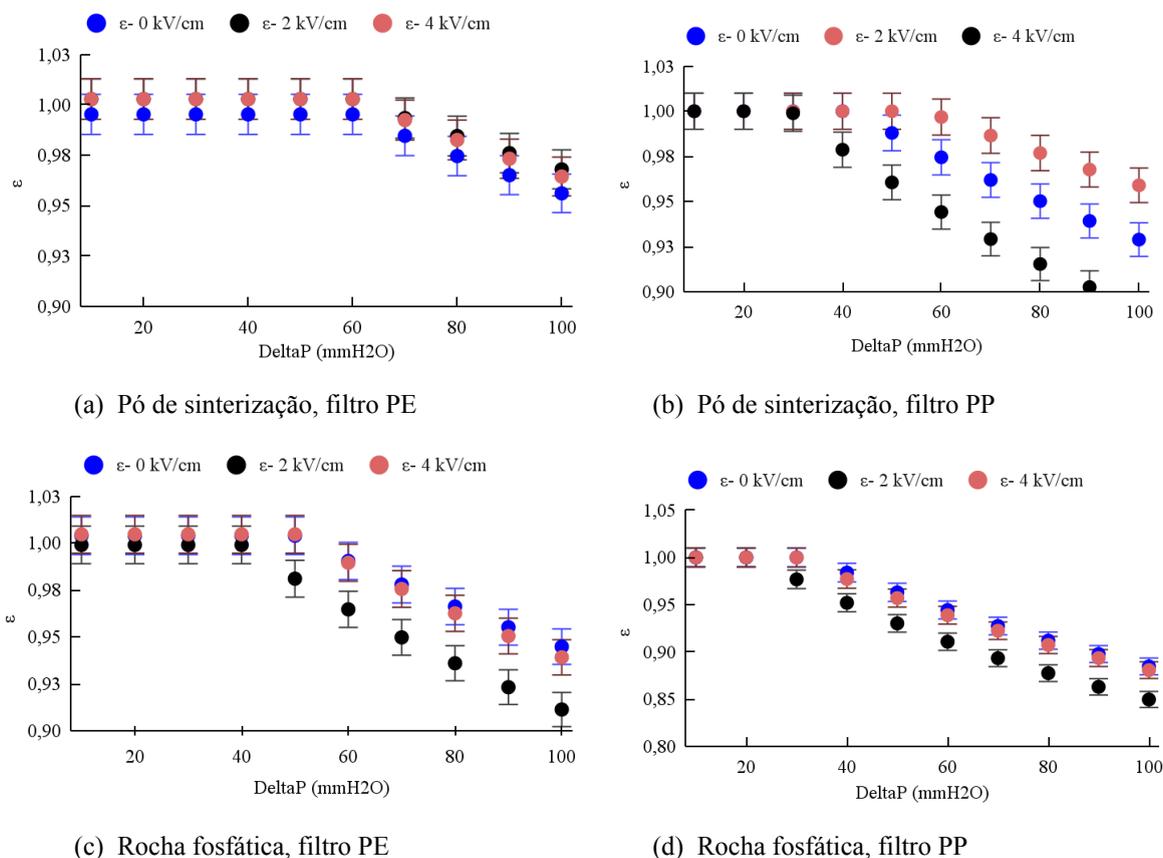
De acordo com as curvas da Figura 27, a porosidade começou a diminuir em para o poliéster e em 40 mmH₂O para o polipropileno. Ainda, pode-se observar que nas curvas de campo elétrico aplicado de 0,0 e -4,0 kV/cm as curvas tiveram valores de porosidade próximos, levando a dois efeitos contrários na porosidade da torta quando se aplica tensão no precipitador, primeiro, as partículas mais finas formando a torta, o que leva a menores porosidades, segundo, as partículas com cargas elétricas residuais, o que leva a maiores porosidades.

Os valores de porosidade para o pó de sinterização foram semelhantes tanto nos ensaios de filtração com material filtrante PP quanto PE. No entanto, ao considerar a rocha fosfática, observou-se que os ensaios com PE resultaram em porosidades maiores do que aqueles com PP.

