

**Bruna Râmela de Melo**

***Precoating: uma alternativa mais econômica para melhorar a performance dos meios filtrantes em filtros de mangas da indústria siderúrgica***

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos

Orientadora: Mônica Lopes de Aguiar

São Carlos, 2021



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

*PRECOATING*: UMA ALTERNATIVA MAIS ECONÔMICA PARA  
MELHORAR A PERFORMANCE DOS MEIOS FILTRANTES EM FILTROS  
DE MANGAS DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

Bruna Râmela de Melo

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

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

**São Carlos/SP**  
**2021**



**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 Bruna Râmela de Melo, realizada em 16/04/2021.

**Comissão Julgadora:**

Profa. Dra. Mônica Lopes Aguiar (UFSCar)

Profa. Dra. Vádila Giovana Guerra Béttega (UFSCar)

Prof. Dr. Rafael Sartim (UFES)

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

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

*“O correr da vida embrulha tudo.  
A vida é assim: esquenta e esfria,  
aperta e daí afrouxa,  
sossega e depois desinquieta.  
O que ela quer da gente é coragem.”*

*Guimarães Rosa*

## AGRADECIMENTOS

A vida é uma dádiva que eu agradeço muito a Deus, Ele quem guia meus caminhos e me dá forças para vencer os obstáculos.

Agradeço à minha mãe, meu pai e meu irmão, que estão sempre ao meu lado, me dando todo o suporte necessário e muito amor. E também à toda minha família que está sempre torcendo por mim.

Ao Levi pelo companheirismo, sugestões, críticas, pelo cuidado diário e por se fazer sempre presente.

À Mônica pela orientação, sugestões, compreensão e conselhos. Obrigada pelos ensinamentos tanto profissionalmente, quanto pessoalmente.

À Luana pelas conversas, danças, conselhos, almoços na UFSCar e amizade. À Katy, Camila e Nati pelo carinho e por se tornarem minha família em São Carlos. Ao Felipe, que já vem me acompanhando há alguns anos e o carinho só cresce cada vez mais. À Isa pela presença constante e torcida, mesmo estando distante.

À todos amigos, os que a vida colocou em meu caminho durante a jornada, aos que entraram comigo no mestrado na turma de 2019 e à salinha do controle ambiental. Obrigada por todo suporte, conversas e compartilhamento de experiências. “Aqueles que passam por nós, não vão sós, não nos deixam sós. Deixam um pouco de si, levam um pouco de nós.” (Antoine de Saint-Exupéry).

Aos técnicos Marcos e Samuel que sempre foram solícitos em todas as dificuldades encontradas.

À Vádila e ao Sartim pela avaliação e sugestões que ajudaram a enriquecer o trabalho realizado. Agradeço também ao Sartim e à Arcellor pela obtenção do pó de aciaria.

Ao Henrique e à Larissa, que deram o suporte no fornecimento dos meios filtrantes pela empresa, e à empresa que gentilmente forneceu estes materiais.

Ao departamento de Eng. Química, pela oportunidade da realização do mestrado e aos professores por todo conhecimento adquirido.

À UFSCar e ao laboratório de controle ambiental pela estrutura, ao laboratório de termodinâmica pelo uso do malvern e ao CNPQ pelo auxílio financeiro.

## RESUMO

A emissão de material particulado na atmosfera é preocupante devido aos seus impactos ambientais e à saúde humana. Dentre os equipamentos utilizados no controle de material particulados destaca-se o filtro de mangas, com eficiência na coleta de até 99,9%. Há diversos meios filtrantes no mercado e sua escolha é um desafio. A maioria, quando novos, possuem baixa eficiência de coleta, sendo necessário a realização de tratamentos superficiais para obtenção de uma melhor performance. No entanto, esse tratamento superficial aumenta a queda de pressão e o custo do filtro. Dessa forma, investigar técnicas com menor custo, como o *precoating*, apresenta-se como uma alternativa promissora para diminuir os gastos operacionais dos filtros de mangas. Esta técnica consiste no revestimento do tecido com material particulado para dar início à filtração de superfície. Para seu uso eficiente é necessário conhecer a massa ideal de material de *precoat* e quais características garantem a alta eficiência de filtração. Diante disso, o presente trabalho avaliou a performance de diferentes pós de *precoating* em filtros de mangas na filtração do pó de aciaria. Para esta investigação foram avaliados dois pós de *precoat* (calcário e terra de diatomáceas) e foram depositadas diferentes massas dos materiais sobre os meios filtrantes (PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic), as quais foram avaliadas quanto à eficiência de coleta de micro e nanopartículas, porosidade do *precoating* e massa retida após o pulso de limpeza. Os resultados foram comparados com um filtro revestido com membrana de PTFE (PE/PTFE). Foram realizadas as caracterizações dos materiais particulados (distribuição granulométrica, densidade, formato e circularidade) e dos meios filtrantes (porosidade, diâmetro médio das fibras, permeabilidade e espessura) para compreender as características que impactam na performance do revestimento. Também foi avaliado o primeiro ciclo de filtração para meios filtrantes com e sem a presença do *precoating*. PE/PTFE apresentou eficiência de coleta superior à 94% para micro e para nanopartículas. Os demais filtros chegaram a apresentar valores de até 60% para eficiência de coleta de micropartículas e valores de até 20% para nanopartículas. Com a adição do *precoating*, houve um aumento destes valores, que variou de acordo com a massa de revestimento depositada sobre os filtros, que apresentaram desde eficiências a partir de 80% para micropartículas, até resultados superiores ao encontrado para PE/PTFE para ambos pós de *precoat*. Para nanopartículas foram obtidos resultados de eficiência com *precoat* a partir de 45%, porém apenas com a terra de diatomáceas foi possível obter valor superior ao filtro com membrana. A terra de diatomáceas, devido ao seu menor diâmetro volumétrico comparado ao calcário, preencheu mais rapidamente os poros do tecido, acarretando em um aumento mais rápido na queda de pressão, um revestimento mais compacto, com porosidade 2x maior que a obtida para o calcário e um melhor desempenho na eficiência de coleta. Quanto aos resultados de massa retida de revestimento após o pulso de limpeza, foram obtidos valores inferiores à 10% de massa retida para o calcário, e inferior à 40% para a terra de diatomáceas. O *precoating*, no primeiro ciclo de filtração, não impactou no tempo do ciclo, mas aumentou a massa retida e a queda de pressão residual. No entanto, estes valores foram inferiores àqueles obtidos por PE/PTFE. Dessa forma, o *precoating*, por apresentar boa performance na eficiência de coleta em filtros de menor custo, comparado ao PE/PTFE, é uma boa alternativa para diminuir os gastos em filtros de mangas.

Palavras-chave: *Precoating*; Filtro de mangas; Eficiência de Coleta; Filtração de gases.

## ABSTRACT

The emission of particulate matter into the atmosphere is a concern because of its environmental and human health impacts. Among the equipment used in the control of particulate material, the bag filter stands out, with a collection efficiency of up to 99.9%. There are several filter media on the market and choosing them is a challenge. Most of them, when new, have low collection efficiency, so it is necessary to carry out surface treatments to obtain a better performance. However, this surface treatment increases the pressure drop and the cost of the filter. Thus, investigating techniques with lower cost, such as precoating, presents a promising alternative to reduce the operational costs of bag filters. This technique consists of coating the fabric with a particulate material to initiate surface filtration. For its efficient use, it is necessary to know the ideal mass of precoat material and which characteristics guarantee a high filtration efficiency. Therefore, the present work evaluated the performance of different precoating powders in bag filters in the filtration of steelworks powder. For this investigation, two precoat powders (limestone and diatomaceous earth) were evaluated and different masses of materials were deposited on the filter media (PE, PE/PTFE Resin, and PE/Epitropic), which were evaluated for the collection efficiency of micro and nanoparticles, porosity of precoating and mass retained after the cleaning pulse. The results were compared with a filter coated with a PTFE membrane (PE/PTFE). The characterizations of particulate materials (particle size distribution, density, shape, and circularity) and filter media (porosity, average fiber diameter, permeability, and thickness) were carried out to understand the characteristics that impact the performance of the coating. The first filtration cycle for filter media with and without precoating was also evaluated. PEa part/PTFE showed collection efficiency above 94% for micro and nanoparticles. The other filters even showed values above 60% for microparticles collection efficiency and values above 20% for nanoparticles. By the addition of precoating, there was an increase in these values, which varied according to the coating mass deposited on the filters, with efficiencies from 80% for microparticles, to results higher than that found for PE/PTFE for both precoat powders. For nanoparticles, efficiency results were obtained with precoat from 45%, but only with diatomaceous earth, it was possible to obtain a higher value than the membrane filter. Diatomaceous earth, due to its smaller volumetric diameter compared to limestone, filled the pores of the fabric more quickly, resulting in a faster increase in pressure drop, a more compact coating, with a porosity 2x greater than that obtained for limestone and better performance in collection efficiency. About the results of retained coating mass after the cleaning pulse, values obtained for limestone were below 10% and were below 40% for diatomaceous earth. Precoating, in the first filtration cycle, did not impact the cycle time but increased the retained mass and the residual pressure drop. However, these values were lower than those obtained by PE/PTFE. In this way, precoating, for presenting a good performance in the collection efficiency in filters of lower cost, compared to PE/PTFE, is a good alternative to reduce spending on bag filters.

Keywords: Precoating; Bag filter; Collection Efficiency; Gas filtration.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Filtro de mangas: a) representação esquemática do equipamento e b) captura de material particulado pelo meio filtrante.....	20
Figura 2. Formação de dendritos por nanopartículas em filtro de poliéster .....	22
Figura 3. Etapas da filtração .....	22
Figura 4. Ciclos de filtração .....	23
Figura 5. Efeito de patchy cleaning observado em um filtro.....	23
Figura 6. Sistema de limpeza por jato de ar pulsante .....	25
Figura 7. Penetração de material particulado pelas vias aéreas.....	28
Figura 8. Distribuição granulométrica de partículas: a) distribuição fracionária e b) distribuição acumulativa.....	29
Figura 9. Mecanismos de coleta de partículas pelo meio filtrante .....	31
Figura 10. Eficiência dos mecanismos de captura em função do diâmetro das partículas.....	33
Figura 11. Estrutura de meios filtrantes: a) tecido e b) não tecido .....	38
Figura 12. Revestimentos: a) membrana de PTFE e b) nanofibras.....	41
Figura 13. Filtração com e sem precoat.....	42
Figura 14. Efeito do pulso de limpeza sobre a camada de precoating.....	43
Figura 15. Artigos relacionados ao precoating na filtração ente 1975 e 2020 .....	46
Figura 16. Amostras dos materiais particulados: a) terra de diatomáceas, b) calcário e c) pó de aciaria.....	49
Figura 17. Imagens dos materiais particulados obtidas em MEV: a) e b) terra de diatomáceas, c) e d) calcário, e) à h) pó de Aciaria.....	50
Figura 18. Alga diatomácea: a) observada em MEV e b) representação esquemática.....	51
Figura 19. MEV/EDS dos diferentes formatos de partículas observadas para o pó de aciaria: a) e d) imagens em SE, b) e e) mapeamento químico de Ferro, c) e f) mapeamento química de Cálcio.....	51
Figura 20. Distribuição granulométrica volumétrica do material particulado: a) calcário, b) terra de diatomáceas e c) pó de aciaria .....	54
Figura 21. Amostras dos meios filtrantes: a) PE, b) PE/PTFE, c) PE/Resina PTFE e d) PE/Epitropic .....	55
Figura 22. Imagens superficiais dos meios filtrantes obtidas em MEV: a) e b) PE, c) e d) PE/PTFE, e) e f) PE/Resina de PTFE, g) e h) PE/Epitropic.....	56
Figura 23. Caracterizações: a) determinação do diâmetro médio das fibras e b) espessura do meio filtrante.....	57
Figura 24. Unidade experimental utilizada para determinação da constante de permeabilidade do meio filtrante .....	58
Figura 25. Distribuição de fibras dos meios filtrantes: a) PE, b) PE/PTFE, c) PE/Resina PTFE e d) PE/Epitropic .....	60
Figura 26. Linha de filtração 1: eficiência de coleta fracionária para nanopartículas.....	62
Figura 27. Sonda de amostragem inserida no suporte do meio filtrante .....	63
Figura 28. Linha de filtração 2: eficiência de coleta fracionária para micropartículas .....	63
Figura 29. Linha de filtração 3: simulação de filtro de mangas em escala laboratorial .....	65
Figura 30. Desenho esquemático do alimentador e dispersor do alimentador de pó .....	65

Figura 31. Determinação do ponto de colmatação .....	69
Figura 32. Preparação de amostras para MEV: a) etapa de prefixação e b) etapa de fixação..	72
Figura 33. Eficiência de coleta fracionária de nanopartículas para os meios filtrantes virgens: PE/PTFE, PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic .....	74
Figura 34. Eficiência de coleta fracionária de micropartículas para os meios filtrantes virgens ( $\Delta P_0$ ) e ao longo do aumento da queda de pressão: a) PE, b) PE/PTFE, c) PE/Resina PTFE e d) PE/Epitropic .....	76
Figura 35. Ampliação do aumento da eficiência de coleta com o aumento da queda de pressão para PE.....	78
Figura 36. Penetração de partículas dos pós de precoat nos meios filtrantes comparadas à penetração do pó de aciaria .....	78
Figura 37. Curvas de massa/área ao longo do aumento da queda de pressão para obtenção do ponto de colmatação nos meios filtrantes: a) calcário e b) pó de aciaria .....	80
Figura 38. Porosidade indireta obtida para diferentes quantidades de precoat depositado sobre os meios filtrantes: PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic.....	85
Figura 39. Imagens obtidas no MEV para os precoats, com massas equivalentes ao ponto de colmatação ( $C_0$ ) depositado sobre os meios filtrantes: a) calcário sobre PE, b) calcário sobre PE/Epitropic, c) terra de diatomáceas sobre PE, d) terra de diatomáceas sobre PE/Resina PTFE e e) terra de diatomáceas sobre PE/Epitropic. ....	86
Figura 40. Porcentagem de massa de precoat retida nos meios filtrantes após o pulso de limpeza .....	87
Figura 41. Terra de diatomáceas sobre a superfície do filtro PE após um pulso de limpeza: a) superfície e b) lateral .....	88
Figura 42. Eficiência fracionária de coleta dos filtros após diferentes massas de precoat de calcário sobre o meio filtrante: Coleta de micropartículas: (a) PE, (c) PE/Resina PTFE e (e) PE/Epitropic; coleta de nanopartículas: (b) PE, (d) PE/Resina PTFE e (f) PE/Epitropic .....	89
Figura 43. Eficiência fracionário de coleta dos filtros após diferentes massas de precoat de terra de diatomáceas sobre o meio filtrante: Coleta de micropartículas: (a) PE, (c) PE/Resina PTFE e (e) PE/Epitropic; coleta de nanopartículas: (b) PE, (d) PE/Resina PTFE e (f) PE/Epitropic	91
Figura 44. Ciclo de filtração realizado com o pó de aciaria nos meios filtrantes com e sem a presença de precoat: a) PE, b) PE/Resina PTFE e c) PE/Epitropic.....	94
Figura 45. Massa retida e diferença entre a queda pressão residual e a queda de pressão inicial para o primeiro ciclo dos meios filtrantes com precoat, de calcário e terra de diatomáceas, e sem precoat .....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades do material particulado .....	30
Tabela 2. Características de materiais de fibras para meios filtrantes.....	39
Tabela 3. Correlações dos procedimentos experimentais realizados com os objetivos específicos .....	48
Tabela 4. Composição química (% em massa) dos pós de precoating: terra de diatomáceas e calcário.....	52
Tabela 5. Composição química (% em massa) do pó de aciaria .....	52
Tabela 6. Caracterização dos materiais particulados.....	53
Tabela 7. Especificações dos meios filtrantes fornecidas pelo fabricante.....	55
Tabela 8. Caracterizações dos meios filtrantes.....	59
Tabela 9. Parâmetros utilizados na linha de filtração 3 .....	66
Tabela 10. Ponto de colmatção dos meios filtrantes e suas respectivas queda de pressão inicial .....	81
Tabela 11. Dados da deposição dos precoat de calcário e terra de diatomáceas sobre o meio filtrante PE.....	83
Tabela 12. Dados da deposição dos precoat de calcário e terra de diatomáceas sobre o meio filtrante PE/Resina PTFE .....	83
Tabela 13. Dados da deposição dos precoat de calcário e terra de diatomáceas sobre o meio filtrante PE/Epitropic .....	83
Tabela 14. Massa de precoating retida sobre o meio filtrante após o pulso de limpeza.....	87

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_f$	Área útil de filtração	$[L^2]$
$A_p$	Área da partícula	$[L^2]$
$C_c$	Fator de correção de Cunningham	[-]
$C_i$	Concentração de partículas antes do meio filtrante	$[ML^{-3}]$
$C_f$	Concentração de partículas após o meio filtrante	$[ML^{-3}]$
$c_{FD}$	Concentração média de massa de material particulado no fluido	$[ML^{-3}]$
$C_{pó}$	Concentração de pó no filtro	$[ML^{-3}]$
$D$	Coefficiente difusivo da partícula	$[L^2t^{-1}]$
$d_a$	Diâmetro aerodinâmico	$[L]$
$\bar{d}_f$	Diâmetro médio das fibras	$[L]$
$d_g$	Diâmetro médio geométrico	$[L]$
$d_p$	Diâmetro da partícula	$[L]$
$d_{st}$	Diâmetro de Stokes	$[L]$
$d_{sv}$	Diâmetro de superfície-volume	$[L]$
$E_D$	Eficiência de coleta para o mecanismo de difusão	[-]
$E_G$	Eficiência de coleta para o mecanismo gravitacional	[-]
$E_I$	Eficiência de coleta para o mecanismo de impactação inercial	[-]
$E_R$	Eficiência de coleta para o mecanismo de interceptação direta	[-]
$E_q$	Eficiência de coleta para o mecanismo de atração eletrostática	[-]
FR	Fator de circularidade	[-]
$g$	Gravidade	$[L^2t^{-1}]$
$k$	Fator de forma da partícula	[-]
$k_1$	Coefficiente de permeabilidade viscosa	$[L^2]$
$k_2$	Coefficiente de permeabilidade inercial	$[L]$
$ku$	Fator hidrodinâmico de Kuwabara	[-]
$L$	Espessura do meio filtrante	$[L]$
$M$	Massa molar do fluido	$[Mmol^{-1}]$
$Ma$	Massa por unidade de área	$[ML^{-2}]$
$M_B$	Massa de pó que atravessou o filtro durante a filtração	$[M]$
$M_C$	Massa de pó coletada no filtro	$[M]$
$m_c$	Massa de pó depositada no filtro pelo tempo de filtração	$[Mt^{-1}]$
$M_{fp}$	Massa de precoat injetada sobre o meio filtrante	$[M]$
$MF_i$	Massa do meio filtrante antes da filtração	$[M]$
$MF_f$	Massa do meio filtrante após a filtração	$[M]$
$MF_p$	Massa do meio filtrante após o pulso de limpeza	$[M]$
$P$	Pressão atmosférica	$[ML^{-1}t^{-2}]$
$Pe$	Número de Péclet	[-]
PE	Eficiência do <i>precoating</i>	[-]
$P_e$	Penetração de partículas pelo meio filtrante	[-]
$P_p$	Perímetro da partícula	$[L]$
$Q$	Vazão volumétrica	$[L^3t]$

R	Constante universal dos gases ideais	$[ML^2T^{-1}t^{-2}mol^{-1}]$
Ra	Razão entre o raio da partícula e o raio da fibra	[L]
Re <sub>f</sub>	Número de Reynolds para as fibras	[-]
r <sub>f</sub>	Raio da fibra do meio filtrante	[L]
r <sub>p</sub>	Raio da partícula	[L]
Stk	Número de Stokes	[-]
T	Temperatura do fluido	[T]
t <sub>f</sub>	Tempo de filtração	[t]
V <sub>s</sub>	Velocidade superficial de filtração	$[Lt^{-1}]$
V <sub>TS</sub>	Velocidade de sedimentação da partícula	$[Lt^{-1}]$
ΔP	Queda de pressão no meio filtrante	$[ML^{-1}t^{-2}]$
ΔP <sub>0</sub>	Queda de pressão inicial	$[ML^{-1}t^{-2}]$
ΔP <sub>r</sub>	Queda de pressão residual	$[ML^{-1}t^{-2}]$
α	Densidade de empacotamento/Solidez	[-]
ε	Porosidade	[-]
ρ <sub>g</sub>	Densidade do gás	$[ML^{-3}]$
ρ <sub>p</sub>	Densidade do material particulado	$[ML^{-3}]$
μ	Viscosidade do gás	$[ML^{-1}t^{-1}]$
η <sub>c</sub>	Eficiência de coleta	[-]
η <sub>L</sub>	Eficiência de limpeza	[-]
σ <sub>g</sub>	Desvio padrão geométrico das partículas	[-]

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	15
2. OBJETIVOS .....	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	18
3.1. Equipamentos para controle de emissão de material particulado.....	18
3.2. Filtros de mangas.....	19
3.2.1. Visão geral .....	19
3.2.2. Etapas da filtração .....	21
3.2.3. Ciclos de filtração .....	22
3.2.4. Mecanismos de limpeza .....	24
3.2.5. Velocidade de filtração .....	26
3.2.6. Umidade e temperatura .....	27
3.3. Material particulado .....	27
3.3.1. Contexto socioambiental.....	27
3.3.2. Características do material particulado .....	29
3.3.3. Mecanismos de coleta .....	30
3.3.4. Forças de adesão e coesão.....	33
3.4. Meios filtrantes.....	35
3.4.1. Características .....	35
3.4.2. Porosidade .....	35
3.4.3. Permeabilidade.....	36
3.4.4. Eficiência de coleta .....	37
3.4.5. Estrutura dos Filtros .....	38
3.4.6. Características das Fibras.....	38
3.4.7. Acabamentos .....	40
3.5. <i>Precoating</i> .....	41
3.5.1. Fundamento.....	41
3.5.2. Características e formas de aplicação .....	44
3.5.3. Eficiência do <i>precoating</i> .....	45
3.5.4. Estado da arte .....	45
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
4.1. Materiais .....	48
4.1.1. Caracterizações dos materiais particulados .....	48
4.1.2. Caracterizações dos meios filtrantes.....	54
4.2. Equipamentos.....	61

4.2.1. Linha de filtração 1 .....	61
4.2.2. Linha de filtração 2 .....	63
4.2.3. Linha de filtração 3 .....	64
4.3. Procedimentos experimentais .....	67
4.3.1. Eficiência de coleta fracionária.....	67
4.3.2. Ensaio de penetração.....	68
4.3.3. Ponto de colmatação para o pó de <i>precoating</i> .....	68
4.3.4. Deposição do <i>precoating</i> sobre os meios filtrantes .....	69
4.3.5. Porosidade do <i>precoating</i> .....	70
4.3.6. Imagens do <i>precoating</i> em MEV.....	72
4.3.7. Primeiro ciclo de filtração .....	73
5. RESULTADOS .....	74
5.1. Eficiência de coleta fracionária.....	74
5.1.1. Eficiência de coleta para nanopartículas.....	74
5.1.2. Eficiência de coleta para micropartículas .....	75
5.2. Ensaio de penetração de material particulado pelo meio filtrante .....	78
5.3. Ponto de colmatação .....	79
5.4. <i>Precoating</i> .....	82
5.4.1. Deposição do <i>precoat</i> sobre os meios filtrantes .....	82
5.4.2. Avaliação da massa retida de <i>precoat</i> após o pulso de limpeza.....	86
5.4.3. Eficiência de coleta do <i>precoating</i> .....	88
5.5. Primeiro ciclo de filtração.....	93
6. CONCLUSÕES .....	97
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	99
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	100

## 1. INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica cresce continuamente devido ao aumento do setor produtivo e do padrão de vida da sociedade. Acompanhado a esse crescimento aumenta-se a preocupação ambiental, a social, devido às doenças correlacionadas à poluição do ar, e a necessidade de normas legislativas para seu controle.

Em 2016, cerca de 4,2 milhões de pessoas foram a óbito devido à poluição do ar ambiente, tanto em cidades quando em áreas rurais, uma vez que 91% da população viviam em locais que excediam em pelo menos 2,5 vezes os níveis de qualidade do ar definidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS) (WHO, 2018). No Brasil não é diferente, o ministério da saúde registrou entre 2006 e 2016 um aumento de 14% nas mortes causadas pela poluição do ar e em 2018 houve um gasto de R\$ 1,3 bilhões com internações por problemas respiratórios (MENDES, 2019). Além disso, estudos recentes indicaram que a poluição do ar é um fator adicional na letalidade do COVID-19, responsável pela pandemia de 2020 (CONTICINI; FREDIANI; CARO, 2020; ZHU et al., 2020).

Dentro dessa realidade destaca-se o material particulado, cuja exposição, segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), pode provocar ataques cardíacos, asma agravada, diminuição da função pulmonar e irritação nas vias aéreas. Além disso, partículas menores que 1  $\mu\text{m}$  podem chegar ao cérebro e causar inflamação neural e propensão à doenças degenerativas (TELEANU et al., 2018; CALDERÓN-GARCIDUEÑAS et al., 2019). Dessa forma, as normas legislativas para emissão de material particulado estão cada vez restritivas. No Brasil, o CONAMA em 2018 lançou novos limites para os padrões de qualidade do ar, diferenciando as emissões de particulados por diâmetros e estabelecendo fases progressivas de limites com o intuito de alcançar a média anual desejável pela OMS, que é de 10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  para  $\text{PM}_{2,5}$  e de 20  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  para  $\text{PM}_{10}$  (WHO, 2016).

Apesar desta legislação ainda não se aplicar às indústrias, as discussões sobre saúde e meio ambiente ganham cada vez mais visibilidade nos dias atuais (ONU, 2015). Sendo a indústria uma fonte emissora de material particulado, a busca por equipamentos com alta eficiência para o controle de emissão de particulados abaixo de 1,0  $\mu\text{m}$  torna-se necessária. Um dos equipamentos mais utilizados para fazer esse controle é o filtro de mangas, pois ele pode operar com ampla variedade de tipos de poeiras, apresenta pouca sensibilidade às possíveis flutuações de vazão e possui alta eficiência de coleta, para uma grande faixa granulométrica, podendo alcançar valores de 99,9% dependendo do meio filtrante utilizado (HINDS, 1982;

PEREIRA et al., 2016). Existem diversos tipos de meios filtrantes e saber escolher qual deles é o mais adequado para uma determinada operação ainda é um grande desafio.

Entre os possíveis meios filtrantes existentes no mercado destacam-se aqueles revestidos por uma fina camada de membrana polimérica (PTFE), a qual garante alta eficiência de coleta durante todo o processo de filtração, inclusive para partículas nanométricas, e aumenta a vida útil das mangas, reduzindo os custos de manutenção e operação (HINDS, 1982; BARNETT, 2000; MEIOFILTRANTE, 2013). Contudo, eles são caros e possuem alta queda de pressão. Meios filtrantes que não possuem a membrana em sua superfície, normalmente apresentam menor custo e menor eficiência de coleta para partículas ultrafinas, abaixo de 1  $\mu\text{m}$ , principalmente quando novos. Essa eficiência aumenta durante a coleta com a formação da torta de filtração.

Uma possível alternativa para reduzir custos garantindo altas eficiências de filtração, é o *precoating*. Esta técnica consiste na formação de uma primeira camada superficial de material particulado sobre o meio poroso, a qual acelera a formação da torta de filtração e conseqüentemente aumenta a eficiência de coleta e evita a penetração de partículas no tecido, diminuindo o desgaste do mesmo, porque facilita a remoção da torta durante a limpeza (LI; HESS; HÖFLINGER, 2003; BELCHER; TORIT, 2013; SCHILLER; SCHMID, 2015). Ele já é aplicado na indústria, porém é pouco estudado tanto na filtração de líquidos, quanto na de gases, sendo que para gases essa técnica é ainda menos investigada. Desde 1975 a 2021 foram publicados cerca de 10 artigos por ano para o *precoating* na filtração de líquidos, para um total de 466 publicações. Já para gases houve um total de 34 publicações, com uma média de 0,7 publicações por ano (SCOPUS, 2021a; SCOPUS, 2021b).

Estudos já realizados por Schiller e Schmid (2014, 2015) Schiller, Hellmich e Schmid (2016) e Andrade (2019) demonstram que o *precoating* é capaz de promover bons resultados em aplicações reais, garantindo alta eficiência a um baixo custo. No entanto, seu uso pode trazer desvantagens como a elevação da queda de pressão devido a restrição à passagem de ar pelo meio filtrante, além de que seu efeito pode ser temporário, deixando o meio filtrante novamente exposto e não trazendo bons resultados, diminuindo a vida útil das mangas (BELCHER; TORIT, 2013). Dessa forma, estudos nesse tema são importantes porque muitos questionamentos ainda não foram esclarecidos e compreender alguns fatores do *precoating* contribuirá para os processos de captura de material particulado no setor industrial, onde essa técnica já é utilizada para a redução de custos e aumento da eficiência de filtração.

## 2. OBJETIVOS

Esta dissertação tem por objetivo avaliar a performance de diferentes pós de *precoating* em diferentes materiais e obter as condições ideais para alcançar a máxima eficiência de filtração de gases em filtros de mangas, utilizando o material particulado de um sistema de despoejamento secundário da aciaria de uma indústria siderúrgica.

Os objetivos específicos são:

- i. Obter a espessura de *precoating* que garante alta eficiência na coleta de micro e nanopartículas partículas em filtros de baixo custo;
- ii. Avaliar a remoção de *precoating* após o pulso de limpeza;
- iii. Avaliar a influência do *precoating* no primeiro ciclo de filtração;
- iv. Compreender como as características físicas influenciam na relação do tipo de pó de *precoat* utilizado com o meio filtrante.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentados os equipamentos para controle de emissão de material particulado com destaque para o filtro de mangas, que é o objetivo deste projeto. Também serão abordados os parâmetros operacionais que influenciam na eficiência de um filtro de mangas, os tipos de limpeza, características do material particulado e do meio filtrante e a utilização do *precoating*.

#### 3.1. Equipamentos para controle de emissão de material particulado

Diante da necessidade de separação do material particulado das correntes gasosas, equipamentos foram desenvolvidos e aperfeiçoados ao longo do tempo. Um dos primeiros equipamentos utilizados no controle da emissão de material particulado na atmosfera foi a câmara gravitacional, sendo a força gravitacional o mecanismo de coleta predominante sobre as partículas. Este equipamento possui baixo custo de construção e operação, no entanto caiu em desuso devido a necessidade de grandes dimensões e baixa eficiência de coleta para partículas menores de que 40  $\mu\text{m}$  (LISBOA; SCHIRMER, 2007). Os equipamentos mais utilizados atualmente são: o lavador de gases, o ciclone, o precipitador eletrostático e o filtro de mangas. Estes são aplicados conforme as particularidades de cada processo e suas necessidades econômicas e ambientais.

O lavador de gases, também conhecido como absorvedor de gases, consiste na captação de partículas (absorbato) pelo contato inercial de um meio líquido (absorvente). Este é muito utilizado para coleta de material particulado úmido além de também ser utilizado para controle de gases e vapores. Entretanto, possui baixa eficiência para partículas submicrômicas e necessita de tratamento do resíduo gerado (PEUKERT; WADENPOHL, 2001; LISBOA; SCHIRMER, 2007).

O ciclone consiste na separação de partículas por meio da força centrífuga e, devido a sua eficiência ser limitada para partículas maiores que 10  $\mu\text{m}$ , ele costuma ser comumente empregado como um pré-coletor antes de um precipitador eletrostático ou de um filtro de mangas (PEUKERT; WADENPOHL, 2001). Suas vantagens são o baixo custo de construção, operação e manutenção, não ter limitação de temperatura e pressão e exigir pouco espaço para instalação. Porém ele não é indicado na utilização de partículas adesivas e há possibilidade de abrasão a longo prazo (LISBOA; SCHIRMER, 2007).

Um equipamento que pode ser operado para coletar o material particulado tanto em processos a úmido quanto a seco é o precipitador eletrostático. Seu mecanismo de coleta

consiste na força eletrostática introduzida ao material particulado através de eletrodos de descarga (PEUKERT; WADENPOHL, 2001). Ele é muito utilizado por possuir alta eficiência de coleta acima de 99,9 %, para partículas maiores que 1  $\mu\text{m}$ , baixo custo operacional e de manutenção e baixa perda de carga. Entretanto, ele possui baixa eficiência de coleta para partículas submicrômicas, porque elas são difíceis de serem coletadas devido à dificuldade destas em adquirir carga elétrica (JAWOREK et al., 2019). Ademais, ele necessita de um alto investimento inicial e de medidas de segurança para prevenção de acidentes com alta voltagem, e possuem alta sensibilidade para variações durante a operação (LISBOA; SCHIRMER, 2007).

Uma possível solução para a captura de partículas com menores diâmetros é o uso de filtros de mangas. Este equipamento consiste em um conjunto de filtros responsáveis pela separação mecânica do material particulado presente na corrente de gás. Ele possui alta eficiência de coleta, para uma ampla faixa de tamanho de material particulado, podendo chegar a valores superiores a 99,9% para partículas finas, maiores que 1  $\mu\text{m}$ , e apresenta a possibilidade de recuperação de matéria prima, sendo, portanto, o mais utilizado na indústria (MORRIS; ALLEN, 1997; ROCHA et al., 2014; PEREIRA et al., 2016). Ele também possui facilidade de operação e pouca sensibilidade às possíveis flutuações de vazões e concentrações durante o processo, abrangendo amplas faixas de aplicações.

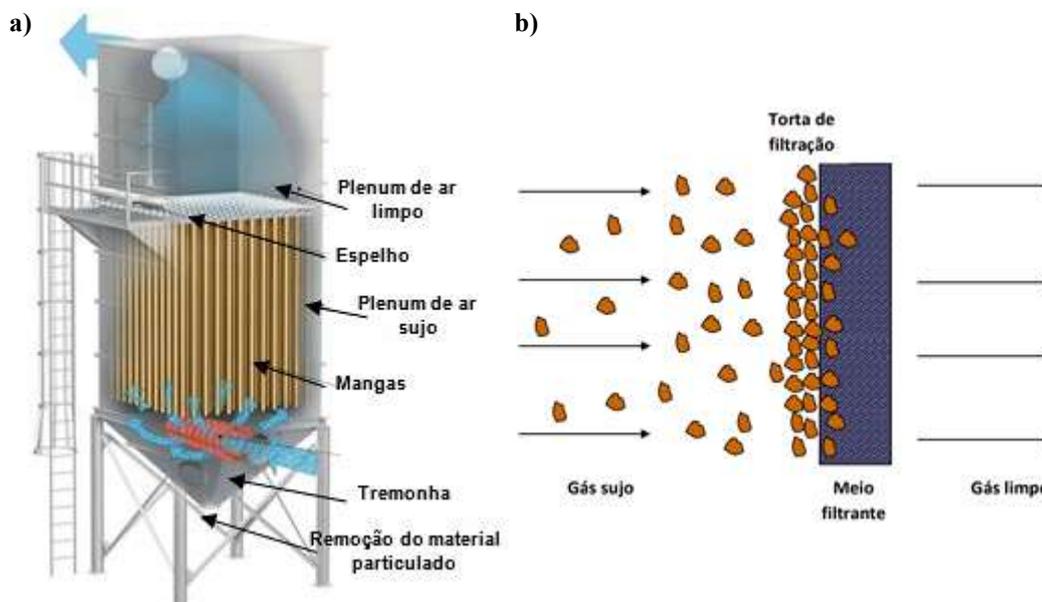
Este equipamento, porém, possui a umidade como fator limitante, operando apenas em processos de separação a seco, restrições de temperatura, alto custo de construção e manutenção e alta queda de pressão (PEUKERT; WADENPOHL, 2001; LISBOA; SCHIRMER, 2007). No entanto, há a possibilidade de utilização do *precoating*, que possibilita a obtenção de alta eficiência de coleta com meios filtrantes de menor custo e menor queda de pressão, impactando diretamente nos custos de operação e manutenção deste equipamento (SCHILLER; SCHMID, 2015; MA et al., 2016). Por ser o objetivo deste trabalho o filtro de mangas e o *precoating* serão detalhados ao longo dessa revisão.

## **3.2. Filtros de mangas**

### **3.2.1. Visão geral**

O filtro de mangas consiste em uma carcaça metálica na qual está acoplado um conjunto de filtros porosos, denominados mangas (Figura 1 (a)), os quais, ao passar a corrente de gás, capturam o material particulado, separando-os do fluido ((b)). Cada câmara possui uma ou mais tremonhas. Neste local é depositado o pó que é posteriormente removido pelo sistema de coleta em sua extremidade inferior, que pode ser, por exemplo, uma válvula rotativa ou uma rosca transportadora (LIMA, 2019).

