

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

BÁRBARA KAROLINNE SILVA ARAÚJO ANDRADE

**PRECOATING EM FILTRO DE MANGAS PARA REMOÇÃO
DE MATERIAL PARTICULADO E POTENCIAL REDUÇÃO
DA EMISSÃO DE SO₂ NA DESSULFURIZAÇÃO**

São Carlos -SP
2023

BÁRBARA KAROLINNE SILVA ARAÚJO ANDRADE

**PRECOATING EM FILTRO DE MANGAS PARA REMOÇÃO
DE MATERIAL PARTICULADO E POTENCIAL REDUÇÃO
DA EMISSÃO DE SO₂ NA DESSULFURIZAÇÃO**

Defesa para obtenção do título de doutora em
Engenharia Química.

Orientação: Prof^a. Dr^a. Mônica Lopes Aguiar
Co orientação: Prof^o Dr^o Rafael Sartim

São Carlos -SP
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Bárbara Karolinne Silva Araújo Andrade, realizada em 25/05/2023.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Mônica Lopes Aguiar (UFSCar)

Profa. Dra. Vádila Giovana Guerra Béttega (UFSCar)

Prof. Dr. Eduardo Hiromitsu Tanabe (UFSM)

Profa. Dra. Sandra Mara Santana Rocha (UFES)

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

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

Para voar é preciso ter coragem para enfrentar o terror do vazio. Porque é só no vazio que o voo acontece. O vazio é o espaço da liberdade...

Fiódor Dostoiévski

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Mônica pela orientação, todo apoio e amizade, ao Rafael Sartim pela orientação e pelas oportunidades concedidas. Aos professores Vádila, Eduardo, Olímpio, Simone e Sandra por aceitarem fazer parte da banca e por todas as contribuições.

À ArcelorMittal pelo apoio financeiro e fornecimento dos materiais.

Aos meus pais, Josiel e Goreti, por todo apoio e amor. À minha irmã, Raíssa, que compartilha todos os momentos comigo, por todo amor e amizade.

Aos alagoanos, Thalyne, Karla, Pedro, Neto e Edie, por terem sido um aconchego e uma família em todos esses anos. À tia Sônia, tio Braga e à tia Creuza por todo carinho e ajuda. E aos agregados Guilherme, Luana e Lorena pela amizade e tantas boas lembranças.

A todos que fizeram parte da salinha ao longo desses anos, em especial a Turma da Monica, foi muito bom compartilhar o dia a dia, conhecimentos, risadas e amizade com vocês. Ao Bruno Lima por tanto ter me ajudado e ao Marcos por todo suporte no laboratório.

À Thalyne, Dani e Jana pela amizade, histórias, risos, lágrimas, horas de conversas, passeios, conselhos e todo carinho.

Aos demais amigos do DEQ, da academia e de São Carlos por dividirmos tantos momentos felizes juntos e terem tornado todos esses anos em uma experiência incrível.

À Carol pela ajuda, mentoria e pela oportunidade de fazer algo que amo.

À todos que enriqueceram minha vida de bons momentos e conhecimento nos 6 anos em São Carlos.

RESUMO

A siderurgia é responsável por gerar poluentes que precisam ser tratados antes de serem liberados para atmosfera, diversos gases como amônia, benzeno, monóxido de carbono, dióxido de enxofre e materiais particulados. Para realizar a limpeza dos materiais particulados, o gás sujo passa por equipamentos de separação gás-sólido, como os filtros de mangas que possui alta eficiência de coleta para uma ampla faixa granulométrica e fácil operação. Para aumentar a eficiência de coleta dos filtros de mangas, algumas indústrias utilizam um pré-tratamento nas mangas denominado *precoating*, que consiste em recobrir a superfície de meios filtrantes de não-tecidos com determinado material particulado formando uma fina camada de pó que aumenta o tempo de saturação das mangas. Além dos benefícios na filtração, a cal hidratada presente na camada do *precoating* poderia ser investigada na remoção ou diminuição de dióxido de enxofre, a fim de reduzir a visibilidade de gases em chaminés. Entretanto, estudos sobre o *precoating* e a influência dos parâmetros operacionais em filtro de mangas no tratamento de gases da sinterização são raros. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência do *precoating*, variando a sua umidade e espessura, na filtração de gases e a dessulfurização de gases da siderurgia. Para tal finalidade, no Capítulo 2 foram avaliados os parâmetros de espessura e umidade da camada de *precoating* na eficiência de coleta de micro e nanopartículas; no Capítulo 3 foram avaliados os mesmos parâmetros em 50 ciclos de filtração; e, no Capítulo 4 foi avaliada a eficiência da cal hidratada em uma unidade de dessulfurização de gases. Os resultados mostraram que o *precoating* aumentou a eficiência de coleta para micro e nanopartículas em até 3%, aumentou o tempo de ciclo em até 9000s e que a cal hidratada apresentou 100% de absorção de dióxido de enxofre em sistema batelada.

Palavras-chave: *precoating*; filtração; material particulado; sinterização.

ABSTRACT

The steel industry is responsible for generating pollutants that need to be treated before being released into the atmosphere, various gases such as ammonia, benzene, carbon monoxide, sulfur dioxide and particulate matter. To carry out the cleaning of particulate matter, the dirty gas passes through gas-solid separation equipment, such as bag filters, which have high collection efficiency for a wide granulometric range and easy operation. To increase bag filter collection efficiency, some industries use a bag pre-treatment called precoating, which consists of covering the surface of non-woven filter media with a certain particulate material, forming a fine layer of dust that increases the time mango saturation. In addition to the benefits in filtration, the hydrated lime present in the precoating layer could be investigated in the removal or reduction of sulfur dioxide, in order to reduce the visibility of gases in chimneys. However, studies on precoating and the influence of operating parameters in bag filters in the treatment of sintering gases are rare. Thus, this work aims to evaluate the efficiency of precoating, varying its humidity and thickness, in the filtration of gases and the desulphurization of gases from the steel industry. For this purpose, in Chapter 2, the parameters of thickness and humidity of the precoating layer were evaluated on the efficiency of collecting micro and nanoparticles; in Chapter 3 the same parameters were evaluated in 50 filtration cycles; and, in Chapter 4, the efficiency of hydrated lime in a gas desulphurization unit was evaluated. The results showed that precoating increased the collection efficiency for micro and nanoparticles by up to 3%, increased the cycle time by up to 9000s and that hydrated lime showed 100% absorption of sulfur dioxide in a batch system.

Keywords: precoating; filtration; particulate matter; sintering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Porcentagem de penetração das partículas.....	5
Figura 2 - Mecanismos de coleta.....	7
Figura 3 - Determinação do ponto de colmatação.....	9
Figura 4 - Unidade experimental de permeabilidade.....	18
Figura 5 - Unidade experimental de filtração com contador de micropartículas.....	19
Figura 6 - Unidade experimental de nanopartículas.....	20
Figura 7 - Curvas de concentração em massa: a) cal hidratada; b) pó de sinterização primária.....	28
Figura 8 - Concentração volumétrica: a) cal hidratada; b) pó de sinterização primária.....	28
Figura 9 - Pó de sínter: a) 500 vezes de aumento b) 2500 vezes de aumento.....	29
Figura 10 - Caracterização das amostras de cal hidratada úmidas: a) de 0 à 20 μm b) ampliação de 0 à 6 μm	30
Figura 11 - Curvas de adsorção e dessorção das amostras da cal hidratada.....	31
Figura 12 - Formação de grânulos com a umidade.....	32
Figura 13 - Imagens da cal hidratada úmida: a) Seca 0% b) 5 % c) 10% e d) 15%.....	33
Figura 14 - Imagens do poliéster: a) ampliação de 50 vezes; b) ampliação de 200 vezes.....	34
Figura 15 - Queda de pressão em função da velocidade de filtração do poliéster.....	35
Figura 16 - Eficiência de coleta do poliéster sem precoatig.....	36
Figura 17 - Eficiência de coleta de nanopartículas do poliéster.....	37
Figura 18 - Massa depositada de <i>precoatig</i> e ponto de colmatação variando a umidade em 0, 5 e 10%.....	38
Figura 19 - Eficiência de coleta do <i>precoatig</i> variando a espessura da camada de <i>precoatig</i> (queda de pressão máxima)......	40
Figura 20 - Eficiência de coleta variando a umidade da camada de precoatig: a) queda de pressão máxima até 150Pa; b) queda de pressão máxima até 200Pa.....	41
Figura 21 - Eficiência de coleta do <i>precoatig</i> variando a umidade e a queda de pressão: a) <i>precoatig</i> com 5% de umidade; b) <i>precoatig</i> com 10% de umidade e c) <i>precoatig</i> com 15% de umidade.....	43
Figura 22 - Meios filtrantes de poliéster com <i>precoatig</i> após a filtração com pó de sínter ...	43
Figura 23 - Eficiência de coleta do precoatig para nanopartículas variando a umidade e queda de pressão: a) <i>precoatig</i> com 0% de umidade; b) <i>precoatig</i> com 5% de umidade e c) <i>precoatig</i> com 10% de umidade.....	45