No ensaio de filtração com rocha fosfática e filtro PE a -4,0 kV.cm⁻¹, observou-se o maior tempo de filtração entre os ensaios. No entanto, isso não diminuiu a porosidade da torta de filtração. Isso se deve ao fato de que, com uma torta mais porosa, os espaços se ajustam para permitir a passagem do ar, resultando conseqüentemente em um tempo de filtração mais longo.

A aplicação de tensão no ESP, com conseqüente formação de tortas com granulometria menor, não foi suficiente para reduzir a porosidade da torta de maneira significativa, nem para fazer com que a queda de pressão no filtro aumentasse de forma mais rápida, significando para indústria em menos ciclos de limpeza e contribuindo para maior longevidade das mangas filtrantes.

Figura 27 - Evolução da porosidade da torta em função da queda de pressão para os ensaios realizados com pó de sinterização com os filtros PE (a) e PP (b), e com rocha fosfática com PE (c) e PP (d).



Fonte: Acervo pessoal (2024).

Comparando com os resultados de Castro (2022), que empregou o mesmo sistema para filtração híbrida, porém com uma velocidade de filtração de 2 m.min⁻¹, inferior à do presente estudo, observou-se uma faixa de valores de porosidade próximos aos apresentados neste estudo.

Tabela 20 - Porosidade da torta de filtração (ϵ_c) da rocha fosfática e pó de sinterização utilizando os materiais filtrantes PP e PE.

Material Filtrante	E (kV.cm⁻¹)	ϵ_c (Sinter)	ϵ_c (Rocha Fosfática)
	0,0	0,94 ± 0,01	0,89 ± 0,01
PP	-2,0	0,96 ± 0,00	0,83 ± 0,02
	-4,0	0,90 ± 0,02	0,87 ± 0,02
PE	0,0	0,95 ± 0,00	0,93 ± 0,02
	-2,0	0,95 ± 0,02	0,93 ± 0,04
	-4,0	0,95 ± 0,01	0,94 ± 0,01

Fonte: Acervo pessoal (2024)

6. CONCLUSÕES

A eficiência da coleta do pó da rocha fosfática no precipitador foi maior que o pó de sinterização. Essa coleta aconteceu tanto por gravidade na base do precipitador, quanto nas placas.

À medida que a tensão aplicada ao precipitador aumentou, foi observado aumento na eficiência de coleta, não só no precipitador mas também no filtro, fazendo com que a eficiência no filtro híbrido chegasse a valores de 100% para algumas condições.

Os maiores tempos de filtração para alcançar a queda de pressão de 100 mmH₂O nos ensaios do filtro híbrido, aconteceram nas maiores tensões aplicadas ao precipitador, o que industrialmente significaria menor frequência de limpeza das mangas e, possivelmente, maior tempo de vida útil. Apesar de ter havido uma coleta preferencial de partículas finas pelo filtro, não foi observada a formação de tortas extremamente compactas, que poderiam comprometer a performance do filtro híbrido.

O material filtrante mais adequado vai depender do material particulado utilizado, o que apresentou melhor eficiência de coleta para os ensaios feitos com a rocha fosfática foi polipropileno chegando a 100% tendo ou não campo elétrico aplicado ao precipitador, já para o pó de sinterização ambos os materiais filtrantes apresentaram altas eficiência de coleta, além de valores próximos de tempo de filtração e porosidade da torta formada, indicando que ambos são boas escolhas para o pó de sinterização.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação do impacto na eficiência de coleta quando há deposição da linha do equipamento.
- Avaliação de efeitos da rugosidade na porosidade da torta e na eficiência de coleta do precipitador e do material filtrante.
- Determinar a porosidade das tortas formadas com pó de sinterização em ensaios de filtração híbrida por algum método experimental e comparar os resultados com as porosidades estimadas pelas correlações existentes na literatura.
- Avaliar o desempenho da filtração híbrida com carregamento eletrostático do pó de sinterização e polarização das fibras do meio filtrante com campo elétrico externo.
- Avaliar o desempenho da filtração híbrida para outros processos da indústria siderúrgica, bem como para outras indústrias.
- Avaliar em laboratório outras configurações de filtros híbridos, como aquelas em que os materiais filtrantes ficam localizados entre as placas coletoras do precipitador eletrostático.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Poluentes atmosféricos. Disponível em: <[https://antigo.mma.gov.br/cidades:sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes:atmosf%C3%A9ricos.html](https://antigo.mma.gov.br/cidades/sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes:atmosf%C3%A9ricos.html)> . Acessado em: 16 de dezembro de 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM D1777 – 96. **Standard Test Method for Thickness of Textile Materials**. West Conshohocken, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM D3776/D3776M – 09a (Reapproved 2017). **Standard Test Methods for Mass Per Unit Area (Weight) of Fabric**. West Conshohocken, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM D737 – 18. **Standard Test Methods for Air Permeability of Textile Fabrics**. West Conshohocken, 2018.