Figura 1. Filtro de mangas: a) representação esquemática do equipamento e b) captura de material particulado pelo meio filtrante



Fonte: a) Adaptado de DEPURFILTECH (s.d.) b) Tanabe (2011)

O meio filtrante é o principal responsável pela operação do processo e funciona como um suporte, no qual as partículas começam a se depositar e formar a torta de filtração, que aumenta a eficiência de coleta, atuando como um novo filtro (DONOVAN, 1985; MORRIS; ALLEN, 1997). Ao longo da deposição de material particulado ocorre também o aumento da queda de pressão, pois a deposição das partículas aumenta a resistência ao escoamento de ar. Dessa forma, são necessárias limpezas frequentes para remoção da torta e diminuição da queda de pressão. Esta é obtida através do diferencial de pressão medido antes e após o meio filtrante e é um fator importante na operação do filtro de mangas. Geralmente ela varia de 750 a 2000 Pa e impacta diretamente nos custos de operação e manutenção (MORRIS; ALLEN, 1997).

Altas quedas de pressão não são favoráveis ao processo, pois aumentam a energia necessária para operação do sistema de ventilação, que consiste em um exaustor à jusante do processo, e é responsável pela sucção do ar contendo o material particulado. Ele é responsável por 60-80% dos custos operacionais totais, sendo que a energia utilizada no consumo de ar comprimido para o sistema de limpeza por jato de ar pulsante é de 10-15% (CHOUDHARY; MUKHOPADHYAY, 2012).

No entanto, ao mesmo tempo que a limpeza é favorável ao processo, removendo a torta e diminuindo a queda de pressão, ela também pode ocasionar o desgaste do meio filtrante. Dessa forma, a boa performance do equipamento dependerá do mecanismo de limpeza a ser utilizado, da sua eficiência e do tipo de meio filtrante. Além disso, a eficiência do processo é afetada pelo

material particulado, pois ele é responsável pela formação da torta de filtração e interage diretamente com o meio filtrante.

Os parâmetros operacionais também impactam diretamente essa técnica de controle de emissões de partículas, tais como: velocidade de filtração, temperatura e umidade do gás. Ademais há possibilidade de diferentes geometrias, que impactam no desempenho do filtro, influenciando na distribuição de gás e material particulado em seu interior. Quando há homogeneidade do escoamento, o ciclo de filtração é mais eficiente, pois mais partículas podem ser coletadas com um menor número de limpezas, ocasionando um aumento na vida útil do filtro e um menor custo de manutenção (PEREIRA et al., 2016). Todos estes fatores citados serão descritos com mais detalhes ao longo deste texto.

### **3.2.2. Etapas da filtração**

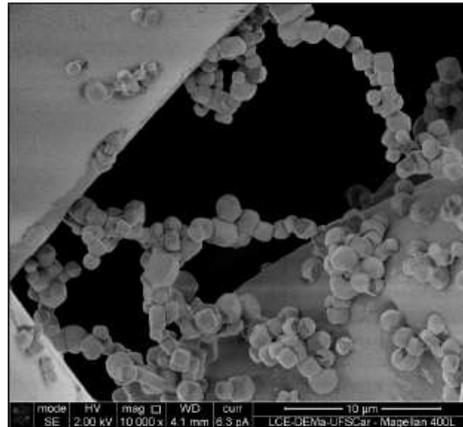
A coleta de material particulado é realizada pelo meio filtrante e pode ser dividida em três etapas: filtração de profundidade, transição e filtração de superfície.

A primeira etapa é a filtração de profundidade, período caracterizado pela coleta de particulados pelas fibras do filtro. Geralmente novos meios filtrantes possuem grande quantidade de poros, oferecendo pouca resistência à passagem do ar, e conseqüentemente há possibilidade de penetração das partículas mais profundamente por entre suas fibras. As partículas também podem ser carregadas junto à corrente gasosa para a atmosfera quando não são capturadas devido à alta permeabilidade do tecido, portanto há uma menor eficiência de coleta (WALSH, 1996; MORRIS; ALLEN, 1997). Essa etapa é predominante para sistemas com tamanhos de fibras maiores, altas velocidades de filtração e baixa coesão entre as partículas (SEVILLE, 1997).

À medida que a filtração continua, as partículas já coletadas realizam a coleta de novas partículas, formando estruturas por entre as fibras do meio filtrante, as quais são denominadas de dendritos. Com a formação dos dendritos há a diminuição do volume dos poros e um aumento na eficiência de filtração. A Figura 2 apresenta a formação dessas estruturas, e nesse momento inicia a segunda etapa, que é a de transição.

Com a continuidade do carregamento de pó, os poros começam a ficar carregados de partículas e uma camada de poeira se forma na superfície do tecido, a qual é chamada de torta de filtração. Assim, inicia-se a terceira etapa, denominada filtração de superfície, que tem como ponto de partida a colmatção (WALSH, 1996). Nessa etapa é obtida a eficiência máxima alcançada pelo filtro, pois a torta se comporta como um novo meio filtrante com poros de menor diâmetro que oferecem uma maior resistência à passagem do fluido (MORRIS; ALLEN, 1997).

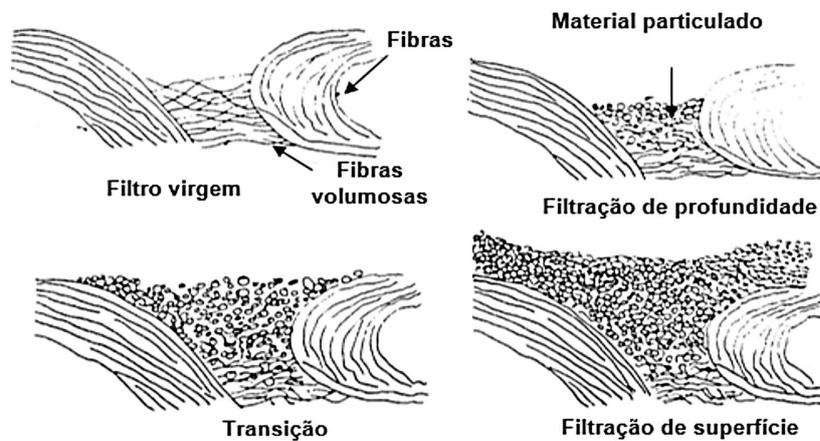
Figura 2. Formação de dendritos por nanopartículas em filtro de poliéster



Fonte: Barros (2014)

Ao longo da filtração, dependendo da quantidade e do tamanho das partículas, a torta de filtração pode ser fina com baixa permeabilidade ou pode ser espessa com alta permeabilidade, contudo a resistência à passagem do gás aumenta constantemente até o ponto de queda de pressão máxima (BARNETT, 2000). A ocorrência dessas etapas é apresentada pela Figura 3.

Figura 3. Etapas da filtração

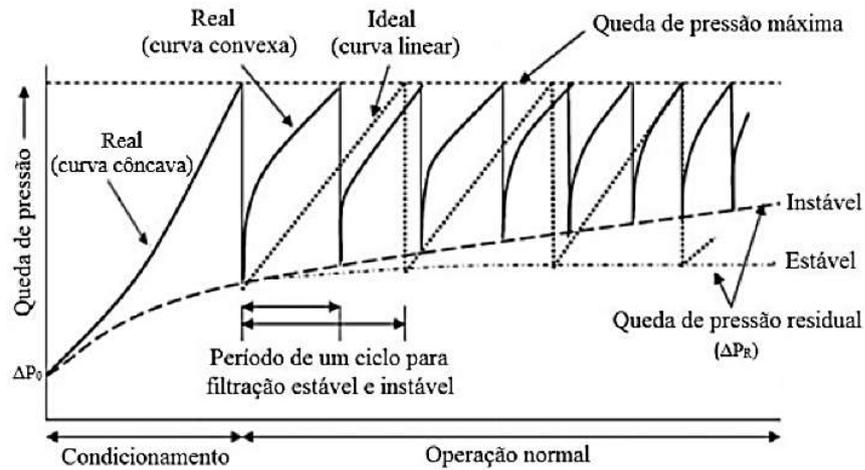


Fonte: Dennis e Susprenant (1978)

### 3.2.3. Ciclos de filtração

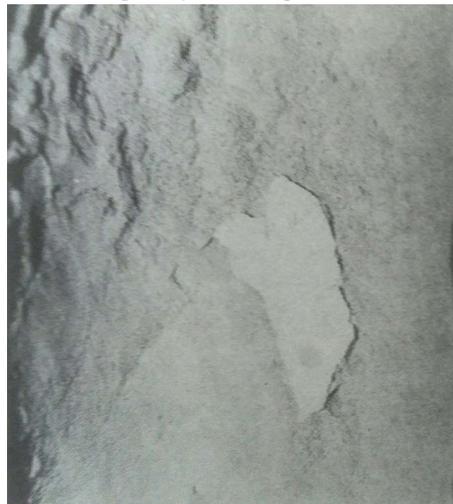
Durante a filtração, com a deposição de partículas sobre o meio filtrante há a formação da torta de filtração e o aumento da queda de pressão ao longo do tempo, sendo necessária a limpeza do meio filtrante quando o filtro alcança um tempo ou queda de pressão pré-determinada. O tempo da filtração somado ao tempo da limpeza é chamado de ciclo de filtração (MORRIS; ALLEN, 1997). Os ciclos de filtração estão apresentados na Figura 4.

Figura 4. Ciclos de filtração



Fonte: Mukhopadhyay (2009)

Há possibilidade de geração de três tipos de curvas nos ciclos de filtração, podendo ser côncava, convexa ou linear. As curvas lineares são formadas quando não há penetração de pó entre as fibras no meio filtrante, ocorrendo apenas a filtração superficial, sua ocorrência é um comportamento ideal. No primeiro ciclo é comum observar a curva côncava, que evidencia a presença da filtração de profundidade. Já a curva convexa é comum a partir do segundo ciclo de filtração. Ela é decorrente principalmente do processo de *patchy cleaning* (DONOVAN, 1985), que ocorre quando a limpeza dos filtros é incompleta e a torta não é removida de forma homogênea e sim por blocos, podendo ficar alguns deles aderidos às mangas, como na Figura 5 (MORRIS; ALLEN, 1997).

Figura 5. Efeito de *patchy cleaning* observado em um filtro

Fonte: Seville (1997)

Outro impacto do *patchy cleaning* é que a queda de pressão inicial do segundo ciclo será maior que a do primeiro ciclo, e assim sucessivamente, e essa nova queda de pressão é chamada

de queda de pressão residual ( $\Delta P_r$ ). Esta é responsável por diminuir o tempo dos ciclos de filtração e aumentar o número de limpezas.

A queda de pressão residual pode aumentar ao longo da filtração até obter um valor aproximadamente constante, com pouca variação, ou pode continuar crescendo até o ponto em que o limite crítico da queda de pressão seja atingido e faz-se necessário a substituição da manga (CHOUDHARY; MUKHOPADHYAY, 2013). O rápido crescimento do diferencial da pressão total e residual acarreta no aumento da frequência de limpeza dos filtros, que podem causar maior desgaste do meio filtrante e diminuir sua vida útil (ROCHA et al., 2014). Em uma filtração ideal a queda de pressão é estável, não sendo alterada ao longo do tempo.

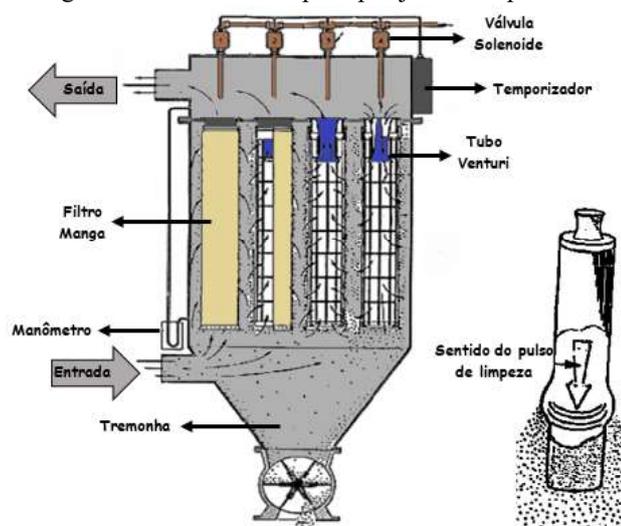
### 3.2.4. Mecanismos de limpeza

A limpeza dos meios filtrantes é necessária para garantir a boa operação do equipamento e a eficiência do processo. Seu desempenho impacta diretamente na vida útil das mangas, na emissão de gases e partículas, na queda de pressão dos filtros e no consumo total de energia (WIESLANDER; FRANCIS, 2009). Entre os mecanismos de limpeza existentes estão: a agitação mecânica, o fluxo de ar reverso e o jato de ar pulsante.

A agitação mecânica consiste na remoção das partículas através da vibração mecânica das mangas ocasionada por um motor. Já o fluxo de ar reverso consiste na passagem de uma corrente de ar limpo no sentido inverso da filtração. É uma técnica menos agressiva ao meio filtrante, porém ele opera melhor a baixas vazões (AGUIAR, 1991; LISBOA; SCHIRMER, 2007). Contudo, ambas as técnicas necessitam paralisação do processo para que a limpeza ocorra, sistema denominado *off-line*, sendo, portanto, uma desvantagem industrialmente porque necessitam de grandes áreas de filtração e o filtro opera com duas ou mais câmaras (carcaça).

O mecanismo mais utilizado é o jato de ar pulsante. Ele consiste na remoção do material particulado através de um pulso de ar gerado na parte superior das mangas, por um tubo Venturi, na direção contrária à filtração. O jato de ar introduzido percorre o meio filtrante ocasionando a expansão do mesmo e a remoção da torta, como apresentado na Figura 6. Neste sistema a pressão de ar injetado para limpeza é de 3 a 7 bar e ocorre por um curto período de tempo, 50 a 150 ms (CHOUDHARY; MUKHOPADHYAY, 2012). Ele apresenta como vantagens: um sistema mais compacto, possibilidade de operar a altas vazões e altas concentrações de pó, a limpeza mais rápida e eficaz e não necessita de interrupção do processo, sendo o sistema *on-line* (AGUIAR, 1991; LISBOA; SCHIRMER, 2007; PARK et al., 2012; CIRQUEIRA; TANABE; AGUIAR, 2019).

Figura 6. Sistema de limpeza por jato de ar pulsante



Fonte: Adaptado de Morris e Allen (1997) e Lisboa e Schirmer (2007)

Apesar das vantagens comparado aos demais mecanismos, o jato de ar pulsante é o mais agressivo para a vida útil das mangas, as quais apresentam um tempo de utilização cerca de 75% menor se comparado com o uso da técnica de fluxo de ar reverso (MEIOFILTRANTE, 2013). Além disso, este procedimento não é indicado para filtros rígidos, por exemplo meios filtrantes com fibras de cerâmica, nesses casos é indicado o fluxo de ar reverso (KOCH; SEVILLE; CLIFT, 1996). O pulso de ar também não é capaz de promover a remoção completa do pó, principalmente para partículas aderidas ao meio filtrante e às que penetraram por entre as fibras. Este fato ocasiona a elevação da queda de pressão residual e constata a necessidade de seleção de parâmetros operacionais e de projeto adequados para garantir uma melhor eficiência do filtro (CHOUDHARY; MUKHOPADHYAY, 2013).

A eficiência de limpeza ( $\eta_L$ ) pode ser calculada através de parâmetros como a queda de pressão no meio filtrante ( $\Delta P$ ), a queda de pressão residual ( $\Delta P_r$ ) e a queda de pressão inicial ( $\Delta P_0$ ), e é dada pela equação (LEE; SOHN; PARK, 2015):

$$\eta_L = \frac{\Delta P - \Delta P_r}{\Delta P - \Delta P_0} \times 100\% \quad (1)$$

E os parâmetros que impactam o sistema de limpeza por jato de ar pulsante são o diâmetro do Venturi e sua distância da parte superior da manga, a pressão e duração do pulso, além das propriedades da válvula de pulso, como diafragma e velocidade de elevação das válvulas (LU; TSAI, 1996; QIAN et al., 2018). Dentre estes parâmetros, a pressão do pulso é o fator mais crítico, pois tanto pode aumentar a eficiência de limpeza reduzindo a queda de pressão, quanto pode ocasionar o desgaste do meio filtrante, aumentando o nível de emissões (CHOUDHARY;

MUKHOPADHYAY, 2013). O pulso de ar pode ser classificado como (MUKHOPADHYAY, 2009):

- Alta pressão e baixo volume: 600 kPa;
- Média pressão e médio volume: 200 a 250 kPa e;
- Baixa pressão e alto volume: 100 kPa.

Um estudo de Cirqueira (2017) avaliou a variação do tempo e da pressão de pulso na limpeza durante a filtração de calcário em meios filtrantes de fibras de acrílico, e verificou que não houve grande aumento na eficiência de limpeza ao aumentar o tempo e a pressão de pulso. Choudhary e Muckopadhyay (2012) também avaliaram a variação da pressão de pulso na filtração de cimento em mangas de poliéster. Eles evidenciaram que a pressão residual diminui com o aumento da pressão de pulso para filtros com fibras finas, no entanto para aqueles com fibras de maior espessura as mudanças foram insignificantes. Estes fatos demonstram que é possível usar menores pressões de pulso para promover uma boa eficiência de limpeza com menor propensão ao desgaste das mangas e conseqüentemente menor gasto com suas trocas.

### 3.2.5. Velocidade de filtração

A velocidade superficial de filtração ( $V_s$ ), também chamada de relação ar-pano, é um importante parâmetro para o projeto de filtros de mangas e possui valores típicos de filtração variando de 0,3 a 3,7 m.min<sup>-1</sup>. Ela determina a área necessária para a filtração com uma vazão de fluido pré-determinada. Portanto, ela possui impacto direto nas dimensões e custos iniciais do equipamento, sendo que baixas velocidades superficiais podem exigir grandes áreas de filtração. Ela pode ser obtida pela razão entre a vazão volumétrica de gás ( $Q$ ) alimentada no equipamento e área útil de filtração ( $A_f$ ) (MORRIS; ALLEN, 1997):

$$v_s = \frac{Q}{A_f} \quad (2)$$

Além de ser um parâmetro importante no design de filtros mangas, a razão ar-pano também é importante para análise da filtração. Ela impacta diretamente na porosidade da torta, a qual diminui com o aumento da velocidade superficial, aumenta a possibilidade de penetração de partículas no meio filtrante, dificultando a limpeza e diminuindo a vida útil das mangas, além de afetar a queda de pressão do filtro.

Park et al. (2019) demonstraram através da simulação e validação experimental de um filtro de mangas, que o aumento da velocidade ocasiona o aumento da queda de pressão. O estudo da influência da velocidade de filtração também foi realizado por Rocha et al. (2010),

que tinham como objetivo avaliar seus efeitos na limpeza do meio filtrante. Seus resultados evidenciaram que o aumento da velocidade de filtração aumentou a penetração de partículas no meio filtrante, além de aumentar a queda de pressão residual e total, sendo necessárias limpezas mais frequentes e, conseqüentemente, diminuindo a vida útil dos filtros.

Resultados semelhantes também foram obtidos por Cirqueira (2013), que ao variar a velocidade da filtração, concluiu que o aumento desta ocasiona o aumento na queda de pressão no filtro e o aumento da penetração de partículas por entre as fibras do tecido. Além disso, a eficiência de coleta pode ainda ser alterada devido à razão ar-pano, sendo que quanto menor seu valor, maior a eficiência de coleta.

### **3.2.6. Umidade e temperatura**

A umidade é um fator limitante para o meio filtrante e pode ser prejudicial em altas concentrações. A presença de água pode aumentar a força de adesão das partículas ao filtro (MORRIS; ALLEN, 1996), e a condensação da umidade pode preencher os espaços vazios entre o material particulado e restringir a passagem de ar, ocasionando o aumento da queda de pressão. Ela também pode deixar as partículas molhadas e ocasionar o entupimento do meio filtrante (DAVID COOPER; ALLEY, 2002).

Boudhan et al. (2019) avaliou a influência da umidade na filtração de resíduos de combustão, comparando seu desempenho com  $0 \text{ g.m}^{-3}$  e com aproximadamente  $73 \text{ g.m}^{-3}$  de umidade absoluta na corrente gasosa. Seu estudo mostrou que a presença da umidade aumenta a queda de pressão no filtro, diminui a eficiência de limpeza e pode aumentar a resistência da torta de filtração e a queda de pressão residual.

A temperatura da corrente gasosa também é um fator importante, uma vez que o meio filtrante possui limites de temperatura e valores acima destes limites podem ocasionar o desgaste precoce das mangas ou o derretimento das fibras. Ela também impacta na viscosidade e na vazão volumétrica do gás, sendo que o aumento de ambos pode causar o aumento da queda de pressão (DAVID COOPER; ALLEY, 2002). Temperaturas usualmente aplicadas em filtrações não ultrapassam  $250^\circ\text{C}$  (MORRIS; ALLEN, 1997).

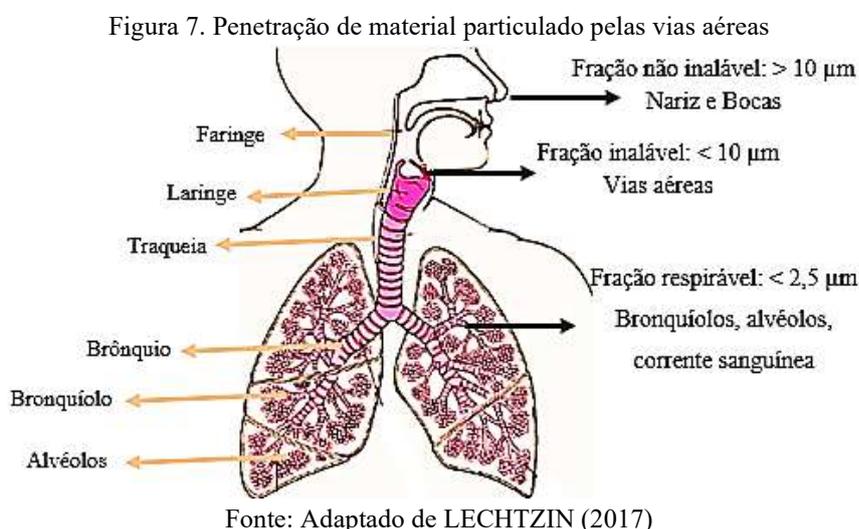
## **3.3. Material particulado**

### **3.3.1. Contexto socioambiental**

O material particulado consiste em um conjunto de partículas sólidas ou gotículas líquidas suspensas no ar, podendo ser orgânicas ou inorgânicas e inclui poluentes como: sulfato, nitrato,

carbono, poeira e fuligem (WHO, 2016). Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), o material particulado é classificado de acordo com o diâmetro de partícula, sendo que  $PM_{10}$  possui até  $10\ \mu m$ , considerado como inalável, e  $PM_{2,5}$  possui até  $2,5\ \mu m$ , considerado como finos inaláveis.

O tamanho das partículas está diretamente ligado ao seu potencial de prejudicar a saúde. Partículas maiores que  $10\ \mu m$  ficam retidas pelo sistema respiratório, as  $PM_{10}$  podem penetrar pelas vias aéreas e chegar ao sistema pulmonar, já as  $PM_{2,5}$  podem penetrar os alvéolos ou até entrar na corrente sanguínea, como demonstrado na Figura 7. Segundo a EPA (2017), essas partículas podem ser transportadas por longas distâncias e a exposição a elas pode provocar ataques cardíacos, asma agravada, diminuição da função pulmonar e irritação nas vias aéreas.



Além disso, estudos recentes evidenciaram que partículas ultrafinas, menores que  $1\ \mu m$ , ao caírem na corrente sanguínea ou serem absorvidas pela pele, podem chegar ao cérebro, e causar estresse oxidativo, inflamação neural, comprometimento das células e propensão à doenças degenerativas como Parkinson e Alzheimer (BENCSEK; LESTAEVEL; GUSEVA CANU, 2018; TELEANU et al., 2018; CALDERÓN-GARCIDUEÑAS et al., 2019). Há também os danos ambientais como: chuva ácida, capaz de danificar o ambiente natural, cultural e a agricultura, esgotamento dos nutrientes dos solos e alteração do balanço de nutrientes em águas costeiras.

A OMS diz ser desejável que a emissão média anual seja de  $10\ \mu g.m^{-3}$  para  $PM_{2,5}$  e de  $20\ \mu g.m^{-3}$  para  $PM_{10}$  (WHO, 2016). Para nanopartículas ainda não existe um padrão bem definido, pois o estudo de seus impactos ainda é recente, mas suas emissões na atmosfera são preocupantes e seu uso vem crescendo em diversos setores como: medicina, energia, indústrias alimentícias, farmacêuticas e de eletrônica. Esses fatores evidenciam a necessidade de controle

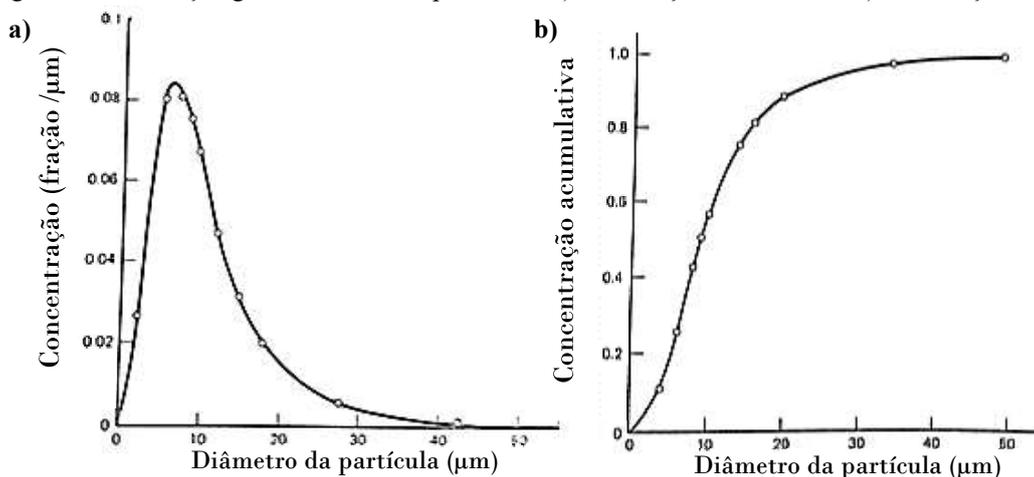
de emissões de material particulado, e, ao ser utilizado um filtro de mangas para este fim, é necessário compreender as características destes materiais, pois elas afetam diretamente a eficiência de coleta.

### 3.3.2. Características do material particulado

O material particulado apresenta uma ampla diversidade de características físicas e químicas, as quais dependem de suas fontes emissoras. Suas características podem impactar diretamente na escolha do meio filtrante e na eficiência do processo. Algumas das características de partículas são: distribuição granulométrica, forma, densidade, circularidade, rugosidade, corrosividade, reatividade, fluidez e toxicidade. Dentre essas características uma das mais importantes é a distribuição granulométrica, pois ela impacta diretamente no tipo de mecanismo de coleta e na penetração pelas fibras do meio poroso (PEUKERT; WADENPOHL, 2001; DAVID COOPER; ALLEY, 2002; CIRQUEIRA; TANABE; AGUIAR, 2019).

Os aerossóis normalmente são polidispersos, ou seja, possuem uma ampla faixa de tamanhos e propriedades físicas, e uma forma de representar sua distribuição é através de um gráfico de concentração em função do diâmetro de partículas, como evidenciado na Figura 8 (HINDS, 1982). A unidade de medida para diâmetro das partículas é o micrômetro ( $\mu\text{m}$ ), e para aquelas na faixa nanométrica utiliza-se o nanômetro (nm) (DAVID COOPER; ALLEY, 2002).

Figura 8. Distribuição granulométrica de partículas: a) distribuição fracionária e b) distribuição acumulativa



Fonte: Hinds (1982)

O estudo do impacto do tamanho do material particulado foi realizado por Li et al., (2019), que avaliaram diferentes granulometrias obtidas pelo peneiramento de cinzas volantes durante a filtração. Os autores concluíram que partículas de maior tamanho resultaram, em média, na redução da emissão das partículas no gás, menor queda de pressão residual, maior tempo de ciclo de filtração e, conseqüentemente, uma menor frequência de limpeza.

Como as partículas podem apresentar diferentes formatos, sendo muitas delas irregulares, utiliza-se um diâmetro equivalente para que suas propriedades possam ser comparáveis. E uma vez que o objetivo é a remoção do particulado da corrente gasosa, é interessante caracterizá-las de acordo com seu comportamento no gás, ou mais especificamente, de acordo com sua velocidade de sedimentação. Portanto, duas possibilidades de diâmetros equivalentes muito utilizadas em tecnologias de controle de poluentes atmosféricos são o diâmetro de Stokes ( $d_{st}$ ) e o diâmetro aerodinâmico ( $d_a$ ) (HINDS, 1982; DAVID COOPER; ALLEY, 2002).

O diâmetro de Stokes é o diâmetro da esfera com a mesma densidade e velocidade de sedimentação da partícula ( $V_{TS}$ ), já o diâmetro aerodinâmico é o diâmetro de uma esfera de densidade unitária ( $\rho_p = 1 \text{ g. cm}^{-3}$ ), também com a mesma velocidade de sedimentação. Entre eles o diâmetro aerodinâmico é mais utilizado, principalmente para determinação da eficiência de coleta (HINDS, 1982; DAVID COOPER; ALLEY, 2002). Além disso, devido suas irregularidades, as partículas também podem ser caracterizadas quanto a circularidade, que é uma medida bidimensional e adimensional, que avalia o quanto a partícula se aproxima de um círculo. Ela é dependente da curvatura dos cantos e bordas do objeto (WADELL, 1932; CRUZ-MATÍAS et al., 2019).

Algumas propriedades das partículas que conferem dificuldade na filtração de gases foram descritas por PEUKERT e WADENPOHL (2001) e estão apresentadas na Tabela 1, assim como os impactos que elas trazem para o processo de filtração.

Tabela 1. Propriedades do material particulado

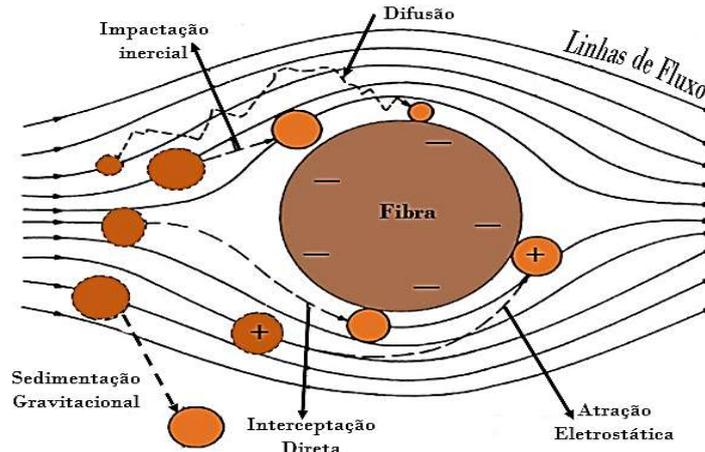
Propriedades de poeira	Comentários
Partículas ultrafinas com diâmetro $< 1 \mu\text{m}$	Alta queda de pressão na superfície de filtros
Baixa densidade de partículas	Baixa sedimentação e baixo efeito de coleta por inércia
Partículas fibrosas	Impactos na saúde e possibilidade de entupimento do meio filtrante. Ex. amianto
Partículas pegajosas ou de sinterização	Dificuldade de regeneração do meio filtrante
Partículas abrasivas	Erosão em área de alta velocidade
Partículas reativas ou explosivas	Necessário a implementação de corta chamas e meio filtrante adequado
Partículas em alta temperatura	Destruição do meio filtrante se a temperatura exceder seu limite de operação

Fonte: Adaptado de Peukert e Wandenpohl (2001)

### 3.3.3. Mecanismos de coleta

Existem cinco tipos de mecanismos de coleta das partículas pelo meio filtrante: interceptação direta, impactação inercial, difusão, gravitacional e atração eletrostática, apresentados na Figura 9.

Figura 9. Mecanismos de coleta de partículas pelo meio filtrante



Fonte: Adaptado de DONOVAN (1985)

Na intercepção direta o particulado segue as linhas de fluxo do gás, sendo capturado pelas fibras do filtro que estão dentro do raio da partícula durante seu caminho, nesses casos o centro de massa da partícula está próximo à fibra e favorece sua captura. Esse mecanismo também pode ocorrer quando as partículas são maiores que o caminho livre para sua passagem por entre as fibras (HINDS, 1982; DAVID COOPER; ALLEY, 2002). Ele é diretamente influenciado pela razão entre o raio da partícula ( $r_p$ ) e da fibra ( $r_f$ ), razão rotulado como  $Ra$  e sua eficiência de coleta é obtida a partir da equação:

$$E_R = \frac{1}{2Ku} \left[ 2(1 + Ra) \ln(1 + Ra) - (1 + Ra) + \left( \frac{1}{1+Ra} \right) \right] \quad (3)$$

$$Ku = -\frac{\ln \alpha}{2} - \frac{3}{4} + \alpha - \frac{\alpha^2}{4} \quad (4)$$

no qual  $\alpha$  é a densidade de empacotamento, também chamada de solidez, que corresponde a fração volumétrica ocupada pelas fibras e apresenta valores típicos entre 0,01 e 0,03 (HINDS, 1982). Ela é obtida por:  $1 - \text{porosidade} (\epsilon)$ .

A impactação inercial ocorre quando a partícula colide com a fibra do filtro devido à sua inércia, que a impede de ajustar rapidamente sua trajetória quando há mudanças na corrente de gás nas fronteiras da fibra. Sua ocorrência aumenta com o aumento da velocidade de filtração (DONOVAN, 1985). Esse mecanismo é governado pelo número de Stokes ( $Stk$ ), demonstrado na Equação 5, tendo sua probabilidade de coleta aumentada à medida que o número de Stokes aumenta, como mostrado na Equação 6 da eficiência de coleta para esse mecanismo (HINDS, 1982; DONOVAN, 1985).

$$Stk = \frac{C_c \rho_p v_f d_p^2}{18 \mu d_f} \quad (5)$$

$$E_I = \frac{J(Stk)}{2Ku} \quad (6)$$

$$p/ Ra < 0,4: \quad J = (29,6 - 28\alpha^{0,62})Ra^2 - 27,5Ra^{2,8} \quad (7)$$

$$p/ Ra > 0,4: \quad J = 2,0 \quad (8)$$

em que  $C_c$  é o fator de correção de Cunningham,  $\mu$  é a viscosidade do gás,  $d_p$  é o diâmetro da partícula e  $d_f$  é o diâmetro da fibra e  $\rho_p$  é a densidade da partícula.

A difusão é predominante para nanopartículas, as quais são capturadas pelo meio filtrante devido ao seu movimento Browniano, decorrente das múltiplas colisões destas com as moléculas do fluido, fazendo-as seguir um caminho aleatório. Com a diminuição do tamanho da partícula, a probabilidade de ocorrência desse mecanismo aumenta (HINDS, 1982; DONOVAN, 1985). As partículas, no entanto, apenas serão capturadas se houver forças de curto alcance suficientemente fortes para mantê-las na superfície, como, por exemplo, forças de Van der Waals, eletrostáticas e químicas (DAVID COOPER; ALLEY, 2002). Esse mecanismo não é dependente da densidade de empacotamento, e sua eficiência de coleta (Equação 9) é dependente do número de Péclet (Pe) (Equação 10):

$$E_D = 2Pe^{-2/3} \quad (9)$$

$$Pe = \frac{d_f v_f}{D} \quad (10)$$

no qual D é o coeficiente difusivo da partícula.

O mecanismo gravitacional ocorre apenas para partículas maiores que 5  $\mu\text{m}$ , pois elas desviam de suas linhas de fluxo e são capturadas pelas fibras devido à força da gravidade. Sua ocorrência é maior quando o escoamento do ar é na vertical e aumenta com o aumento do tamanho e da densidade da partícula e com a diminuição da velocidade de filtração. Para velocidades superficiais maiores que 10  $\text{cm.s}^{-1}$  a impactação inercial é maior que a sedimentação gravitacional (HINDS, 1982; DONOVAN, 1985). A eficiência de coleta para este mecanismo é obtida pelas equações:

$$p/ v_f \text{ e } V_{TS} \text{ na mesma direção: } E_G = G(1 + Ra) \quad (11)$$

$$p/ v_f \text{ e } V_{TS} \text{ em direções opostas: } E_G = -G(1 + Ra) \quad (12)$$

$$G = \frac{V_{TS}}{v_f} = \frac{\rho_p d_p^2 C_c g}{18\mu v_f} \quad (13)$$

no qual  $V_{TS}$  é a velocidade terminal de sedimentação da partícula e  $g$  é a gravidade.