Figura 24 - Diagrama de Pareto.....	48
Figura 25 - Superfícies de resposta: a) 2 fatores e 3 níveis b) todos os dados experimentais ..	50
Figura 26 - Superfícies de resposta para nanopartículas	51
Figura 27- Filtro de mangas.....	54
Figura 28 – Mangas filtrantes	55
Figura 29 - Ciclos de Filtração	57
Figura 30 – Mecanismo de limpeza de jato de ar pulsante (<i>pulse-jet</i>)	60
Figura 31 – Equipamento de filtração da norma VDI 3926	62
Figura 32 – Alimentador e dispersor de material particulado	62
Figura 33 - Fotômetro, medidores de pressão e suporte de meio filtrante	63
Figura 34 - Módulo de controle de concentração e alimentação, unidade controladora e de aquisição de dados e bombas.....	63
Figura 35 - Sistema de limpeza <i>pulse-jet</i>	63
Figura 36 – Suporte para filtro absoluto	63
Figura 37 - Software de controle e aquisição de dados	64
Figura 38 - 50 Ciclos de filtração: a) pó de síter sem <i>precoating</i> ; b) <i>precoating</i> 200Pa 0%; c) <i>precoating</i> 200Pa 10%; d) <i>precoating</i> 400Pa 0% e e) <i>precoating</i> 400Pa 10%.....	67
Figura 39 - Etapas da absorção.....	77
Figura 40 - Unidade de dessulfurização com monitor de SO ₂ , suporte para meio filtrante e lavador de gás	81
Figura 41 - Misturador de gases	82
Figura 42 - Suporte central com lavador de gás aquecido.....	82
Figura 43 - Sensores de gás e de pressão.....	83
Figura 44 - Monitor de leitura dos sensores	84
Figura 45 - Software de leitura do Arduino.....	84
Figura 46 – Esquema da linha de dessulfurização.....	84
Figura 47 - MEV da cal hidratada 80%: a) ampliação de 500 vezes; b) ampliação de 10000 vezes	87
Figura 48 - Concentração SO ₂ ao longo do tempo no lavador batelada.....	87
Figura 49 - Absorção do SO ₂ ao longo do tempo no lavador batelada	88
Figura 50 - Eficiência de dessulfurização em lavador batelada	89
Figura 51 - Concentrações de SO ₂ no lavador contínuo.....	90
Figura 52 - SO ₂ absorvido no lavador contínuo	90
Figura 53 - Eficiência de dessulfurização no lavador contínuo.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Planejamento experimental do <i>precoating</i> variando umidade e espessura	23
Tabela 2 - Tabela de experimentos.....	26
Tabela 3 - Caracterização dos materiais particulados	27
Tabela 4 - Componentes químicos dos materiais particulados pelo DRX	27
Tabela 5 - Composição química do pó de síter	29
Tabela 6- Caracterização do pó de sinterização primária.....	29
Tabela 7 - Diâmetro aerodinâmico da cal úmida.....	31
Tabela 8 - Caracterização das amostras úmidas de cal hidratada.....	32
Tabela 9 - Características do poliéster.....	34
Tabela 10 - Permeabilidade do poliéster	35
Tabela 11 - Resistência específica do <i>precoating</i>	39
Tabela 12 - Permeabilidade e porosidade da camada de <i>precoating</i>	40
Tabela 13 – Eficiência global de partículas micrométricas	44
Tabela 14 – Eficiência global de partículas nanométricas	46
Tabela 15 - Resultados gerais.....	47
Tabela 16 - Efeito estimado, erro padrão valor de t e grau de significância estatística (p).....	49
Tabela 17 – Experimentos VDI.....	64
Tabela 18 – Queda de pressão residual	66
Tabela 19 – Eficiência de coleta dos ciclos de filtração.....	68
Tabela 20 - FRX da cal adsorvida	91

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	IX
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - UMIDADE E ESPESSURA DO PRECOATING NA FILTRAÇÃO DE MICRO E NANOPARTÍCULAS	3
2.1 OBJETIVOS	3
2.1.1 Objetivo Geral	3
2.1.2 Objetivos específicos	3
2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.2.1 Sinterização	4
2.2.2 Material Particulado	4
2.2.3 Mecanismos de coleta	6
2.2.4 Ponto de Colmatação	8
2.2.5 Precoating	9
2.2.5.1 Umidade	10
2.2.5.2 Estado da Arte do precoating	12
2.3 MATERIAIS E MÉTODOS	16
2.3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PARTICULADOS	16
2.3.1.1 Umidade da cal hidratada	16
2.3.1.2 Preparação da cal hidratada úmida	17
2.3.1.3 Caracterização da cal úmida	17
2.3.1.4 Formação de Grânulos	17
2.3.2 CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FILTRANTE	17
2.3.2.1 Permeabilidade do poliéster	18
2.3.2.2 Eficiência de coleta de micropartículas do poliéster	19
2.3.2.3 Eficiência de coleta de nanopartículas do poliéster	20
2.3.3 CARACTERIZAÇÃO DO PRECOATING	21
2.3.3.1 Massa depositada do precoating	21
2.3.3.2 Resistência específica do precoating	21
2.3.3.3 Coefficiente de permeabilidade, porosidade e espessura da camada de precoating	21
2.3.4 FILTRAÇÃO	22
2.3.4.1 Planejamento experimental	22
2.3.4.1 Efeito da umidade do precoating na eficiência de coleta de micropartículas .	24
2.3.4.2 Efeito da espessura do precoating na eficiência de coleta de micropartículas	24

2.3.4.3	Experimentos variando a umidade e espessura da camada de precoating na eficiência de coleta de micropartículas.....	24
2.3.4.4	Eficiência de coleta variando a umidade e espessura do precoating para nanopartículas.....	24
2.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
2.4.1	Caracterização dos Materiais Particulados	27
2.4.1.1	Pó de sinterização	28
2.4.1.2	Cal hidratada natural	30
2.4.1.3	Cal hidratada úmida	30
2.4.1.4	Formação de Grânulos	32
2.4.2	Caracterização do meio filtrante	34
2.4.2.1	Permeabilidade do meio filtrante	35
2.4.2.2	Eficiência de coleta de micropartículas do poliéster.....	36
2.4.2.3	Eficiência de coleta de nanopartículas do meio filtrante	37
2.4.3	Precoating na remoção de material particulado	37
2.4.3.1	Massa depositada do precoating	38
2.4.3.2	Resistência específica do precoating	39
2.4.3.3	Permeabilidade, porosidade e espessura da camada de precoating	39
2.4.4	Filtração	40
2.4.4.1	Efeito da espessura do precoating na eficiência de coleta de micropartículas.....	40
2.4.4.2	Efeito da umidade do precoating na eficiência de coleta de micropartículas ..	41
2.4.4.3	Eficiência de coleta da camada do precoating variando a umidade e a espessura.....	42
2.4.4.4	Eficiência de coleta do precoating para nanopartículas.....	44
2.4.5	Resultados gerais	46
	EFICIÊNCIA DE COLETA GLOBAL PARA NANOPARTÍCULAS (%).....	47
2.4.6	Análise estatística	48
2.4.6.1	Análise estatística da eficiência do precoating na coleta de micropartículas ..	48
2.4.6.2	Análise estatística da eficiência do precoating na coleta de nanopartículas ...	50
2.5	CONCLUSÃO	52
3	CAPÍTULO 3 – INFLUÊNCIA DA UMIDADE E ESPESSURA DO PRECOATING NOS CICLOS DE FILTRAÇÃO	53
3.1	OBJETIVOS	53
3.1.1	Objetivo Geral	53
3.1.2	Objetivos específicos	53
3.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	54
3.2.1	Filtro de Mangas	54
3.2.2	Queda de pressão	56
3.2.3	Meios Filtrantes	58
3.2.4	Mecanismo de limpeza	58
3.2.5	Norma VDI 3926	60
3.3	MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66

3.5	CONCLUSÃO	69
4	CAPÍTULO 4 - DESSULFURIZAÇÃO.....	70
4.2	OBJETIVOS	70
4.2.1	Objetivo Geral	70
4.2.2	Objetivos específicos	70
4.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	71
4.3.1	Dióxido de enxofre - SO ₂	71
4.3.2	Padrões de emissão poluentes atmosféricos gerados em indústrias siderúrgicas integradas e semi-integradas	72
4.3.3	Dessulfurização.....	72
4.3.4	Modelo de dessulfurização.....	72
4.3.5	Eficiência de dessulfurização	73
4.3.6	Cinética Geral.....	74
4.3.7	FGD – Sistemas de dessulfurização de gases de combustão.....	74
4.3.8	Absorção.....	76
4.3.9	Adsorção.....	77
4.3.10	Difusão.....	79
4.3.9	Cal hidratada	80
4.3.10	Umidade	80
4.4	MATERIAIS MÉTODOS.....	81
4.4.2	Unidade de dessulfurização	81
4.4.3	Gases.....	85
4.4.4	Dessulfurização do lavador de gases.....	85
4.4.4.1	Dessulfurização em sistema em batelada.....	85
4.4.4.2	Dessulfurização em sistema contínuo	85
4.4.4.3	Caracterização da cal da lama.....	85
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
4.5.2	Dessulfurização do lavador de gases.....	87
4.5.2.1	Dessulfurização em sistema batelada.....	87
4.5.2.2	Dessulfurização em sistema contínuo	89
4.5.2.3	Caracterização da cal da lama.....	91
4.6	CONCLUSÕES	92
5	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	93
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Em 2021, foram emitidas 1,91 de toneladas de emissão de gases de efeito estufa e poluentes como amônia, benzeno, monóxido de carbono, cianeto de hidrogênio, dióxido de enxofre, gases que provocam a chuva ácida e materiais particulado (CARVALHO; MESQUITA; MELO, 2015; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2022).