ANDRADE, R. G. S. A., GUERRA, V. G. Discharge electrode influence on electrostatic precipitation of nanoparticles. **Powder Technology**, 379, 417–427, 2021.

AÇO BRASIL, Relatório de sustentabilidade: Aço Brasileiro, 2020. Disponível em : <<https://www.acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/assets/pdf/PDF-2020-Relatorio-Aco-Brasil-Dados.pdf>> Acessado em: 19 de julho de 2024

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

BRAGA, B.; Hespanhol, I.; Conejo, J., G., L.; Mierzwa., J., C.,. Barros, M., T., L.; Spencer, M.; Porto, M., Nucci, N.; Juliano, N.; Eiger, J.; Introdução à engenharia ambiental. **Prentice Hall**, São Paulo, 2002.

CASTRO, B. C. **Desempenho da Filtração Híbrida na Coleta de Nanopartículas, Calcário Dolomítico e Pó de Sinterização de uma Indústria Siderúrgica**. Tese (Doutorado

em Engenharia Química) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 2022.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS DA CONSERVAÇÃO INTEGRADA (CECI). Ofício do ferreiro. Disponível em: <<http://www.ct.ceci-br.org/ceci/br/pesquisa-ceci/estudos/oficios-tradicionais/ferro-a-forja.html>> . Acesso em: 31 de março de 2024.

CLIMATE HOME NEWS, Lessons from London's 1952 fog could save millions today. Disponível em: <<https://www.climatechangenews.com/2017/03/03/lessons-londons-1952-fog-save-millions-today/>> Acessado em: 26/12/2023.

COURY, J. R. **Electrostatic effects in granular bed filtration of gases**. Tese (Doutorado em Filosofia) – Universidade de Cambridge, Cambridge, 1983.

DE CASTRO, B. J. C., LACERDA, C. R., MELO, B. R., SARTIM, R., AGUIAR, M. L.; Performance assessment of a bench scale hybrid filter in the collection of nanoparticles. **Process Safety and Environmental Protection**, 154, 32–42, 2021. doi-10.1016/j.psep.2021.07.042

DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018. Disponível em - <https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/d01-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603> Acessado em - 03 de novembro de 2023.

DIXON, Disponível em: <<https://www.dixonvalve.com/sites/default/files/product/files/brochures;literature/dielectric-constant-values.pdf>> Acessado em: 09/10/2023.

DUARTE, F. O. B.; MARRA, J. W. D.; KACHAN, G.C.; COURY, J.R. Filtration of electrified solid particles. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, 39,10, 3884–3895, 2000.

ENVIRONMENT AGENCY, Processes Subject to Integrated Pollution Control- Iron and Steel Making Process. **The Stationery Office**. Londres, v.1, p. 10-18, 1999,

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA); EPA Air Pollution Control Cost Manual. **U.S. Environmental Protection Agency**, 6 ed., v.1, Estados Unidos, 2002.

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

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

FAUSTINO, P. B. **Determinação experimental da força de adesão entre partículas e meios filtrantes constituídos de celulose**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 2010.

FENG, Z.; CAO, S.-J.; LONG, Z. Determining V-I characteristics of an energy-efficient electrostatic assisted air filtration system by utilizing the back-corona induced current model. **Energy and Built Environment**, v. 4, n. 2, p. 227–235, 2023.

FERNANDES, M. C. S.; PAULIN FILHO, P. I.; MORELLI, M. R.. Análise da superfície de grês porcelanato por microscopia de força atômica. **Cerâmica**, v. 57, n. 342, p. 173–179, abr. 2011.

HEUMANN, W. L. Industrial air pollution control systems. **McGraw-Hill Companies**. Estados Unidos, 1997.