Já a atração eletrostática ocorre devido a existência de cargas elétricas nas partículas e/ou nas fibras, ocasionando a atração entre eles. Ela ocorre principalmente para partículas entre 1 e 5  $\mu\text{m}$  e o aumento de suas cargas elétricas ou das cargas presente nas fibras aumenta a ocorrência desse mecanismo (MORRIS; ALLEN, 1997). Na filtração ele é difícil de ser quantificado, sendo normalmente desprezado, a menos que haja indução de cargas eletrostáticas

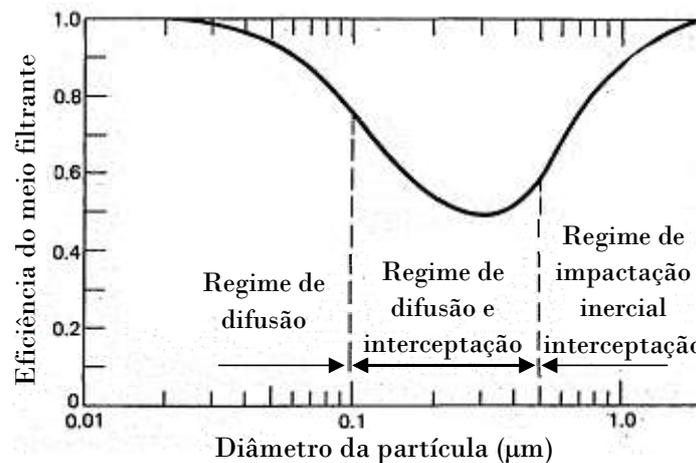
ou a partícula e/ou o filtro possuam cargas previamente conhecidas (HINDS, 1982; DONOVAN, 1985). A eficiência de coleta para esse mecanismo é:

$$E_q = \left( \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 1} \right)^{1/2} \left( \frac{q^2}{3\pi\mu d_p d_f^2 v_f (2 - \ln Re_f)} \right) \quad (14)$$

no qual  $\epsilon$  é a constante dielétrica da partícula,  $q$  a carga da partícula e  $Re_f$  é o número de Reynolds para as fibras.

A relação do diâmetro da partícula com a eficiência de cada mecanismo está apresentada na Figura 10, a qual também evidencia a existência de uma região de mínima eficiência, que ocorre quando a difusão e a interceptação são os mecanismos de coleta principais.

Figura 10. Eficiência dos mecanismos de captura em função do diâmetro das partículas



Fonte: Adaptado de LEE e LIU (1980)

### 3.3.4. Forças de adesão e coesão

Como visto, o material particulado pode ser capturado pelo meio filtrante através de vários mecanismos, sendo necessária a existência de forças que são responsáveis por essas coletas. Quando a partícula se adere à superfície do meio filtrante a força existente é chamada de adesão, enquanto que, quando elas se aderem umas às outras a força é conhecida como coesão, a qual é responsável pela formação dos dendritos e posteriormente da torta de filtração.

As forças presentes nessa aderência podem ser forças de Van der Waals, indução de dipolo eletrostático ou forças de capilaridade. Em filtrações comuns não há indução de cargas eletrostáticas e a umidade fica entre 30 e 60%, portanto seus efeitos na superfície são insignificantes. Dessa forma, a principal força atuante são as forças de Van der Waals (MORRIS; ALLEN, 1996). Esta predominância foi confirmada no estudo de Aguiar (1991) ao evidenciar que os valores obtidos experimentalmente para a adesão, durante a filtração de um

concentrado fosfático, apresentaram boa concordância com equações teóricas para o cálculo das forças de Van der Waals.

A importância de se conhecer as forças adesivas e coesivas é expressa na limpeza do meio filtrante, uma vez que a força de limpeza aplicada deve superar essas forças para garantir uma menor queda de pressão residual, ao mesmo tempo que esta não deve ser excessiva para evitar desgastes das mangas. Alguns dos aspectos que impactam diretamente nessas forças são: propriedades físicas e químicas do material particulado, condicionamento da torta, a estrutura do meio filtrante, uma vez que superfícies mais rugosas promovem uma maior adesão às partículas, a umidade e a temperatura da corrente gasosa, além da presença de cargas eletrostáticas (KOCH; SEVILLE; CLIFT, 1996; MORRIS; ALLEN, 1996).

Os efeitos da umidade e das forças eletrostáticas na força de adesão foram comprovados por Morris e Allen (1996) na filtração de diferentes materiais, como carvão, PVC, giz e fibras de vidro. Os autores demonstraram que a presença destes efeitos na corrente gasosa pode tanto ocasionar um aumento quanto uma diminuição desta força. Essa característica foi dependente do pó utilizado, comprovando a influência das características químicas e físicas do material. Uma dessas características é o diâmetro da partícula. Aguiar (1991, 1995) em seus estudos de filtração com rocha fosfática mostrou que a adesão variou inversamente com o diâmetro da partícula.

Em relação a estrutura do meio filtrante, a pesquisa realizada por Koch, Seville e Clift (1996) comparando dois meios filtrantes, sendo um deles rígido (material cerâmico formado a partir de fibras de silicato de alumínio) e um maleável (poliéster agulhado com superfície chamuscada), evidenciou que meios rígidos fornecem uma maior adesão. Felicetti (2008) também avaliou o força da adesão, através da técnica centrífuga, de materiais pulverulentos em substratos, e demonstrou que a força de adesão diminuiu com o aumento da rugosidade da superfície das partículas e dos substratos.

Estudos de determinação da força de adesão para compreensão do comportamento da remoção da torta de filtração, com limpeza por ar reverso, também foram realizados por Barros (2014). Com a variação de dois tipos de pó, polvilho doce e rocha fosfática, e três meios filtrantes, poliéster, polipropileno e acrílico, ela evidenciou que tanto o pó quanto o meio filtrante impactaram na força de adesão. O autor também mostrou que maiores velocidades de filtração aumentam a força de adesão das partículas, conseqüentemente dificultando a limpeza.

### 3.4. Meios filtrantes

#### 3.4.1. Características

Como visto previamente, a manga filtrante é o principal responsável pela eficiência de coleta do material particulado, além de ser também a responsável pelo alto custo de manutenção devido à necessidade de trocas frequentes. A escolha inadequada do meio filtrante pode ocasionar a redução da vida útil das mangas e uma eficiência de coleta insatisfatória, acarretando no aumento do custo do processo (BARNETT, 2000).

No mercado existe uma grande variedade de tecidos, com as mais diversas características e preços. Cada tipo de filtro tem um conjunto de características que devem ser escolhidas de acordo com cada aplicação. Para isso é necessário avaliar parâmetros operacionais, características do escoamento de gás e do material particulado e o projeto do equipamento. Alguns dos parâmetros a serem avaliados são a temperatura e umidade do processo, tamanho, concentração e abrasividade do particulado, propriedades químicas como acidez e alcalinidade, vazão e velocidade de filtração, o tipo de mecanismo de limpeza utilizado, além do custo e disponibilidade no mercado (BARNETT, 2000; LISBOA; SCHIRMER, 2007).

Em relação às características do meio filtrante, é necessário observar fatores como: a gramatura, uma vez que se for muito baixa, dependendo do processo, pode gerar altas emissões de material particulado e reduzir a sua vida útil; a densidade, que é a razão entre a gramatura e a espessura, esse valor, se baixo, pode ocasionar menor eficiência de coleta e o desgaste precoce devido à abrasão do material particulado; a permeabilidade e a porosidade, pois estas estão diretamente correlacionadas com a queda de pressão do meio filtrante e sua eficiência de coleta (MEIOFILTRANTE, 2013). Os meios filtrantes ainda podem se diferenciar em relação à sua estrutura, características das fibras e acabamento do material. Esses fatores estão detalhados nas próximas subseções.

#### 3.4.2. Porosidade

A porosidade ( $\varepsilon$ ) é a fração de espaços vazios presentes em um meio poroso ou na torta de filtração. Ela pode ser determinada através de dois métodos, o direto e o indireto.

O método indireto consiste na obtenção deste parâmetro através de equações encontradas na literatura. Uma das mais utilizadas é a equação de Ergun (1952),

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 \mu v_s (1-\varepsilon)^2}{d_f^2 \varepsilon^3} + \frac{1,75 \rho_g v_s^2 (1-\varepsilon)}{d_f \varepsilon^3} \quad (15)$$

em que L é a espessura da camada porosa e  $\rho_g$  é a densidade do gás.

Já o método direto consiste na determinação experimental da porosidade a partir de observação em microscópio. Para isso é necessário a preparação da amostra através de um método determinado por Aguiar (1995), quem adaptou a técnica proposta por Schmidt e Löffler (1990) de endurecimento da torta a partir de um adesivo instantâneo (LOCTITE-416) para avaliação de sua estrutura. O adesivo é arrastado por uma corrente de ar através do meio filtrante, passa por uma etapa de fixação com resina PMS-10 e posteriormente por uma etapa de embutimento e polimento. A amostra preparada é levada para obtenção das micrografias em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e a porosidade é obtida através de um software.

A porosidade de um meio filtrante afeta diretamente a queda de pressão, a eficiência de coleta e a possibilidade de entupimento do meio, uma vez que ela está diretamente correlacionada à medida da capacidade de armazenamento de poeira no filtro, havendo uma correlação quase linear entre o volume de poros e a massa de material particulado armazenada (RUD; MAUSCHITZ; HÖFLINGER, 2007).

Quanto mais partículas penetram profundamente por entre os poros do filtro, maior é a possibilidade de desgaste, diminuindo sua vida útil (PEREIRA et al., 2016). Portanto, faz-se necessário entender a influência de sua estrutura na filtração (RUD; MAUSCHITZ; HÖFLINGER, 2007). A cada filtração, com a formação da torta, a estrutura do filtro e sua porosidade podem ser alteradas, resultando em um aumento da queda de pressão residual. Estudos de Rocha et al. (2012) demonstraram que este efeito é mais pronunciado a partir de velocidades superiores a  $5 \text{ cm.s}^{-1}$ .

### 3.4.3. Permeabilidade

A permeabilidade está diretamente relacionada à capacidade do meio poroso em permitir a passagem do fluido, sendo influenciada pela quantidade e formação dos poros presentes, além de levar em conta as características do fluido de escoamento e sua interação com o meio filtrante (BARROS, 2014). Comercialmente seu valor é informado para o filtro virgem, o qual vem, por exemplo, com unidades de  $(\text{m}^3.\text{min}^{-1}).\text{m}^{-2} @ 125 \text{ Pa}$ ,  $(\text{L}.\text{min}^{-1}).\text{dm}^{-2} @ 20 \text{ mmH}_2\text{O}$  ou  $\text{cfm}.\text{ft}^{-2} @ 1/2'' \text{ H}_2\text{O}$ , pois ela é também avaliada como a vazão volumétrica de fluido que atravessa uma área útil do meio filtrante, resultando em um valor de queda de pressão (CARVALHO, 2018).

Dessa forma, quanto maior for o valor da permeabilidade menor será o valor da queda de pressão no meio poroso. Contudo, este fator também pode levar à diminuição da eficiência de coleta ao permitir maior penetração de material particulado e maior possibilidade de desgaste (MEIOFILTRANTE, 2013). Sendo assim, ela é um fator importante para o entendimento da filtração, no entanto, pode ser alterada ao longo da operação, assim como a porosidade, uma

vez que à medida que as partículas vão se depositando entre as fibras, há um aumento na resistência à passagem do fluido.

Este parâmetro pode ser obtido através da equação de Forchheimer, a qual se destina ao escoamento de fluidos incompressíveis através de meios sólidos granulares e pode ser aplicado para os meios filtrantes:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho g}{k_2} v_s^2 \quad (16)$$

A Equação 16 apresenta a queda de pressão ( $\Delta P$ ) em função da velocidade superficial ( $v_s$ ) do escoamento, sendo formada por um termo viscoso e um termo inercial, de forma a apresentar a transição gradual do escoamento laminar a turbulento. Sendo assim,  $k_1$  representa a constante de permeabilidade viscosa e  $k_2$  a constante de permeabilidade inercial (AGUIAR, 1991). Para escoamentos laminares puramente viscosos, que apresentam baixas velocidades de filtração, o termo inercial da Equação 16 pode ser desprezado, resultando na equação de Darcy:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s \quad (17)$$

Esta equação se adapta bem para filtros de mangas por apresentarem baixa velocidade de filtração, com valores típicos entre 0,3 a 3,7 m.min<sup>-1</sup> (MORRIS; ALLEN, 1997).

#### 3.4.4. Eficiência de coleta

A eficiência de coleta do meio filtrante é o fator mais importante na operação do filtro de mangas. Ela representa a quantidade, descrita em porcentagem, de partículas que são capturadas pelo meio filtrante e pode ser calculada pela equação (HINDS, 1982):

$$\eta_c (\%) = \left( \frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \cdot 100 \quad (18)$$

na qual  $C_i$  e  $C_f$  representam as concentrações de entrada e saída de material particulado no filtro, respectivamente.

A eficiência também pode ser obtida através da razão entre a massa de particulado coletada pelo meio filtrante ( $M_C$ ) e a massa total que chega até ele:

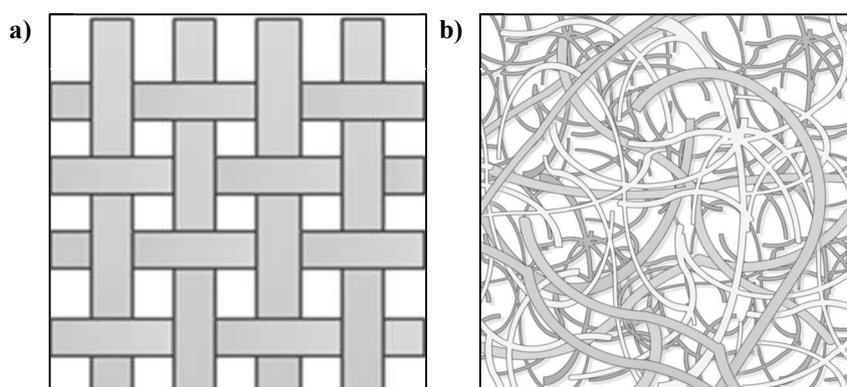
$$\eta_c (\%) = \left( \frac{M_C}{M_C + M_B} \right) \cdot 100 \quad (19)$$

A massa total é obtida pelo somatório da massa coletada e daquela que atravessa o filtro ( $M_B$ ), sendo que esta última pode ser mensurada através da massa obtida em um filtro absoluto posicionado na saída do meio poroso (SANCHEZ et al., 1997).

### 3.4.5. Estrutura dos Filtros

As mangas podem ser classificadas em função de sua estrutura, como: tecidos (*woven*) ou não tecidos (*nonwoven*). Estas estão apresentadas na Figura 11. O primeiro é uma estrutura na qual um conjunto de fios é entrelaçado regularmente, formando ângulos de aproximadamente 90°, sendo o conjunto de fios longitudinal denominado de urdume e àqueles na transversal denominados de trama. Já o segundo consiste em um conjunto de fibras randomicamente dispostas e fixadas em uma estrutura plana (ABINT, 1999).

Figura 11. Estrutura de meios filtrantes: a) tecido e b) não tecido



Fonte: Cirqueira (2017)

Os filtros de tecido apresentam vantagens na estimativa do tamanho e distribuição dos poros, sendo, portanto, de fácil construção. No entanto, o mais utilizado para a confecção dos meios filtrantes é o não tecido (MEIOFILTRANTE, 2013). Este apresenta a vantagem de possuir maior permeabilidade, maior eficiência de filtração, menor perda de carga, maior remoção da torta de filtração, além de apresentarem menor custo (KOTHARI; DAS; SINGH, 2007). Uma destas vantagens é evidenciada no estudo de Kothari, Das e Singh (2007), no qual os autores avaliaram o comportamento da filtração em filtros de tecido e não tecido e observaram que a queda de pressão em ambas estruturas aumentava com o aumento do escoamento de ar, porém ela foi maior para filtros de tecido.

### 3.4.6. Características das Fibras

Além da estrutura, os meios filtrantes também se diferenciam na espessura e material das fibras. Elas podem ser naturais como a lã, o algodão e as fibras metálicas; artificiais como o vidro, o acetato e a viscose, ou sintéticas como a poliamida, o poliéster, o polipropileno, o teflon, o P-84 e o acrílico (BARNETT, 2000). As fibras sintéticas são as mais utilizadas

industrialmente, e os filtros de poliéster, por exemplo, duram cerca de três vezes mais do que os de algodão (LISBOA; SCHIRMER, 2007).

Na escolha do material é importante considerar as condições na qual o meio poroso estará exposto, uma vez que cada material possui um limite de exposição à temperatura, além de poder vir a reagir com algum componente presente no escoamento de gás. A Tabela 2 apresenta algumas das características e condições de operação de alguns dos materiais disponíveis no mercado (BARNETT, 2000; LISBOA; SCHIRMER, 2007).

Tabela 2. Características de materiais de fibras para meios filtrantes

Material (Nome Comercial)	Símbolo	Temp. máx. (°C)	Resistência a abrasão	Resistência química					Custo relativo
				Ácidos	Bases	Solvente	Óxidos	Hidrólise	
<b>Poliéster</b>	PE	132	E	B	NR	E	B	NR	1
<b>Polipropileno</b>	PP	90	E	E	E	R	B	E	1
<b>Poliacrilonitrila (Acrílico)</b>	PAN	125	B	B	NR	E	B	E	2
<b>Fibra de vidro</b>	-	260	R	NR	R	-	E	E	3
<b>Aramida (Nomex)</b>	NO	204	E	NR	B	E	R	R	4
<b>Polifenilsulfeto (Ryton)</b>	PPS	190	B	E	E	E	NR	B	6
<b>Poliimida aromática (P-84)</b>	PIC	240	R	B	R	B	B	R	6
<b>Teflon</b>	PTFE	260	B	E	E	E	E	E	7
<b>Poliamida (Nylon)</b>	PA	110	E	NR	B	B	R	R	-
<b>Algodão</b>	CO	82	B	NR	B	-	-	-	-
<b>Lã</b>	WO	93	R	B	NR	-	-	-	-

E - Excelente; B - Bom; R - Ruim; NR - Não recomendado

Fontes: Adaptado de Lisboa e Schimer (2007); Casfil (2015) e AIRFILTER (2019)

Em relação à espessura das fibras, quanto mais finas elas forem, melhor será a eficiência do meio filtrante, fato que vem trazendo destaque para o uso de nanofibras na filtração (CHOUDHARY; MUKHOPADHYAY, 2012). Barros (2014) determinou a eficiência de coleta de nanopartículas em diferentes meios filtrantes: filtro HEPA, filtro com fibras heterogêneas e diâmetros menores que 2  $\mu\text{m}$ , e filtro de poliéster, composto por fibras mais homogêneas de diâmetro médio de 19,39  $\mu\text{m}$ . Seus resultados demonstraram que àquele com menor diâmetro de fibras obteve melhor eficiência de coleta ao longo da filtração, de 99,8% a 100%, enquanto que o filtro com maior diâmetro de fibras apresentou valores entre 15 a 100%.

Resultados semelhantes foram obtidos por Cirqueira, Tanabe e Aguiar (2019) que avaliaram a eficiência de filtração em meios filtrantes de poliéster e polipropileno. O estudo

demonstrou que o poliéster apresentou maior eficiência de coleta, maior contribuição da filtração de superfície e menor retenção de partículas após a limpeza, fatores atribuídos ao menor diâmetro médio de fibra e à menor porosidade do filtro.

### **3.4.7. Acabamentos**

Com a finalidade de melhorar a eficiência de coleta e a limpeza do meio filtrante, e diminuir a penetração de partículas entre as fibras do material, diferentes tipos de acabamentos podem ser realizados nos tecidos. Os mais utilizados são: mecânicos, químicos, térmicos, antiestático e revestimentos das fibras com membrana ou nanofibras.

Os mecânicos ocorrem por fricção e consistem em formas de entrelaçamento das fibras, que podem ser por agulhagem ou hidroentrelaçamento, sendo que o primeiro consiste no entrelaçamento das fibras com penetração alternada de agulhas e no segundo o entrelaçamento ocorre pela introdução de jatos de água a altas pressões. Nessa classificação há também o processo de costura, que consiste na inserção de fios de costura ou utilização das fibras do não tecido para efetuar sua consolidação (ABINT, 1999).

Já os processos químicos, consistem na aplicação de resinas ou impregnação de agentes químicos. Esse processo protege o meio filtrante contra abrasão, corrosão e altos teores de umidade, além de facilitar a remoção da torta de filtração (ABINT, 1999; PANOVA et al., 2012).

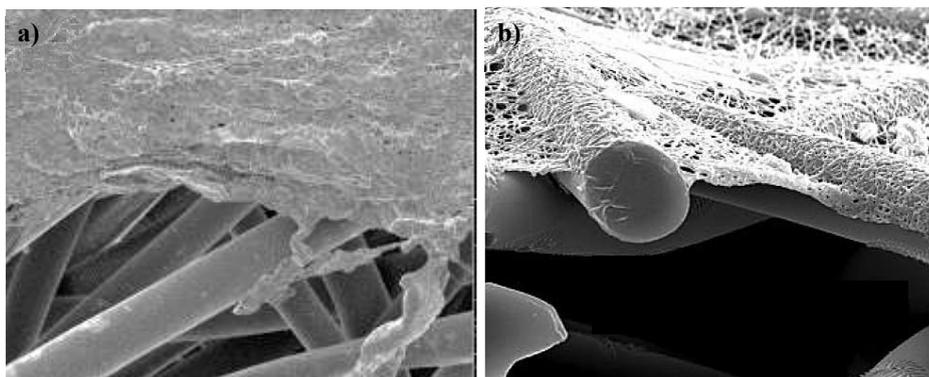
O tratamento térmico consiste na ligação das fibras (coesão) através da ação do calor, visando fortalecer o tecido. Os mais comuns são a calandragem e a chamuscagem. Na chamuscagem uma chama é colocada em contato com filtro para eliminar as fibras e promover uma superfície lisa, com o intuito de melhorar a resistência ao desgaste e facilitar a limpeza. Já na calandragem, o tecido é comprimido pela passagem de rolos quentes sob pressão na superfície, criando um filme de superfície lisa sobre a mesma, o qual facilita a regeneração dos tecidos durante a limpeza (ABINT, 1999; PANOVA et al., 2012). O aumento na vida útil em meio filtrantes com acabamento térmico foi verificado por Cirqueira, Tanabe e Aguiar (2017), pois ao compará-los com filtros sem tratamento superficial, eles apresentaram menor penetração profunda de partículas e melhor eficiência de coleta ao final de 50 ciclos filtração.

O tratamento antiestático visa à redução do risco de explosão para materiais particulados de baixa granulometria e alta explosividade. Além disso, ele pode melhorar a eficiência de limpeza ao neutralizar de forma passiva a eletricidade estática que possa estar proporcionando a adesão das partículas no meio filtrante. Ele consiste na introdução de fibras condutoras no meio filtrante, podendo ser por mesclagem de fibras de polímero condutor (Epitropic) ou de

fibras de aço-inox (AES) às fibras do tecido (PACHECO, 2002; PANOV et al., 2012; MEIOFILTRANTE, 2013).

O revestimento consiste em propiciar a filtração de superfície sem a necessidade de formação inicial da torta. Esse acabamento superficial, aumenta a eficiência de coleta de partículas, inclusive na faixa de tamanho nanométrica, além de evitar que o particulado penetre no meio filtrante, reduzindo o desgaste das fibras e facilitando a limpeza (HINDS, 1982; BENNETT; META, 2000; CARVALHO, 2018). Um exemplo são os meios filtrantes revestidos por uma membrana polimérica de fibras finas de teflon (PTFE). Entretanto, tecidos revestimento de membrana possuem alto custo, alta queda de pressão inicial, além de não possuir boa performance para partículas abrasivas quando comparada ao poliéster, como pode ser visto na Tabela 2. A utilização de revestimentos com nanofibras também vem ganhando destaque por garantir alta eficiência por um menor custo e menor queda de pressão inicial (BELCHER; TORIT, 2013). A Figura 12 apresenta um exemplo dos revestimentos citados.

Figura 12. Revestimentos: a) membrana de PTFE e b) nanofibras



Fonte: a) Carvalho (2018) b) Belcher e Torit (2013)

Com intuito de garantir alta eficiência de coleta para partículas finas em filtros de mangas, com um custo relativamente menor, várias indústrias utilizam uma técnica denominada de *precoating*, em detrimento aos meios filtrantes com membranas, que são muito caros, com resultados muito promissores. Por ser o objetivo do presente estudo esta técnica está detalhada na próxima seção.

### 3.5. *Precoating*

#### 3.5.1. Fundamento

A eficiência de filtração para meios filtrantes virgens, sem tratamento superficial ou revestido com membrana, é baixa tanto para partículas na faixa micrométrica quanto nanométrica (BELCHER; TORIT, 2013; CARVALHO, 2018). Esse fato é oriundo da filtração

de profundidade que ocorre nos primeiros instantes, onde nem todas as partículas conseguem ser captadas pelas fibras do meio filtrante e são carregadas junto ao escoamento de ar na saída da chaminé. À medida que uma camada superficial de pó vai se formando na superfície, esta funciona como um pré-filtro capaz de reter partículas de menores diâmetros, antes que estas possam penetrar no tecido (HINDS, 1982).

Esse fato foi demonstrado por Barros (2014), ao verificar que os filtros de poliéster conseguem atingir até 100% de eficiência de coleta para nanopartículas após a formação da torta, que começa a atuar como meio filtrante. Carvalho (2018) também analisou a eficiência de coleta pelo diâmetro aerodinâmico, de 0,523  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$ , em meios filtrantes de poliéster com e sem revestimento de membrana. Essa análise foi realizada no início da filtração e ao longo do aumento da queda de pressão, conseqüentemente início da deposição de pó. Com isso ele demonstrou que para meios filtrantes de poliéster revestidos com membrana a eficiência foi de aproximadamente 100% para todas as faixas de diâmetro aerodinâmicos, enquanto que para aqueles sem o revestimento a eficiência era inferior a 79% para  $\text{PM}_{2,5}$ , aproximando-se de 100% à medida que ocorria a deposição de pó.

Dessa forma, constatou-se que é possível aumentar a eficiência de filtração de novos meios filtrantes adicionando uma primeira camada superficial de material particulado, essa técnica é conhecida como *precoating*, ou pré-revestimento, e está ilustrada na Figura 13. Sem o *precoat* a eficiência aumenta de maneira gradual com a deposição de pó no filtro. Essa camada de material particulado é eficiente na remoção de partículas submicrômicas e aumento da vida útil do filtro, pois tem como objetivo a proteção contra a penetração mais profunda do material particulado no meio filtrante, evitando a abrasão das partículas nas fibras internas, o que poderia resultar em desgastes das mesmas, além de evitar obstruções ou bloqueios dos poros, o que acarretaria em aumento da queda de pressão residual (LI; HESS; HÖFLINGER, 2003; BELCHER; TORIT, 2013; SCHILLER; SCHMID, 2015).

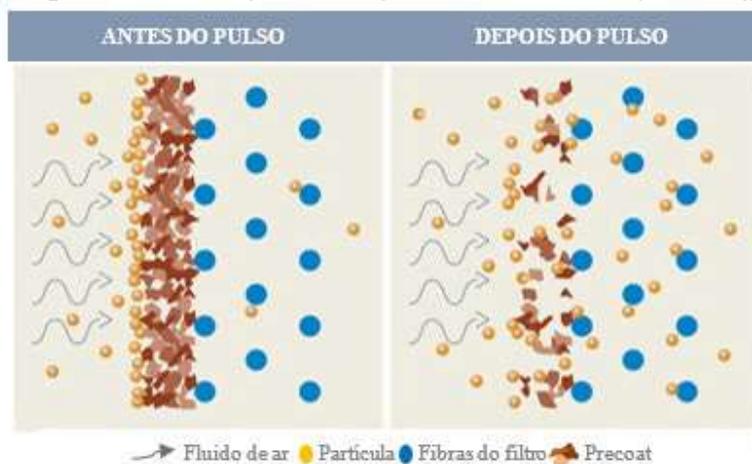


Fonte: Adaptado de UPC, 2017

Outros benefícios provenientes do *precoating* são: facilidade e melhor efetividade da limpeza da torta (SENTMANAT, 2013), não exige grande espaço físico para ser implementado (BENNETT; META, 2000), pode ser utilizado para lidar com filtração de partículas pegajosas que possuem alta aderência no meio filtrante, como o alcatrão, uma vez que elas ficariam majoritariamente retidas no revestimento (PEUKERT; WADENPOHL, 2001; BELCHER; TORIT, 2013), absorve óleos, umidade e hidrocarbonetos e ajuda a atenuar os danos causados por faíscas uma vez que o pó de *precoat* possui alto ponto de fusão (UPC, 2017).

No entanto, esta técnica pode apresentar desvantagens uma vez que o revestimento pode restringir a passagem de ar pelo meio poroso quando não usado corretamente ou em excesso, fator que ocasiona o aumento da queda de pressão e custos adicionais devido ao desperdício de material. Além disso, o *precoating* pode ser removido com a torta após a limpeza por jato de ar pulsante, fazendo com que o meio filtrante volte a se comportar como um filtro sem tratamento de superfície, como apresentado pela Figura 14, possibilitando o entupimento dos poros e a penetração de partículas entre as fibras (BELCHER; TORIT, 2013).

Figura 14. Efeito do pulso de limpeza sobre a camada de *precoating*



Fonte: Adaptado de Belcher e Torit (2013)

Tais fatos confirmam a necessidade de se compreender melhor os fundamentos de aplicação dessa técnica para garantir a eficácia da filtração e um baixo valor de queda de pressão durante o processo. Dessa forma, a seleção correta do pó de *precoat*, com suas características como: distribuição granulométrica, tamanho médio de partículas, formato e composição química, assim como as características do meio filtrante como: permeabilidade, composição química, e tamanho e distribuição de fibras, são cruciais para alcançar maiores eficiências de coleta das partículas finas em sua aplicação.

### 3.5.2. Características e formas de aplicação

A aplicação do *precoat* pode ocorrer de diferentes formas, uma das possíveis formas de utilização é através da aplicação do material antes do primeiro ciclo de filtração, formando uma fina camada de pré-revestimento sobre o meio filtrante. Essa configuração aumenta a eficiência do meio filtrante virgem, contudo o material depositado poderá ser removido durante o pulso de limpeza junto com a torta de filtração, deixando o meio poroso desprotegido (BELCHER; TORIT, 2013). Uma forma de evitar esse problema é realizando a aplicação do *precoat* sobre o filtro no início de cada novo ciclo de filtração. No entanto, seria necessário parar o processo de filtração constantemente para a realização de um novo pré-revestimento.

Outra possibilidade implica em, após a realização do revestimento no primeiro ciclo, continuar a dosagem com pequenas quantidades do pó junto ao material particulado a ser filtrado. Essa técnica visa garantir que o revestimento seja continuamente regenerado evitando possíveis penetrações no tecido, o que poderia ocasionar desgastes das fibras e entupimentos (VOSTRČIL; TESAŘIK, 1972; BENNETT; META, 2000). Entretanto, estas duas últimas formas de aplicação são mais onerosas devido à quantidade de *precoat* utilizado. É necessário, portanto, avaliar qual o tipo de aplicação que melhor se adequa a cada processo.

A aplicação pode ainda ocorrer por dois mecanismos: por deposição do material no mesmo sentido da filtração ou por escoamento cruzado. Para otimizar o primeiro caso é necessário selecionar a combinação apropriada do meio filtrante com a granulometria do pó de *precoat*. Já no segundo caso, sua otimização pode se dar na aplicação de diferentes velocidades de escoamento cruzado, além das características já observadas para otimização do primeiro (LI; HESS; HÖFLINGER, 2003).

A escolha do meio filtrante e do material de *precoat* é crucial para garantir a eficiência desejada e um baixo nível de queda de pressão durante os ciclos de filtração. Quanto ao filtro, é necessário que ele apresente baixa queda de pressão inicial e alta eficiência de coleta para o material de pré-revestimento (SCHILLER; SCHMID, 2014). Já em relação ao material do *precoating*, é necessário que ele tenha custo moderado; seja inerte e não tóxico; tenha baixa densidade aparente; possua alto ponto de fusão; disponha de distribuição uniforme do tamanho de partículas e grande o suficiente para não entupir o meio filtrante; se deposite preferencialmente na superfície; tenha porosidade adequada garantindo alta permeabilidade; possua boa qualidade de deposição e boa adesão às fibras (SENTMANAT, 2013; SCHILLER; SCHMID, 2014; UPC, 2017).

A terra de diatomáceas ou diatomito ( $\text{SiO}_2$ ) é comumente utilizada como pó de pré-revestimento (BENNETT; META, 2000; LI; HESS; HÖFLINGER, 2003; GUO et al., 2018; MAY et al., 2019). Além deste pó, também é utilizado o calcário e a cal hidratada (SCHILLER; SCHMID, 2014, 2015; SCHILLER; HELLMICH; SCHMID, 2016; ANDRADE, 2019) e comercialmente também foi encontrado o uso de perlita e rocha vulcânica natural (THECARYCOMPANY, 2019; U.S., AIR FILTRANTION, 2019).

### 3.5.3. Eficiência do *precoating*

O conceito de eficiência de *precoating* (PE) foi introduzido por Schiller, Hellmich e Schmid (2016) e é obtido pela razão entre a quantidade de material particulado fino coletado ( $M_C$ ) pela massa de *precoat* injetada ( $M_{fp}$ ). Este parâmetro visa avaliar a eficiência da filtração de poeira fina em processos que utilizam essa técnica para auxiliar a filtração de gases. Dessa forma para o primeiro ciclo tem-se:

$$PE_1 = \frac{M_C}{M_{fp}} \quad (20)$$

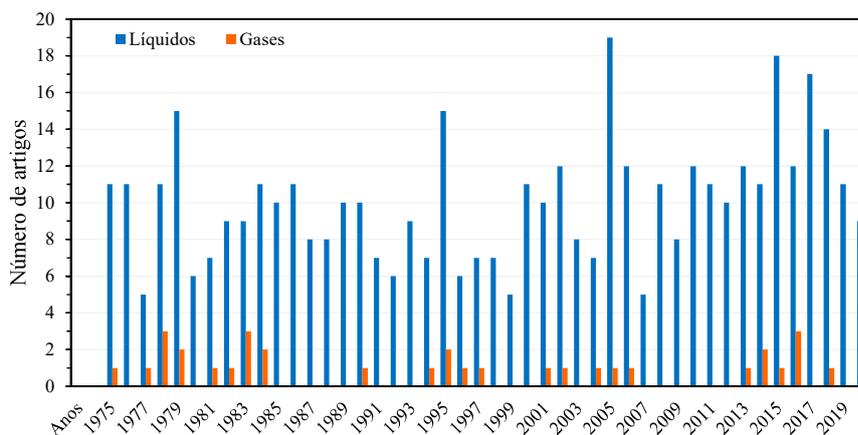
O valor de  $M_C$ , sob a presunção de que 100% do material particulado é separado, pode ser obtido através da equação:

$$M_C = c_{FD} \cdot Q \cdot t_f \cdot \eta_c \quad (21)$$

sendo:  $Q$  a vazão de gás média,  $c_{FD}$  a concentração média de massa de material particulado no fluido,  $t_f$  o tempo de filtração e  $\eta_c$  a eficiência de coleta.

### 3.5.4. Estado da arte

O uso do *precoat* como auxiliar na filtração de fluidos líquidos já é amplamente difundido na literatura e em aplicações industriais garantindo alta eficiência em aplicações como indústrias de alimentos e processamento de bebidas, refino de petróleo, filtragem de lubrificantes para siderurgia, filtração de água e processos de dessalinização (VOSTRČIL; TESÁŘIK, 1972; HÖFLINGER; HACKL, 1990; LI; HESS; HÖFLINGER, 2003; FLEXICON, 2010; ROEBUCK; TREMBLAY, 2017; GUO et al., 2018; MAY et al., 2019). Sua operação é comparada com processos de alta tecnologia como microfiltração por membrana (BENNETT; META, 2000). Essa técnica já é aplicado na indústria, porém é pouco estudado tanto para a filtração de fluidos líquidos (242 artigos entre 1975 e 2019), quanto de gases (32 artigos de 1975 a 2019), sendo que para gases essa técnica é ainda menos investigada, com cerca de 7x menos publicações, como mostrado na Figura 15, e portanto precisa ser mais explorada.