No campo industrial, a remoção de material particulado ocorre através da filtração de ar, que é realizada com diferentes equipamentos de coleta, entre eles destaca-se o filtro de mangas. Este possui alta eficiência de coleta, para uma ampla faixa granulométrica, baixo custo e fácil operação. Com objetivo de aumentar a eficiência de coleta para o material particulado mais fino, um pré-tratamento denominado *precoating* é utilizado por algumas indústrias (SCHILLER; SCHMID, 2014a).

O *precoating* consiste em recobrir a superfície de meios filtrantes de não-tecidos com determinado material particulado, com diferentes características físicas e químicas, formando uma fina camada de pó nos instantes iniciais da filtração, que pode prevenir as partículas mais finas de penetrarem no meio filtrante, para aumentar o tempo de saturação das mangas. Assim, a camada de *precoating* age como um novo elemento filtrante em que ocorre a filtração de superfície, permitindo que o gás escoe mais livremente ao passar pela manga, melhorando a performance do meio filtrante, com o aumento da sua vida útil, da eficiência de coleta para o material particulado mais fino e maior facilidade na limpeza das mangas, porque promove melhor desprendimento da torta (RAVERT, 2005; WALSH; STENHOUSE, 1997a).

Poucos artigos que tem como tema o estudo do *precoating* são encontrados na literatura científica. Alguns estudos, como o de Ravert, (2005) explanou o passo a passo da aplicação do *precoating* para filtros novos. Schiller; Hellmich; Schmid, (2016) compararam os valores obtidos de eficiência de coleta e o reuso do *precoating* em uma planta de laboratório e uma planta real de queima de pellets. Os autores observaram que na planta laboratorial havia um aumento linear da eficiência de coleta com o reuso do *precoat*, porém na planta real os valores não apresentaram linearidade e não foi possível uma comparação. Schiller *et al.* (2014) investigaram as melhores combinações entre onze meios filtrantes e três pós de *precoat* durante a filtração de partículas ultrafinas de queima de pellets e analisaram as melhores combinações entre meios filtrantes e *precoats*, indicando que o meio filtrante PTFE + PI foi o que obteve melhor desempenho. Khirouni *et al.* (2021) observaram a alta eficiência do *precoating* na coleta de nanopartículas e na melhora do processo de limpeza ao longo dos ciclos de filtração.

No entanto, a limpeza de gases da siderurgia utilizando o *precoating* não foi ainda investigada ou destacada na literatura. Além de melhorar a performance da filtração quanto a remoção do material particulado fino, o *precoating* pode apresentar a capacidade de tratar os gases das emissões, diminuir a necessidade de troca de mangas e melhorar a visibilidade da pluma de gases em chaminés.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência do *precoating* na filtração de material particulado e na dessulfurização de gases. Para tal finalidade, tanto a umidade como a espessura da camada de *precoating* serão avaliadas nas etapas de filtração e coleta de material particulado (Capítulos 2 e 3) e a cal hidratada será avaliada na eficiência de dessulfurização de gases (Capítulo 4).

CAPÍTULO 2 - UMIDADE E ESPESSURA DO PRECOATING NA FILTRAÇÃO DE MICRO E NANOPARTÍCULAS

O Capítulo 2 aborda a aplicação do processo de *precoating* e a influência da umidade e da espessura na filtração de micro e nanopartículas. O objetivo dessa etapa consiste em determinar quais valores de umidade e espessura na camada de *precoating* maximizam a eficiência de coleta de partículas em comparação com o filtro virgem.

2.1 OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da umidade e da espessura do *precoating* na filtração de material particulado fino e ultrafino.

2.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos tem-se:

- Avaliar a influência do *precoating* nos parâmetros operacionais (permeabilidade, porosidade, resistência específica) do meio filtrante;
- Avaliar a influência da umidade e da espessura da camada de *precoating* na eficiência de coleta de partículas micrométricas e nanométricas;
- Obter parâmetros operacionais do *precoating* que garantam uma alta eficiência de coleta de partículas micro e nanométricas.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.2.1 Sinterização

O processo de sinterização converte matérias-primas muito finas, incluindo minério de ferro, coque, calcário e escória de aciaria, em um produto aglomerado, conhecido como sinter, de tamanho adequado para ser carregado no alto-forno. No sistema primário de despoeiramento da sinterização, há a emissão de material particulado e de gases como SO_x, NO_x e COV (Compostos orgânicos voláteis). No sistema secundário de despoeiramento há a emissão de material particulado. O limite de emissão desses poluentes estabelecido na Resolução do CONAMA 382 é de 70 mg/Nm³ para material particulado, 600 mg/Nm³ para SO₂ e 700 mg/Nm³ para NO_x (CONAMA, 2006).

2.2.2 Material Particulado

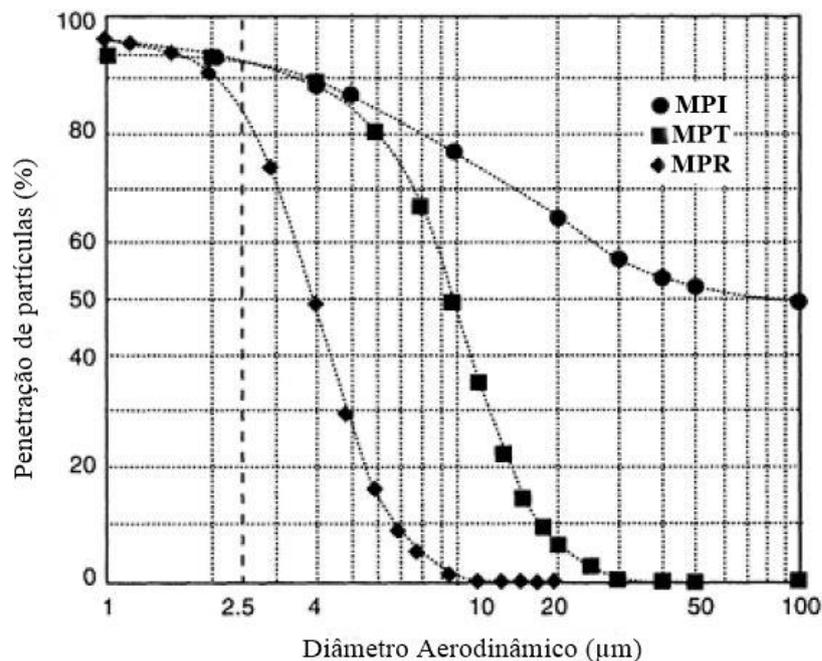
As partículas de poeira no ar raramente são homogêneas e variam muito em tamanho e forma, e sua composição química é determinada por fatores específicos da fonte e localização de emissões. Os efeitos e interações combinados de várias substâncias misturadas com partículas são significativos, especialmente quando a exposição a longo prazo ocorre. Em geral, o risco de efeitos adversos na saúde devido a inalação de partículas é uma função do tamanho e da concentração das partículas finas presentes no ar, a duração da exposição, a penetração e deposição de partículas nas regiões do trato respiratório e nas respostas biológicas do corpo ao depósito destes materiais. Esses fatores estão relacionados à quantidade de poluente que realmente entra no corpo em um período especificado (MUKHOPADHYAY, 2010; THAD GODISH, 2004).

Antes que as partículas atmosféricas possam causar efeitos adversos à saúde, elas precisam entrar e se depositarem no sistema respiratório humano. A penetração e a deposição das partículas no sistema respiratório dependem do tamanho aerodinâmico das partículas, dos mecanismos de defesa respiratória e padrões de respiração. As partículas podem ser descritas como inaláveis (MPI), torácicas (MPT) ou respiráveis (MPR), com base em sua penetração e potencial de deposição. As faixas de tamanho e a penetração fracionária do MPI, MPT e MPR são ilustradas na Figura 1. MP inalável pode entrar nas vias aéreas superiores da cabeça; MPT, pode penetrar nas vias aéreas e nas regiões de troca gasosa do pulmão. Partículas respiráveis

são um subconjunto de MPT com alta probabilidade de serem depositadas na região pulmonar (THAD GODISH, 2004).

Particularmente, as partículas menores do que 20 μm de diâmetro aerodinâmico são as mais preocupantes, uma vez que podem permanecer suspensas na atmosfera e, dependendo do seu tamanho, se depositar lentamente. Essas partículas em suspensão caracterizam o aerossol atmosférico. Partículas com mais de 10 μm geralmente não atravessam os pelos nasais e os mecanismos de defesa do sistema respiratório superior. Partículas torácicas e respiráveis são as maiores preocupações de saúde pública, uma vez que entram nas vias aéreas respiratórias e são capazes de depositar no tecido pulmonar. O diâmetro aerodinâmico das partículas é o principal determinante da deposição respiratória. A deposição ocorre por impactação inercial, sedimentação e difusão. A impactação é particularmente eficaz na faixa de tamanho de partícula de 5 a 10 μm ; a sedimentação de 3 a 5 μm ; e a difusão para partículas menores que 0,1 μm (THAD GODISH, 2004).

Figura 1 -Porcentagem de penetração das partículas



Fonte: Adaptada de Thad Godish, (2004)

A emissão direta de partículas e a formação de partículas secundárias como resultado da química atmosférica representam grandes preocupações ambientais. Estes incluem doenças, redução da visibilidade, efeitos climáticos e efeitos incômodos associados ao potencial de sujidade das partículas depositadas (THAD GODISH, 2004).

Em geral, a poluição do ar pode levar ao câncer de pulmão, asma, infecções pulmonares, doença pulmonar obstrutiva crônica, doença arterial coronariana, insuficiência cardíaca, problemas no ritmo cardíaco e várias outras doenças. O sistema respiratório é particularmente sensível aos poluentes do ar, pois grande parte é composto por uma membrana exposta (MUKHOPADHYAY, 2010).