HINDS, W. C. **Aerosol Technology- Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles**. New York- John Wiley & Sons, Inc., 1982.

HOSANSKY, D. "electrostatic precipitator". **Encyclopedia Britannica**, 2021. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/electrostatic-precipitator>>. Acessado em; 8 de março de 2024.

INFOMONEY, Disponível em:
<<https://www.infomoney.com.br/mercados/xangai-cerca-areas-afetadas>>

[pela-covid-e-gera-protestos: bolsas: e-commodities: despencam/](#)>. Acesso em: 09 de outubro de 2023.

JANG, H.-N., BACK, S.-K., SUNG, J.-H., KANG, Y.-S., JURNG, J., & SEO, Y.-C. The simultaneous capture of mercury and fine particles by hybrid filter with powder activated carbon injection. **Environmental Pollution**, 237, 531–540, 2018. doi:10.1016/j.envpol.2018.02.080

JAWOREK, A.; MARCHEWICZ, A.; SOBCZYK, A. T. ; KRUPA, A.; CZECH, T.; Two-stage electrostatic Precipitators for the reduction of PM_{2.5} particle emission. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 67, p. 206-233, 2018.

JAWOREK, A., SOBCZYK, A., KRUPA, A., MARCHEWICZ, A., CZECH, T., & ŚLIWIŃSKI, L. Hybrid electrostatic filtration systems for fly ash particles emission control. A review. **Separation and Purification Technology**. v. 213, p. 283–3, 2019.

LIANG, W. et al. Long-term exposure to ambient particulate matter is associated with prognosis in people living with HIV/AIDS: Evidence from a longitudinal study. **Science of The Total Environment**, v. 928, p. 172453, 2024.

LOGCOMEX, Dia Nacional do Aço- como estão a exportação e a importação de aço no Brasil?. Disponível em: <<https://blog.logcomex.com/importacao-de-aco/>> . Acessado em: 04/11/2023

MACYNTIRE, A. J., Ventilação industrial e controle da poluição. **Editores Guanabara**, Rio de Janeiro, 1988.

MADSEN, F. B., YU, L., & SKOV, A. L. Self-Healing, High-Permittivity Silicone Dielectric Elastomer. **ACS Macro Letters**, 5(11), 1196–1200, 2016. doi-10.1021/acsmacrolett.6b00662

MATA, G. C. ; MORAIS, M. S.; OLIVEIRA, W. P.; AGUIAR, M. L.; Sustainable surgical masks: optimizing fine/ultrafine particle filtration using PVA/chitosan electrospun nanofibers. **Environmental Science- Nano**. 10, 2185-2200, 2023.

MARTÍNEZ, H. J. F., & KATZ, H. E. Through Thick and Thin- Tuning the Threshold Voltage in Organic Field-Effect Transistors. **Accounts of Chemical Research**, 47(4), 1369–1377, 2014. doi-10.1021/ar5000049

MORRIS, K.; ALLEN, R. W. K. Gas cleaning in demanding applications. 1st ed. London-**Blackie Academic & Professional**, 1997.

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.

NATIONAL GEOGRAPHIC, Smog. Disponível em: <<https://education.nationalgeographic.org/resource/smog/>>. Acesso em: 09/10/2023.

NETO, C. M. S.; CARNEIRO, V. A.; SILVA, F. S.; PEREIRA, L. S.; GONÇALVES, B. B. Emissões Atmosféricas Por Chaminés Industriais Nas Mesorregiões Leste, Centro E Sul Do Estado De Goiás (Brasil). **Revista Mirante**, v. 8, n. 1, 2015.

NEVERS, N. Air pollution control engineering. **McGraw-Hill**, 1995.

Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS), Novos dados da OMS revelam que bilhões de pessoas ainda respiram ar insalubre - OPAS/OMS. Disponível em: <<https://www.paho.org/pt/noticias/4-4-2022-novos-dados-da-oms-revelam-que-bilhoes-pessoas-ainda-respiram-ar-insalubre>>. Acesso em: 3 ago. 2024.

OLIVEIRA DA SILVA, F. M. et al. Use of hybrid filters to optimize the process of the filtration in cement particles. **Heliyon**, v. 9, n. 11, p. e21808, 1 nov. 2023.