Figura 15. Artigos relacionados ao *precoating* na filtração ente 1975 e 2020

Fonte: Scopus (2021)

Na literatura, o *precoating* na filtração de gases, voltou a ser estudado por Schiller e Schmid (2013) ao avaliarem o uso do *precoat* na filtração de material particulado fino proveniente da combustão em aquecedores de pellets. Seus resultados demonstraram que com o uso dessa técnica foi possível reduzir o teor de partículas finas nos gases de escape de  $40 \text{ mg.m}^{-3}$  para menos de  $1 \text{ mg.m}^{-3}$ . Schiller e Schmid (2014) continuaram esse estudo analisando qual o melhor revestimento na filtração de finos da combustão. Foram avaliados onze tipos de meios filtrantes e três tipos de materiais de *precoat*, sendo eles o calcário, a cal hidratada e o iFIL N ( $\text{SiO}_2$  modificado). Verificou-se que essa tecnologia garante eficiência acima de 99% para partículas ultrafinas e um processo estável a longo prazo, sendo que a aplicação do iFIL N gerou a menor queda de pressão.

Schiller e Schmid (2015) também avaliaram a reciclagem do material de *precoating* nos ciclos subsequentes, avaliando misturas de pó virgem com o usado. As investigações revelaram que o reuso possui alto potencial de economia. A reutilização do *precoat* duas vezes possibilitou uma economia de 67% para o iFIL N; 65% para o calcário e 61% para a cal hidratada.

Além da escala laboratorial, Schiller, Hellmich e Schmid (2016) avaliaram a reutilização do *precoat* em uma planta real de aquecedor de *pellets*, a fim de mostrar semelhanças entre as eficiências de *precoating* de ambos processos. Em escala laboratorial houve um aumento linear da eficiência de *precoating* com a reutilização do material. No entanto, na planta real, que não operava em regime estacionário, não foi possível comparar seus resultados com àqueles obtidos em escala laboratorial sem implementar fatores de correção.

Os benefícios do *precoating* também foram comprovados por Ma et al. (2016). Os autores avaliaram o uso de grânulos de TPU, pré-revestimento produzido industrialmente a partir de poliuretano termoplástico, na filtração de cinzas volantes em filtros comuns agulhados. Seus

resultados demonstraram que o uso do *precoat* promoveu o aumento da eficiência de coleta e da vida útil do meio filtrante, além de manter a pressão residual relativamente estável.

Andrade (2019) investigou a influência do *precoating* na filtração de pó de aciaria. Como *precoat* foram usados o calcário e a cal hidratada e comparou-se o filtro de poliéster com e sem membrana. O autor verificou que o revestimento de membrana no filtro de poliéster, se comparado ao poliéster sem revestimento, aumentou a eficiência de filtração. Entretanto, o uso de *precoating* no poliéster sem revestimento gerou eficiência similar com maior vida útil do meio filtrante, evidenciando a eficácia dessa técnica.

Estudos realizados por Leubner, Mnich e Riebel (2005) demonstraram também que a utilização de um pré-revestimento na filtração de gases, além de promover melhor eficiência de coleta de partículas finas, pode realizar a quimissorção de poluentes presentes no gás, como o HCl e o SO<sub>2</sub>. Para isto, eles utilizaram um *precoat* com NaHCO<sub>3</sub>, o qual reage com esses poluentes removendo-os da corrente gasosa. Este material, que é o principal componente do minério de Nahcolite, que também foi utilizado como *precoat* por Genco e colaboradores (1975). Neste trabalho, os autores concluíram que seu uso em filtros de mangas para filtração de cinzas volantes foi capaz de promover uma eficiência de coleta acima de 99% e uma remoção de SO<sub>2</sub> acima de 70%. Outro pré-revestimento possível para remoção de gases ácidos é o Ca(OH)<sub>2</sub>, o qual foi utilizado por Walberer et al. (2018) na filtração de gases de escape de combustão. Seus resultados demonstraram uma redução de até 86,9% de SO<sub>2</sub> presente no gás durante 43 minutos e que possivelmente um revestimento contínuo durante a filtração poderia ser benéfico.

Também foi avaliado os benefícios do *precoating* quanto à limpeza do meio filtrante. Khirouni et al. (2021) ao avaliar o uso do *precoating* (CaCO<sub>3</sub>; SiO<sub>2</sub> e material metálico de maior diâmetro) na coleta de nanopartículas metálicas pegajosas (indústria metalúrgica), além de observarem uma melhora na eficiência de coleta, obtiverem uma eficiência de regeneração do meio filtrante utilizado de 15% para 90%.

Os estudos já realizados demonstram que o *precoating* é capaz de promover bons resultados, garantindo alta eficiência a um baixo custo. Ademais, devido às legislações cada vez mais restritivas quanto à emissão de material particulado, principalmente os mais finos, essa técnica vem ganhando destaque em estudos e aplicações industriais, onde ela já é utilizada para a redução de custos e aumento da eficiência de filtração.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, contendo os materiais e suas caracterizações (seção 4.1), equipamentos (seção 4.2) e procedimentos experimentais (seção 4.3). A correlação de cada objetivo específico com os procedimentos experimentais realizados está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Correlações dos procedimentos experimentais realizados com os objetivos específicos

Objetivo específico	Seção da metodologia	Procedimentos experimentais
i	4.3.1, 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, 4.3.5 e 4.3.6	Realização do ponto de colmatação e avaliação da eficiência de coleta fracionária para micro e nanopartículas com meios filtrantes com e sem <i>precoating</i> . Análise da porosidade do <i>precoating</i> , massa de pó depositada sobre o meio filtrante, tempo de deposição do <i>precoat</i> e aumento da queda de pressão do meio filtrante.
ii	4.3.4	Avaliação da eficiência de coleta fracionária para micro e nanopartículas após a realização do <i>precoating</i> seguindo do pulso de limpeza e comparação dos resultados os meios filtrantes sem <i>precoating</i> e com o <i>precoating</i> antes da limpeza. Análise da massa de <i>precoat</i> retida nos meios filtrantes após o pulso de limpeza.
iii	4.3.7	Análise do primeiro ciclo de filtração através do aumento da queda de pressão ao longo da deposição de material particulado sobre os meios filtrantes com e sem a presença do <i>precoating</i> , massa retida após o pulso de limpeza, aumento na queda de pressão do meio filtrante após o pulso e massa de material particulado coletada durante a filtração.
iv	4.3	Correlação entre os resultados obtidos e as caracterizações.

### 4.1. Materiais

#### 4.1.1. Caracterizações dos materiais particulados

Para a execução do presente trabalho foram utilizados dois diferentes pós para a avaliação do *precoating* e um para a avaliação da filtração.

Como *precoating* foram utilizados a terra de diatomáceas e o calcário agrícola. Estes foram escolhidos com base na literatura e por apresentarem diferentes propriedades químicas e físicas, a fim de se compreender melhor a influência de diferentes características no uso da técnica. A terra de diatomáceas apresenta ampla aplicação como *precoat* na filtração de líquidos (LI; HESS; HÖFLINGER, 2003; GUO et al., 2018; MAY et al., 2019) e foi também avaliada por Schiller e Schmid (2014, 2015) na filtração de gases. O calcário foi utilizado por estes autores e apresenta um menor custo comparado com a terra de diatomáceas, além de também ter sido utilizado como *precoat* na filtração de gases por Andrade (2019). O pó utilizado para

avaliação da filtração foi cedido por uma indústria siderúrgica, ele foi coletado na câmara do filtro de mangas do despoejamento secundário da aciaria.

Uma amostra dos materiais particulados utilizados está apresentada na Figura 16, estes foram caracterizados quanto à forma, composição química, circularidade, densidade e distribuição granulométrica volumétrica.

Figura 16. Amostras dos materiais particulados: a) terra de diatomáceas, b) calcário e c) pó de aciaria

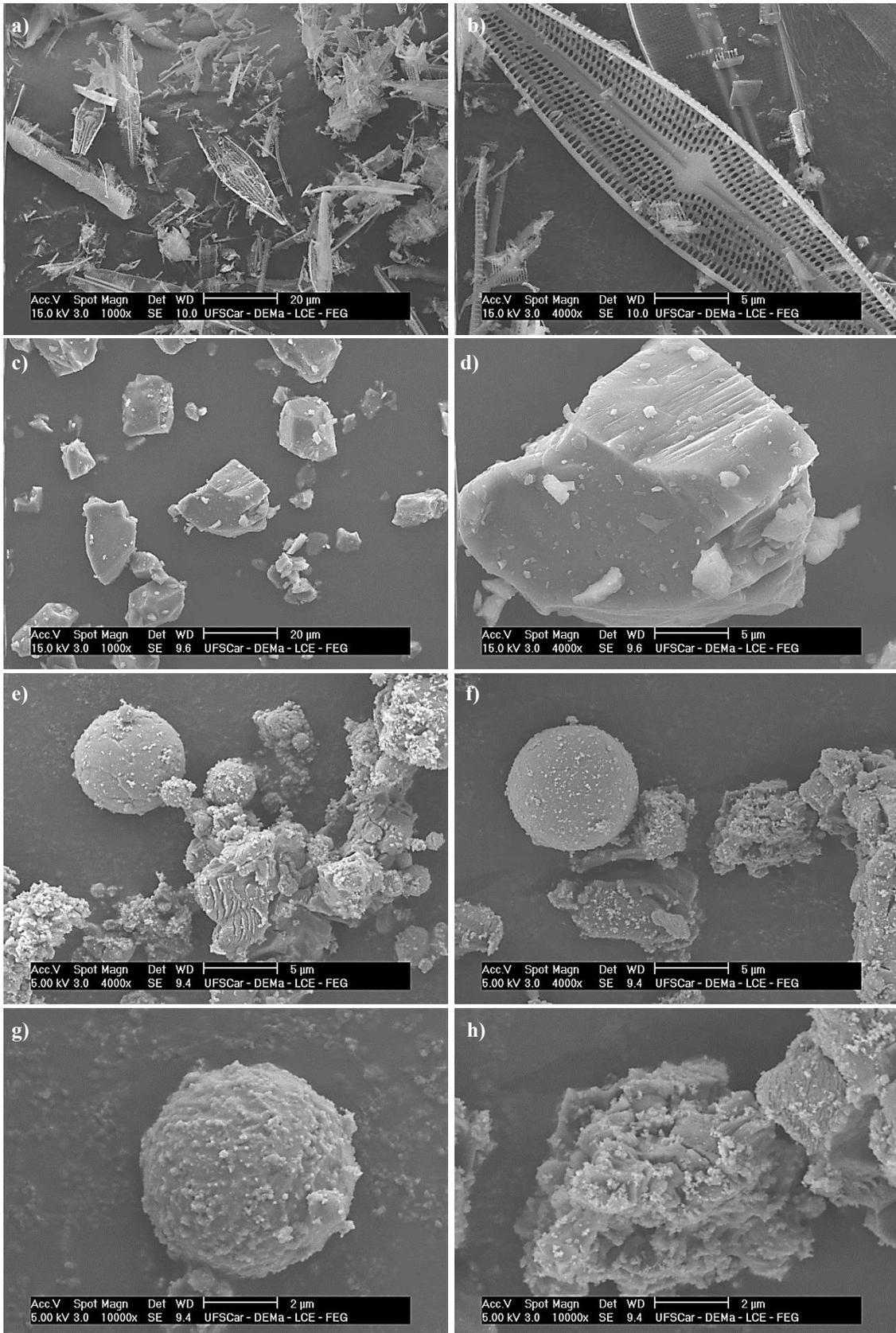


Fonte: Acervo pessoal

Imagens em MEV das partículas foram obtidas para avaliação de seu formato e estão apresentadas na Figura 17. As imagens foram obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) Philip XL-30 FEG (Field Emission Gun), acoplado a um sistema de EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) da marca Bruker. Este equipamento está disponível no Laboratório de Caracterização Estrutural do Departamento de Materiais (LCE/DEMA) da UFSCar. As imagens foram obtidas com elétrons secundários (SE), em magnificações de 1000x e 4000x, e as amostras foram previamente revestidas com uma camada fina de ouro para melhorar o nível de emissão de elétrons.

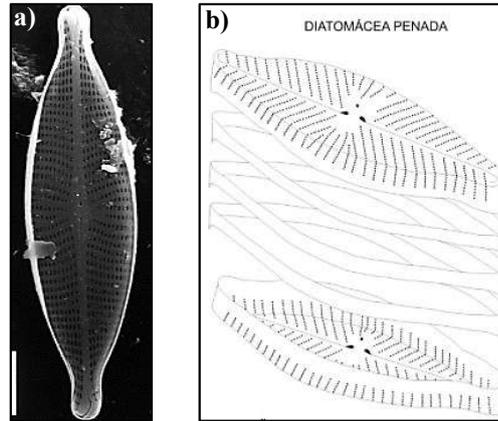
A terra de diatomáceas, constituída de restos fossilizados de algas diatomáceas, apresentou um formato penado (Figura 17a e 17b) característico dessa alga, como pode ser visualizado na Figura 18. O calcário dolomítico (Figura 17c e 17d), devido sua formação rochosa, apresenta partículas de formato irregular. O pó de aciaria apresentou dois formatos de partículas predominantes, uma arredondada, como ilustrado na Figura 17g, e outra irregular, ilustrado na Figura 17h. Com o uso do EDS acoplado ao MEV foi possível determinar a composição química predominante em cada formato de partícula. Em ambos formatos foram encontradas a presença de Alumínio (Al), Cálcio (Ca), Ferro (Fe), Magnésio (Mg), Potássio (K) e Silício (Si). No entanto, o Fe foi o compostos com maior destaque para as partículas de formato arredondado e o Ca para àquelas de formato irregular, como apresentado na Figura 19.

Figura 17. Imagens dos materiais particulados obtidas em MEV: a) e b) terra de diatomáceas, c) e d) calcário, e) à h) pó de Aciaria



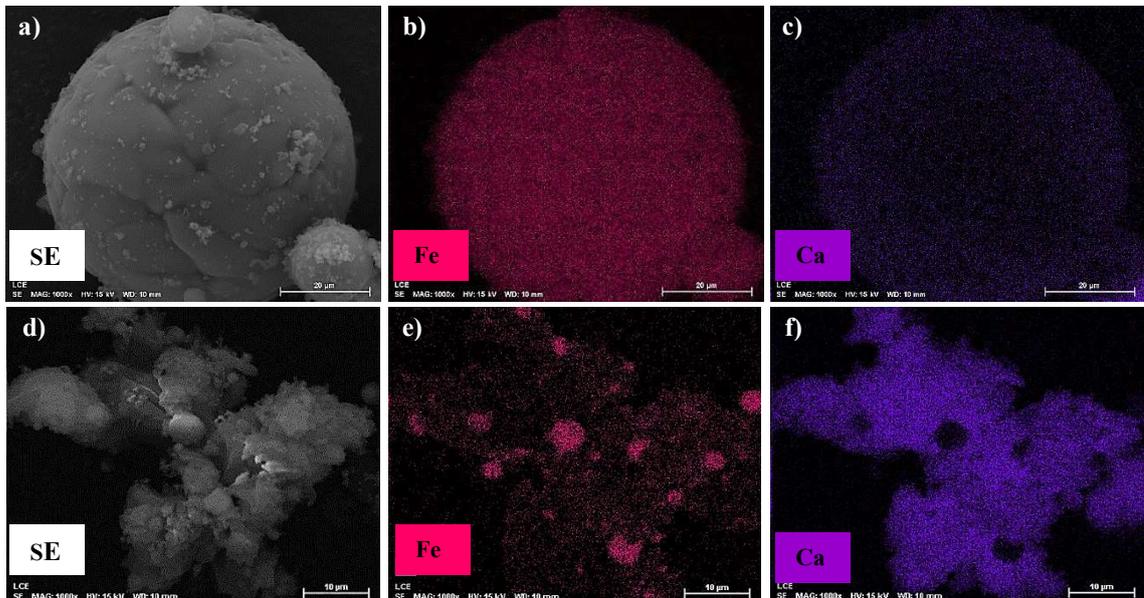
Fonte: Acervo pessoal

Figura 18. Alga diatomácea: a) observada em MEV e b) representação esquemática



Fonte: a) VOUILLOUD; SALA; SABBATINI (2005) b) CAVALCANTE (2012)

Figura 19. MEV/EDS dos diferentes formatos de partículas observadas para o pó de aciaria: a) e d) imagens em SE, b) e e) mapeamento químico de Ferro, c) e f) mapeamento química de Cálcio



Fonte: Acervo pessoal

A predominância de Fe e Ca na composição química do pó de aciaria foi confirmada com os resultados obtidos pela fluorescência de raio-x (FRX), realizada no equipamento Shimadzu EDX-720, também disponível no LCE/DEMA. O Fe e o Ca apresentaram  $35,70 \pm 0,12\%$  e  $59,06 \pm 0,09\%$  em massa, respectivamente. Também foi encontrada a presença dos demais compostos (Al, Mg, K e Si), além de outros em menores porcentagens. Para a terra de diatomáceas o composto predominante foi Si ( $91,97 \pm 0,12\%$ ) e para o calcário foi o Ca ( $79,98$

$\pm 0,11\%$ ). Esta composição é característica de suas fontes de origem. A Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam a composição completa obtida para os pós de *precoat* e o pó de aciaria.

Tabela 4. Composição química (% em massa) dos pós de precoating: terra de diatomáceas e calcário

Terra de Diatomáceas			Calcário		
Composto Químico	% em massa	Desvio	Composto Químico	% em massa	Desvio
Si	91,67	0,12	Ca	79,54	0,11
Al	4,87	0,04	Mg	13,70	0,17
Fe	1,65	0,01	Si	3,48	0,03
Ti	0,83	0,02	Fe	1,20	0,03
Ca	0,36	0,01	Al	0,92	0,04
K	0,29	0,02	K	0,61	0,04
Outros	0,33	-	Outros	0,55	-

Fonte: Acervo pessoal

Tabela 5. Composição química (% em massa) do pó de aciaria

Pó de Aciaria		
Composto Químico	% em massa	Desvio
Ca	59,06	0,09
Fe	35,71	0,12
Mg	1,17	0,09
S	0,72	0,14
Al	0,65	0,04
K	0,59	0,03
Cl	0,57	0,06
Mn	0,47	0,01
Si	0,45	0,01
Outros	0,61	-

Fonte: Acervo pessoal

A circularidade e a densidade estão apresentadas na Tabela 6. Para análise da circularidade das partículas foram utilizadas as imagens obtidas no MEV com magnificação de 1000x. As partículas foram circuladas e a circularidade calculada com o auxílio do software Image Pro Plus 7.0. Esta análise foi realizada em três partículas diferentes, e cada partícula foi circulada três vezes para minimizar os erros, uma vez que este processo é feito de forma manual. A densidade foi realizada no Laboratório de Controle Ambiental I do Departamento de Engenharia Química (LabCAm/DEQ) da UFSCar, através de picnometria a hélio no equipamento AccuPyc 1330 Micromeritics. Esta análise foi realizada em triplicata e para cada triplicata o equipamento realizou cinco medidas.

Tabela 6. Caracterização dos materiais particulados

Caracterização	Pó de Aciaria		Calcário	Terra de Diatomáceas
	Ferro	Cálcio		
Densidade (g.cm <sup>-2</sup> )	2,72 ± 0,06		2,89 ± 0,03	2,56 ± 0,14
Circularidade	0,75 ± 0,03	0,41 ± 0,01	0,67 ± 0,09	0,39 ± 0,07
<b>Distribuição granulométrica</b>				
D (v, 0,1) (µm)	1,6 ± 0,4		2,1 ± 0,3	1,4 ± 0,0
D (v, 0,5) (µm)	29,3 ± 1,2		37,0 ± 1,0	12,3 ± 0,1
D (v, 0,9) (µm)	133,7 ± 7,9		158,7 ± 0,3	52,8 ± 1,7

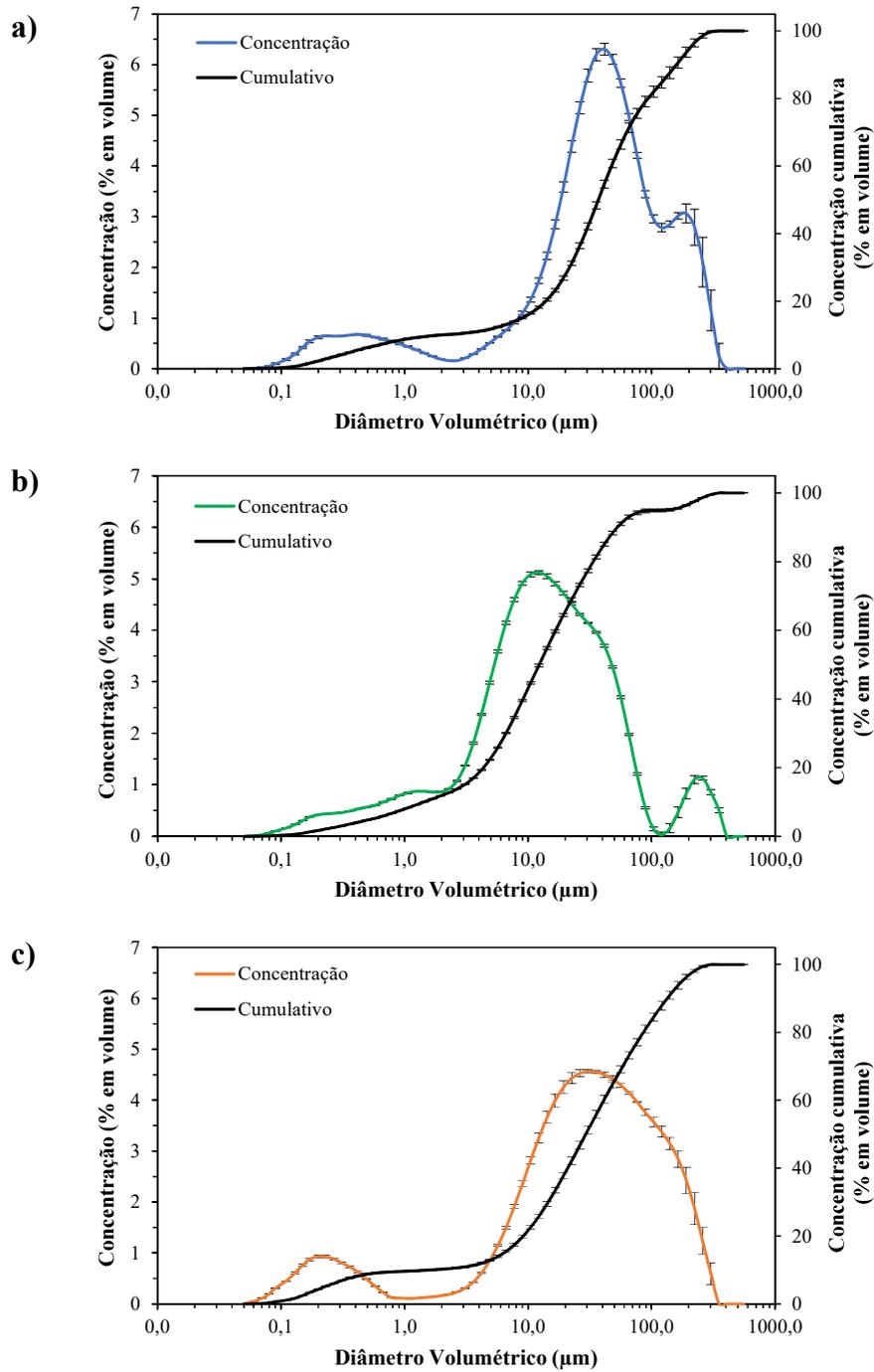
Fonte: Acervo pessoal

O calcário foi o que apresentou maior densidade ( $2,89 \pm 0,03 \text{ g.cm}^{-2}$ ) e a terra de diatomáceas foi a que apresentou o menor valor ( $2,56 \pm 0,14 \text{ g.cm}^{-2}$ ). Quanto a circularidade, a terra de diatomáceas também foi a que apresentou o menor valor ( $0,39 \pm 0,07$ ) devido ao seu formato penado, com a formação de ângulos agudos em suas extremidades. O maior valor foi obtido para as partículas do pó de aciaria com predominância de ferro, as quais possuem um formato mais circular.

Quanto à distribuição granulométrica volumétrica, esta foi realizada no Malvern Mastersizer Microplus disponível no Laboratório de Termodinâmica do Departamento de Engenharia Química (TermoSep/DEQ) da UFSCar. Esta análise foi realizada em triplicata. Os valores obtidos também estão apresentados na Tabela 6. Todos os materiais apresentaram curvas com mais de um pico de concentração e distribuição polidispersa, como observado na Figura 20. Dentre eles a terra de diatomáceas foi a que apresentou menor tamanho de partículas, pois 90% delas estão abaixo de  $52,8 \mu\text{m}$ , quando comparada aos valores do calcário ( $158,7 \pm 0,3 \mu\text{m}$ ) e do pó de aciaria ( $133,7 \pm 7,9 \mu\text{m}$ ), e o calcário foi o que apresentou maiores diâmetros de partículas. O pó de aciaria apresentou valores intermediários entre os pós de *precoat*.

Para obtenção da densidade e para os ensaios de filtração, todos os materiais particulados foram previamente deixados por 24 h em estufa à  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  para remover a umidade. Posteriormente, antes da utilização, eles foram armazenados em dessecador até chegar na temperatura ambiente, para não haver variação na densidade. Com exceção para o pó de aciaria, que foi deixado em estufa por 72 h pois havia aumento de seu volume durante as primeiras 48 h, ocasionando um aumento de  $4,72 \pm 0,01\%$  na massa e redução da densidade de  $3,28 \pm 0,04 \text{ g.cm}^{-3}$  para  $2,72 \pm 0,06 \text{ g.cm}^{-3}$ . Estes valores foram obtidos em triplicata pela comparação das amostras colocadas em estufa antes e após sua expansão.

Figura 20. Distribuição granulométrica volumétrica do material particulado: a) calcário, b) terra de diatomáceas e c) pó de aciaria



Fonte: Acervo pessoal

#### 4.1.2. Caracterizações dos meios filtrantes

Foram utilizados quatro diferentes tipos de meios filtrantes, constituídos de feltro agulhado com tela base 100% poliéster, de uma empresa fornecedora de mangas de filtração

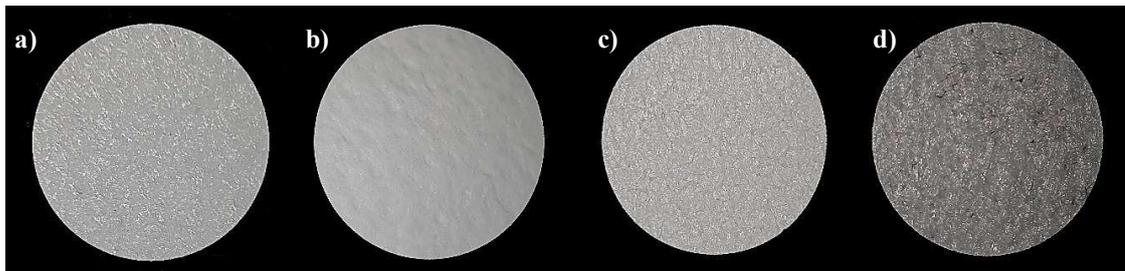
para a indústria siderúrgica. Os meios filtrantes utilizados e suas características estão apresentadas na Tabela 7 e uma amostra dos mesmos está apresentada na Figura 21.

Tabela 7. Especificações dos meios filtrantes fornecidas pelo fabricante

Materiais/ Especificações	PE	PE/PTFE	PE/Resina PTFE	PE/Epitropic
Material	Poliéster	Poliéster	Poliéster	Poliéster com Fibras Epitropic
Tratamento	Termofixado, chamuscado e calandrado	Termofixado, chamuscado e calandrado / Membrana de PTFE	Termofixado, chamuscado e calandrado / Fibras 100% encapsuladas com resina PTFE	Termofixado, chamuscado e calandrado / Fibras 100% encapsuladas com resina PTFE
Gramatura (g/m <sup>2</sup> )	550	550	550	600

Fonte: Acervo pessoal

Figura 21. Amostras dos meios filtrantes: a) PE, b) PE/PTFE, c) PE/Resina PTFE e d) PE/Epitropic

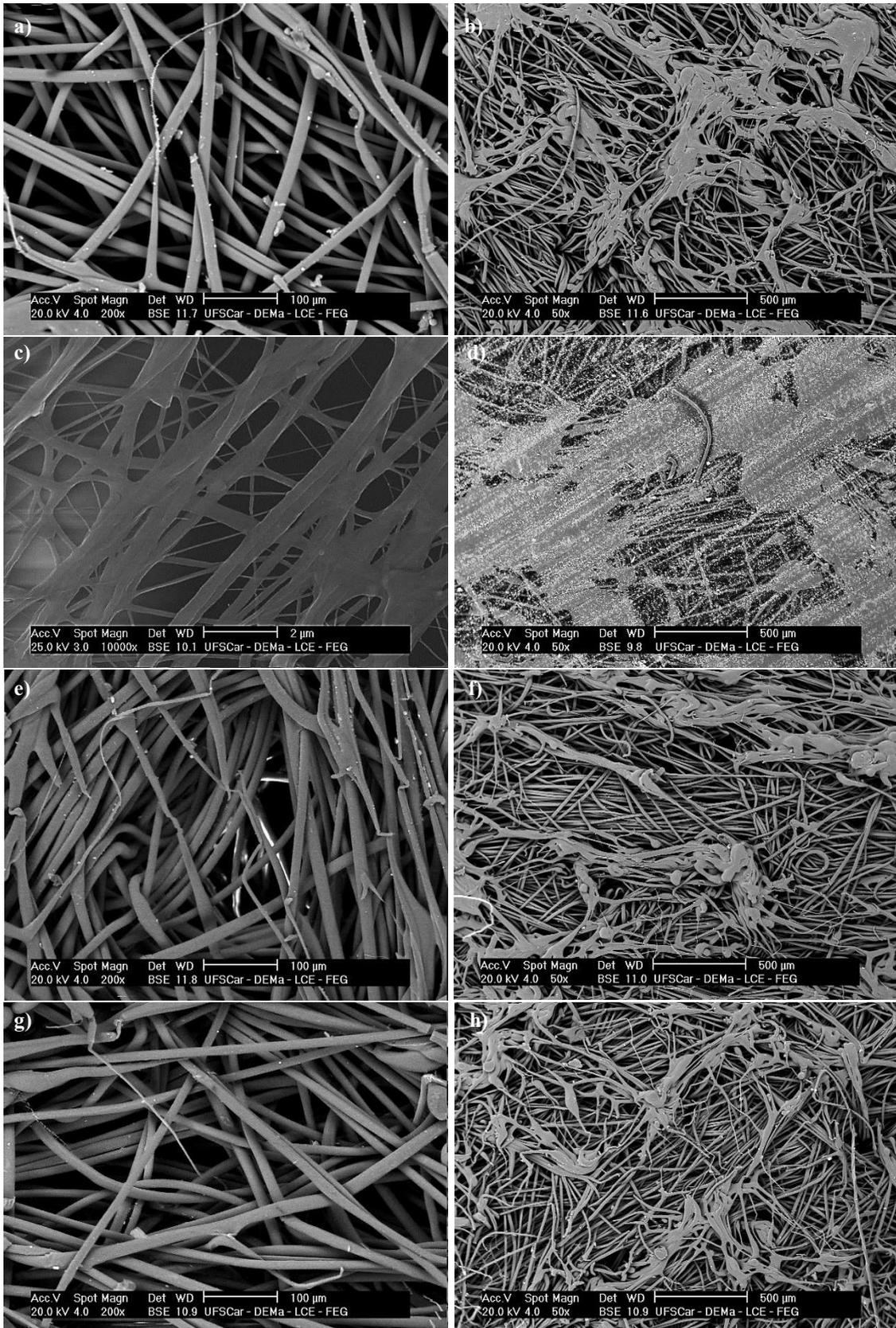


Fonte: Acervo pessoal

O desempenho do *precoating* será avaliado em diferentes tipos de meios filtrantes (PE, PE/Resina PTFE, PE/Epitropic), os quais apresentam menor custo e eficiência de coleta inicial quando comparado com aquele revestido com a membrana de PTFE. O filtro PE foi escolhido pois o poliéster é o material mais utilizado no despoejamento secundário da aciaria. Além da comparação, o filtro de PE/Resina PTFE também foi escolhido para observar o impacto da resina nas fibras quanto ao uso do revestimento, pois este tratamento confere uma antiaderência das partículas nas fibras e poderia melhorar a limpeza do meio filtrante e eliminar o *precoat*. Quanto ao tecido antiestático (PE/Epitropic), como o *precoating* pode ajudar na atenuação de danos por faíscas (UPC, 2017), poderia ser interessante a utilização desta técnica em processos com este material para aumento da eficiência de coleta.

As caracterizações realizadas nos meios filtrantes foram: diâmetro médio de fibras ( $\bar{d}_f$ ), espessura (L), constante de permeabilidade inercial ( $k_1$ ) e porosidade ( $\epsilon$ ). Além disso, foram obtidas imagens da superfície dos meios filtrantes em MEV, as quais estão apresentadas na Figura 22.

Figura 22. Imagens superficiais dos meios filtrantes obtidas em MEV: a) e b) PE, c) e d) PE/PTFE, e) e f) PE/Resina de PTFE, g) e h) PE/Epitropic

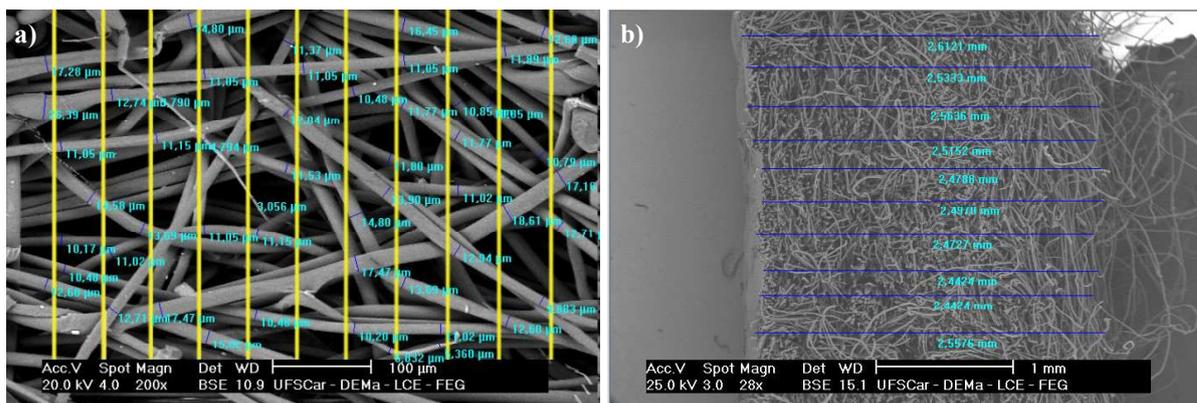


Fonte: Acervo pessoal

As imagens foram obtidas no MEV Philip XL-30 FEG (Field Emission Gun), disponível no LCE/DEMA da UFSCar. As amostras foram revestidas com uma camada fina de ouro e as imagens foram obtidas com elétrons retroespalhados (BSE) em magnificações de 200x, com exceção do filtro PE/PTFE para o qual foi necessária uma magnificação de 10000x devido ao fino diâmetro das fibras da membrana. Como a membrana reveste apenas a superfície do filtro, foram obtidas imagens da transversal para o filtro de PE/PTFE, em magnificação de 200x, para mensurar o diâmetro da base do meio filtrante. Também foram obtidas imagens com magnificações de 50x para visualização do tratamento superficial dos tecidos.

A partir das imagens, o diâmetro das fibras foi mensurado seguindo a metodologia de Bortolassi, Guerra e Aguiar (2017). Foram avaliadas seis imagens de diferentes locais do tecido, e estas foram seccionadas em 12 seções verticais igualmente espaçadas. Os diâmetros das fibras que interceptavam as seções verticais foram mensurados através do software Image Pro Plus 7.0, como apresentado na Figura 23a, totalizando aproximadamente 50 medidas para cada imagens. O diâmetro médio das fibras foi obtido pela média aritmética dos valores obtidos. A espessura também foi analisada a partir de imagens obtidas no MEV, porém realizadas na transversal e em magnificação de 28x, a fim de visualizar toda lateral do tecido. Foi realizada a média aritmética de 10 medidas em três diferentes amostras de meio filtrante através do Image Pro Plus 7.0, como mostrado na Figura 23b.