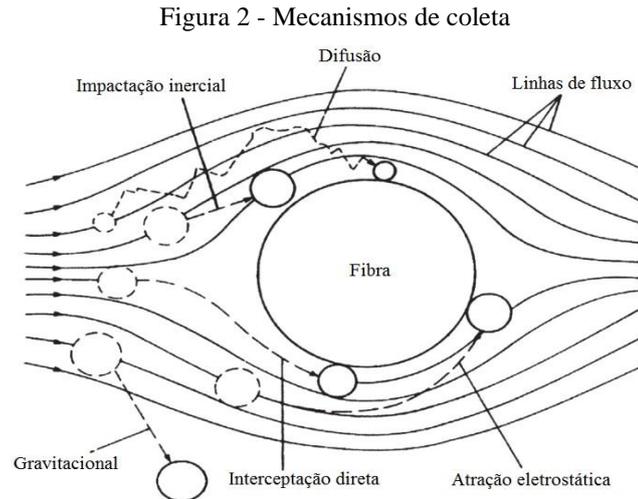
2.2.3 Mecanismos de coleta

Existem cinco mecanismos (Figura 2) para todos os tipos de deposição de partículas em filtros e até no pulmão, que são: interceptação, impactação inercial, difusão Browniana, gravitacional e atração eletrostática (HINDS, 1982).

Observe que todas essas forças do mecanismo de coleta são fortemente dependentes do tamanho da partícula. Cada mecanismo é brevemente descrito a seguir. O mais simples deles é a gravidade, que coleta partículas grandes movendo-se lentamente em um fluxo de gás. A força centrífuga é outro mecanismo de coleta usado para captura de partículas. Partículas grandes se movem para fora das linhas de fluxo em virtude de seu momento perdendo energia cinética e são separadas da corrente de gás. As partículas são então acionadas por forças gravitacionais e são coletadas. O mecanismo gravitacional ocorre quando a partícula sofre a ação da gravidade e colide com a fibra (THEODORE, 2008).

A impactação inercial ocorre quando a presença da fibra no caminho de um fluxo de gás carregado de partículas faz com que haja uma mudança nas linhas de fluxo. As partículas maiores tendem a continuar em um caminho reto por causa de sua inércia colidindo com a fibra e são capturadas. Como as trajetórias dos centros das partículas podem ser calculadas, é possível determinar teoricamente a probabilidade de colisão (THEODORE, 2008).

A interceptação direta também depende da inércia e é apenas uma forma secundária de impactação. Acontece quando a partícula segue as linhas de corrente de escoamento próximo a um raio de partícula da superfície da fibra, colide com a fibra e é capturada. A interceptação é o único mecanismo que a partícula segue a linha de corrente original do escoamento. Observe que a trajetória do centro de uma partícula pode ser calculada; no entanto, mesmo que o centro possa contornar o objeto alvo, uma colisão pode ocorrer, pois a partícula tem tamanho finito. A interceptação direta não é, portanto, um princípio separado, mas apenas uma extensão da impactação inercial. Na impactação inercial quanto mais rápida e maior a partícula maior a chance de colisão com a fibra (THEODORE, 2008; HINDS, 1982).



Fonte: Adaptado de Donovan, (1985)

Outro mecanismo primário de coleta de partículas envolve forças eletrostáticas. As partículas podem ser carregadas naturalmente ou, como na maioria dos casos envolvendo atração eletrostática, podem ser carregadas sujeitando a partícula a um forte campo elétrico. Se dá devido a atração de cargas opostas entre fibra-partícula capturadas (THEODORE, 2008).

Quando há uma forte diferença na concentração de moléculas entre os dois lados da partícula, há uma diferença no número de colisões moleculares. A partícula se move em direção à área de menor concentração. Partículas muito pequenas desviam ligeiramente quando são atingidas por moléculas de gás. A deflexão é causada pela transferência de energia cinética da molécula de gás que se move rapidamente para a pequena partícula. À medida que o tamanho, a massa e a densidade das partículas aumentam, a extensão do movimento das partículas diminui. Assim, a deflexão passa a ser efetiva como mecanismo de captura para partículas menores que aproximadamente 1,0 mm, sendo significativa para partículas menores que 0,5 mm. Devido ao bombardeio por moléculas de fluido, as partículas suspensas em um fluido serão submetidas a um movimento molecular aleatório e caótico conhecido como movimento browniano. Esse movimento surge além de qualquer movimento líquido em uma determinada direção devido à ação de outras forças externas, como a gravidade. Assim, esse efeito se torna o mecanismo de coleta predominante para partículas na faixa de 0,1 a 1,0 mm. O movimento Browniano de partículas pequenas é suficiente para aumentar a possibilidade de colisão com a fibra enquanto segue em uma não linha de interceptação (THEODORE, 2008; HINDS, 1982).

Na filtração, estes mecanismos são importantes somente nos instantes iniciais, até que uma camada de pó muito fina seja depositada na superfície do meio filtrante.

2.2.4 Ponto de Colmatação

Os dendritos, que antecedem a formação da torta, apresentam crescimento mais moderado quando a captura das partículas ocorre na faixa de coleta por impactação direta e mais lento quando a coleta das partículas acontece no regime inercial (KANAOKA; HIRAGI, 1990).

Quando o acúmulo de dendritos forma a primeira camada de torta dá-se o nome de ponto de colmatação. O ponto de colmatação tem um significado adicional, a saber, que define o ponto em que é provável que seja mais econômico substituir um filtro do que arcar com os custos de queda de pressão adicional no filtro carregado. Também fornece uma boa indicação da capacidade de retenção de material particulado de um meio filtrante, pontos de colmatação maiores tem maior capacidade de retenção de material particulado. O tamanho do aerossol, a densidade de empacotamento o diâmetro das fibras do meio filtrante têm um efeito significativo no ponto de colmatação (WALSH; STENHOUSE, 1997b).

Testes acelerados de um filtro de alta eficiência com poeira natural polidispersa e fumaça de cloreto de sódio polidispersa mostraram que a vida útil do filtro é quatro vezes maior com partículas de aerossol maiores; filtros de grandes densidades de empacotamento e pequenos diâmetros de fibra entopem mais rapidamente e partículas pequenas são mais obstrutivas do que as grandes (WALSH; STENHOUSE, 1997b).

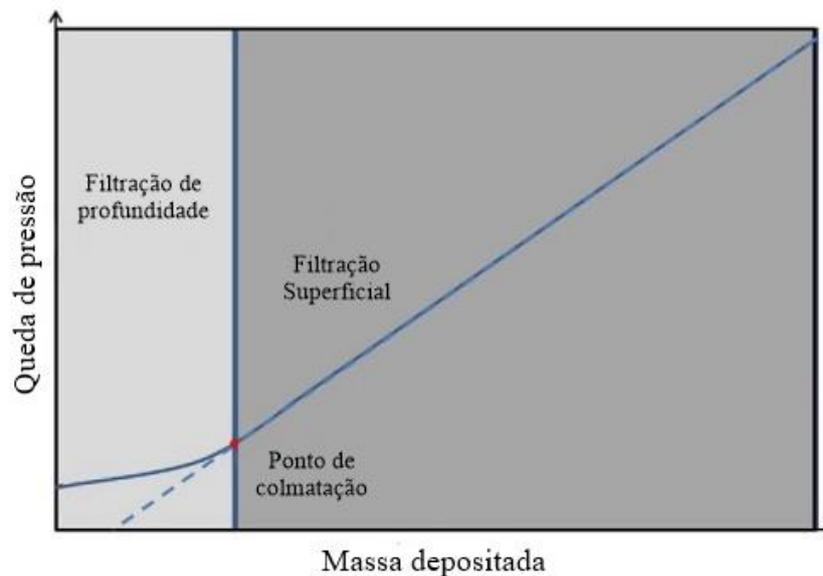
A previsão do momento exato de formação da torta é difícil de se obter fisicamente porque os tecidos não são materiais uniformes. A formação de uma torta de filtro é caracterizada na curva de queda de pressão durante a filtração por uma rápida aceleração da queda de pressão, sendo o aumento da queda de pressão por unidade de carga pequeno nos estágios iniciais da vida útil do meio filtrante (WALSH; STENHOUSE, 1997b).

Durante as mudanças na queda de pressão de um filtro de tecido plano, duas fases podem ser tipicamente distinguidas: filtração de profundidade (obstrução do meio filtrante com partículas) e de superfície (formação de uma torta de partículas na superfície do meio). A transição entre essas duas fases ocorre quando a primeira camada do meio atinge a saturação durante o entupimento e leva à formação de uma camada na superfície. A massa de partículas acumuladas no filtro nessa fase é definida como o ponto de colmatação (Figura 3). Este ponto pode ser definido como a interseção das tangentes no início e durante a filtração da superfície

ou pelo ponto inicial do aumento linear da queda de pressão, dependendo da massa de partículas depositadas (ponto de transição superior) (BOURROUS et al., 2016).

Quanto menores forem as partículas mais rápida a colmatação e, principalmente, se o meio filtrante for densamente empacotado, uma vez que há espaços menores disponíveis entre as fibras para a deposição das partículas. Uma partícula capturada pode atuar como um local de coleta para futuras partículas, contribuindo assim para a eficiência da filtração. Essa partícula também aumentará a resistência ao escoamento do gás através do filtro, contribuindo assim para o aumento da queda de pressão através do filtro. As partículas são capturadas preferencialmente em partículas previamente depositadas, o que leva à formação de estruturas semelhantes a árvores dentro do filtro, as estruturas dendríticas. Eventualmente, esses dendritos crescem um no outro e uma torta é formada. O aumento da queda de pressão por unidade de depósito de massa na torta é muito grande (WALSH; STENHOUSE, 1997b).