Organização Mundial da Saúde (OMS). **Estatísticas mundiais de saúde 2018-Monitoramento da saúde para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**. Genebra, Suíça, 2018.

PARKER, K.R.; Applied Electrostatic Precipitation. **Springer Dordrecht**, Reino Unido, 1 ed., 1997.

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, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.10.098>.

PETEAN, P. G. C.; AGUIAR, M. L. Determining the adhesion force between particles and rough surfaces. **Powder Technology**, v. 274, p. 67–76, 1 abr. 2015.

POPA, G.N.; DINIŞ, C.M.; IAGĂR, A. Investigations on Three-Section Plate-Type Electrostatic Precipitators Used in Thermoelectric Power Plants. **Energies**, 16, 1186, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16031186>

QI, C. et al. Effect of charged spray evaporation of desulfurization wastewater on fine particle removal efficiency of electrostatic precipitator. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 179, p. 99–107, 2023.

RIVERGLENPTS, Princípio de funcionamento do precipitador eletrostático. Disponível em: <<https://riverglennpts.com/pt/electrostatic-precipitator/383-working-principle-of-electrostatic-precipitator.html>> Acesso em: 21/10/2023.

SILVA, C.R.N.; NEGRINI, V.S.; AGUIAR, M.L.; COURY, J.R.; Influence of gas velocity on cake formation and detachment. **Powder Technology**, v. 101, p. 165-172, 1999.

SONG, Y., ZHANG, Y., ZHU, W., LIU, Y., LONG, W., & VAFAI, K. Study on the influence of electrodes on the collection efficiency during the treatment of welding fume in electrostatic precipitators. **Journal of Electrostatics**, 123, 103808, 2023.

TIAN, E., GAO, Y., & MO, J. Experimental studies on electrostatic-force strengthened particulate matter filtration for built environments: Progress and perspectives. **Building and Environment**, 228, 109782. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109782>, 2023.

TIAN, E.; MO, J.; LONG, Z.; LUO, H.; ZHANG, Y. Experimental study of a compact electrostatically assisted air coarse filter for efficient particle removal- Synergistic particle charging and filter polarizing. **Building and Environment**, v. 135, n. February, p. 153–161, 2018.

ULUSOY, U. Application of ANOVA to image analysis results of talc particles produced by different milling. **Powder Technology**, v. 188, n. 2, p. 133–138, 2008.

WANG, L. K.; PEREIRA, N. C.; HUNG, Y.-T. Air Pollution Control Engineering. 1. ed. Estados Unidos: **Springer Science & Business Media**, v. 1, 2004.

WANG, X., ZHANG, L., & CHEN, D. Circularity of particles: A new method for characterization. **Nanotechnology**, 29(40), 405701, 2018.

WEG, Filtro de Mangas. Disponível em: <https://www.weg.net/institutional/PT/pt_PT/solutions/energy-efficiency/industrial-applications/bag-houses> Acessado em: 01 de fevereiro de 2024.

WU, S., WANG, L., ZHAO, L., ZHANG, P., EL-SHALL, H., MOUDGIL, B., HUANG, X., ZHANG, L. Recovery of rare earth elements from phosphate rock by hydrometallurgical processes – A critical review. **Chemical Engineering Journal**, 335, 774–800. doi-10.1016/j.cej.2017.10.143

XIE, H., WU, Q., LIU, Y., XIE, Y., GAO, M., & LI, C. Direct measurement and theoretical prediction model of interparticle adhesion force between irregular planetary regolith particles. **International Journal of Mining Science and Technology**, 33(11), 1425–1436, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2023.10.002

ZHANG, X., Emission standards and control of PM_{2.5} from coal-fired power plants. **IEA Clean Coal Centre**, 2016.

ZHANG, G., LING, S., LIAO, Z., XIAO, C., & WU, X.. Mechanism and influence on red-bed soft rock disintegration durability of particle roughness based on experiment and fractal theory. **Construction and Building Materials**, 419(135504), 135504, 2024. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135504

ZHOU, G.; LOW, Ze-X.; FENG, S.; ZHANG, F.; ZHONG, Z.; XING, W. Effect of relative humidity and dust moisture content on filtration performance of bag filter. **Separation And Purification Technology**, v. 308, p. 122952. 2023. http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122952.