Figura 23. Caracterizações: a) determinação do diâmetro médio das fibras e b) espessura do meio filtrante



Fonte: Acervo pessoal

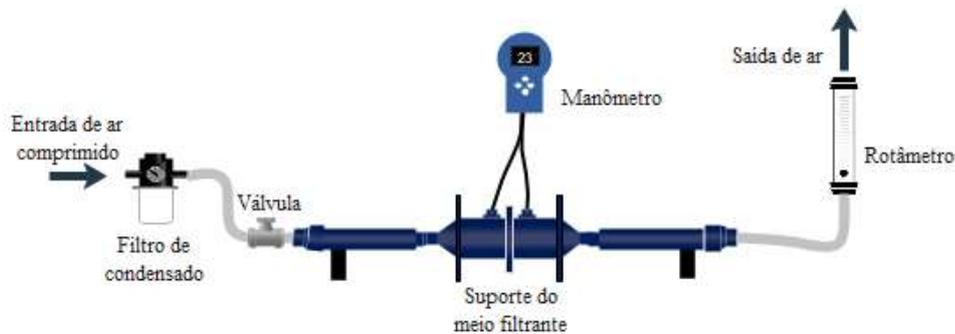
Para obtenção do coeficiente de permeabilidade do meio filtrante ( $k_1$ ) utilizou-se a equação de Darcy (Equação 17). A unidade experimental utilizada está ilustrada na Figura 24. Ela foi realizada em triplicatas, com três diferentes amostras do tecido com 40,15 cm<sup>2</sup> de área circular, e a temperatura, pressão e umidade de operação eram anotadas. Como L é constante, o valor de  $k_1$  pode ser obtido pelo cálculo do coeficiente angular da curva de  $\Delta P/L \times V_s$ , que é

obtido ao variar a vazão de ar limpo pelo meio filtrante, aferindo para cada vazão a queda de pressão registrada no filtro (AGUIAR, 1995). Foi utilizado o manômetro digital Velocicalc da marca TSI 9555-P e a variação na vazão de ar foi realizada de 5 em 5 L.min<sup>-1</sup> na faixa de 5 a 50 L.min<sup>-1</sup> com o uso do rotâmetro GF-2500 da Gilmont, com escala até 80 L.min<sup>-1</sup>. O rotâmetro foi calibrado à 70 °F e 760 mmHg, portanto, a vazão medida foi corrigida através da equação:

$$\text{Vazão corrigida} = \text{Vazão medida} \cdot \frac{T \text{ calibração}}{T \text{ operação}} \cdot \frac{P \text{ operação}}{P \text{ calibração}} \quad (22)$$

em que T é a temperatura do fluido e P é a pressão atmosférica. Para aplicação na equação de Darcy, a vazão volumétrica foi convertida em velocidade através da equação 2.

Figura 24. Unidade experimental utilizada para determinação da constante de permeabilidade do meio filtrante



Fonte: Acervo pessoal

A porosidade do meio filtrante virgem foi obtida pelo método indireto, fazendo uso da equação de Ergun (Equação 15). Os valores utilizados de  $\Delta P$  e  $V_s$  foram àqueles obtidos na análise de permeabilidade e a densidade do gás foi calculada nas condições do fluido pela equação do gás ideal:

$$\rho_g = \frac{PM}{RT} \quad (23)$$

em que M é a massa molar do fluido, T é a temperatura do fluido, P é a pressão atmosférica e R é a constante universal dos gases ideais (8,3145 Pa.m<sup>3</sup>.k<sup>-1</sup>.mol<sup>-1</sup>).

Os resultados das caracterizações estão apresentados na Tabela 8. Para PE/PTFE os resultados do diâmetro médio das fibras e porosidade estão divididos por camada (membrana de PTFE e tecido base) e a espessura e a constante de permeabilidade possuem resultado único, por não ser possível separar as camadas para realizar suas medidas.

Os maiores valores de espessura foram obtidos para PE/Epitropic e PE/PTFE, os demais tecidos apresentaram valores próximos. O aumento no valor de PE/Epitropic pode ser resultante de sua maior gramatura (600 g.m<sup>-2</sup>) e por ele possuir um diferente tipo de fibra (Fibras Epitropic). Estas, por possuírem uma mesclagem com polímero condutor, podem ter colaborado tanto para o aumento da espessura quanto para o aumento da gramatura.

Tabela 8. Caracterizações dos meios filtrantes

Materiais/ caracterizações	PE/PTFE				
	PE	Membrana	Tecido base	PE/Resina PTFE	PE/Epitropic
<b>Diâmetro médio das fibras (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	12,61 $\pm$ 3,28	0,14 $\pm$ 0,06	13,40 $\pm$ 2,69	13,46 $\pm$ 3,54	12,59 $\pm$ 3,30
<b>Porosidade</b>	0,89 $\pm$ 2,38 E <sup>-3</sup>	0,99 $\pm$ 7,41 E <sup>-5</sup>	0,79 $\pm$ 4,0 E <sup>-3</sup>	0,88 $\pm$ 2,34 E <sup>-3</sup>	0,90 $\pm$ 1,92 E <sup>-3</sup>
<b>Espessura (mm)</b>	2,19 $\pm$ 0,09	2,65 $\pm$ 0,17		2,30 $\pm$ 0,09	2,44 $\pm$ 0,08
<b>Gramatura (<math>\text{g.m}^{-2}</math>)*</b>	550	550		550	600
<b>Constante de Permeabilidade (<math>\text{m}^2</math>)</b>	5,71 E <sup>-11</sup> $\pm$ 5,02 E <sup>-13</sup>	1,86 E <sup>-11</sup> $\pm$ 0,0		5,70 E <sup>-11</sup> $\pm$ 2,25 E <sup>-12</sup>	6,77 E <sup>-11</sup> $\pm$ 1,50 E <sup>-12</sup>
<b>Queda de pressão inicial (Pa)</b>	23,9 $\pm$ 0,2	88,4 $\pm$ 0,0		25,1 $\pm$ 0,1	22,4 $\pm$ 0,5

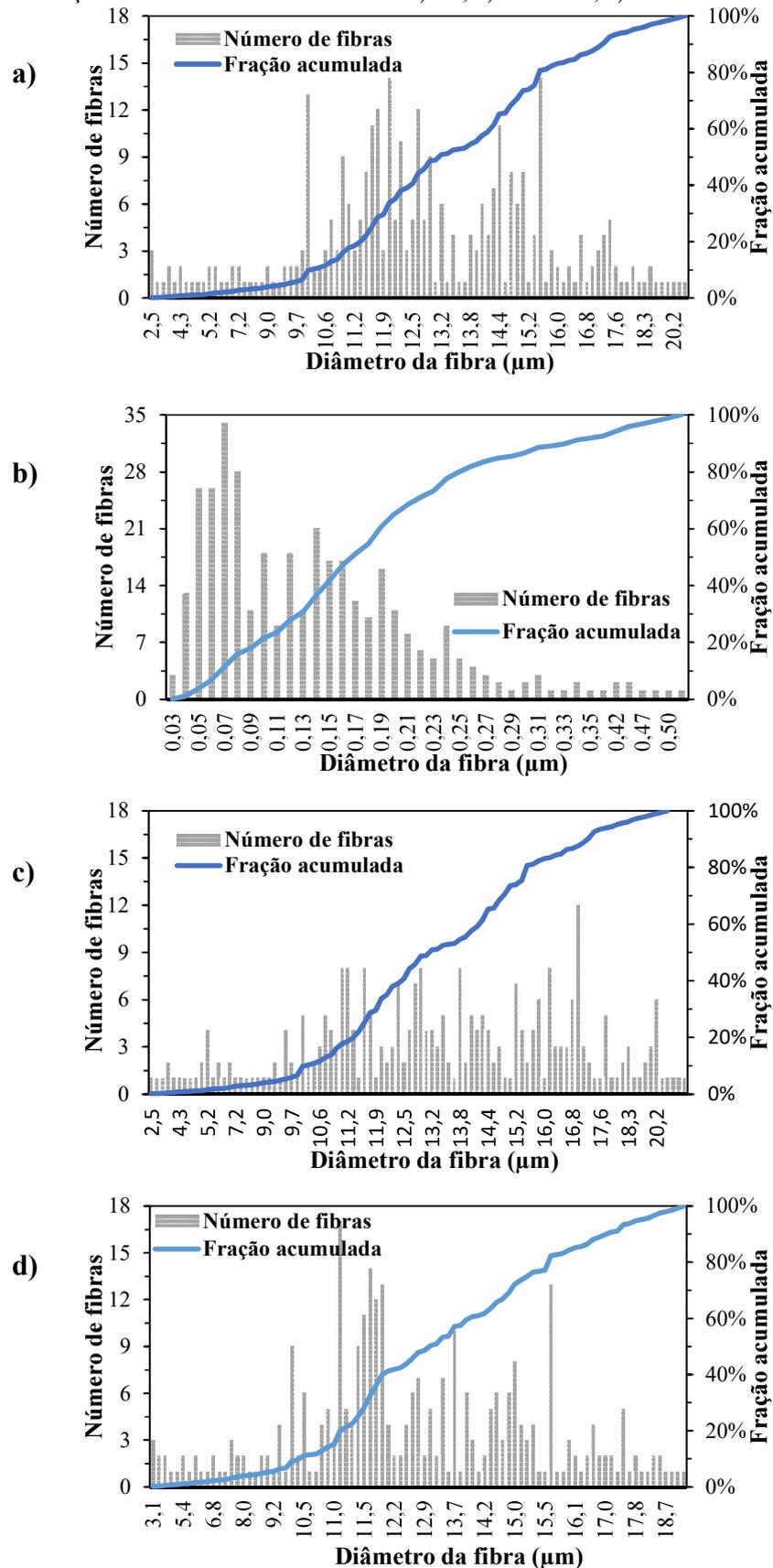
\*Dados fornecidos pelo fabricante

Fonte: Acervo pessoal

Quanto ao aumento da espessura de PE/PTFE, apesar de ter a mesma gramatura que PE e PE/Resina PTFE (550  $\text{g.m}^{-2}$ ), foi acrescido de uma membrana de PTFE em sua superfície. Esta última apresentou diâmetro médio de fibras cerca de 100x menor que a dos demais materiais. PE, PE/Resina PTFE, PE/Epitropic e o tecido base de PE/PTFE apresentaram valores próximos, uma vez que eles possuem a mesma construção, sendo feitos de feltro agulhado com tela base 100% PE. Os resultados também indicaram que a presença do encapsulamento das fibras com resina de PTFE apresentou pouca interferência na espessura e no diâmetro das fibras. O alto valor de erro associado ao diâmetro das fibras é decorrente da composição heterogênea de tamanhos presente nos meios filtrantes fibrosos, como pode ser visualizado na Figura 25.

O filtro com menor valor de constante de permeabilidade, como era esperado, foi o PE/PTFE (1,86 E<sup>-11</sup>  $\pm$  0  $\text{m}^2$ ), pois a presença da membrana aumenta a resistência à passagem do ar e, conseqüentemente, diminui a permeabilidade. Devido sua baixa permeabilidade, este também foi o tecido com maior valor de queda de pressão inicial (88,4  $\pm$  0,0 Pa). O maior valor da constante de permeabilidade (6,77 E<sup>-11</sup>  $\pm$  1,50 E<sup>-12</sup>  $\text{m}^2$ ) foi obtido pelo PE/Epitropic, quando comparado com àqueles encontrados para PE e PE/Resina PTFE, que foram semelhantes entre si. Este resultado é consistente, uma vez que este filtro apresentou o menor valor de queda de pressão inicial (22,4  $\pm$  0,5 Pa) e maior valor de porosidade (0,90  $\pm$  1,92 E<sup>-3</sup>) quando comparada à PE (0,89  $\pm$  2,3 E<sup>-3</sup>) e à PE/Resina PTFE (0,88  $\pm$  2,34 E<sup>-3</sup>), pois o maior volume de vazios aumenta a permeabilidade do filtro.

Figura 25. Distribuição de fibras dos meios filtrantes: a) PE, b) PE/PTFE, c) PE/Resina PTFE e d) PE/Epitropic



Fonte: Acervo pessoal

A maior porosidade foi obtida para a membrana de PE/PTFE ( $0,997 \pm 7,414 E^{-5}$ ), sendo 13% superior ao PE e ao PE/Resina PTFE. Ela foi menor para o tecido base de PE/PTFE ( $0,792 \pm 0,004$ ) quando comparado aos demais filtros, o que está coerente com o valor encontrado para  $k_l$ , que também foi o menor entre os meios filtrantes. O maior valor de porosidade para a membrana de PE/PTFE ocorre por ela apresentar maior volume de vazios, devido ao diâmetro médio das fibras cerca de 100 vezes menor que os demais materiais. Se realizada a média entre as porosidades encontradas para PE/PTFE (membrana e tecido base), ela seria equivalente à dos demais meios filtrantes, com valor de 0,895, porém com um desvio muito elevado (0,145) devido às grandes divergências entre os resultados encontrados para cada camada do filtro.

## 4.2. Equipamentos

Neste trabalho foram utilizadas três linhas de filtração, as quais estão apresentadas nesta subseção juntamente com seus parâmetros operacionais. Os procedimentos executados em cada linha de filtração estão apresentados na subseção 4.3.

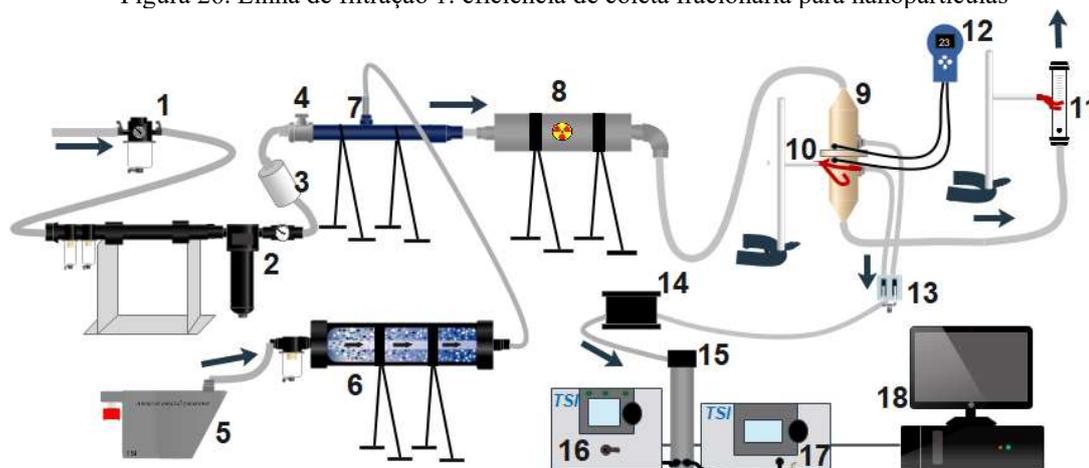
### 4.2.1. Linha de filtração 1

A linha de filtração 1, apresentada na Figura 26, é utilizada para avaliação da eficiência de coleta fracionária de nanopartículas e está disponível no LabCAM/DEQ da UFSCar.

As nanopartículas são geradas através de uma solução de  $1 \text{ g.L}^{-1}$  de NaCl por um atomizador, à uma vazão de  $142 \text{ L.h}^{-1}$  controlada por um rotâmetro acoplado ao gerador. Optou-se por trabalhar com a solução de NaCl por ela ser estável, ter alta reprodutibilidade e gerar partículas na faixa de interesse. O aerossol passa por um secador de difusão para remoção da umidade e as partículas se juntam à corrente de ar comprimido, a qual passou previamente por filtros de ar para remoção de umidade e purificação do ar, para evitar contaminações no sistema. As partículas seguem por um neutralizador de Criptônio 85 (Kr-85) para neutralização de cargas eletrostáticas, as quais poderiam interferir nos mecanismos de coleta pelo meio filtrante.

A corrente de ar com partículas neutralizadas segue então para a linha de filtração, que é composta por duas partes desmontáveis de PVC, sendo o meio filtrante, com área útil circular de  $17,57 \text{ cm}^2$ , inserido entre elas. Para fixação das duas partes foram utilizados dois alicates de pressão para solda tipo U. O suporte também possui duas entradas para monitorar a queda de pressão, uma antes e uma após o meio filtrante. Após passar pelo filtro, o ar seguiu para um rotâmetro no qual era aferida a vazão. O ajuste da vazão foi realizado pela válvula posicionada antes da entrada de aerossol na linha de ar comprimido.

Figura 26. Linha de filtração 1: eficiência de coleta fracionária para nanopartículas



## LEGENDA

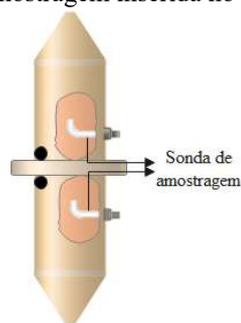
1	Filtro de ar: entrada de ar comprimido	10	Centro do suporte para posicionamento do meio filtrante
2	Filtro de ar TSI 3074B	11	Rotâmetro Gilmont D7200-D7299, número 4
3	Filtro HEPA	12	Manômetro digital Velocicalc TSI 9555-P
4	Válvula para regular a vazão de ar comprimido	13	Válvula de três vias da amostragem de partículas
5	Gerador de aerossol: Atomizador TSI 3079A	14	Neutralizador de Amerício 241 (Am-241)
6	Secador de difusão com sílica TSI 3062	15	Analisador de mobilidade diferencial (DMA) TSI 3081 longo
7	Entrada do aerossol na linha de ar comprimido	16	Classificador eletrostático TSI 3080
8	Neutralizador de Criptônio 85 (Kr-85)	17	Contador de partículas ultrafinas TSI 3776
9	Suporte para o meio filtrante	18	Computador para aquisição de dados

Fonte: Acervo pessoal

Para a contagem de partículas, duas sondas de amostragem foram posicionadas no centro do suporte de filtração, uma à montante e uma à jusante do meio filtrante, como mostrado na Figura 27. A coleta não era realizada simultaneamente e dependia do posicionamento da válvula de três vias. As partículas coletadas foram enviadas para o analisador de partículas por mobilidade elétrica (SMPS), porém antes elas passaram por uma fonte de Amerício 241 para neutralização de cargas, a fim de que elas não influenciassem nos resultados aferidos. O SMPS é composto por um classificador eletrostático, o qual possui um analisador de mobilidade diferencial (DMA) e um contador de partículas ultrafinas. Os dados do classificador e do contador de partículas foram obtidos pelo software dos equipamentos em um computador.

O valor para o ar de diluição (*sheath flow*) foi de  $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  e o da amostra (*sample flow*) foi de  $1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , estes, segundo o manual, devem ser na proporção de 10:1. O tempo que as amostras de partículas estão sendo computadas (*scan up*) e o tempo para a voltagem no classificador voltar ao valor inicial (*retrace*) foram de 300 e 15 s, respectivamente. A faixa de partículas analisadas foi de 7,37 a 299,6 nm.

Figura 27. Sonda de amostragem inserida no suporte do meio filtrante

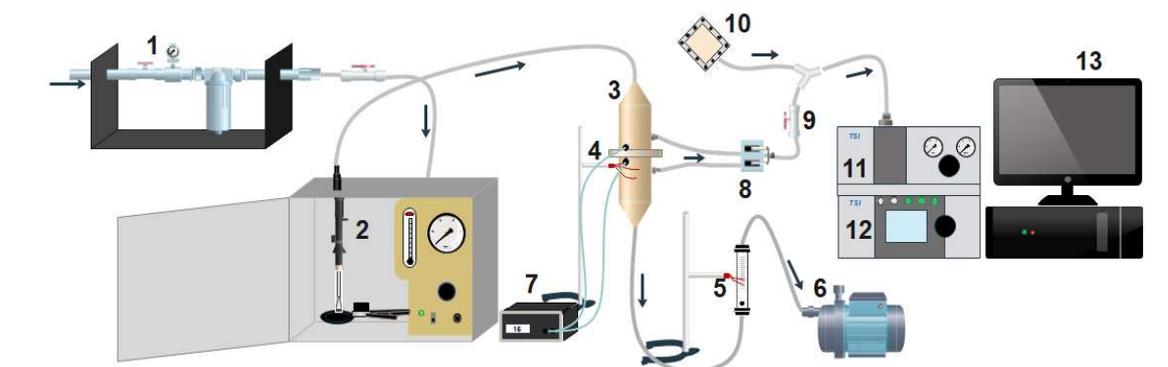


Fonte: Acervo pessoal

#### 4.2.2. Linha de filtração 2

A linha de filtração 2, apresentada na Figura 28, é utilizada para avaliação da eficiência de coleta fracionária para micropartículas e está disponível no LabCAm/DEQ da UFSCar.

Figura 28. Linha de filtração 2: eficiência de coleta fracionária para micropartículas



#### LEGENDA

1	Filtro de ar TSI 3074	8	Válvula de três vias da amostragem de partículas
2	Dispersor de pó TSI 3433	9	Válvula agulha para ajuste de vazão para coleta isocinética
3	Suporte para o meio filtrante	10	Caixa de diluição com filtro HEPA
4	Centro do suporte para posicionamento do meio filtrante	11	Diluidor de aerossol TSI 3302A
5	Rotâmetro Digiflow	12	Espectrômetro Aerodynamic Particle Sizer (APS) TSI 3320
6	Bomba de sucção à vácuo	13	Computador para aquisição de dados
7	Micromanômetro FCO12		

Fonte: Acervo pessoal

Essa linha apresenta inicialmente um filtro de sílica para remoção da umidade do ar que é direcionado para um dispersor de pó. Neste, o material particulado é depositado em um prato rotativo e succionado através de um capilar através do efeito Venturi com uma pressão de 150 inH<sub>2</sub>O. Os testes foram conduzidos em umidades ambiente de até 50%. O equipamento também possui uma corrente de ar, denominada *sheath flow*, que foi de 5 L.min<sup>-1</sup>, cuja função era

quebrar as aglomerações de pó no prato giratório. Os materiais particulados utilizados foram àqueles apresentados na subseção 4.1.1.

O ar carregando as partículas era succionado, por uma bomba à vácuo, através do meio filtrante, com área útil de 17,57 cm<sup>2</sup>, posicionado no centro do suporte de PVC fixado por 2 alicates de pressão para solda tipo U, o mesmo utilizado na linha de filtração 1. A queda de pressão foi monitorada e o ar seguiu para um rotâmetro acoplado à uma válvula para ajuste de vazão.

A coleta de partículas foi realizada por sondas de amostragem posicionadas no interior do suporte, de acordo com o posicionamento da válvula de três vias, coletando ora à montante, ora à jusante do meio filtrante. As partículas coletadas foram então succionadas através de um diluidor de aerossol, utilizado para aumentar a vida útil do espectrômetro, *Aerodynamic Particle Sizer* (APS), que mede o diâmetro aerodinâmico das partículas por intensidade de dispersão de luz. A faixa de partículas analisadas foi de 0,542 a 4,698 µm, por tempo de 60 s para cada coleta. Os dados foram obtidos pelo software do APS através de um computador.

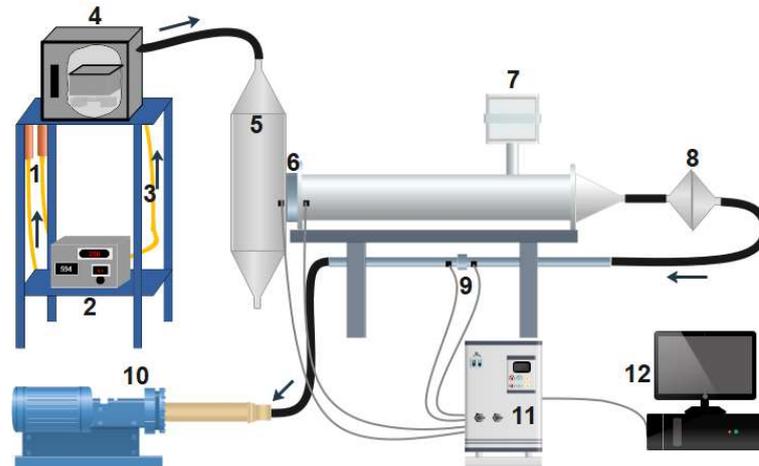
Para micropartículas foi necessário garantir a amostragem isocinética, pois elas seguem as linhas de fluxo da corrente de ar. A sonda de amostragem possui área de 0,1158 cm<sup>2</sup>, sua vazão foi aferida em um rotâmetro digital TSI 4100 posicionado entre a coleta e a válvula de três vias e o ajuste de vazão foi realizada por uma válvula agulha. Porém, uma vez que o APS succiona a uma vazão fixa de 5 L.min<sup>-1</sup>, foi necessário utilizar uma caixa de diluição com um filtro HEPA.

### **4.2.3. Linha de filtração 3**

A linha de filtração 3 foi construída com base na norma VDI 3926 e simula a operação de um filtro de mangas com limpeza por jato de ar pulsante em escala laboratorial. Ela está apresentada na Figura 29. O equipamento está disponível no LabCAm/DEQ da UFSCar.

O material particulado é disposto em um container fechado, sendo alimentado no sistema através de um parafuso giratório, que tem sua velocidade de rotação ajustada através de uma unidade de controle acoplada do alimentador de pó. O parafuso leva o pó até uma escova giratória para sua dispersão, o qual é arrastado por uma corrente de ar comprimido, como mostrado na Figura 30. O ar comprimido utilizado no equipamento inicialmente passou por filtros coalescentes da Apexfil e depois por uma coluna de sílica para remoção de umidade.

Figura 29. Linha de filtração 3: simulação de filtro de mangas em escala laboratorial

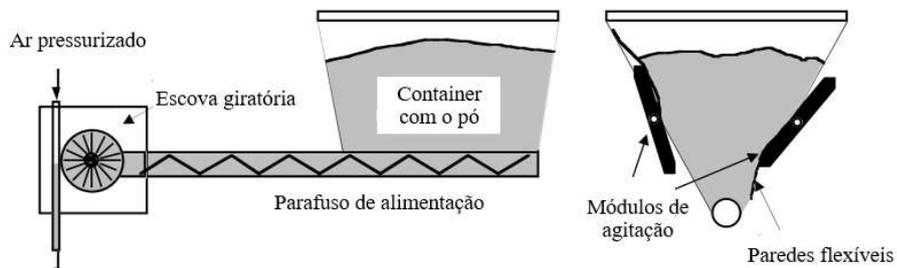


**LEGENDA**

1	Ar seco: entrada na caixa de alimentação de aerossol	7	Taque de ar comprimido para limpeza
2	Controlador da balança	8	Suporte para o filtro absoluto
3	Ar seco: entrada na balança	9	Placa de orifício
4	Compartimento com alimentador de aerossol (Dust feeder NDF100-BD)	10	Exaustor
5	Câmara de aerossol	11	Controlador
6	Suporte do meio filtrante	12	Computador para aquisição de dados

Fonte: Acervo pessoal

Figura 30. Desenho esquemático do alimentador e dispersor do alimentador de pó



Fonte: FILTEQ (2018)

O aerossol segue para uma câmara de onde é succionado através do meio filtrante por um exaustor instalado no final do equipamento. O tecido é fixado em um suporte de aço inoxidável e as partículas que passam ficam retidas em um filtro absoluto. Após passar pelo filtro absoluto o ar segue por uma placa de orifício de 4 mm e, posteriormente, para o exaustor.

O equipamento também possui um controlador conectado ao exaustor para ajuste da rotação, à transdutores que realizam a leitura da queda de pressão na placa de orifício e no meio filtrante e à um tanque de ar comprimido para limpeza do filtro que se localiza entre o suporte do meio filtrante e o filtro absoluto. Através dos transdutores localizados à montante e à jusante do meio poroso e é possível monitorar a queda de pressão ao longo do tempo. Quando a queda de pressão alcança um valor máximo pré-estabelecido, é emitido um sinal e o ar pressurizado

no tanque de limpeza é liberado em direção ao filtro no sentido oposto ao fluxo de filtração.

Após passar pelo exaustor, há uma saída de ar onde é possível medir a vazão de ar do sistema. Para isso foi utilizado o rotâmetro GF-2500 da Gilmont. O ajuste inicial da vazão é realizado de forma manual através do controlador, aumentando ou diminuindo a rotação do exaustor no inversor de frequência, até chegar no valor desejado. A queda de pressão na placa de orifício na vazão de interesse é então inserida no software de aquisição de dados. Conforme o material particulado é depositado sobre o meio filtrante, há um aumento da resistência à passagem de ar pelo mesmo e a vazão precisa ser corrigida aumentando a rotação do exaustor. Essa correção é realizada de forma automática pelo controlador, que ajusta a rotação do exaustor mantendo a queda de pressão na placa de orifício através de um controlador no qual os parâmetros de controle utilizados foram  $P = 0,0053$  e  $K_i = 0,02$ .

Os parâmetros da filtração utilizados nesta linha também foram baseados na norma VDI 3926 e estão listados na Tabela 9. Para controle da velocidade inicial, a vazão correspondente era ajustada de forma manual no início da filtração e durante a filtração o controle foi feito de forma automática. A pressão de ar comprimido no tanque de limpeza era aferida por um manômetro e o ajuste era feito de forma manual por uma válvula na saída de ar. O tempo de pulso era ajustado no software e feito de forma automática, e para controle da umidade relativa do ar, além dos filtros e colunas de sílica posicionadas na entrada de ar comprimido pelo sistema, foi utilizado um desumidificador de ar Munters HC-300.

Tabela 9. Parâmetros utilizados na linha de filtração 3

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Velocidade de filtração (m.min <sup>-1</sup> )	2 m.min <sup>-1</sup>
Diâmetro útil do meio filtrante (mm)	160
Concentração de pó no filtro (mg.m <sup>3</sup> )	5000
Pressão no tanque de ar comprimido para limpeza do meio filtrante (MPa)	0,5
Tempo de pulso de limpeza (ms)	60
Temperatura de filtração (°C)	Ambiente
Umidade relativa (% RH)	≤ 50

Fonte: Acervo pessoal

Quanto ao controle da concentração de pó no filtro, este foi feito através da mudança da velocidade de alimentação do parafuso no alimentador de pó. Foi realizada a calibração individual para cada combinação de pó e meio filtrante. Para isso um meio filtrante foi pesado, colocado no suporte de filtração da linha, em seguida um valor arbitrário de velocidade de parafuso foi utilizado e o pó foi alimentado durante um período de 5 min. Posteriormente o

meio filtrante foi novamente pesado e avaliou-se o valor de concentração que chegou no meio filtrante através da Equação:

$$C_{pó} = \frac{MF_f - MF_i}{t_f \cdot Q} \quad (24)$$

em que  $MF_f$  e  $MF_i$  são as massas do meio filtrante depois e antes da filtração, respectivamente,  $t_f$  é o tempo de filtração e  $Q$  é a vazão de ar no equipamento. A partir do valor obtido aumentou-se ou diminuiu-se a rotação do parafuso, em seguida foi dado o pulso para limpeza do filtro e repetiu-se o procedimento. Ao encontrar o valor de interesse, o experimento foi repetido mais duas vezes para confirmação do valor obtido. Essa calibração foi realizada diariamente antes do início dos experimentos, pois havia variações de um dia para o outro.

No controlador da balança, além do ajuste da velocidade do parafuso, há um controlador de pressão com medidor digital para o ajuste do fluxo comprimido do ar de dispersão, este foi mantido fixo em 0,9 MPa, pois a balança não aceita valores maiores que 1,0 MPa e valores menores diminuem a concentração de pó alimentada no sistema.

### 4.3. Procedimentos experimentais

#### 4.3.1. Eficiência de coleta fracionária

Foram realizadas as eficiências fracionárias de coleta para nano e micropartículas para os meios filtrantes virgens, sendo utilizadas as linhas de filtração 1 e 2, respectivamente. Esse experimento foi conduzido a fim de compreender a eficiência inicial dos filtros utilizados. Em ambas linhas os ensaios foram realizados com velocidade de filtração de  $2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , uma vez que este foi o valor utilizado na filtração da linha 3.

Os rotâmetros utilizados nas linhas foram aferidos para corresponder à velocidade de interesse através da Equação 2, sendo a vazão aferida corrigida de acordo com a Equação 22. Com os valores registrados pelas coletas de material particulado nas sondas de amostragem foi feito o cálculo da eficiência de coleta através da Equação 18.

No ensaio para micropartículas foi utilizado o pó de aciaria. Em cada amostra foi feito a coleta de partículas na saída e posteriormente na entrada do filtro, para não comprometer os valores coletados na saída, que poderiam ser subestimados se durante a coleta já houvesse depósito de partículas no meio filtrante. As coletas foram realizadas inicialmente com o tecido limpo ( $\Delta P_0$ ) e foram novamente realizadas mais quatro vezes na mesma amostra a cada aumento de  $10 \text{ mmH}_2\text{O}$  na queda de pressão do filtro em relação à queda de pressão inicial ( $\Delta P_0 + 10 \text{ mmH}_2\text{O}$ ,  $\Delta P_0 + 20 \text{ mmH}_2\text{O}$ ,  $\Delta P_0 + 30 \text{ mmH}_2\text{O}$ ,  $\Delta P_0 + 40 \text{ mmH}_2\text{O}$ ). A análise foi

realizada para observar o comportamento da eficiência no início da filtração e foi conduzida em duplicata.

No ensaio para nanopartículas, para cada amostra de tecido, foram realizadas 7 coletas de material particulado pelas sondas de amostragem, intercaladas entre antes e após o meio filtrante, iniciando pela coleta antes do filtro. Para nanopartículas a deposição de material particulado sobre o meio filtrante é pequena, portanto, iniciar a coleta pela entrada não afeta no valor da concentração de saída. A eficiência para cada amostra foi a média das coletas realizadas e este ensaio também foi realizado em duplicata.

#### 4.3.2. Ensaio de penetração

Na linha de filtração 2 também foram realizados os ensaios de penetração de material de *precoating* nos filtros. Nestes ensaios o calcário e a terra de diatomáceas foram utilizados como material particulado e os meios filtrantes avaliados foram: PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic. A partir da eficiência de coleta é possível calcular a penetração de partículas, que representa a fração de massa que não é coletada (HINDS, 1982; DAVID COOPER; ALLEY, 2002):

$$P_e = 1 - \eta_c \quad (25)$$

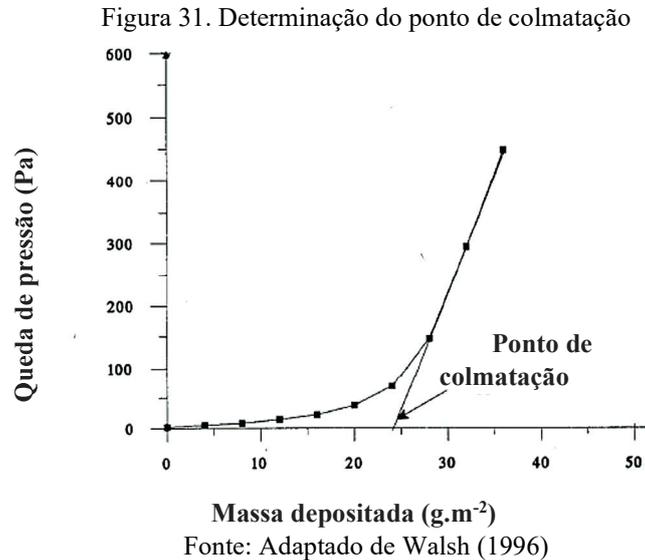
Este ensaio foi realizado pois uma das características necessárias para o uso de um material particulado como *precoat* é que ele seja depositado preferencialmente na superfície, garantindo, além de um aumento na eficiência, um aumento da vida útil do meio filtrante ao evitar bloqueio dos poros e abrasão das partículas nas fibras internas do filtro (LI; HESS; HÖFLINGER, 2003; SCHILLER; SCHMID, 2015). Dessa forma, os resultados foram comparados com àqueles obtidos com o pó de aciaria no ensaio de eficiência fracionária de micropartículas com os meios filtrantes em  $\Delta P_0$ .

#### 4.3.3. Ponto de colmatação para o pó de *precoating*

O ponto de colmatação foi realizado na linha de filtração 3 e foi o ponto de partida para estabelecer a quantidade de material de *precoat* necessária para iniciar a filtração de superfície e, conseqüentemente, obter um aumento da eficiência de coleta. A partir desse ponto, o *precoating* foi realizado com diferentes massas de deposição sobre o meio filtrante.

A colmatação foi realizada em duplicata para os pós de *precoating* de calcário nos meios filtrantes PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic. Nestes meios filtrantes e também no filtro PE/PTFE foi realizada a colmatação em duplicata com o pó de aciaria para comparação com os valores obtidos para os pós de *precoat*. A metodologia utilizada para determinação do ponto de colmatação foi proposta por Walsh (1996), sendo este obtido experimentalmente pelo ponto de

encontro do prolongamento do segmento linear da curva de filtração com o eixo das abcissas, como demonstrado na Figura 31.