Figura 3 - Determinação do ponto de colmatação



Fonte: Adaptada de Bourrous et al., (2016)

2.2.5 *Precoating*

A filtração de pré-revestimento (*precoating*) consiste no recobrimento de meios filtrantes com material particulado a fim de atingir o ponto de colmatação, que é o ponto do início da formação da torta. Desse modo, a filtração do material particulado requerido é mais eficiente desde o início, uma vez que a torta já está formada e ocorre a filtração de superfície. O *precoating* é eficiente na coleta de partículas submicrômicas. Embora o processo de filtração de pré-revestimento tenha sido aplicado há apenas um certo tempo, a economia e o desempenho

da filtração ainda são melhores do que aquelas soluções de separação altamente avançadas, como processos de membrana em muitos casos (LI; HESS; HÖFLINGER, 2003; SCHILLER; SCHMID, 2014a).

A camada de *precoating* ou a torta de filtro tem uma estrutura aproximadamente uniforme e, portanto, resistência específica quase constante em toda a torta. As propriedades da camada de pré-revestimento são essenciais para o desempenho da filtração, assim como o material da membrana é para a microfiltração. A camada de *precoating* pode ser vista como um tipo de membrana secundária, que pode ser formada e removida dinamicamente durante os processos de filtração (LI; HESS; HÖFLINGER, 2003).

É importante que as partículas de *precoating* sejam grandes o suficiente para não obstruir o meio filtrante, mas tenham uma alta permeabilidade e boas qualidades de deposição. Além disso, o meio filtrante deve ter uma queda de pressão baixa e alta eficiência de coleta total para o material de *precoating*. A combinação ideal de filtro e material de *precoating* deve exibir alta eficiência de coleta total da poeira fina e um baixo nível de queda de pressão para garantir longos ciclos de filtração (SCHILLER; SCHMID, 2014b).

2.2.5.1 Umidade

O impacto da umidade relativa na filtração é significativamente diferente do teor de umidade do material particulado. Aumentar a umidade relativa diminui a resistência da torta de filtro principalmente por reduzir a carga de massa e aumentar a porosidade da torta de filtro. Em comparação, o teor de umidade do particulado afeta a filtração principalmente por meio da dispersão e deposição de aglomerados de partículas no filtro de mangas. E há um teor crítico de umidade de 1,44% (a 60% de umidade relativa) para o teor de umidade do pó na filtração. Os maiores valores de carga de massa e espessura da torta ocorrem nesse teor de umidade, resultando em uma torta de filtro densa e de alta resistência (ZHOU et al., 2023).

O aumento da umidade ocasiona um decréscimo no crescimento da queda de pressão e, conseqüentemente, um aumento da permeabilidade. Isso ocorre, pois, uma maior umidade altera a agregação das partículas, criando arranjos de partículas mais compactos com outras partículas, formando grânulos. Há um ponto limite onde a espessura da torta é obrigada a ser comprimida e quando o rearranjo da estrutura for concluído (MIGUEL, 2003).

Para umidades mais altas, o aumento da queda de pressão é mais lento. O efeito da umidade na evolução da queda de pressão através do filtro ocorre porque a presença de umidade aumenta as forças de ligação partícula-partícula. A influência da umidade é mais significativa

com a diminuição do diâmetro das partículas. À medida que o conteúdo líquido aumenta, a porosidade aumenta até um valor máximo devido a formação de grânulos e, conseqüentemente uma disposição irregular da torta. Adicionar umidade às partículas leva à formação de pontes de líquido entre elas e gera uma força capilar filtro (GUPTA et al., 1993; JOUBERT et al., 2010; MIGUEL, 2003).

Para filtros plissados, resultados experimentais mostraram que a influência da umidade do ar varia de acordo com o estágio de filtração. Durante a fase de filtração da torta, a presença de umidade reduz a resistência específica à torta da mesma maneira que para filtros planos, mas quando começa a etapa de redução da superfície de filtração, a presença de umidade aumenta a queda de pressão no filtro (GUPTA et al., 1993; JOUBERT et al., 2010; MIGUEL, 2003). Além disso, Joubert *et al.* (2011) demonstraram que a torta formada na presença de umidade pode não estar em equilíbrio termodinâmico com seu ambiente. E que para 90% de umidade, há uma redução de aproximadamente 10% na resistência específica da torta é observada após alguns minutos.

As partículas aderem mais umas às outras quando a umidade relativa durante a colmatação é alta. Na verdade, por causa dos diâmetros submicrônicos das partículas, os depósitos na superfície dos filtros se formam principalmente em dendritos. A área de superfície total de várias partículas aglomeradas é menor que a soma das áreas de superfície de todas as suas partículas individuais. Isso pode explicar por que, para uma determinada massa de partículas coletadas, uma torta de partículas formada na presença de umidade tem uma queda de pressão menor do que uma torta que é formada ao ar seco. Assim, como a presença de umidade leva à aglomeração das partículas depositadas no filtro, isso explica porque o efeito da umidade é mais acentuado com partículas de pequeno diâmetro (para a mesma higroscopicidade da partícula) (JOUBERT et al., 2010).

2.2.5.1.1 Espessura da Torta

O meio filtrante satura e novas partículas acumulam-se em sua superfície, formando dendritos. Ao passar do tempo, esses dendritos se unem formando uma torta cuja espessura aumenta com o tempo. À medida que a torta cresce em espessura, a área de filtração aumenta, elevando as chances das novas partículas serem coletadas, ocorrendo um aumento linear da massa retida com a queda de pressão máxima (AL-OTOOM, 2005).

A espessura da torta é fortemente afetada pelo número de partículas e pelo diâmetro médio da massa das partículas. A espessura aumenta com o tamanho da partícula, bem como

com o número líquido de partículas depositadas. À medida que a espessura aumenta, a porosidade média diminui. Isto poderia ser explicado pela cobertura da camada inicial com partículas maiores, o que impede as demais partículas de atingirem as camadas internas, as partículas menores não se acomodam nas regiões mais profundas. Acredita-se que em espessuras menores, as partículas são influenciadas por uma maior força de arrasto resultante das diferenças de queda de pressão entre os lados positivo e negativo do filtro. Isso significa que as partículas neste nível podem ser arrastadas para o meio filtrante com menos resistência de outras partículas depositadas (AL-OTOOM, 2005).

Em espessuras mais altas, essa resistência torna-se maior devido ao maior número de partículas o que induz a compressões locais, e a suposição de que todas as partículas em colisão que aderem à superfície se tornam mais adequadas. A queda de pressão da torta aumenta com a diminuição do tamanho médio das partículas, pois, partículas menores tendem a formar uma torta com porosidade média mais baixa, aumentando assim a queda de pressão através do filtro (AL-OTOOM, 2005).

Uma vez que a camada de pó sob certa espessura torna-se incompressível, a taxa de aumento da espessura da torta torna-se constante depois de certa carga mássica. Com o aumento da espessura da torta de filtração, maior é a força coesiva atuando na torta. Dependendo das espessuras da camada de *precoating* e das diferentes porosidades dos materiais, há diferentes durações dos ciclos de filtração e níveis de queda de pressão residual porque uma maior capacidade de separação de pó fino é possível (CHOI; HA; JANG, 2004; SCHILLER; HELLMICH; SCHMID, 2016).

A espessura da torta de filtração, L , pode ser calculada pela massa de material particulado depositado por unidade de área (W), conhecendo-se a densidade de partícula (ρ_p) e a porosidade da torta (ε), conforme mostra a equação (CHOI; HA; JANG, 2004):

$$L = \frac{W}{\rho_p(1 - \varepsilon)} \quad (1)$$

2.2.5.2 Estado da Arte do *precoating*

Poucos são os estudos sobre *precoating*, principalmente em condições de operação industrial. Snyder; Bush; Robinson (1990) avaliaram o uso de pós, cal hidratada, cinza de torta

de pó da planta piloto Scholz de filtro de tecido com alto teor de enxofre (HSFP) e o silicato de alumínio, como material de pré-revestimento como um meio de reduzir o componente de resistência ao escoamento associado à interface tecido/pó. Eles concluíram que um pó de silicato de alumínio com baixa área de superfície e alta porosidade total reduziu significativamente esta resistência ao escoamento. Além disso, notaram que os *precoats* também podem ser capazes de proteger a superfície do tecido e a torta de poeira residual dos efeitos prejudiciais da condensação frequentemente associada ao comportamento cíclico.

Bennett; Meta (2000) elucidou a alta eficiência do *precoating* na remoção de material particulado. Ravert, (2005) explicou a aplicação do *precoating* em filtros de manga. Schiller; Schmid, (2014a) avaliaram as melhores combinações entre onze meios filtrantes e três pós de *precoating* e a espessura do *precoating* na filtração de partículas ultrafinas de queima de pellets e concluíram que a camada de *precoating* deve ser maior do que 1mm para não ocorrer entupimento do meio filtrante e que tem eficiência de coleta maior do que 99% para concentrações de material particulado menores do que 1 mg/m³.

Schiller; Schmid (2015) analisou as eficiências de coleta para misturas e reuso dos pós de *precoat*, obtendo uma quantidade mássica que garantisse uma filtração longa e estável para particulados finos em uma planta de laboratório e uma planta real de queima de pellets. Foram utilizados como pós de *precoat* o calcário, calcário hidratado e iFIL coating N® e como meio filtrante utilizado foi uma combinação PTFE com poliamida. Concluíram que todos os pós podem ser usados no *precoating* e apresentaram uma eficiência superior à 99% com alta eficiência na filtração de material particulado fino. Além de que o reuso é possível, com possibilidade de economia de *precoat*, porém é necessário o controle do pó pois influencia nas características de filtração.

Schiller; Hellmich; Schmid (2016) compararam os valores obtidos de eficiência de coleta e reuso do *precoating* em uma planta de laboratório e uma planta real de queima de pellets. O meio filtrante utilizado foi uma combinação PTFE com poliimida e utilizaram como pó de *precoating* calcário hidratado. Após a primeira filtração o pó de *precoating* foi reutilizado em uma mistura 50:50 com pó de *precoat* novo, o mesmo foi feito para a terceira filtração. E observaram que na planta laboratorial havia um aumento linear na eficiência de coleta com o reuso do *precoat*, porém na planta real os valores não apresentaram linearidade e não foi possível uma comparação.

Wang et al. (2020) estudaram os fatores que afetam o processo de filtração com *precoating* e a regulação de métodos por meio de testes em pequena escala e em escala piloto combinado com espectroscopia Raman com superfície melhorada (SERS). Foram avaliadas partículas de prata e partículas de catalisador gastas em lamas de metanol e olefinas. O *precoating* foi realizado antes da filtração. Concluíram que o tamanho de partícula, a concentração mássica e a espessura do *precoating* influenciam a filtração. O teste de escala de laboratório determinou que o ótimo tamanho médio de partícula é 39 μm , a espessura ideal é 3 mm e a concentração de massa ideal da suspensão de *precoating* é 3%. Os resultados do SERS mostraram que os materiais com tamanho de partícula menor formam um *precoating* com tamanho de poro menor.

Khirouni et al. (2021) investigaram o uso do *precoating* antes da filtração para melhorar a limpeza de filtros com nanopartículas metálicas. Os resultados revelaram que o *precoating* melhora consideravelmente a eficiência de limpeza do meio filtrante. A eficiência de regeneração passou de 15% sem *precoating* a 90% com *precoating*. O aumento da massa coletada de nanopartículas permite melhorar a eficiência da limpeza. Além disso, dados experimentais mostraram que uma camada fina de *precoating* não é suficiente para proteger a superfície do filtro de entupimentos irreversíveis. Esta massa mínima de *precoating* a ser aplicada depende do material utilizado, pois a estrutura da camada e a porosidade diferem com a forma, densidade e tamanho das partículas. Os resultados dos ciclos de filtração mostraram que o *precoating* ajudou a estabilizar o processo de filtração e que renovar a camada de *precoating* após cada limpeza é essencial para manter um bom desempenho.

O trabalho de Andrade (2019) avaliou o *precoating* na filtração de pó de aciaria do despoejamento secundário de uma indústria siderúrgica em um filtro de mangas. Foram feitos 30 ciclos de filtração em poliéster sem *precoating*, fazendo o *precoating* com cal hidratada e calcário dolomítico e em meio filtrante de poliéster com membrana de PTFE. A autora concluiu que o *precoating* aumentou a duração ao longo dos 30 ciclos de filtração em relação ao poliéster sem *precoating* e ao poliéster com membrana de PTFE.

Melo (2021) avaliou a performance de calcário e terra de diatomáceas no *precoating* sobre os meios filtrantes de poliéster, poliéster com tratamento de Resina PTFE e poliéster com fibras antiestáticas (Epitropic) em filtros de mangas na filtração do pó de aciaria e comparou com poliéster com membrana de PTFE. Concluindo que o poliéster com membrana de PTFE apresentou eficiência de coleta superior aos demais filtros. Com a adição do *precoating*, houve um aumento destes valores, apresentando eficiências superiores até mesmo que as obtidas com

poliéster com membrana de PTFE para ambos os pós de *precoating*. Para nanopartículas, ao realizar o *precoating* com a terra de diatomáceas não foi possível obter valor superior ao obtido com filtro com membrana de PTFE. Quanto aos resultados de massa retida de revestimento após o pulso de limpeza, a terra de diatomáceas apresentou maior massa que o calcário. Em relação ao primeiro ciclo de filtração, o *precoating* não impactou no tempo do ciclo, aumentou a massa retida e a queda de pressão residual, porém, foi inferior ao poliéster com membrana de PTFE.

2.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo visa apresentar os materiais utilizados e a metodologia experimental para obtenção dos resultados propostos nos objetivos.

Inicialmente tem-se a caracterização dos materiais particulados, do meio filtrante e do *precoating*. Seguido dos experimentos de filtração com *precoating* nas unidades experimentais com contador de partículas micro e nanométricas.

2.3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PARTICULADOS

Os materiais particulados utilizados foram cal hidratada para o *precoat* e pó de sinterização primária para a filtração. Para a realização do *precoating*, a cal hidratada recebeu entre 0 e 15% de umidade conforme descrito no item 2.3.1.2.

Nestes materiais foram realizadas a avaliação de composição química por difração de raios X (DRX Bruker D8 Advance ECO) e análise de fluorescência de raio X (FRX Rigaku ZSX PRIMUS II), obtenção de imagens pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV Philips XL-30 FEG), análises da área superficial através de BET (Micromeritics FlowSorb II 2300) e do volume e tamanho do poro através do Porosímetro AMINCO Model 5-7118 no Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa/UFSCar).

A massa específica dos materiais particulados foi obtida por picnometria a hélio, no equipamento AccuPyc 1330 Micrometrics, foram realizadas tréplicas para cada material e o resultado foi determinado pela média das três análises. A distribuição granulométrica volumétrica e o diâmetro médio volumétrico foram determinados pelo equipamento Malvern Mastersizer Microplus 2000, a partir da média das triplicatas. O diâmetro aerodinâmico e a distribuição granulométrica aerodinâmica das amostras, foram determinados pelo valor médio da triplicata, obtidas através do equipamento com contador de partículas Aerodynamic Particle Sizer (APS) 3320, da TSI. E o tamanho dos poros foi feito no CCD-DEMA UFSCar por porosimetria por intrusão de mercúrio.

2.3.1.1 Umidade da cal hidratada

Para obter o valor da umidade da cal hidratada em temperatura ambiente, foi realizado um teste de umidade em estufa de secagem e esterilização (Nova Ética estufa Modelo 400-3ND 81LT). Uma massa de 50g cal hidratada foi pesada em um cadinho e levada à estufa à 105°C por 24h, para garantir a total evaporação da água da amostra. Depois

das 24h, o cadinho foi pesado novamente obtendo a massa de água evaporada, sendo possível calcular a umidade.

2.3.1.2 *Preparação da cal hidratada úmida*

A cal hidratada foi umedecida com água destilada até as umidades de 5, 10 e 15%. Esses valores de umidade foram escolhidos uma vez que o filtro de mangas requer baixos valores de umidade para bom funcionamento. Foi pesado 50g de cal hidratada e acrescentada a massa de água necessária para atingir os valores de umidade pré-determinados. A pesagem foi feita em uma balança de quatro casas decimais Shimadzu Modelo AY220. As amostras úmidas foram deixadas em descanso por 24h para completa uniformidade.

2.3.1.3 *Caracterização da cal úmida*

Foram realizadas análises de diâmetro aerodinâmico médio no Aerodynamic Particle Sizer (APS) 3320 da TSI (Figura 5), de volume de poros no Porosímetro AMINCO model 5-7118 (CCDM/UFSCar) e BET no equipamento FlowSorb II 2300 (CCDM/UFSCar).

2.3.1.4 *Formação de Grânulos*

Amostras de cal seca (0% umidade) foram umedecidas com água destilada variando a umidade em 0, 1%, 2,5%, 5%, 7%, 10%, 12,5% e 15% com o objetivo de analisar por fotos e imagens do MEV a presença e o formato dos grânulos com o aumento da umidade. Além disso, imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura (LCE/UFSCar) foram realizadas para as amostras de 0, 5, 10 e 15%.

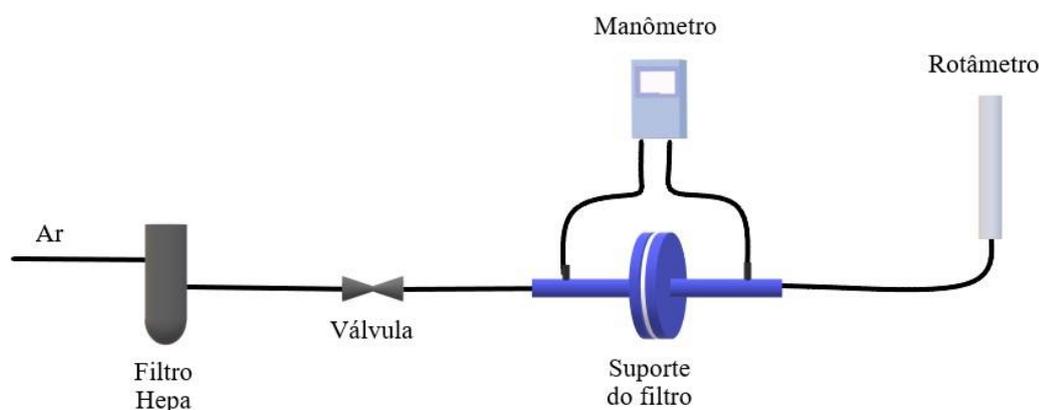
2.3.2 CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FILTRANTE

O meio filtrante utilizado em todos os experimentos é poliéster. Para caracterizar o meio filtrante foram obtidas três imagens da superfície e da seção transversal utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), do Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do DEMA/UFSCar. A partir das imagens, o diâmetro e distribuição das fibras e a porosidade do meio filtrante foram analisados pelo software Image Pro Plus segundo metodologia de Bortolassi; Guerra; Aguiar, (2017). Outras caracterizações como gramatura, espessura, resistência específica e eficiência de coleta de partículas micro e nanométricas do meio filtrante foram determinadas.