Os valores de queda de pressão pelo tempo foram obtidos através dos dados do software do controlador da linha de filtração 3 e os valores de tempo foram convertidos em valores de massa por área através da equação:

$$Ma = \frac{m_c \cdot t_f}{A_f} \quad (26)$$

em que  $Ma$  é a massa por unidade de área e  $m_c$  é o valor de massa de pó por tempo de filtração, o qual é obtido na calibração de alimentação de pó no meio filtrante pela equação:

$$m_c = \frac{MF_f - MF_i}{t_f} \quad (27)$$

Para a terra de diatomáceas não foi possível obter as curvas de filtração para realização da colmatação devido à sua alta adesividade na escova dispersora de pó da alimentação. Durante sua alimentação no sistema, o material se aderiu na escova dispersora de pó da balança e a alimentação não ficava constante ao longo do tempo, havendo picos de alimentação de pó e momentos sem alimentação.

#### 4.3.4. Deposição do *precoating* sobre os meios filtrantes

A deposição de massa de *precoating* sobre os meios filtrantes também foi realizada na linha de filtração 3. O ponto de partida para a deposição de massa nos filtros foi o ponto de colmatação ( $Co$ ) para o pó de calcário. Também foram avaliadas massas de *precoating* 25% abaixo colmatação ( $0,75.Co$ ), 25% acima da colmatação ( $1,25.Co$ ) e o dobro da massa de colmatação ( $2.Co$ ). Estes pontos também foram utilizados para a deposição da terra de

diatomáceas, a fim de comparar os resultados entre os dois materiais de *precoating* e porque não foi possível obter o ponto de colmatação para a terra de diatomáceas.

Estes pontos foram avaliados para estimar a massa de revestimento necessária para garantir um bom desempenho na eficiência de coleta quando comparados ao filtro PE/PTFE. Para isso, após a deposição de *precoat*, os filtros foram levados para avaliação da eficiência de coleta fracionária de nano e de micropartículas nas linhas de filtração 1 e 2. Além disso, foi avaliada a eficiência fracionária de coleta, para micro e nanopartículas, após depositar a massa da colmatação e dar um pulso de limpeza (Co + Pulso) e após realizar 10 vezes a deposição de massa equivalente à colmatação seguida do pulso de limpeza (10 (Co + Pulso)). Estes ensaios foram realizados para avaliar o desempenho do *precoating* após o pulso de limpeza. Também foi avaliada a eficiência fracionária após 10 pulsos de limpeza (10 Pulsos) sem a alimentação de pó, a fim de observar qual o efeito do pulso sobre o tecido.

A partir dos dados da curva de colmatação, observou-se o tempo de filtração necessário para obtenção das massas de *precoat* sobre o filtro. Os meios filtrantes foram pesados antes e após a filtração e avaliou-se se a massa obtida correspondia à massa estimada para dar continuidade e avaliar a eficiência de coleta fracionária, a qual foi comparada com àquela obtida pelo meio filtrante virgem. Os revestimentos depositados no filtro foram também avaliados quanto à porosidade e a massa retida após o pulso de limpeza, obtida pela equação:

$$\text{massa retida} = MF_p - MF_i \quad (28)$$

no qual  $MF_p$  é a massa do meio filtrante após o pulso de limpeza e  $MF_i$  é a sua massa inicial.

#### 4.3.5. Porosidade do *precoating*

A porosidade do *precoating*, assim como a do meio filtrante, foi obtida pelo método indireto. As equações utilizadas foram:

- Ergun (1952):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 \mu v_s (1-\varepsilon)^2}{d_{sv}^2 \varepsilon^3} + \frac{1,75 \rho_g v_s^2 (1-\varepsilon)}{d_{sv} \varepsilon^3} \quad (29)$$

no qual  $L$  é a espessura da camada porosa,  $\mu$  é a viscosidade do gás,  $\rho_g$  é a densidade do gás e  $d_{sv}$  é o diâmetro de superfície-volume das partículas. O primeiro termo é referente aos componentes viscosos, o segundo termo é referente aos componentes inerciais e 150 e 1,75 são as constantes empíricas.

- MacDonald al. (1979):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{A \mu v_s (1-\varepsilon)^2}{d_{sv}^2 \varepsilon^3} + \frac{B \rho_g v_s^2 (1-\varepsilon)}{d_{sv} \varepsilon^3} \quad (30)$$

Este modificou as constantes empíricas de Ergun (1952) considerando a rugosidade das partículas. Dessa forma para partículas lisas (regulares):  $A = 180$  e  $B=1,8$ ; e para partículas rugosas (irregulares):  $A=180$  e  $B=4$ .

- Endo, Chen e Pui (1998):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{180 k \mu v_s (1-\varepsilon)^2}{d_g^2 \varepsilon^3 \exp(4 \ln^2 \sigma_g)} \quad (31)$$

$$k = \left( \frac{d_v}{d_{st}} \right)^2 \quad (32)$$

$$\sigma_g = \frac{d(v, 0,8413)}{d(v, 0,5)} \quad (33)$$

no qual  $d_g$  é o diâmetro médio geométrico da distribuição em volume das partículas,  $d_v$  é o diâmetro médio de volume das partículas,  $k$  é o fator de forma da partícula e  $\sigma_g$  é o desvio padrão geométrico. Este autor levou em conta o formato da partícula, acrescentando no equacionamento o fator de forma, e a não homogeneidade do material, acrescentando a influência da dispersão dos tamanhos das partículas ( $\exp(4 \ln^2 \sigma_g)$ ).

A espessura da torta foi determinada por:

$$Mc = Q \cdot t = L \cdot A_f \cdot \rho_p \cdot (1 - \varepsilon) \quad (34)$$

em que  $Q$  é a vazão de pó por unidade de tempo ( $t$ ),  $Mc$  é a massa da torta,  $A$  é a área útil de filtração (AGUIAR, 1995). Que ao ser aplicada nas equações 29, 30 e 31 resultam nas equações 35, 36 e 37, respectivamente.

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{150 \mu v_s (1-\varepsilon) Q}{d_{sv}^2 \varepsilon^3 A \rho_p} + \frac{1,75 \rho_g v_s^2 Q}{d_{sv} \varepsilon^3 A \rho_p} \quad (35)$$

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{A \mu v_s (1-\varepsilon) Q}{d_{sv}^2 \varepsilon^3 A \rho_p} + \frac{B \rho_g v_s^2 Q}{d_{sv} \varepsilon^3 A \rho_p} \quad (36)$$

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{180 k \mu v_s (1-\varepsilon) Q}{d_g^2 \varepsilon^3 \exp(4 \ln^2 \sigma_g) A \rho_p} \quad (37)$$

O diâmetro de superfície-volume, também conhecido como diâmetro de Sauter, foi obtido pelo malvern com amostras do material particulado que estava na torta formada sobre a superfície do meio filtrante. O diâmetro geométrico foi obtido a partir dos dados de distribuição volumétrica e o diâmetro de Stokes foi obtido pela equação (ALLEN, 2003):

$$d_{st}^2 = \frac{d_v^2}{d_d} \quad (38)$$

no qual  $d_d$  é o diâmetro de arraste que, para baixos valores de Reynolds, pode ser substituído pelo diâmetro de superfície  $d_s$ , o qual é obtido através da fórmula:

$$d_s = \left( \frac{d_v^3}{d_{sv}} \right)^{1/2} \quad (39)$$

#### 4.3.6. Imagens do *precoating* em MEV

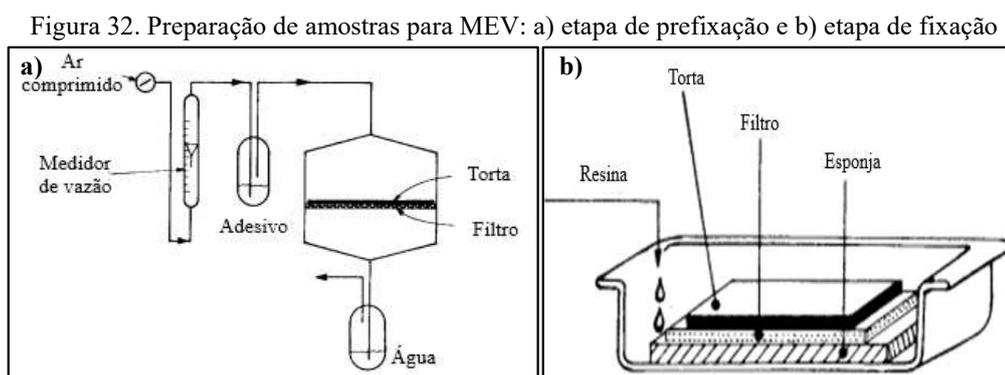
Amostras dos tecidos revestidos com o *precoat* de calcário e terra de diatomáceas, para deposições referentes ao ponto de colmatação (Co), foram preparadas conforme metodologia desenvolvida por Aguiar e Coury (1996) para obtenção de imagens no MEV sem que houvesse perda de material particulado do filtro. O procedimento consistiu em três etapas:

- **Prefixação:** a amostra de meio filtrante com *precoat* foi colocada no sistema apresentado na Figura 32a, onde o adesivo (Loctite 416) foi carregado por uma corrente de ar comprimido com uma vazão de  $0,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  que percolou através do filtro. Na saída de ar do equipamento havia um frasco de água para verificar a passagem de ar pelo sistema através da formação de bolhas e reter o excesso de adesivo.

- **Fixação com resina:** a amostra foi colocada sobre uma esponja embebida com 200 mL de loctite PMS-10E, cuja densidade é  $1,0047 \pm 0,0006 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ , acrescida de 10 gotas de catalisador de polímeros (Figura 32b). A resina penetrou pelo filtro por difusão e este foi preso com garras sobre uma placa de vidro e levado em estufa a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  por 48 h para o processo de cura.

- **Preparação final:** após a cura, os filtros foram cortados em amostras menores ( $1 \text{ cm}^2$ ). Moldes circulares de PVC foram fixados com silicone sobre uma placa de vidro revestida com papel filme e as amostras foram colocadas em seu interior na transversal. Posteriormente os moldes foram preenchidos com uma mistura de resina de poliéster da marca Du Látex (100 mL) e catalisador de polímero (60 gotas). Esperou-se o endurecimento da resina por aproximadamente 72 h em temperatura ambiente. Posteriormente as amostras foram lixadas em lixas d'água com grãos de 240, 400, 600, 1200 e 2000 e então polidas com solução de alumina  $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ , essa etapa foi realizada no Laboratório de Metais do DEMA/UFSCar.

Após o preparo, as amostras foram levadas ao LCE/DEMA para revestimento com ouro e obtenção das imagens em BSE e magnificação de 200x.



Fonte: Aguiar e Coury (1996)

#### 4.3.7. Primeiro ciclo de filtração

O primeiro ciclo de filtração foi realizado na linha de filtração 3 utilizando o pó de aciaria. Foram realizados os ciclos sem *precoating* nos meios filtrantes PE/PTFE, PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic. Também foram realizados os ciclos após a deposição do *precoating* de calcário e de terra de diatomáceas com deposições equivalentes ao ponto de colmatação (Co) obtido para o calcário. Estes foram realizados para os filtros PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic.

Os ciclos foram acompanhados pela queda de pressão ao longo da massa/área que chegava ao meio filtrante até que fosse atingida uma queda de pressão de 1000 Pa. Foram também calculados os valores de massa retida após o pulso de limpeza, a diferença entre  $\Delta P_r$  e  $\Delta P_0$  e a massa de pó de aciaria coletada sobre o meio filtrante, que foi obtida pela diferença entre a massa de torta ao final do ciclo menos a massa de *precoat* depositada. Os resultados obtidos para as curvas com e sem o *precoating* foram comparados entre si.

## 5. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados, que estão divididos em: eficiência de coleta fracionária de nanopartículas e de micropartículas, análise da colmatação, desempenho do *precoating* na eficiência de coleta e análise do primeiro ciclo de filtração para meios filtrantes com e sem a presença do *precoat*.

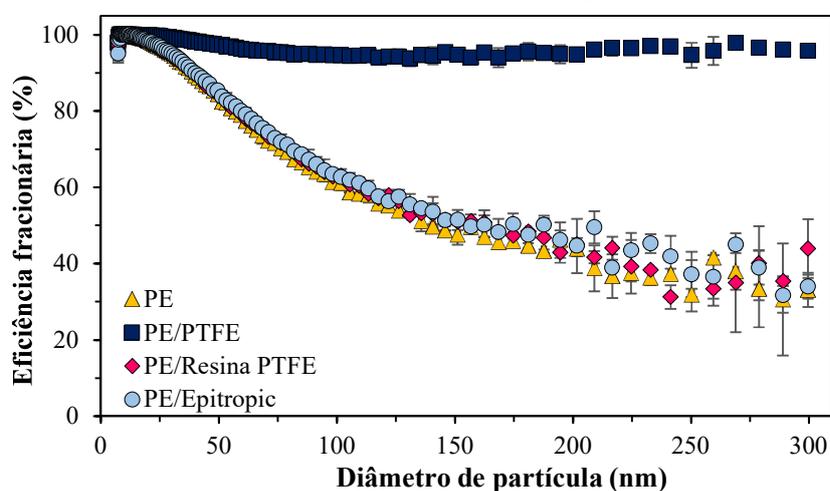
### 5.1. Eficiência de coleta fracionária

Nesta seção estão apresentadas as eficiências de coleta para nanopartículas (subseção 5.1.1), as quais foram geradas a partir de uma solução de NaCl 1 g.L<sup>-1</sup>, e a eficiência de coleta para micropartículas (subseção 5.1.2), que foi realizada com a filtração do pó de aciaria. Os ensaios foram realizados com os meios filtrantes virgens: PE/PTFE, PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic.

#### 5.1.1. Eficiência de coleta para nanopartículas

Na Figura 33 está apresentada a eficiência de coleta fracionária de nanopartículas para os meios filtrantes analisados. O filtro PE/PTFE foi o que apresentou maior eficiência, acima de 94% para toda a faixa de diâmetros analisadas. Os demais filtros apresentaram comportamento similares entre si, com alta eficiência para partículas abaixo de 50 nm, entre 80% e 100%, e um comportamento decrescente com o aumento do diâmetro da partícula, chegando a valores mínimos próximos de 20%. No entanto, essa queda na eficiência de coleta com o aumento do diâmetro também ocorreu para PE/PTFE, apesar de menos pronunciada, se mantendo acima de 99% até 31,1 nm, quando começou a cair até o limite mínimo de 94%.

Figura 33. Eficiência de coleta fracionária de nanopartículas para os meios filtrantes virgens: PE/PTFE, PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic



Fonte: Acervo pessoal

Estes comportamentos são explicados pelos mecanismos de coleta. Para diâmetros até 50 nm, o mecanismo predominante é o de difusão, o qual diminui com o aumento da partícula. Por volta de 50 nm a 500 nm há ocorrência do ponto de mínima eficiência, que varia de acordo com o material particulado a ser filtrado e o meio filtrante a ser utilizado. A partir deste ponto a interação entre a fibra e a partícula por difusão se torna mais fraca e a interceptação direta começa a atuar, esta última aumenta com o tamanho das partículas (Hinds, 1982). Os dados da Figura 33 estão de acordo com a literatura, uma vez que uma maior queda na eficiência de coleta é observada após 50 nm. Verifica-se também que para partículas maiores os desvios aumentam, fato que pode ser explicado pela competição entre os mecanismos de coleta de difusão e de interceptação.

Nos mecanismos de coleta há também a influência de outros fatores (subseção 3.3.3), um deles é o diâmetro das fibras. Tanto na interceptação quanto na difusão, a eficiência de coleta aumenta com a diminuição do diâmetro da fibra. Dessa forma, a presença da membrana de PTFE, que possui diâmetro de fibra cerca de 100x menor que os demais tecidos, sobre a superfície do filtro PE/PTFE, foi uma das principais causas para os altos valores de eficiência obtidos. Além disso, este filtro foi também o que apresentou menor permeabilidade, ou seja, uma maior resistência à passagem de fluido e a menor porosidade foi obtida para o tecido abaixo da membrana. Estes fatores também colaboram para o aumento na eficiência de coleta por interceptação, contribuindo para que grandes diferenças nos valores de eficiência fossem visualizadas quando este mecanismo começa a atuar junto com a difusão (HINDS, 1982).

A semelhança no comportamento dos meios filtrantes PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic ocorre por eles apresentarem características físicas próximas de porosidade e de diâmetro de fibras, como visualizados na Tabela 8, o PE/PTFE foi o que apresentou diferenças mais significativas.

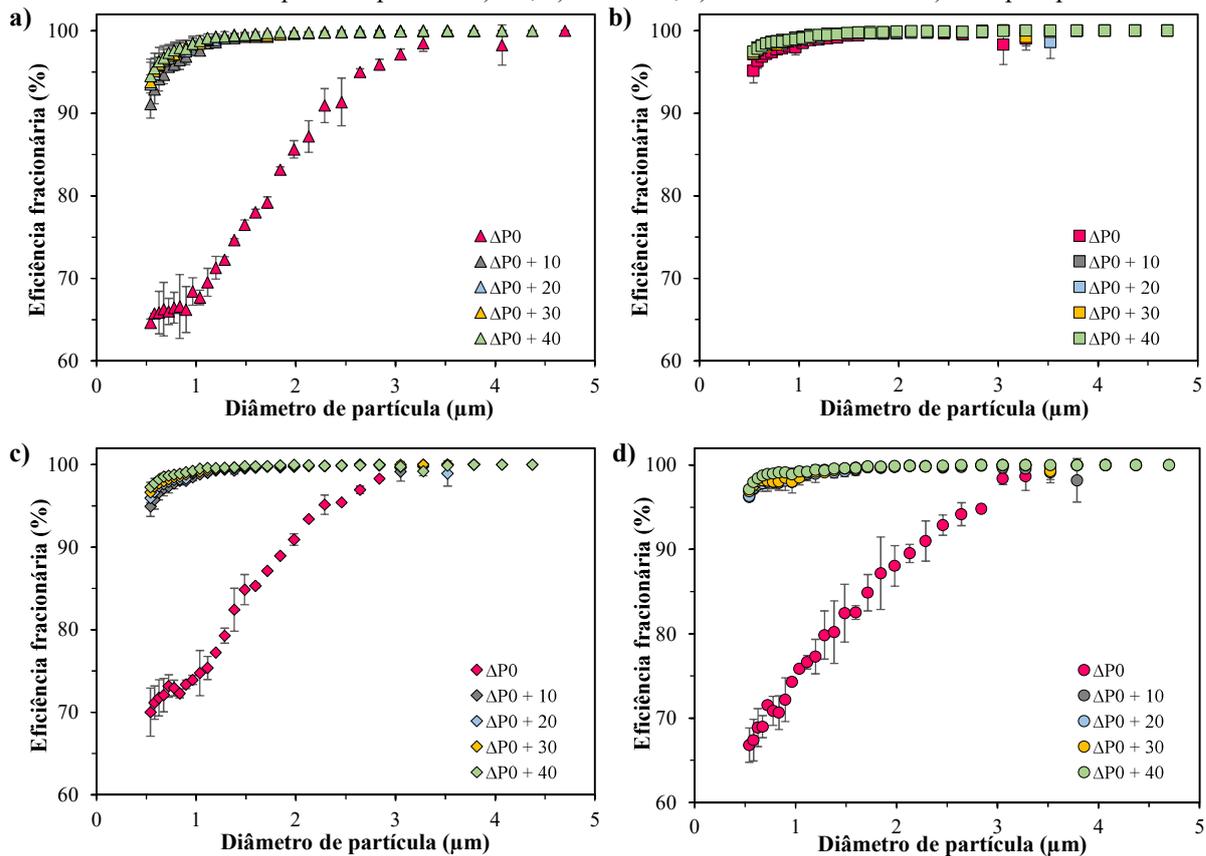
### **5.1.2. Eficiência de coleta para micropartículas**

A eficiência de coleta fracionária para micropartículas dos diferentes meios filtrantes, utilizando o pó de aciaria, está apresentada na Figura 34, a qual apresenta os valores obtidos para os meios filtrantes virgens ( $\Delta P_0$ ) e ao longo do aumento da queda de pressão ( $\Delta P_0 + 10$  mmH<sub>2</sub>O;  $\Delta P_0 + 20$  mmH<sub>2</sub>O;  $\Delta P_0 + 30$  mmH<sub>2</sub>O;  $\Delta P_0 + 40$  mmH<sub>2</sub>O).

Os filtros PE (Figura 34a), PE/Resina PTFE (Figura 34c) e PE/Epitropic (Figura 34d), quando novos, apresentaram menores eficiências de coleta quando comparado ao filtro PE/PTFE (Figura 34b), assim como observado para a eficiência de nanopartículas. Contudo, para micropartículas estes filtros chegaram a valores mínimos de até 60%, quando comparado

àquelas obtidas para nano que alcançaram valores de até 20%. Este fato é decorrente do tamanho das partículas, que quanto maiores elas forem, mais fácil de serem capturadas pelo meio filtrante (LI et al., 2019). O meio filtrante PE/PTFE apresentou valores de eficiência acima de 95% para toda a faixa de diâmetro de partículas analisada.

Figura 34. Eficiência de coleta fracionária de micropartículas para os meios filtrantes virgens ( $\Delta P_0$ ) e ao longo do aumento da queda de pressão: a) PE, b) PE/PTFE, c) PE/Resina PTFE e d) PE/Epitropic



Fonte: Acervo pessoal

A alta eficiência para PE/PTFE comparado aos demais tecidos, assim como discutido na subseção 5.1.1, ocorre devido às suas características físicas, menor permeabilidade e maior queda de pressão inicial, que impactam diretamente no aumento da resistência do meio filtrante à passagem do fluido, e também ao menor diâmetro de fibras para a membrana sobre a superfície do tecido. Estas características aumentam a eficiência de coleta pelos mecanismos de interceptação direta e de impactação inercial, os quais atuam na faixa de diâmetro analisada (0,542 a 4,698  $\mu\text{m}$ ) (HINDS, 1982). Ademais, PE/PTFE foi o que apresentou maior valor de pressão inicial ( $88,4 \pm 0,0$  Pa) devido à presença da membrana, o que também ocasionou o aumento na eficiência.

Os filtros PE/Resina de PTFE e PE/Epitropic apresentaram valores de eficiência de aproximadamente 7% superiores ao PE. Para o PE/Epitropic essa vantagem pode ser devido à

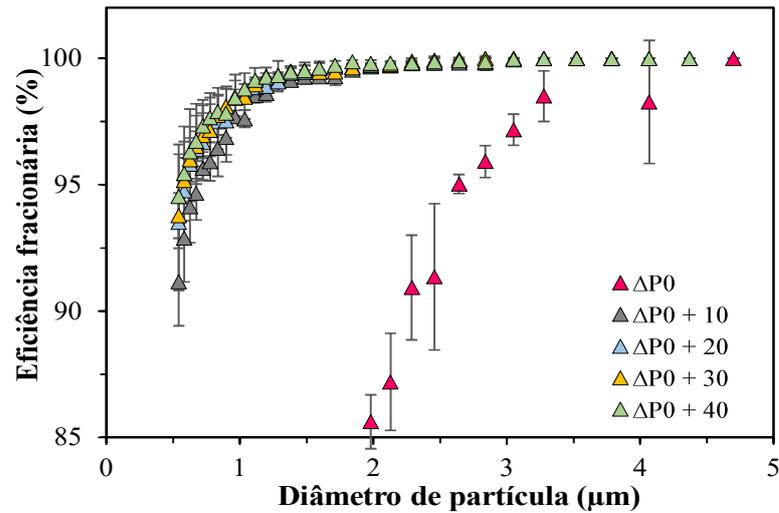
sua maior gramatura ( $600 \text{ g.m}^{-2}$ ) quando comparado ao PE ( $550 \text{ g.m}^{-2}$ ). Já PE/Resina PTFE possui maior valor de queda de pressão inicial ( $25,1 \pm 0,1 \text{ Pa}$ ), quando comparado à PE ( $23,9 \pm 0,2 \text{ Pa}$ ) e à PE/Epitropic ( $22,4 \pm 0,5 \text{ Pa}$ ). Este fato concorda com PE/Resina PTFE ter sido o que também apresentou menor porosidade e menor permeabilidade entre os três tecidos. A menor porosidade deste tecido também pode contribuir para o aumento na eficiência de coleta pelos mecanismos de interceptação e impactação inercial.

O encapsulamento das fibras com resina de PTFE também pode ter influenciado no aumento da eficiência dos filtros PE/Epitropic e do PE/Resina PTFE. Andrade (2019) comparou um filtro de poliéster com um de poliéster encapsulados com resina de PTFE, com gramaturas de 540g e observou uma melhor eficiência de coleta para àquele que possuía o encapsulamento. No entanto, neste estudo, o filtro encapsulado com a resina também possuía maior porosidade e menor permeabilidade que o filtro sem este tratamento.

Além disso, os menores valores de eficiência ocorreram para a menor faixa de partículas analisada e aumentaram com o aumento do diâmetro, chegando a valores superiores a 90% a partir  $1,98 \mu\text{m}$  para PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic. PE/PTFE também apresentou esse comportamento, porém de forma menos pronunciada, partindo de 95,16% de eficiência, para partículas com diâmetro de  $0,542 \mu\text{m}$ , e aumentando até se manter em 100%, para tamanhos de partículas acima de  $3,523 \mu\text{m}$ . Este comportamento também ocorre devido aos mecanismos de coleta. Com o aumento do tamanho das partículas há o aumento da eficiência de coleta por interceptação e a ocorrência do mecanismo de impactação inercial, no qual o aumento do tamanho das partículas também resulta no aumento de sua eficiência (HINDS, 1982).

Para todos os meios filtrantes houve um aumento da eficiência de coleta com o aumento da queda de pressão durante a filtração. Este fato já era esperado, uma vez que com a deposição de partículas há diminuição dos poros do tecido até a formação da torta de filtração, que atua como um novo meio filtrante. Com um aumento de  $10 \text{ mmH}_2\text{O}$  na queda de pressão do tecido, já foi possível obter eficiências acima de 90%. Uma ampliação para visualizar o aumento da eficiência de coleta com o aumento da queda de pressão para o filtro PE está apresentada na Figura 35.

Figura 35. Ampliação do aumento da eficiência de coleta com o aumento da queda de pressão para PE

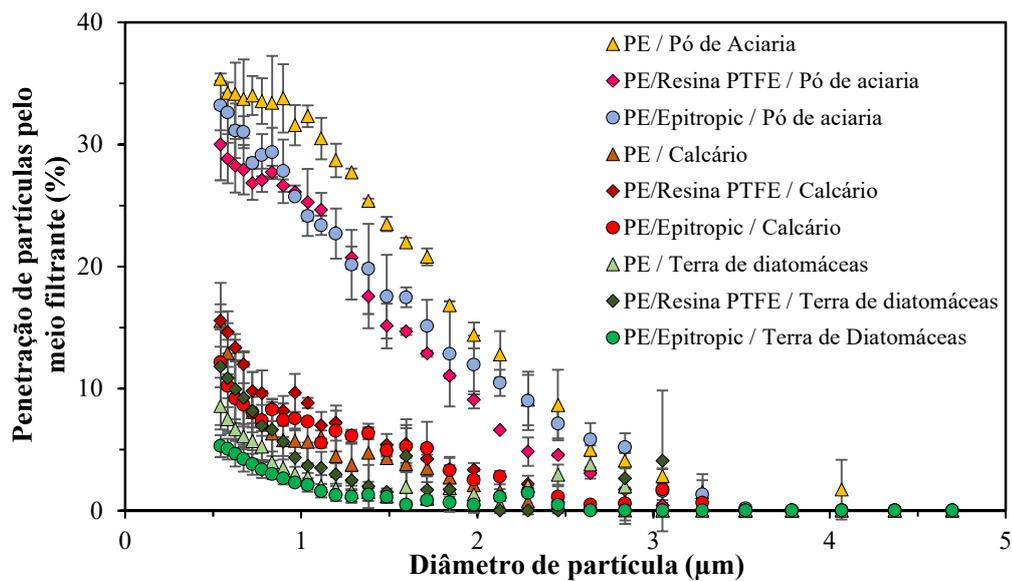


Fonte: Acervo pessoal

## 5.2. Ensaios de penetração de material particulado pelo meio filtrante

Esta seção apresenta os resultados obtidos para o ensaio de penetração dos pós de *precoat* (calcário e terra de diatomáceas) nos meios filtrantes virgens: PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic. Os resultados com os pós de *precoat* foram comparados com aqueles obtidos pelo pó de aciaria e estão apresentados na Figura 36. O filtro PE/PTFE não foi avaliado, pois devido à sua alta eficiência de coleta, ele será utilizado posteriormente apenas como um comparativo na eficiência de coleta e não passará pelo processo de precoating,

Figura 36. Penetração de partículas dos pós de *precoating* nos meios filtrantes comparadas à penetração do pó de aciaria



Fonte: Acervo pessoal

Os pós de *precoat* apresentaram uma menor penetração pelos filtros quando comparados ao pó de aciaria, apresentando valores abaixo de 20% para todos os meios filtrantes avaliados, enquanto o pó de aciaria, para partículas de até 1,0  $\mu\text{m}$  apresentou valores acima de 25%. Os resultados mostram que a terra de diatomáceas e o calcários são bons candidatos como uso no *precoating* na filtração de pó de aciaria, pois apresentaram menor penetração no filtro, consequentemente uma melhor eficiência de coleta e a possibilidade de fazerem a transição para a filtração de superfície com uma maior facilidade quando comparado ao pó a ser filtrado.

Entre os pós de *precoat*, a terra de diatomáceas apresentou menor penetração quanto comparada ao calcário. Esse comportamento pode ser justificado pela distribuição granulométrica dos materiais e pelo formato. A terra de diatomáceas possui menor diâmetro médio de partículas quando comparada ao calcário (subseção 4.1.1), apresentando, portanto, uma maior área superficial, a qual preenche mais facilmente os poros do tecido. Além disso, por possuir um formato de partículas mais alongado, se estiver na horizontal, ela poderia preencher mais rapidamente os poros do filtro e aumentar a eficiência de coleta. No entanto, estas características podem apresentar desvantagens, pois há uma maior possibilidade de entupimento do meio filtrante.

### 5.3. Ponto de colmatação

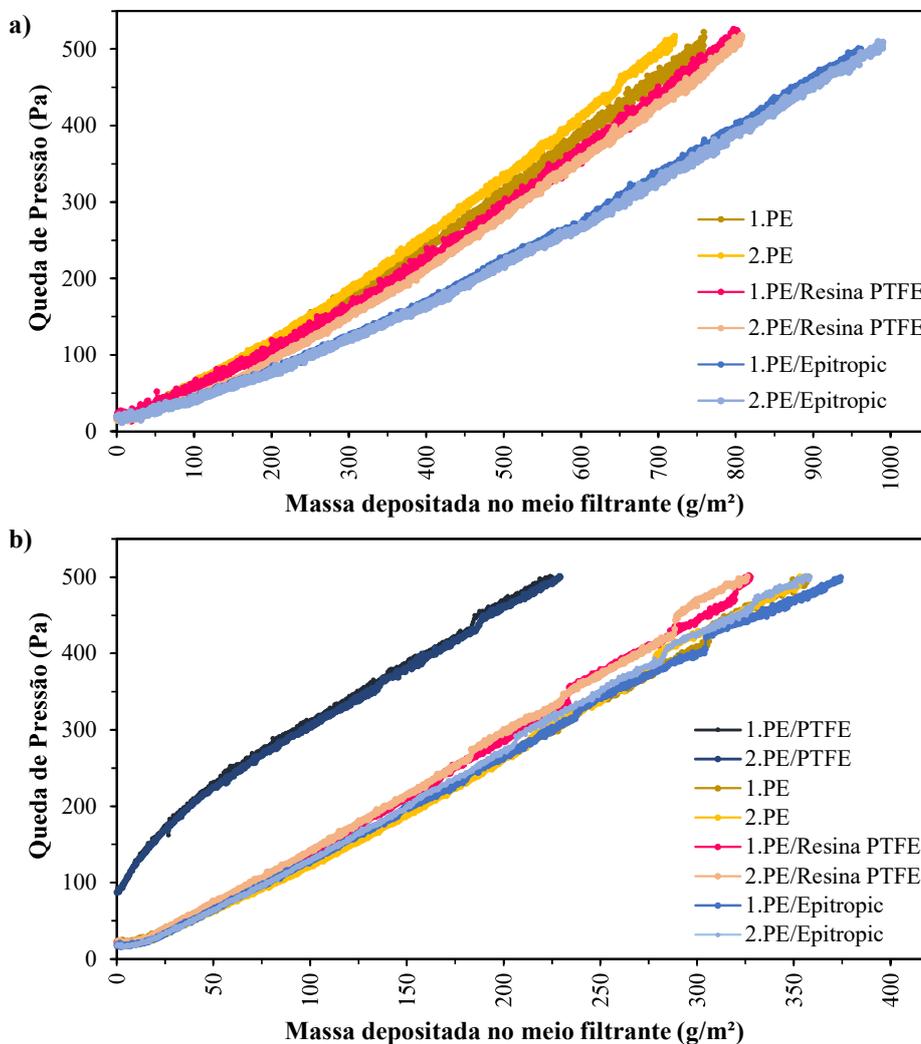
As curvas de filtração obtidas para o cálculo do ponto de colmatação para o calcário e o pó de aciaria estão apresentada na Figura 37. Foram utilizados os meios filtrantes: PE, PE/Resina PTFE, PE/Epitropic e PE/PTFE, sendo este último avaliado apenas com o pó de aciaria, uma vez que ele não será utilizado no processo de *precoating*. Para a terra de diatomáceas, como explicado na metodologia, não foi possível obter as curvas de filtração devido à sua alta adesividade na escova dispersora de pó da alimentação. Os valores da colmatação e a queda de pressão inicial dos tecidos estão apresentados na Tabela 10.

Quanto aos valores obtidos para as curvas com o calcário, PE/Epitropic apresentou o maior valor de colmatação ( $105,08 \pm 13,03 \text{ g.m}^{-2}$ ) entre os tecidos. Este fato está de acordo com os valores obtidos nas caracterizações do meio filtrante, pois este foi o filtro que apresentou maior constante de permeabilidade, maior porosidade e maior espessura quando comparado aos demais. Dessa forma, havia uma maior quantidade de espaços vazios para o material particulado preencher antes de iniciar a filtração de superfície.

PE/Resina PTFE apresentou um valor intermediário entre os filtros ( $90,34 \pm 7,31 \text{ g.m}^{-2}$ ), sendo o menor valor obtido para PE ( $63,53 \pm 5,22 \text{ g.m}^{-2}$ ). Este fato ocorre, pois apesar de PE/Resina PTFE ser um filtro mais fechado que PE, sua queda de pressão sobe mais lentamente.

No gráfico das curvas de penetração (Figura 36), verifica-se que o filtro PE/Resina PTFE apresentou uma maior penetração de material particulado quando comparado ao PE. Logo, a maior penetração do calcário em PE/Resina PTFE pode ter ocasionado o aumento do ponto de colmatação, uma vez que apesar deste tecido apresentar menor valor na constante de permeabilidade ( $5,70 \text{ E}^{-11} \pm 2,25 \text{ E}^{-12}$ ) se comparado à PE ( $5,71 \text{ E}^{-11} \pm 5,02 \text{ E}^{-13}$ ), seus valores são próximos. Outra possibilidade seria de o tratamento com resina diminuir a aderência do material particulado ao meio filtrante, impactando diretamente no aumento da queda de pressão do filtro e consequentemente na curva de filtração.

Figura 37. Curvas de massa/área ao longo do aumento da queda de pressão para obtenção do ponto de colmatação nos meios filtrantes: a) calcário e b) pó de aciaria



Fonte: Acervo pessoal

Tabela 10. Ponto de colmatação dos meios filtrantes e suas respectivas queda de pressão inicial

Meios filtrantes	Ponto de colmatação (g/m <sup>2</sup> )		Queda de pressão inicial (Pa)
	Calcário	Pó de aciaria	
PE	63,53 ± 5,22	23,34 ± 0,93	23,9 ± 0,2
PE/Resina PTFE	90,34 ± 7,31	19,04 ± 2,22	25,1 ± 0,1
PE/Epitropic	105,08 ± 13,03	20,10 ± 0,71	22,4 ± 0,5

Fonte: Acervo pessoal

Os valores da colmatação com o pó de aciaria foram inferiores àqueles obtidos para o calcário para todos os meios filtrantes avaliados. Esse comportamento deve-se ao menor diâmetro volumétrico do pó de aciaria se comparado ao calcário, apresentando, portanto, uma maior área superficial, a qual preenche mais facilmente os poros do tecido. Além disso, por possuir partículas com maior circularidade, o pó de aciaria forma uma superfície de material particulado mais compacta sobre o meio filtrante, pois as partículas preenchem mais eficientemente os espaços intersticiais e possuem uma maior superfície de contato entre si, diminuindo a porosidade e aumentando mais rapidamente a queda de pressão no filtro (CHENG; TSAI, 1998).

Para o pó de aciaria, o filtro PE/PTFE não apresenta ponto de colmatação, pois sua filtração já se inicia na superfície do tecido devido à presença da membrana. Fato também observado pelo comportamento da curva, com concavidade para baixo, que ocorre quando não há penetração das partículas pelo meio filtrante. Os demais meios filtrantes apresentaram, logo no início da filtração, curvas com concavidade para cima, que ocorre devido à presença da filtração de profundidade, ou seja, com penetração de partículas. O filtro que apresentou o maior valor para o ponto de colmatação foi o PE ( $23,34 \pm 0,93 \text{ g.m}^{-2}$ ), enquanto PE/Resina PTFE ( $19,04 \pm 2,22 \text{ g.m}^{-2}$ ) e PE/Epitropic ( $20,10 \pm 0,71 \text{ g.m}^{-2}$ ) apresentaram valores próximos entre si. PE também foi o tecido que apresentou uma menor eficiência de coleta para o pó de aciaria, como apresentado na subseção (5.1.2), enquanto os demais também apresentaram valores mais próximos entre si. Portanto, a menor eficiência de coleta de PE pode ter resultado em seu maior ponto de colmatação.

As variações das análises são decorrentes da não homogeneidade das mangas avaliadas. Elas são compostas de tecido fibrosos, nos quais as fibras são dispostas aleatoriamente e, por isso, há diferenças entre as amostras de meios filtrantes de um mesmo tecido. Para avaliação dos valores da colmatação, os valores obtidos de forma manual foram comparados àqueles obtidos pelo ajuste da parte linear das curvas, que foi realizado no Excel. O R<sup>2</sup> para todos os ajustes ficou acima de 0,98.

## 5.4. *Precoating*

O *precoating* foi realizado com o calcário e a terra de diatomáceas sobre os meios filtrantes virgens: PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic. A análise da massa de *precoating* depositada sobre os meios filtrantes está apresentada na subseção 5.4.1, a avaliação da massa retida após o pulso de limpeza está apresentado na subseção 5.4.2 e os ensaios de eficiência estão apresentados na subseção 5.4.3. O pó de aciaria foi utilizado nos ensaios de eficiência para micropartículas e a solução de NaCl 1 g.L<sup>-1</sup> foi utilizada para geração de nanopartículas. As eficiências dos filtros contendo diferentes massas de *precoating* foram comparadas com aquelas obtidas para o meio filtrante virgem e com o filtro PE/PTFE.

### 5.4.1. Deposição do *precoat* sobre os meios filtrantes

Os pós de *precoat*, calcário e terra de diatomáceas, foram depositados sobre os meios filtrantes PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic através da linha de filtração 3. Para o calcário as massas de revestimentos tiveram como ponto de partida a massa do ponto de colmatção (Co) (subseção 5.3), sendo aplicadas também massas 25% acima (1,25.Co), 25% abaixo (0,75.Co) e o dobro (2.Co) da mesma.

Para a terra de diatomáceas, como não foi possível calcular seu ponto de colmatção, as deposições foram realizadas com base no aumento da queda de pressão alcançada para as deposições do *precoat* de calcário. Por exemplo, a colmatção do calcário em PE foi de 63,53 g.m<sup>-2</sup> e para as deposições referentes à esse valor, houve um aumento de  $20,2 \pm 0,8$  Pa (diferença entre a queda de pressão final e inicial do meio filtrante), logo, a deposição de massa de terra de diatomáceas para o ponto Co foi realizada até haver um aumento de 20,2 Pa no filtro em relação à queda de pressão inicial. O mesmo procedimento foi feito para os demais pontos.

Os resultados do revestimento foram acompanhados pela massa/área obtida no filtro, o tempo para deposição e o aumento da queda de pressão com o *precoating*. As médias dos dados obtidos (duplicata) estão apresentados nas Tabelas 11, Tabela 12 e Tabela 13, alguns valores se encontram sem desvio por não haver réplica dos mesmos, ou quando este foi o valor fixado para deposição das massas de *precoat*.

Tabela 11. Dados da deposição dos *precoat* de calcário e terra de diatomáceas sobre o meio filtrante PE

<i>Precoat</i>	Massa/Área (g.m <sup>-2</sup> )		Tempo de deposição (s)		Aumento da $\Delta P$ com o <i>precoat</i> (Pa)	
	Calcário	Terra de diatomáceas	Calcário (valor fixo)	Terra de diatomáceas	Calcário	Terra de diatomáceas (valor fixo)
<b>0,75.Co</b>	51,48 ± 0,35	2,49 ± 1,41	267	86 ± 40	12,7 ± 1,4	12,7
<b>Co</b>	67,64 ± 2,11	5,47 ± 1,41	348	128 ± 6	20,2 ± 0,8	20,2
<b>1,25.Co</b>	83,81 ± 2,81	6,96	452	150	24,5 ± 1,4	24,5
<b>2.Co</b>	140,00	11,94	720	244	49,0	49,0

Fonte: Acervo pessoal

Tabela 12. Dados da deposição dos *precoat* de calcário e terra de diatomáceas sobre o meio filtrante PE/Resina PTFE

<i>Precoat</i>	Massa/Área (g.m <sup>-2</sup> )		Tempo de deposição (s)		Aumento da $\Delta P$ com o <i>precoat</i> (Pa)	
	Calcário	Terra de diatomáceas	Calcário (valor fixo)	Terra de diatomáceas	Calcário	Terra de diatomáceas (valor fixo)
<b>0,75.Co</b>	64,66 ± 0,21	3,98 ± 0,70	342	224 ± 122	19,1 ± 2,1	19,1
<b>Co</b>	90,52 ± 1,41	6,96 ± 1,41	467	143 ± 13	25,5 ± 2,8	25,5
<b>1,25.Co</b>	110,17 ± 0,35	10,44	572	296	34,3 ± 1,4	34,3
<b>2.Co</b>	188,50	14,92	1000	282	68,6	68,6

Fonte: Acervo pessoal

Tabela 13. Dados da deposição dos *precoat* de calcário e terra de diatomáceas sobre o meio filtrante PE/Epitropic

<i>Precoat</i>	Massa/Área (g.m <sup>-2</sup> )		Tempo de deposição (s)		Aumento da $\Delta P$ com o <i>precoat</i> (Pa)	
	Calcário	Terra de diatomáceas	Calcário (valor fixo)	Terra de diatomáceas	Calcário	Terra de diatomáceas (valor fixo)
<b>0,75.Co</b>	80,07 ± 2,11	2,24 ± 0,35	440	61 ± 4	7,8 ± 2,8	7,8
<b>Co</b>	111,91 ± 0,70	5,47 ± 2,11	587	83 ± 7	11,3 ± 4,9	11,3
<b>1,25.Co</b>	146,72 ± 0,70	6,96	723	132	21,1 ± 2,1	21,1
<b>2.Co</b>	245,20	13,43	1174	426	68,6	68,6

Fonte: Acervo pessoal

Com os dados apresentados nas Tabelas 11, 12 e 13, verifica-se que com o aumento da massa de *precoat* depositada nos meios filtrantes houve um aumento na queda de pressão nos filtros e foi necessário um maior tempo de deposição de calcário para alcançar a mesma queda de pressão se comparado com a terra de diatomáceas. Este fato complementa o que foi observado para os ensaios de penetração de material particulado nos meios filtrantes (subseção 5.2), no qual a terra de diatomáceas teve uma menor porcentagem de penetração quando

comparado ao calcário. Dessa forma, além de haver uma menor penetração pelo filtro, ela ocasionou um aumento na queda de pressão mais rápido que o calcário.

Há duas características físicas deste pó que podem ter contribuído para este comportamento. A primeira característica é o formato da partícula, que por ser mais alongado, como visto na subseção 5.2, durante sua deposição por entre as fibras do tecido, se estiver na horizontal, pode vir a bloquear a passagem do fluido, aumentando mais rapidamente a queda de pressão no filtro.

A segunda característica é a sua coesividade, pois ele apresentou durante seu manuseio uma maior coesão entre suas partículas, formando aglomerados, e se aderiu mais facilmente às superfícies. Seu comportamento se assemelha ao obtido para a rocha fosfática, que foi utilizada por Fagnoli (2010). O autor avaliou a porosidade da torta de filtração formada por este material particulado e comparou com a que foi obtida na filtração com talco, que assim como o calcário é menos coesivo, e a rocha fosfática foi a que apresentou uma menor porosidade, ou seja, uma torta mais compacta.

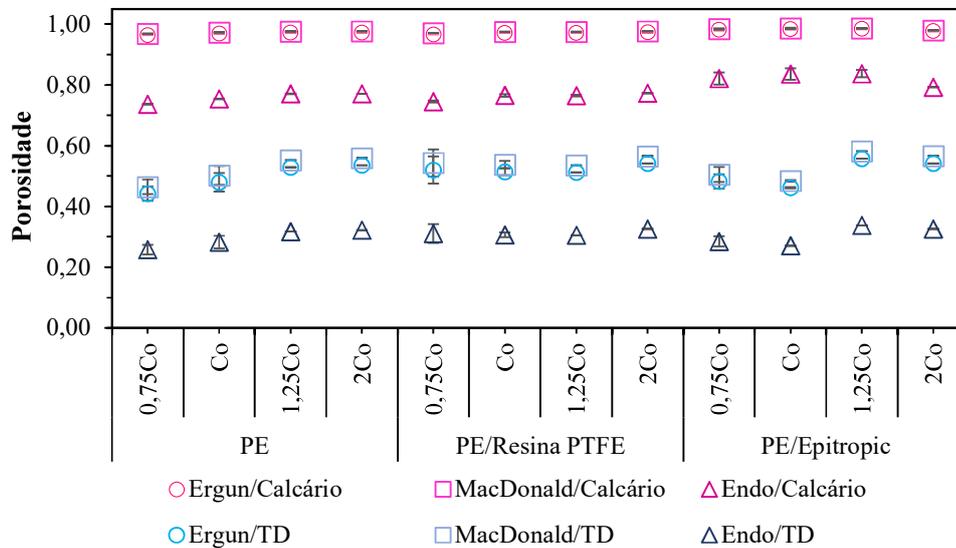
A terra de diatomáceas também apresentou menores valores de massa/área, por causa do rápido preenchimento dos poros do tecido e de sua densidade ( $2,56 \pm 0,14 \text{ g.m}^{-3}$ ) ser inferior à do calcário ( $2,89 \pm 0,03 \text{ g.m}^{-3}$ ).

Também foi avaliada a porosidade indireta para as diferentes massas de *precoat* depositadas. Ela foi realizada através das equações de Ergun modifica, MacDonald e Endo e os resultados estão apresentados na Figura 38. Os resultados encontrados estão de acordo com o que foi observado por Fagnoli (2010). O revestimento com terra de diatomáceas obteve menores valores de porosidade que o calcário. As diferenças de porosidade entre os meios filtrantes e as diferentes massas são muito pequenas. Para as equações de Ergun modificada e MacDonald a terra de diatomáceas apresentou valores entre 0,44 e 0,58 e o calcário apresentou valores entre 0,96 e 0,99. Já os resultados com a equação de Endo apresentou resultados cerca de 30% menores para a terra de diatomáceas, com valores entre 0,26 e 0,34 e valores cerca de 20% menores para o calcário, com valores entre 0,74 e 0,84.

Uma vez que o equacionamento de MacDonald é proveniente da equação de Ergun variando apenas as constantes empíricas da equação, seus valores foram muito próximos (MACDONALD et al., 1979). Quanto ao equacionamento de Endo, este foi mais divergente pois leva em conta o formato das partículas e a influência da dispersão de seus tamanhos, fatores que não são considerados nos demais equacionamentos. (ENDO; CHEN; PUI, 1998).

Estas divergências observadas em relação aos valores obtidos pela equação de Endo e a de Ergun também foram encontradas por Tanabe (2011) e Lima (2015). E Tanabe (2011) ao comparar os resultados de porosidade obtidos pelas equações de Endo e Ergun em meios filtrantes de poliéster, polipropileno e filtro metálico, a equação de Endo foi a que apresentou um melhor ajuste comparado aos resultados de porosidade obtidos experimentalmente (método direto). No entanto, a equação de Endo não apresentou um bom ajuste para filtros de celulose, os quais também foram avaliados em seu estudo.

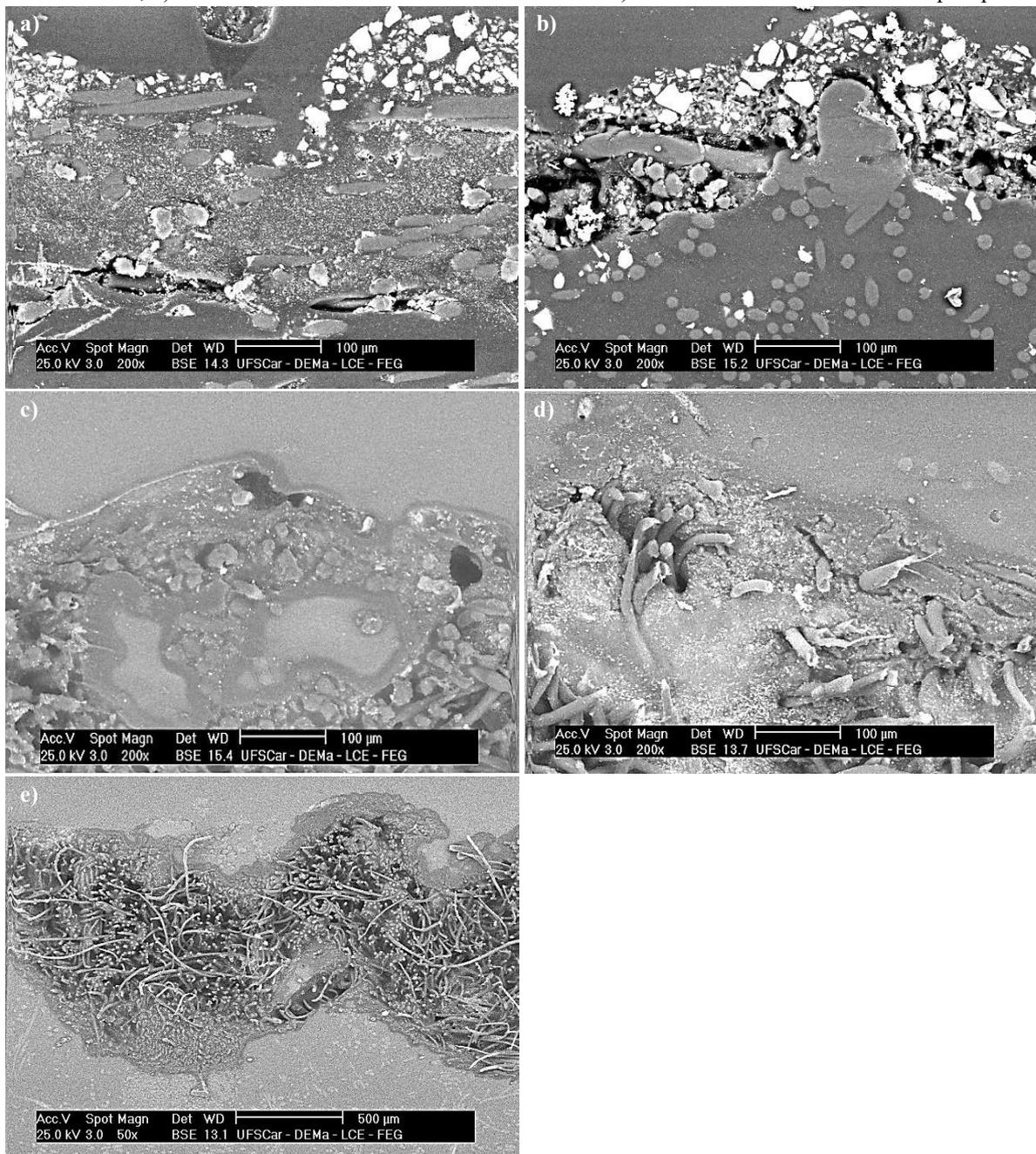
Figura 38. Porosidade indireta obtida para diferentes quantidades de *precoat* depositado sobre os meios filtrantes: PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic



Fonte: Acervo pessoal

Para o *precoat* de calcário foram obtidas imagens da deposição superficial para os filtros PE e PE/Epitropic e para a terra de diatomáceas foram obtidas imagens para PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic. As massas depositadas sobre as superfícies são as equivalentes ao ponto Co. Elas estão apresentadas na Figura 39. Pelas imagens observa-se que a deposição de calcário de fato é mais porosa e possui partículas maiores que aquelas com a terra de diatomáceas.

Figura 39. Imagens obtidas no MEV para os *precoats*, com massas equivalentes ao ponto de colmatção (Co) depositado sobre os meios filtrantes: a) calcário sobre PE, b) calcário sobre PE/Epitropic, c) terra de diatomáceas sobre PE, d) terra de diatomáceas sobre PE/Resina PTFE e e) terra de diatomáceas sobre PE/Epitropic.



Fonte: Acervo pessoal

#### 5.4.2. Avaliação da massa retida de *precoat* após o pulso de limpeza

Foram avaliadas amostras de tecido (PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic) nos quais após as deposições do *precoating* para o ponto Co, com massas de *precoat* e aumento na queda de pressão descritas pelas Tabelas 11, 12 e 13, foi realizado o pulso de limpeza. Estes ensaios foram efetuados para ambos os pós de *precoat* (calcário e terra de diatomáceas). Essa deposição seguida pelo pulso de limpeza foi denominada de Co + Pulso. Ela foi avaliada quando a massa

retida, em valor absoluto e em porcentagem, no meio filtrante após a limpeza. Também foi avaliada a massa retida, apenas em massa absoluta, para amostras em que foram realizadas 10 deposições de *precoating* para o ponto Co com 10 pulsos de limpezas intercalados, esta foi denominada de 10 (Co + pulso). Os valores de massa retida em valor absoluto para Co + Pulso e 10 (Co + Pulso) estão apresentados na Tabela 14, e os valores de massa retida em porcentagem para Co + Pulso estão apresentados na Figura 40.

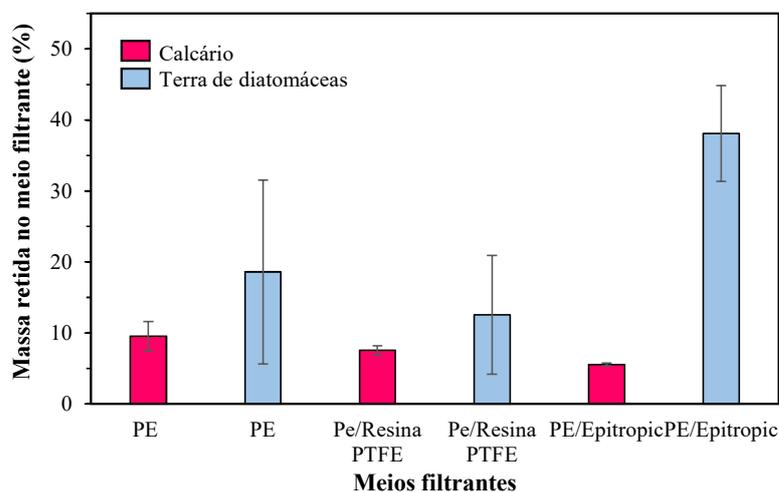
Apesar de a massa de terra de diatomáceas retida nos meios filtrantes ser inferior àquela obtida pelo calcário, como mostrado na Tabela 14, em porcentagem, a massa retida para esse material foi maior (Figura 40). Seu menor valor em gramas deve-se ao fato de a terra de diatomáceas possuir menor densidade se comparada ao calcário.

Tabela 14. Massa de *precoating* retida sobre o meio filtrante após o pulso de limpeza

Meios filtrantes	Massa de calcário (g)		Massa de terra de diatomáceas (g)	
	Co + Pulso	10 (Co + pulso)	Co + Pulso	10 (Co + pulso)
PE	0,13 ± 0,03	0,41 ± 0,06	0,02 ± 0,01	0,06 ± 0,01
PE/Resina PTFE	0,14 ± 0,01	0,39 ± 0,04	0,02 ± 0,01	0,05 ± 0,01
PE/Epitropic	0,14 ± 0,01	0,40 ± 0,04	0,03 ± 0,01	0,05 ± 0,01

Fonte: Acervo pessoal

Figura 40. Porcentagem de massa de *precoat* retida nos meios filtrantes após o pulso de limpeza

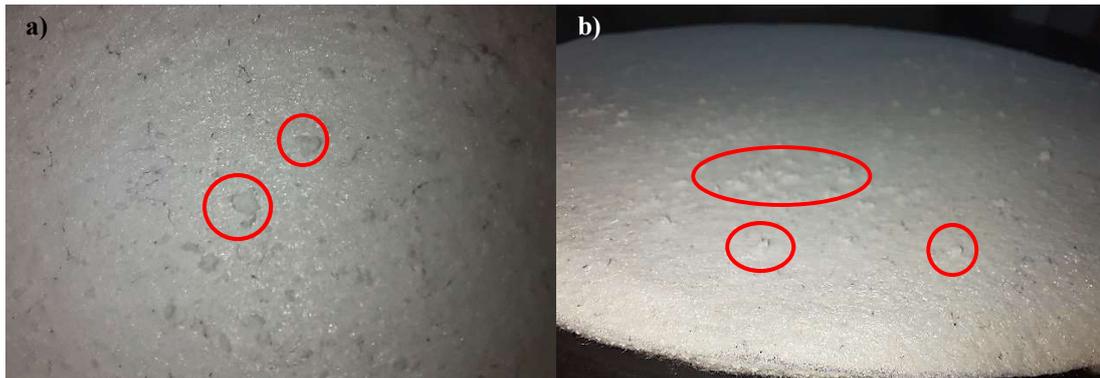


Fonte: Acervo pessoal

Após um pulso de limpeza, nos filtros com o *precoat* de terra de diatomáceas, era possível ver pequenos aglomerados de partículas na superfície, como mostrado na Figura 41. Tal fato não foi observado para o revestimento com o calcário. Sugere-se que a terra de diatomáceas possua uma maior adesão ao meio filtrante e isto ocasionou os maiores valores de porcentagem de massa retida. Além disso, como previamente mencionado, ela apresenta uma maior coesão

entre suas partículas, enquanto que o calcário não é um pó muito coesivo, fato que também impacta diretamente na massa retida sobre o meio filtrante. Quanto ao alto valor dos desvios, as baixas massas/área depositadas sobre o filtro e sua baixa densidade, acarretaram em maiores variações nas massas aferidas.

Figura 41. Terra de diatomáceas sobre a superfície do filtro PE após um pulso de limpeza: a) superfície e b) lateral



Fonte: Acervo pessoal

Quanto aos depósitos de *precoating* para 10 (Co + pulso) nos filtros, eles apresentaram maiores valores absolutos quando comparado àqueles com apenas uma deposição e um pulso (Tabela 14). Com mais deposições houve uma maior quantidade de massa retida no tecido, cerca de 3x mais se comparado aos valores obtidos para (Co + Pulso), demonstrando que em apenas uma deposição não foi possível preencher completamente os poros do filtro.

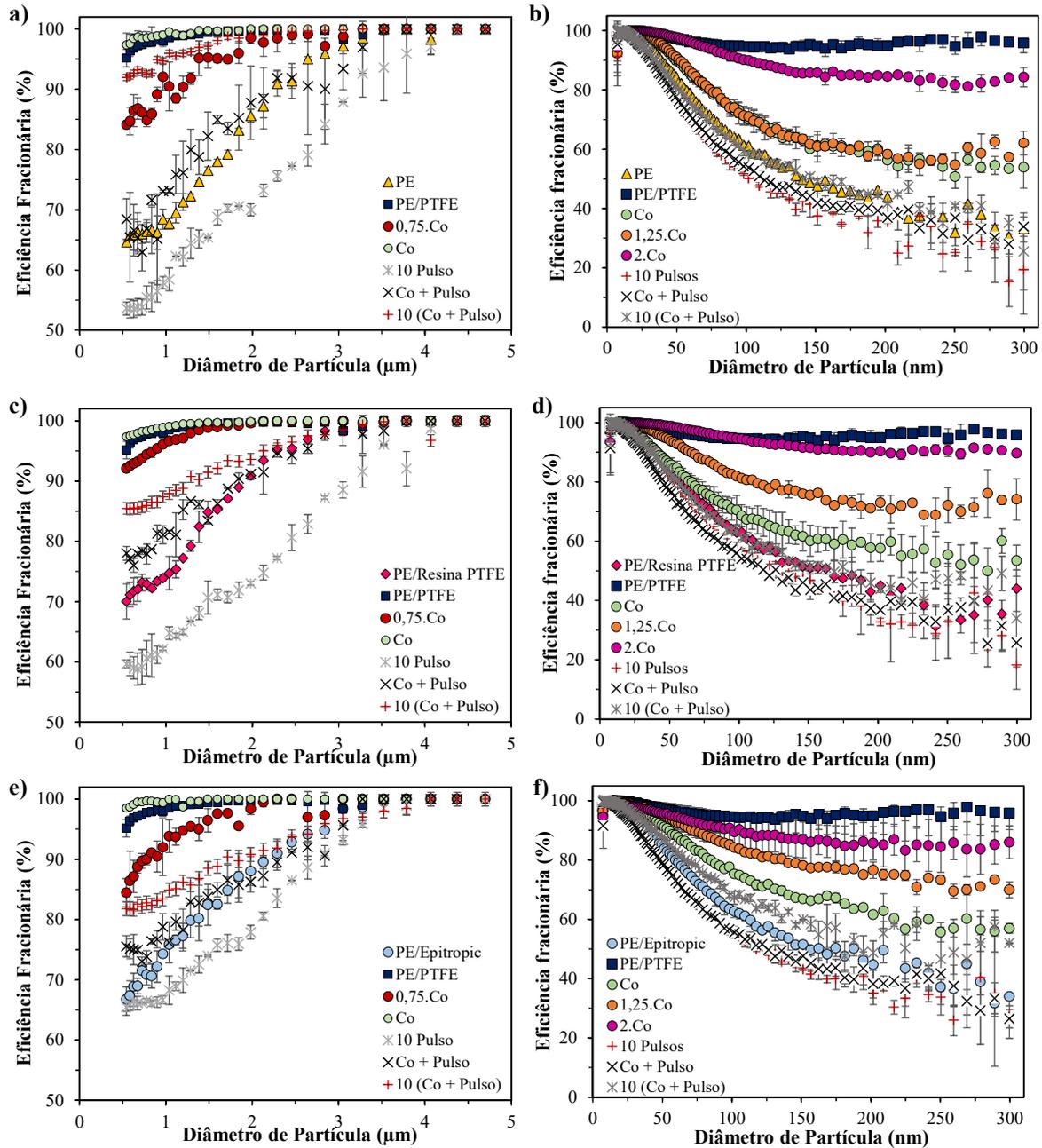
#### 5.4.3. Eficiência de coleta do *precoating*

Os filtros revestidos com o *precoat* foram avaliados quando à eficiência de coleta de nano e micropartículas nas linhas de filtração 1 e 2. Os resultados para o calcário estão apresentados na Figura 42 e os resultados para a terra de diatomáceas (TD) estão apresentados na Figura 43. Os gráficos estão separados por meios filtrantes e por diâmetro de partículas (micro ou nanopartículas), sendo que os filtros sem revestimento estão apresentados por seus nomes (PE, PE/Resina PTFE, PE/Epitropic e PE/PTFE), àqueles com revestimento estão designados de acordo com as nomenclaturas apresentadas na subseção 5.4.1 (0;75.Co; Co; 1,25.Co; 2.Co; Co + Pulso; 10 (Co + Pulso)). Também foi avaliada a eficiência de coleta para os meios filtrantes virgens que passaram por 10 pulsos de limpeza sem que houvesse nenhuma deposição de material particulado.

Os revestimentos com *precoating*, em todos os meios filtrantes, aumentaram a eficiência de coleta, quando comparado com os valores obtidos para os filtros sem revestimento, como já era esperado. Os resultados obtidos na coleta de micropartículas mostraram que os resultados

de *precoat* de calcário com massa equivalente ao ponto de colmatação (Co) apresentaram bons resultados para a eficiência de coleta, com valores superiores àqueles obtidos para PE/PTFE para todos os meios filtrantes. Portanto, não foi necessário avaliar a eficiência para os tecidos de 1,25.Co e 2.Co.

Figura 42. Eficiência fracionária de coleta dos filtros após diferentes massas de *precoat* de calcário sobre o meio filtrante: Coleta de micropartículas: (a) PE, (c) PE/Resina PTFE e (e) PE/Epitropic; coleta de nanopartículas: (b) PE, (d) PE/Resina PTFE e (f) PE/Epitropic



Fonte: Acervo pessoal

Com valores 25% abaixo do ponto de colmatação a eficiência de coleta não atingiu valores superiores ao filtro com membrana, no entanto a maior eficiência foi obtida para o

PE/Resina PTFE. Este filtro foi também o que apresentou maior eficiência de coleta sem o revestimento (subseção 5.1.2) devido sua maior queda de pressão inicial, além disso, foi o que teve maior aumento na queda de pressão com a deposição do *precoat*, como mostrado nas Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13.

Quanto às amostras em que foi realizado um pulso de limpeza após o *precoat*, não houve um incremento significativo na eficiência de coleta, sugerindo que a porcentagem de massa que ficou retida, apresentada na Figura 40, não foi suficiente. Apesar de o *precoating* não obter bons resultados quanto à eficiência após o pulso de limpeza, como indicado por Belcher e Torit (2013), 10 (Co + Pulso) apresentou um melhor desempenho, com eficiências de coleta superiores à 80%. Este resultado está coerente com os valores obtidos de massa retida após o pulso, que para 10 (Co + Pulso) foi cerca de 3x superior à Co + Pulso, o que também evidencia que são necessárias mais deposições e pulsos de limpeza para se aproximar da saturação do filtro.

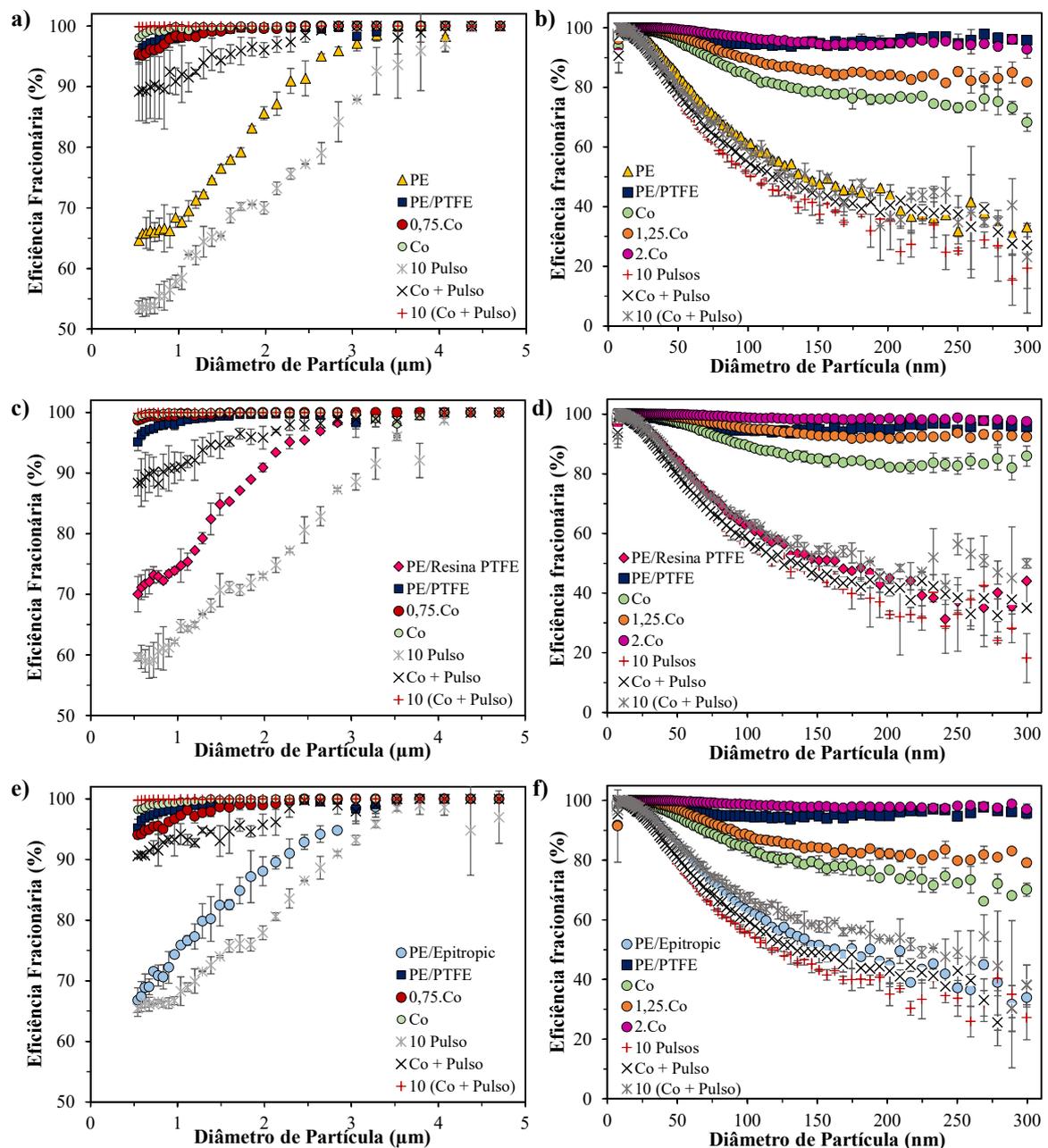
Para a eficiência de coleta de nanopartículas, após o revestimento com o calcário, com massas equivalentes à colmatação, ou massas 25% acima, não foi possível observar uma melhora significativa nos resultados. Apenas os resultados de 2.Co se mantiveram acima de 80% para todos os meios filtrantes em todos os diâmetros analisados, porém ainda não apresentou eficiência superior àquela obtida para PE/PTFE.

Quanto aos resultados após o pulso de limpeza, para nanopartículas, estes mostraram haver uma diminuição na eficiência de coleta quando comparados ao filtro sem revestimento. Ao realizar a eficiência de coleta para os tecidos nos quais foram realizados 10 pulsos de limpeza sem que houvesse uma deposição de material particulado, verificou-se que a eficiência de coleta para micro e nanopartículas diminuiu comparado com o meio filtrante virgem (sem os pulsos de limpeza). Portanto, a diminuição na eficiência de coleta para os filtros com Co + pulso e 10 (Co + Pulso) é decorrente dos desgastes nas fibras após a limpeza, que, por menores que sejam, podem vir a impactar a eficiência de coleta quando ainda não houve a saturação do meio filtrante.

Os resultados obtidos pela terra de diatomáceas (Figura 43) apresentaram comportamento semelhante àquele observado para o calcário, porém com resultados de eficiência superiores. Para micropartículas, o ponto Co, para todos os meios filtrantes avaliados, apresentou resultado superior àquele obtido para PE/PTFE, porém, 0,75.Co também apresentou resultados próximos, e para PE/Resina PTFE os valores de 0,75.Co chegaram a ser superiores ao encontrado para o filtro com membrana de PTFE.

Para nanopartículas os resultados de Co também não alcançaram os valores de PE/PTFE, porém foram superiores àqueles obtidos com o *precoat* de calcário. Além disso, 1,25.Co com terra de diatomáceas obteve valores próximos aos obtidos para o 2.Co com calcário, apresentando eficiências de coleta superiores à 79%, e no caso de PE/Resina PTFE com valores superiores à 91%. Já os resultados de 2.Co para a terra de diatomáceas apresentaram resultados comparáveis ou até melhores que aqueles obtidos para PE/PTFE, com valores mínimos de 93% enquanto PE/PTFE, sem revestimento, apresentou valores mínimos de 94%.

Figura 43. Eficiência fracionário de coleta dos filtros após diferentes massas de *precoat* de terra de diatomáceas sobre o meio filtrante: Coleta de micropartículas: (a) PE, (c) PE/Resina PTFE e (e) PE/Epitropic; coleta de nanopartículas: (b) PE, (d) PE/Resina PTFE e (f) PE/Epitropic



Fonte: Acervo pessoal

O melhor comportamento da terra de diatomáceas como *precoat* nos ensaios de eficiência de coleta, quando comparado ao calcário, pode ser justificado devido à porosidade do *precoating* formado. Como apresentado na Figura 38, o *precoat* com calcário apresentou uma porosidade cerca de 40 a 50% superior àquela obtida pela terra de diatomáceas. Como foi visto na subseção 5.4.1, as características físicas da terra de diatomáceas (menor diâmetro volumétrico, formato mais alongado das partículas e maior coesividade) colaboraram para este resultado. E quanto menor a porosidade da torta, menos permeável ela será e conseqüentemente terá uma maior eficiência de coleta.