2.3.2.1 Permeabilidade do poliéster

A permeabilidade do meio filtrantes foi determinada na unidade experimental de permeabilidade (Figura 4) do LCA-DEQ/UFSCar. A amostra de poliéster foi colocada no suporte de filtração e iniciou o ajuste da vazão no rotâmetro modelo GF-2400 da Gilmont® com escala até 40 L/min passando ar limpo através do meio filtrante. A cada velocidade de filtração avaliada foi aferida a queda de pressão no meio filtrante, registrada no manômetro digital Modelo 9555-P da TSI. Esse procedimento foi realizado em triplicata para cada amostra de meio filtrante com 20,48 m² de área útil até a vazão de 35 L/min.

Figura 4 – Unidade experimental de permeabilidade



Para avaliar a permeabilidade foram usadas as Equações de Forchheimer (1) e Darcy (2). Com o aumento da velocidade de escoamento, a equação de Darcy deixa de ser satisfatória, já que os efeitos inerciais se tornam importantes e devem ser considerados. Nestes casos, observa-se um comportamento parabólico da queda de pressão em relação à velocidade superficial, sugerindo-se o uso da equação de Forcheimmer para caracterizar o sistema. A equação de Forchheimer é empregada para avaliar o escoamento de fluidos em meios porosos, relacionando os valores de queda de pressão com a velocidade superficial (MIGUEL, 2003):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} V_s + \frac{\rho_g}{k_2} V_s^2 \quad (1)$$

em que L representa a espessura do meio filtrante, μ a viscosidade do fluido, ρ_g a densidade do gás, V_s a velocidade superficial do gás, $k_1(=L/K_m)$ e k_2 são as constantes de permeabilidade do meio poroso. O primeiro e o segundo termo referem-se aos efeitos puramente viscosos e aos efeitos cinéticos ou inerciais, respectivamente (MIGUEL, 2003).

A Equação 2 é conhecida como equação de Darcy e é tradicionalmente utilizada para avaliar o escoamento de fluidos em meios porosos para o caso de escoamento puramente viscoso, devido às baixas velocidades de filtração (MIGUEL, 2003).

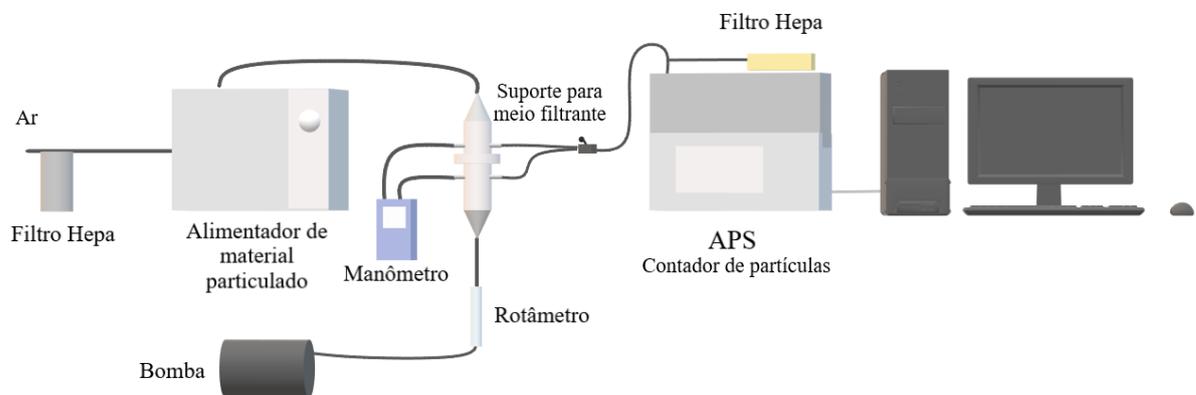
$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} V_s \quad (2)$$

em que ΔP é a queda de pressão, L representa a espessura do meio filtrante, μ a viscosidade do fluido, $V_s(=q/A)$ a velocidade superficial do gás e k_1 é a constante de permeabilidade.

2.3.2.2 Eficiência de coleta de micropartículas do poliéster

Para determinar a eficiência do meio filtrante para partículas menores que 10 micrômetros, foi utilizado o aparato experimental apresentado na Figura 5, composto por: um gerador de aerossol modelo 3433, um diluidor de aerossol 3302 e um espectrômetro Aerodynamic Particle Sizer (APS) modelo 3320 da TSI, do LCA-DEQ/UFSCar.

Figura 5 - Unidade experimental de filtração com contador de micropartículas



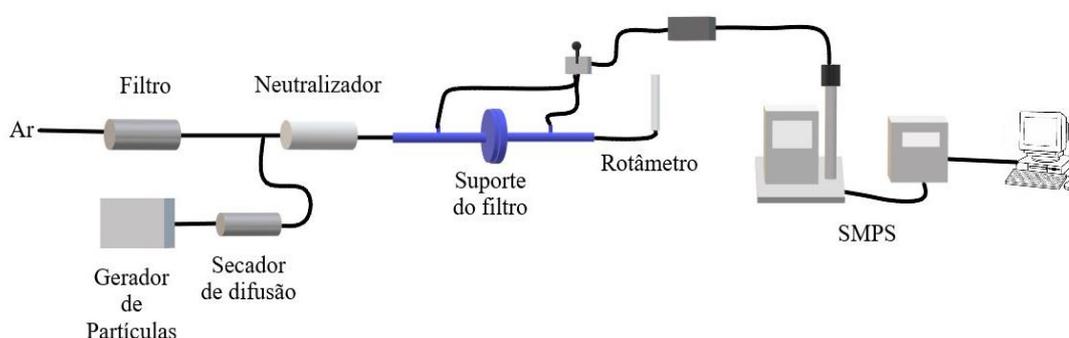
O material particulado proveniente do processo de sinterização primária foi alimentado ao sistema e foram coletadas amostragens isocinéticas antes e após o meio filtrante. As amostras seguem para um diluidor e, em sequência, para um contador de partículas. O mesmo foi realizado para a cal hidratada. A caixa de diluição tem um filtro HEPA para filtrar o ar ambiente succionado. Para calibrar a vazão de ar coletado, um rotâmetro da Gilmont® com escala até 25 L/min estará no ponto da coleta da amostra e a diluição é regulada por uma válvula de três vias até obter a vazão desejada no rotâmetro. O ar limpo é eliminado por uma bomba de sucção. Os dados foram coletados em um computador.

Os meios filtrantes possuíam área útil de filtração de 20,43 cm² (diâmetro de 5,10 cm). Foi operado com uma relação ar-pano de 2 m/min, que é a mesma operada pela norma VDI 3926 esse valor foi padronizado para todos os ensaios de filtração e dessulfurização.

2.3.2.3 Eficiência de coleta de nanopartículas do poliéster

Para determinar a eficiência de coleta de nanopartículas na faixa de 6 a 300 nm de diâmetro de mobilidade elétrica, os meios filtrantes foram submetidos a ensaios de filtração na unidade experimental ilustrada na Figura 6.

Figura 6 - Unidade experimental de nanopartículas



Uma solução com concentração de 1g/L de NaCl foi adicionada em um gerador de partículas modelo 3079 da TSI na vazão de 200 mL/h. O aerossol passa por um secador de difusão modelo 3062 da TSI para remoção da umidade e em seguida, o ar com partículas de NaCl atravessa um neutralizador contendo Criptônio 85 (Kr-85) para promover o equilíbrio de cargas de aerossóis, evitando possível deposição de partículas na tubulação. Segue para o suporte da amostra de meio filtrante de 40,15 cm² de área útil, onde amostragens isocinéticas foram coletadas antes e após o meio filtrante e foram enviadas para um analisador de partículas por mobilidade elétrica (SMPS) modelo 3936 da TSI, que aferiu a concentração de partículas nanométricas por faixas de diâmetro aerodinâmico. O SMPS é composto por um classificador eletrostático modelo 3080 e de um contador de partículas ultrafinas modelo 3776 que determina a quantidade de nanopartículas (entre 6 e 300 nm) por faixa de diâmetro antes e após o meio filtrante permitindo o cálculo da eficiência de coleta.

Por fim, o ar filtrado passa por um rotâmetro modelo GF-2400 da Gilmont® com escala até 40 L/min e é liberado para o ambiente. A vazão de ar alimentada é ajustada neste rotâmetro em 4 L/min para corresponder a uma velocidade de filtração de 2 m/min, a qual foi a mesma aplicada nos demais ensaios deste trabalho.

2.3.3 CARACTERIZAÇÃO DO *PRECOATING*

2.3.3.1 *Massa depositada do precoating*

Para determinar a massa de cal hidratada depositada durante o *precoating*, os meios filtrantes foram pesados em uma balança Modelo AY220 da Shimadzu antes e depois da realização do *precoating*. O *precoating* foi realizado até as quedas de pressão atingirem valores máximos de 50, 100, 150, 200, 300 e 400 Pa variando a umidade em 0, 5 e 10%. A partir disso, o ponto de colmatação foi calculado segundo a Figura 3.