Quanto aos resultados após o pulso de limpeza com a terra de diatomáceas, para micropartículas houve um aumento significativo na eficiência de coleta, com valores acima de 88% para todos os filtros e em toda a faixa de diâmetros analisados, quando comparado aos resultados dos filtros sem revestimento, que chegaram a atingir valores de até 60%. Para PE o pulso apresentou uma performance ainda melhor, com valores superiores à 95%. Este filtro também apresentou maior porcentagem de massa retida ( $18,59 \pm 12,95\%$ ) se comparada à PE/Resina PTFE ( $12,57 \pm 8,38\%$ ), fato que pode ter colaborado para seu melhor desempenho na eficiência de coleta.

PE também teve melhor desempenho que PE/Epitropic (com eficiência de coleta a partir de 90%), o qual apresentou um valor maior de porcentagem de massa retida ( $38,1 \pm 6,73\%$ ) se comparado à PE. Sugere-se que, como PE/Epitropic é um tecido mais poroso que PE, seria necessária uma porcentagem de massa retida ainda maior que a obtida para garantir altas eficiências de coleta após o pulso.

Os resultados de 10 (Co + Pulsos), assim como para o calcário, apresentou valores superiores aqueles obtidos por Co + Pulso e uma maior massa retida, evidenciando que com apenas uma deposição e um pulso de limpeza o meio filtrante ainda não foi saturado e houve o desprendimento do *precoat* sobre o meio filtrante. No entanto, para a terra de diatomáceas, 10 (Co + Pulso) apresentaram valores de eficiência de coleta comparáveis àquelas obtidos por PE/PTFE. Possivelmente com a terra de diatomáceas a saturação do meio filtrante é obtida mais facilmente ou este material possui uma maior força de adesão sobre o meio filtrante.

Para nanopartículas, novamente Co + Pulso apresentou valores de eficiência inferiores ao filtro limpo e 10 (Co + Pulso) apresentaram também valores inferiores ou muito próximos ao filtro virgem devido aos desgastes nas fibras ocasionados pelo pulso de limpeza.

Portando, os resultados indicaram que a deposição de *precoating* contribuiu para uma melhora na eficiência de coleta, porém ela não foi mantida após a limpeza. E, dentre os materiais de *precoat*, o que apresentou melhores resultados foi a terra de diatomáceas. Quando comparada

ao calcário, ela preencheu mais rapidamente os poros do tecido, acarretando em um aumento mais rápido na queda de pressão, um revestimento mais compacto e um melhor desempenho na eficiência de coleta. Este comportamento foi justificado devido ao seu menor diâmetro volumétrico, à sua maior coesividade e ao formato das partículas alongadas.

### 5.5. Primeiro ciclo de filtração

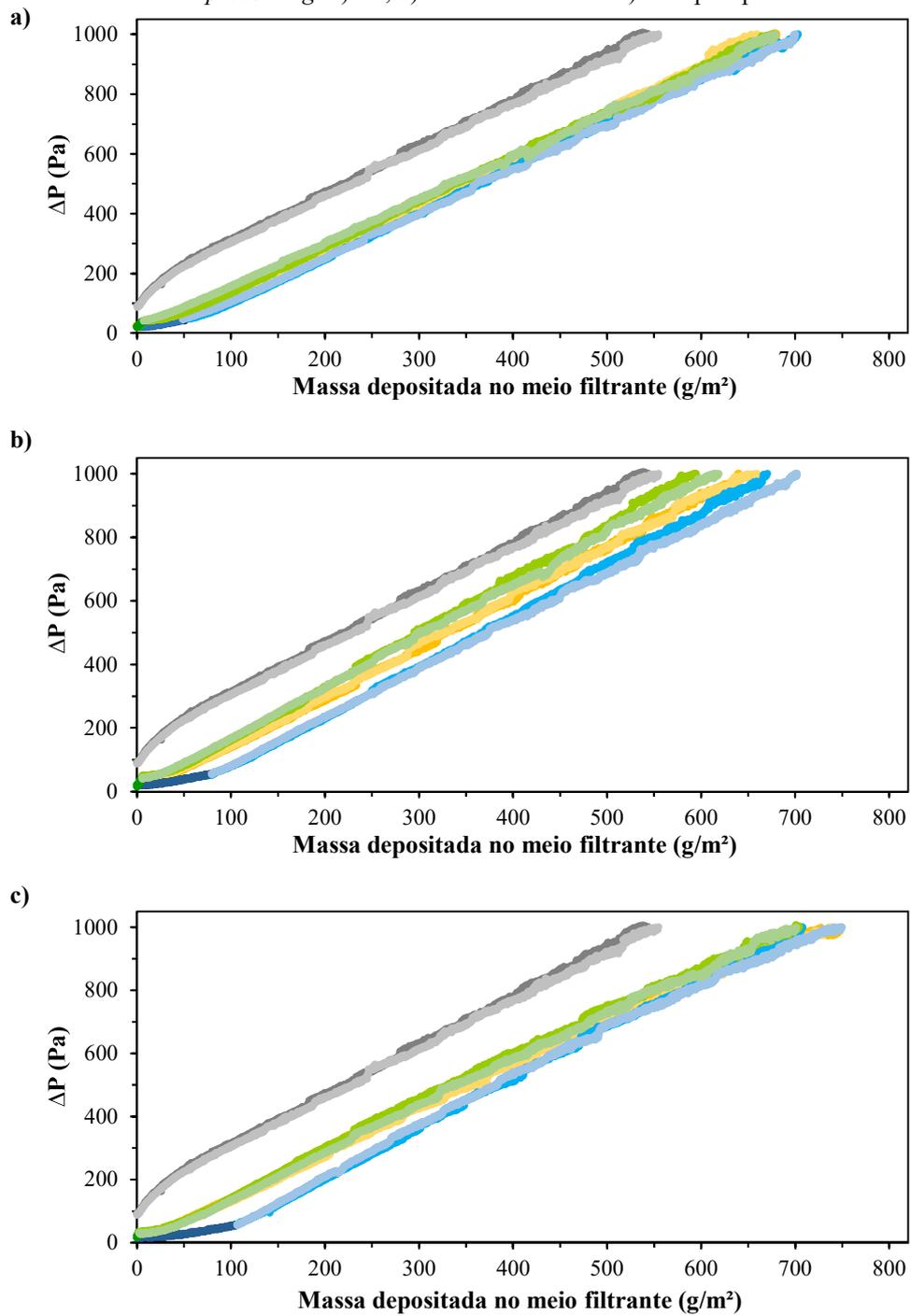
O ciclo de filtração foi realizado com o pó de aciaria para os meios filtrantes PE, PE/Resina PTFE e PE/Epitropic com e sem a presença do *precoating*. Para o meio filtrante PE/PTFE o ciclo foi realizado apenas sem a presença do *precoating* para comparação.

Os ciclos estão apresentados na Figura 44 de queda de pressão ao longo da deposição de massa sobre o meio filtrante. Os gráficos estão separados por meios filtrantes, sendo um para PE, um para PE/Resina PTFE e um para PE/Epitropic. Nos gráficos estão apresentadas as curvas (descritas como ciclo) com o *precoating* de terra de diatomáceas (TD) e calcário e também as sem *precoating*. Também foram plotados o aumento na queda de pressão com a alimentação de *precoating*, que estão designadas apenas como *precoating* e o nome do material utilizado. As curvas foram realizadas em duplicatas, representadas pelo número 1 e 2. As curvas obtidas para o filtro com a membrana foram plotadas em todos os gráficos para comparação.

O filtro com a membrana foi o que apresentou menor massa depositada sobre o meio filtrante ao obter uma queda de pressão de 1000 Pa. Este fato ocorre, pois, este filtro apresenta em sua superfície a presença da membrana, a qual colabora para que o filtro tenha uma maior queda de pressão inicial que os demais, seja menos permeável e possua uma maior eficiência de coleta. Dessa forma sua curva já se inicia com uma queda de pressão superior aos demais e com alta resistência à passagem de ar e de material particulado, o qual se deposita preferencialmente na superfície. O formato convexo da curva para PE/PTFE também é uma das evidências da ocorrência da filtração de superfície. Os demais filtros apresentaram uma curva com formato côncavo, característicos do primeiro ciclo de filtração no qual ocorre a penetração de material particulado pelo meio filtrante.

Para todos os meios filtrantes, as curvas com o *precoating* de calcário apresentaram uma tendência de ter uma maior massa depositada sobre o meio filtrante se comparada às demais curvas. Essa diferença ocorreu devido à maior densidade do calcário ( $2,89 \pm 0,03 \text{ g.cm}^{-3}$ ) se comparado à do pó de aciaria ( $2,72 \pm 0,06 \text{ g.cm}^{-3}$ ), acarretando em um maior valor de massa depositada no início da filtração se comparado com os demais ciclos.

Figura 44. Ciclo de filtração realizado com o pó de aciaria nos meios filtrantes com e sem a presença de *precoating*: a) PE, b) PE/Resina PTFE e c) PE/Epitropic



**Legenda:**

- |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| ● 1.Ciclo/sem precoating      | ● 2.Ciclo/sem precoating      |
| ● 1.Precoating calcário       | ● 2.Precoating calcário       |
| ● 1.Ciclo/precoating calcário | ● 2.Ciclo/precoating calcário |
| ● 1.Precoating TD             | ● 2.Precoating TD             |
| ● 1.Ciclo/precoating TD       | ● 2.Ciclo/precoating TD       |
| ● 1.PE/PTFE/sem precoating    | ● 2.PE/PTFE/sem precoating    |

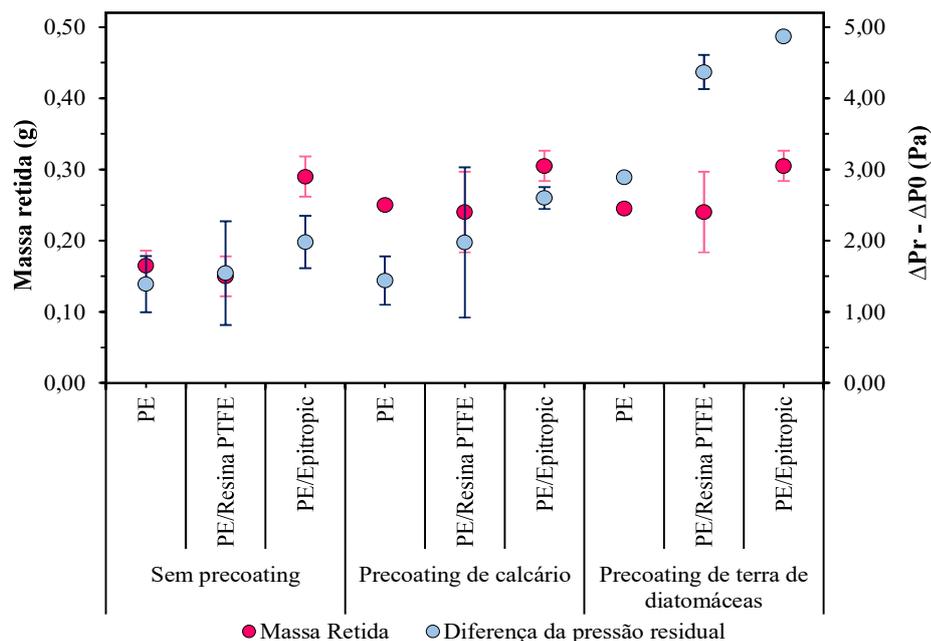
Fonte: Acervo pessoal

Para PE e PE/Epitropic a inclinação das curvas com e sem a presença de *precoating* foram muito próximas, com exceção para a curva com o *precoating* de calcário para PE/Epitropic, a qual apresentou uma inclinação diferente no início da filtração. Este filtro foi também o que apresentou maior ponto de colmatação para o calcário ( $105,08 \pm 13,03 \text{ g.m}^{-2}$ ) se comparado com PE ( $63,53 \pm 5,22 \text{ g.m}^{-2}$ ) e PE/Epitropic ( $90,34 \pm 7,31 \text{ g.m}^{-2}$ ), e essa maior massa de *precoating* depositada pode ter ocasionado essa divergência.

Já PE/Resina PTFE foi o filtro que teve maiores diferenças entre as curvas com e sem a presença de *precoating*. Isto pode ter ocorrido pois a massa de *precoating* referente à colmatação para este tecido, como apresentado na subseção 5.4.1, foi a que resultou em um maior aumento na queda de pressão no meio filtrante, com um valor de  $25,5 \pm 2,8 \text{ Pa}$ , se comparado à  $20,2 \pm 0,8 \text{ Pa}$  e  $11,3 \pm 4,9 \text{ Pa}$  obtidos para PE e PE/Epitropic, respectivamente. A tendência de aumento mais rápido na queda de pressão para os ciclos com o *precoating* de terra de diatomáceas pode ser resultante da estrutura menos permeável de revestimento ocasionada por este material.

Os valores, para o primeiro ciclo de filtração, de massa retida nos filtros após o pulso de limpeza e a diferença entre a queda de pressão residual e a queda de pressão inicial estão apresentados na Figura 45. Os resultados mostram que houve um aumento na diferença da queda de pressão no meio filtrante para os ciclos com *precoating*. Esse aumento foi acompanhado pelo aumento na massa retida após o pulso de limpeza.

Figura 45. Massa retida e diferença entre a queda de pressão residual e a queda de pressão inicial para o primeiro ciclo dos meios filtrantes com *precoating*, de calcário e terra de diatomáceas, e sem *precoating*



Fonte: Acervo pessoal

Estes resultados mostram que os materiais utilizados como *precoat* podem ter uma maior adesão ao meio filtrante se comparado ao pó de aciaria. No entanto, a longo prazo, apesar da presença do *precoating* aumentar a eficiência de coleta, este aumento na queda de pressão poderia acarretar em uma diminuição da vida útil do meio filtrante. Porém, estes valores ainda foram menores que àquele obtido para PE/PTFE que apresentou uma massa retida de  $0,20 \pm 0,00$  g e uma diferença de queda de pressão final de  $20,9 \pm 0,13$  Pa. Portanto, o uso do *precoating*, se comparado ao meio filtrante com membrana para aumentar a eficiência de coleta dos meios filtrante, é uma opção factível.

Ao comparar os materiais de *precoat* utilizados, a terra de diatomáceas foi a que apresentou maior diferença na queda de pressão final se comparado com a pressão inicial (queda de pressão residual). Esse resultado está coerente com os demais resultados obtidos, em que, devido as características de suas partículas, este material pode vir a ter uma maior adesão aos meios filtrantes e uma maior compactação do material particulado sobre a superfície. Este fato poderia ser negativo a longo prazo pois há a possibilidade de haver o entupimento dos poros e conseqüentemente uma diminuição da vida útil do filtro. Dessa forma, apesar de a terra de diatomáceas ter apresentado melhores resultados de eficiência de coleta se comparado ao calcário, ainda seria necessária uma maior investigação de seu impacto à longo prazo sobre o meio filtrante. Quanto ao calcário, este não apresentou um alto potencial de diminuição da vida útil do meio filtrante.

## 6. CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou a performance da terra de diatomáceas e do calcário como *precoat* na filtração do pó de aciaria. O *precoating* foi avaliado em três meios filtrantes distintos: PE (filtro de poliéster), PE/Resina PTFE (filtro de poliéster com fibras encapsuladas com resina de PTFE) e PE/Epitropic (filtro de poliéster com fibras Epitropic). Os resultados da filtração com *precoating* foram comparados com a filtração sem o uso dessa técnica e também com um meio filtrante com membrana de PTFE (PE/PTFE). A partir dos resultados obtidos foi possível obter as conclusões de acordo com os objetivos propostos:

i. **Obter a espessura de *precoating* que garante alta eficiência na coleta de micro e nanopartículas em filtros de baixo custo:**

Com a adição do *precoating*, houve um aumento da eficiência de coleta para micropartículas, que variou de acordo com a massa de revestimento depositada sobre os filtros, apresentando eficiências a partir de 80%. Para ambos materiais de *precoat*, o aumento na pressão equivalente ao ponto de colmatação com o calcário, apresentou eficiência de coleta para micropartículas superior àquela obtida para PE/PTFE (> 95%). Para nanopartículas, o ponto de colmatação não foi suficiente para obter eficiência de coleta superior ao filtro com membrana (> 94%), foram obtidos resultados de eficiência, com o *precoat*, a partir de 45%.

ii. **Avaliar a remoção de *precoating* após o pulso de limpeza:**

Após o pulso de limpeza há remoção do *precoat* sobre os meios filtrantes, permanecendo valores inferiores à 10% de massa retida para o calcário e inferior à 40% para a terra de diatomáceas. Após a limpeza, a eficiência de coleta de micropartículas para o *precoat* de calcário ficou muito próxima àquela obtida pelo filtro sem o *precoat*. A terra de diatomáceas apresentou um melhor desempenho, com eficiência acima de 88%, devido à sua maior porcentagem de massa retida resultante de sua alta adesão ao meio filtrante. Portanto, a adesão do material particulado ao filtro impacta diretamente no *precoating*.

iii. **Avaliar a influência do *precoating* no primeiro ciclo de filtração:**

O *precoating*, no primeiro ciclo de filtração, não impactou no tempo do ciclo, mas ocasionou um aumento na massa retida e na queda de pressão residual. Os maiores valores foram obtidos para a terra de diatomáceas devido à sua alta coesividade, formato e menor tamanho de partículas. Contudo, estes valores foram inferiores àqueles obtidos por PE/PTFE.

iv. **Compreender como as características físicas influenciam na relação do tipo de pó de *precoat* utilizado com o meio filtrante:**

A partir dos resultados observados, conclui-se que o *precoating* é uma alternativa para aumentar a eficiência de coleta em filtros de baixo custo. Quando comparada ao PE/PTFE, com ambos os pós de *precoat*, foi possível obter resultados superiores de eficiência de coleta para micropartículas e uma menor queda de pressão residual após o primeiro ciclo de filtração. No entanto, após o pulso o *precoating* é removido do tecido. Por isso é necessário: refazer o revestimento, até que ocorra a saturação do tecido, e/ou avaliar materiais com maior adesão ao filtro ou alta coesividade e menor tamanho de partículas, como a terra de diatomáceas; mas nesses casos seria necessário também uma avaliação quanto à vida útil do filtro à longo prazo.

## 7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como trabalhos futuros:

- Quantificar a adesão da terra de diatomáceas e do calcário com os meios filtrantes avaliados neste trabalho e a coesão entre as partículas, a fim de compreender a influências desses aspectos do material particulado como *precoat*;
- Avaliar a penetração dos materiais de *precoating* nos meios filtrantes em imagens do MEV, para avaliar se o *precoating* penetrou profundamente por entre as fibras ou se manteve preferencialmente na superfície do filtro;
- Realização de 100 ciclos de filtração com e sem o *precoating* de terra de diatomáceas e de calcário para avaliação da vida útil e verificar se o *precoating* de terra de diatomáceas ocasionaria a obstrução dos poros do filtro;
- Avaliar como *precoat* outros materiais com diferentes coesividades, densidades e tamanho de partículas, a fim de compreender qual característica física do material possui maior impacto como material de pré-revestimento.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINT. **Classificação, Identificação e Aplicações de Nãotecidos**. Disponível em: <[http://www.abint.org.br/pdf/Manual\\_ntecidos.pdf](http://www.abint.org.br/pdf/Manual_ntecidos.pdf)>. Acesso em: 15 nov. 2019.

AGUIAR, M. L. **Filtração de Ar em Filtros de Tecido**. 1991. Universidade Federal de São Carlos, 1991.

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

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

AIRFILTER, S. & S. **Filter Fabric Selection Guide**. Disponível em: <<http://afss.ca/filter-fabric-selection-guide/>>. Acesso em: 16 nov. 2019.

ALLEN, T. **Powder sampling and particle size determination**. Elsevier, 2003. [s.l.: s.n.]v. 1

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

BARNETT, T. Improving the Performance of Fabric Filter Dry Dust Collection Equipment. **Filtration + Separation**, n. March, p. 28–32, 2000.

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

BELCHER, M.; TORIT, D. Beyond precoating : Upgrading to premium-grade cartridge filter media. **PBE-Powder and Bulk Engineering**, n. October, p. 3, 2013. Disponível em: <[https://www.powderbulk.com/enews/2014/editorial/story\\_pdf/pbe\\_020514feature.pdf](https://www.powderbulk.com/enews/2014/editorial/story_pdf/pbe_020514feature.pdf)>.

BENNETT, K.; META, S. Advanced Separation Solutions , One of the Best Proven Methods of. **Filtration + Separation**, n. April, p. 32–33, 2000.

BORTOLASSI, A. C. C.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L. Characterization and evaluate the efficiency of different filter media in removing nanoparticles. **Separation and Purification Technology**, v. 175, p. 79–86, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2016.11.010>>.

BOUDHAN, R. et al. In fl uence of air humidity on particle fi ltration performance of a pulse-jet bag fi lter. v. 130, n. November 2018, p. 1–9, 2019.

CALDERÓN-GARCIDUEÑAS, L. et al. Combustion- and friction-derived magnetic air pollution nanoparticles in human hearts. **Environmental Research**, v. 176, n. April, p. 108567, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108567>>.

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

CASFIL. **Filtração Industrial: Tecidos Técnicos e Feltros Agulhados**. Disponível em: <[http://www.casfil.com.br/images/Folder\\_Casfil.pdf](http://www.casfil.com.br/images/Folder_Casfil.pdf)>. Acesso em: 16 nov. 2019.

CAVALCANTE, K. **Diatomáceas – as algas douradas**. Disponível em: <<https://docs.ufpr.br/~veiga/ficologia/diatomaceas.html>>. Acesso em: 31 out. 2020.

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

CHOUDHARY, A. K.; MUKHOPADHYAY, A. Media selection for pulse jet fabric filtration. **Filtration and Separation**, v. 49, n. 4, p. 34–35, 2012. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882\(12\)70197-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882(12)70197-0)>.

CHOUDHARY, A. K.; MUKHOPADHYAY, A. Particulates: Selection of cleaning pulse pressure for pulse jet fabric filtration. **Filtration and Separation**, v. 50, n. 4, p. 28–30, 2013. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882\(13\)70166-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882(13)70166-6)>.

CIRQUEIRA, S. S. R. **Avaliação do Desempenho dos Ciclos de Filtração e Regeneração Dos Meios Filtrantes Com Limpeza Por Pulso de Ar Reverso**. 2013. Universidade Federal de São Carlos, 2013.

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

CIRQUEIRA, S. S. R.; TANABE, E. H.; AGUIAR, M. L. Evaluation of operating conditions during the pulse jet cleaning filtration using different surface treated fibrous filters. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 105, p. 69–78, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2016.10.010>>.

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

CONTICINI, E.; FREDIANI, B.; CARO, D. Can atmospheric pollution be considered a co-factor in extremely high level of SARS-CoV-2 lethality in Northern Italy? **Environmental Pollution**, v. 261, p. 114465, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114465>>.

CRUZ-MATÍAS, I. et al. Sphericity and roundness computation for particles using the extreme vertices model. **Journal of Computational Science**, v. 30, p. 28–40, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jocs.2018.11.005>>.

DAVID COOPER, C.; ALLEY, F. C. **Air Pollution Control: A design Approach**. 3<sup>a</sup> ed. Long Grove, Illinois: Waveland Press, Inc., 2002.

DENNIS, R.; SUSPRENANT, N. F. **Particulate Control Highlights: Research on Fabric Filtration Technology**. Disponível em: <<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/9101YFHC.PDF?Dockey=9101YFHC.PDF>>. Acesso em: 24 nov. 2019.

DEPURFILTECH. **Análisis de mangas y simulaciones en filtro piloto**. Disponível em:

<<https://depurfiltech.es/es/laboratorio-filtropiloto>>. Acesso em: 24 nov. 2019.

DONOVAN, R. P. **Fabric filtration for combustion sources**. New York: Marcel Dekker, Inc., 1985.

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

EPA, U. S. E. P. A. **Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM)**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>>. Acesso em: 28 out. 2019.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. **Chemical Engineering Progress**, v. 48, n. 2, p. 89–94, 1952.

FARGNOLI, A. G. **Estudo da compressibilidade de tortas de filtração de gases em filtros de tecido**. 2010. Universidade Federal de São Carlos, 2010.

FELICETTI, M. A. **Investigação da influência do tamanho das partículas de materiais pulverulentos sobre a força de adesão em diferentes substratos aplicando a Técnica Centrifuga**. 2008. Universidade Federal de São Carlos, 2008.

FILTEQ, F. T. E. & S. G. **Dust Feeder NDF100-BD - Manual**Karlsruhe, 2018. .

FLEXICON. Diatomaceous earth improves filtration at desalination plant. **Filtration + Separation**, p. 40–41, 2010.

GUO, D. et al. Chemical Engineering Research and Design Diatomite precoat filtration for wastewater treatment: Filtration performance and pollution mechanisms. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 137, p. 403–411, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.06.036>>.

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

HÖFLINGER, W.; HACKL, A. Evaluation of Optimal Knife Advances for Precoat Filtration on Rotary Vacuum Filters. n. 4, p. 110–113, 1990.

JAWOREK, A. et al. Hybrid electrostatic filtration systems for fly ash particles emission control. A review. **Separation and Purification Technology**, v. 213, n. August 2018, p. 283–302, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.011>>.

KHIROUNI, N. et al. Precoating for improving the cleaning of filter media clogged with metallic nanoparticles. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 147, n. xxxx, p. 311–319, 2021.

KOCH, D.; SEVILLE, J.; CLIFT, R. Dust cake detachment from gas filters. **Powder Technology**, v. 86, n. 1, p. 21–29, 1996.

KOTHARI, V. K.; DAS, A.; SINGH, S. Filtration behaviour of woven and nonwoven fabrics. **Indian Journal of Fibre and Textile Research**, v. 32, n. 2, p. 214–220, 2007.

LECHTZIN, N. **Considerações gerais sobre o sistema respiratório**. Disponível em: <<https://www.msmanuals.com/pt/casa/distúrbios-pulmonares-e-das-vias-respiratórias/biologia-dos-pulmões-e-das-vias-aéreas/considerações-gerais-sobre-o-sistema-respiratório>>. Acesso em: 22 nov. 2019.

LEE, K. S.; SOHN, J. R.; PARK, Y. O. Filtration performance characteristics of ceramic candle filter based on inlet structure of high-temperature and high-pressure dust collectors. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 21, p. 101–110, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2014.09.004>>.

LEE, K. W.; LIU, B. Y. H. On the Minimum Efficiency and the Most Penetrating Particle Size for Fibrous Filters. **Journal of the Air Pollution Control Association**, v. 30, n. 4, p. 377–381, 1980.

LI, S. et al. Study on effects of particle size and maximum pressure drop on the filtration and pulse-jet cleaning performance of pleated cartridge filter. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 123, p. 99–104, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.002>>.

LI, X. Z.; HESS, H.; HÖFLINGER, W. Influence of operating parameters on precoat layers built up under crossflow condition. **Separation and Purification Technology**, v. 31, n. 3, p. 269–280, 2003.

LIMA, B. de A. **Avaliação do desempenho dos meios filtrantes de celulose RAD + e RAD Plus submetidos à filtração de gases a altas pressões**. 2015. Universidade Federal de São Carlos, 2015.

LIMA, W. F. **Análise da distribuição de ar em um filtro de mangas utilizando dinâmica dos fluidos computacional**. 2019. Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

LISBOA, H. de M.; SCHIRMER, W. N. Metodologia de Controle da poluição atmosférica. In: **Controle da poluição atmosférica**. I ed. [s.l.: s.n.]p. 1–93.

LU, H.-C.; TSAI, C.-J. Numerical and experimental study of cleaning process of a pulse-jet fabric filtration system. **Environmental Science and Technology**, v. 30, n. 11, p. 3243–3249, 1996.

MA, D. et al. Modification of dust removal performance of filter media by precoating technology. **Journal of Tianjin University Science and Technology**, v. 49, n. 8, p. 869–874, 2016.

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

MAY, B. et al. Filter aid selection allows modulating the vanadium concentration in beverages. **Food Chemistry**, v. 300, n. July, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125168>>.

MEIOFILTRANTE. Tecnologia De Filtro Manga Combate Poluição Atmosférica. **Meio Filtrante**, 2013. Disponível em: <[www.meiofiltrante.com.br/internas.asp?id=15171&link=noticias](http://www.meiofiltrante.com.br/internas.asp?id=15171&link=noticias)>.

MENDES, A. **Mortes devido à poluição aumentam 14% em dez anos no Brasil**. Disponível em: <<http://www.saude.gov.br/noticias/agencia-saude/45500-mortes-devido-a-poluicao-aumentam-14-em-dez-anos-no-brasil>>. Acesso em: 25 set. 2019.

MORRIS, K.; ALLEN, R. W. K. The influence of dust and gas properties on cake adhesion in fabric filters. **Filtration and Separation**, v. 33, n. 4, p. 339–343, 1996.

MORRIS, K.; ALLEN, R. W. K. **Gas cleaning in demanding applications**. 1ª 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, 2009.

ONU. **Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <<http://www.agenda2030.org.br/>>.

PACHECO, T. de A. **Filtros de manga: como obter o rendimento máximo de filtros de manga**. Disponível em: <<https://www.quimica.com.br/filtros-de-manga-como-obter-o-rendimento-maximo-dos-filtros-de-manga/>>.

PANOV, S. Y. et al. Filter material treatment methods for fine dust removal and consistent regeneration. **Chemical and Petroleum Engineering**, v. 48, n. 1–2, p. 44–49, 2012.

PARK, B. H. et al. Filtration characteristics of fine particulate matters in a PTFE/Glass composite bag filter. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 12, n. 5, p. 1030–1036, 2012.

PARK, S. et al. Non-uniform filtration velocity of process gas passing through a long bag filter. **Journal of Hazardous Materials**, v. 365, n. July 2018, p. 440–447, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.10.098>>.

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

PEUKERT, W.; WADENPOHL, C. Industrial separation of fine particles with difficult dust properties. **Powder Technology**, v. 118, n. 1–2, p. 136–148, 2001. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00304-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00304-7)>.

QIAN, Y. et al. Experimental study of the nozzle settings on blow tube in a pulse-jet cartridge filter. **Separation and Purification Technology**, v. 191, p. 244–249, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.09.037>>.

ROCHA, S. M. S. et al. The influence of the velocity of filtration in the formation and removal the dust cake. **Materials Science Forum**, v. 660–661, p. 46–51, 2010.

ROCHA, S. M. S. et al. The effect of the dust cake resistance on fluid flow passing through the filter media. **Materials Science Forum**, v. 727–728, p. 758–763, 2012.

ROCHA, S. M. S. et al. Applications of CFD techniques in the design of fabric filters. **Chemical Engineering Transactions**, v. 39, n. Special Issue, p. 1369–1374, 2014.

ROEBUCK, K.; TREMBLAY, A. Y. Highly permeable twinned alumina nanoparticles

for the precoat filtration of fine colloids. **Separation and Purification Technology**, v. 182, p. 197–206, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2017.03.045>>.

RUD, H.; MAUSCHITZ, G.; HÖFLINGER, W. Transmitted-light microscopy - a new method for surface structure analysis of cleanable non-woven dust filter media. **Journal of Hazardous Materials**, v. 144, n. 3, p. 742–746, 2007.

SANCHEZ, J. R. et al. Comparative study of different fabrics in the filtration of an aerosol using more complete filtration indexes. **Filtration and Separation**, v. 34, n. 6, p. 593–598, 1997.

SCHILLER, S.; HELLMICH, C.; SCHMID, H. J. Evaluation of the Efficiency of Filtration Processes Using Precoat Materials. **Chemical Engineering and Technology**, v. 39, n. 3, p. 491–498, 2016.

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

SCHILLER, S.; SCHMID, H. J. Highly efficient filtration of ultrafine dust in baghouse filters using precoat materials. **Powder Technology**, v. 279, p. 96–105, 2015.

SCHILLER, S.; SCHMIDT, H. J. Hocheffiziente feinstaubabscheidung aus kleinf Feuerungsanlagen mit einem schlauchfilter. **Chemie-Ingenieur-Technik**, v. 85, n. 8, p. 1324–1328, 2013.

SCHMIDT, E.; LÖFFLER, F. Preparation of dust cakes for microscopic examination. **Powder Technology**, v. 60, n. 2, p. 173–177, 1990.

SCOPUS a. Levantamento de artigos publicados com preconting em filtros de mangas: (title-abs-key ((precoat\* or "aid filter" or "filter aid" or precoat ) and ( "filter media" or "fabric filter" or "filter fabric" or "cake" or "patchy cleaning" or "fibrous filter" or filtration) and not ( "bag filter" or "filter bag" or baghouse or " synthesis of zeolite" or "vacuum filtration")) and ( exclude ( subjarea,"arts" ) ) and ( exclude ( subjarea,"vete" ) ) and ( exclude ( subjarea,"neur" ) ) and ( exclude ( subjarea,"heal" ) ) ). Refinado por: Tipo de documento: article. Disponível em: <<https://www-scopus.ez31.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em 20 fev. 2021.

SCOPUS b. Levantamento de artigos publicados com preconting em filtros de mangas: (title-abs-key ( precoat\* or "aid filter" or "filter aid" or precoat ) and ( "bag filter" or "filter bag" or baghouse or "pulse jet" or "pulse-jet" or "filter media" or "fabric filter" or "filter fabric" or "dust cake" or "patchy cleaning" or "fibrous filter" ) and not ( water or "wastewater" or effluent or beer or liquid or "vacuum filtration" or juice or wine or "lube oil" or " synthesis of zeolite" or lubrication ) and ( exclude ( subjarea , "immu" ) ) ). Refinado por: Tipo de documento: article. Disponível em: <<https://www-scopus.ez31.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em 20 fev. 2021.

SENTMANAT, J. M. Engineering Principles of Precoating. **International Filtration News**, n. April, p. 1–8, 2013. Disponível em: <[http://www.filterconsultant.com/images/LFS\\_EngineeringPrinciplesOfPrecoating.pdf](http://www.filterconsultant.com/images/LFS_EngineeringPrinciplesOfPrecoating.pdf)>.

SEVILLE, J. P. K. **Gas cleaning in demanding applications**. 1ª ed. London: Blackie Academic & Professional, 1997.

TANABE, E. H. **Desempenho de meios filtrantes na filtração de gases a altas pressões**. 2011. Universidade Federal de São Carlos, 2011.

TELEANU, D. et al. Impact of Nanoparticles on Brain Health: An Up to Date Overview. **Journal of Clinical Medicine**, v. 7, n. 12, p. 490, 2018.

THECARYCOMPANY. **Guardian Precoat Powder for Filter Bags**. Disponível em: <<https://www.thecarycompany.com/guardian-precoat-powder-for-filter-bags-21bgpp>>. Acesso em: 29 out. 2019.

U.S., AIR FILTRATION, I. **Precoat Systems**. Disponível em: <[https://www.usairfiltration.com/precoat\\_systems.htm](https://www.usairfiltration.com/precoat_systems.htm)>. Acesso em: 29 out. 2019.

UPC, U. P. C. **BENEFITS OF USING PRECOAT FILTER AID IN YOUR BAGHOUSE?** Disponível em: <<https://www.unitedprocesscontrol.com/2017/06/12/benefits-using-precoat-filter-aid-baghouse/>>. Acesso em: 29 out. 2019.

VOSTRČIL, J.; TESÁŘIK, I. A study on the possibility of the water purification by means of the precoat filtration. **Water Research**, v. 6, n. 11, p. 1367–1376, 1972.

VOUILLOUD, A. A.; SALA, S. E.; SABBATINI, M. R. Diatomeas perifíticas de la cuenca del Río Sauce Grande (Buenos Aires, Argentina). **Iheringia - Serie Botanica**, v. 60, n. 1, p. 77–89, 2005.

WADELL, H. Volume, shape, and roundness particles. **The Journal of Geology**, v. 40, n. 5, p. 443–451, 1932.

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

WHO. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. p. 121, 2016. Disponível em: <<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-eng.pdf?sequence=1>>.

WHO. **World Health statistics 2018: monitoring health for the sustainable development goals (SDGs)**. [s.l: s.n.]

WIESLANDER, P.; FRANCIS, S. L. Cost Effectively Increasing the Filtration Area in Fabric Filters for Large Power Plants. **Electrostatic Precipitation**, v. 2, p. 443–448, 2009.

ZHU, Y. et al. Association between short-term exposure to air pollution and COVID-19 infection: Evidence from China. **Science of the Total Environment**, v. 727, n. December 2019, p. 138704, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138704>>.