2.3.3.2 *Resistência específica do precoating*

A resistência específica da camada de *precoating* foi calculada através da equação:

$$\Delta P_T = K_c V_f W \quad (4)$$

em que, ΔP_T é o ΔP do sistema, K_c é a resistência específica da torta, V_f é a velocidade de filtração e W é a massa de pó depositada por unidade de área (ITO; AGUIAR, 2009). A velocidade foi variada aumentando a vazão do fluxo de ar que passa no filtro com a camada de *precoating* e a resistência específica foi calculada segundo a Equação 4.

2.3.3.3 *Coefficiente de permeabilidade, porosidade e espessura da camada de precoating*

O *precoating* foi realizado no equipamento da Figura 5, alimentando cal hidratada até os valores de queda de pressão máxima de 50, 100, 150, 200, 300 e 400 Pa fossem atingidos. Em seguida, os meios filtrantes com a camada de *precoating* foram levados à unidade experimental da Figura 4 para aferição da permeabilidade conforme explicado no item 2.3.2.1.

A partir da equação de Darcy é possível calcular o coeficiente de permeabilidade da camada de *precoating*:

$$\Delta P = \mu V \left(\beta + \frac{L_P}{B_P} \right) \quad (5)$$

sendo que μ é a viscosidade do ar, V é a velocidade de filtração, β é a resistência específica da camada de *precoating*, L_P é a espessura da camada de *precoating* e B_P é o coeficiente de permeabilidade (SCHILLER; SCHMID, 2014b).

Como no caso de tortas de filtração a espessura da mesma (L_P) varia com o tempo de filtração, pode-se admitir que, no caso de tortas incompressíveis:

$$L_P = \frac{W}{\rho_P (1 - \varepsilon_P)} \quad (6)$$

em que, W é a massa de pó depositada por unidade de área, ρ_p é a densidade bulk da cal hidratada e ε_p é a porosidade da camada do *precoating* (SCHILLER; SCHMID, 2014b).

A resistência específica da camada de *precoating* pode ser calculada como o coeficiente K_2 da equação de Ergun:

$$K_2 = \frac{150(1 - \varepsilon_p)}{\varepsilon_p^3} \frac{\mu}{\rho_p d_p^2} \quad (7)$$

sendo que, μ é a viscosidade do ar, ρ_p é a densidade bulk da cal hidratada, ε_p é a porosidade da camada do *precoating* e d_p é o diâmetro da partícula de cal hidratada (ERGUN, 1952).

2.3.4 FILTRAÇÃO

Inicialmente foi feito um planejamento experimental e, em seguida, foram realizados os experimentos para eficiência de coleta de micro e nanopartículas.

2.3.4.1 Planejamento experimental

Um planejamento experimental foi realizado para avaliar a influência do *precoating* variando a umidade da cal hidratada (5, 10 e 15%) e a queda de pressão (50, 100, 150, 200, 300 e 400 Pa), em conjunto, sendo a variável resposta a eficiência de coleta do pó de síter. A Tabela 1 mostra o planejamento experimental realizado em réplicas.

Tabela 1 - Planejamento experimental do *precoating* variando umidade e espessura

Experimento	Réplica	Umidade (%)	Queda de pressão (Pa)
1	1	5	50
2	1	5	100
3	1	5	150
4	1	10	50
5	1	10	100
6	1	10	150
7	1	15	50
8	1	15	100
9	1	15	150
10	2	5	50
11	2	5	100
12	2	5	150
13	2	10	50
14	2	10	100
15	2	10	150
16	2	15	50
17	2	15	100
18	2	15	150
19	3	5	50
20	3	5	100
21	3	5	150
22	3	10	50
23	3	10	100
24	3	10	150
25	3	15	50
26	3	15	100
27	3	15	150
28	1	10	400
29	1	15	200
30	1	5	100
31	1	5	200
32	1	15	400
33	1	10	100
34	1	15	100
35	1	5	400
36	1	10	200
37	2	10	400
38	2	15	200
39	2	5	100
40	2	5	200
41	2	15	400
42	2	10	100
43	2	15	100
44	2	5	400
45	2	10	200
46	3	10	400
47	3	15	200
48	3	5	100
49	3	5	200
50	3	15	400
51	3	10	100
52	3	15	100
53	3	5	400
54	3	10	200

2.3.4.1 *Efeito da umidade do precoating na eficiência de coleta de micropartículas*

Para determinar o efeito da umidade do *precoating* na eficiência de coleta de partículas menores que 10 micrômetros, foram realizadas filtrações na unidade experimental apresentada na Figura 5 variando as umidades do material particulado (cal hidratada) em 0, 5, 10 e 15%. Esses valores de umidade foram limitados à possibilidade de alimentação sem causar danos ao equipamento.

2.3.4.2 *Efeito da espessura do precoating na eficiência de coleta de micropartículas*

Para determinar o efeito da espessura do *precoating* na eficiência de coleta de partículas menores que 20 micrômetros, a filtração foi realizada na unidade experimental apresentada na Figura 5 variando as espessuras do *precoating*. Como não é possível controlar a espessura durante a alimentação, a variável de controle foi a queda de pressão máxima do *precoating*.

O meio filtrante utilizado foi o poliéster (PE). Para a realização do *precoating*, o pó de cal hidratada foi alimentado até atingir a queda de pressão máxima determinada (50, 100, 150, 200, 300 e 400 Pa) na unidade experimental com contador de partículas da Figura 5. Após a realização do *precoating*, deu-se início da filtração, sendo, agora, o sistema alimentado com o pó de síter. A razão ar-pano utilizada em todos os testes foi de 2 m/min.

2.3.4.3 *Experimentos variando a umidade e espessura da camada de precoating na eficiência de coleta de micropartículas*

Os experimentos para avaliação da eficiência de coleta de partículas menores que 10 micrômetros variando a umidade e a espessura da camada de *precoating* foram realizados na unidade experimental apresentada na Figura 5.

O meio filtrante utilizado foi o poliéster. Para a formação do *precoating*, a cal hidratada foi alimentada no sistema de filtração, conforme descrito na Tabela 1. Após a formação do *precoating*, o sistema agora era alimentado com o pó de síter e a eficiência de coleta era analisada.

2.3.4.4 *Eficiência de coleta variando a umidade e espessura do precoating para nanopartículas*

O *precoating* foi realizado até a queda de pressão máxima alcançar os valores de 50, 100, 150, 200, 300 e 400 Pa e, em seguida, foi levado à unidade experimental da Figura 6, para

realização da filtração com aerossol de nanopartículas de NaCl conforme elucidado no item 2.3.2.3.

A Tabela 2 apresenta todos os experimentos realizados e suas respectivas variáveis.

Tabela 2 - Tabela de experimentos

Experimentos	Meio Filtrante	Precoat	Pó/Solução filtrado (a)	Queda de pressão máxima do <i>precoating</i> (Pa)	Umidade (%)
Eficiência de coleta para micropartículas	Poliéster	-	Pó de síter	-	0
Eficiência de coleta para nanopartículas	Poliéster	-	NaCl	-	-
Massa depositada e Ponto de colmatação	Poliéster	Cal hidratada	Pó de síter	50, 100, 150, 200, 300 e 400	0
Resistência específica do <i>precoating</i>	Poliéster	Cal hidratada	Pó de síter	50, 100, 150, 200, 300 e 400	0
Permeabilidade do <i>precoating</i>	Poliéster	Cal hidratada	Pó de síter	50, 100, 150, 200, 300 e 400	0
Porosidade do <i>precoating</i>	Poliéster	Cal hidratada	Pó de síter	50, 100, 150, 200, 300 e 400	0
Espessura do <i>precoating</i>	Poliéster	Cal hidratada	Pó de síter	50, 100, 150, 200, 300 e 400	0
Efeito da umidade na eficiência de coleta para micropartículas	Poliéster	Cal hidratada	Pó de síter	150 e 200	0, 5, 10 e 15%
Efeito da espessura na eficiência de coleta para micropartículas	Poliéster	Cal hidratada	Pó de síter	50, 100, 150, 200, 300 e 400	0
Eficiência de coleta para micropartículas variando a umidade e espessura do <i>precoating</i>	Poliéster	Cal hidratada	Pó de síter	50, 100, 150, 200, 300 e 400	5, 10 e 15%
Eficiência de coleta para nanopartículas variando a espessura do <i>precoating</i>	Poliéster	Cal hidratada	NaCl	50, 100, 150, 200, 300 e 400	0, 5 e 10%

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item são apresentados os resultados das caracterizações dos materiais particulados, dos meios filtrantes e do *precoating* e dos ensaios de filtração.

2.4.1 Caracterização dos Materiais Particulados

Os valores de massa específica, obtidos por picnometria, do diâmetro médio volumétrico, obtido pelo equipamento Malvern, e do diâmetro aerodinâmico médio, pelo APS, dos materiais particulados estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização dos materiais particulados

Material particulado	Massa específica (g/cm ³)	Diâmetro aerodinâmico médio (μm)	Diâmetro médio volumétrico (μm)
Cal hidratada	2,58 ± 0,03	1,43 ± 0,02	19,83 ± 0,29
Pó de sinterização	2,32 ± 0,00	2,02 ± 0,62	9,39 ± 0,13

Os principais componentes da cal hidratada e do pó de sínter obtidos através do DRX encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Componentes químicos dos materiais particulados pelo DRX

Cal hidratada	Ca(OH) ₂	MgO	Ca(CO ₃)	CaMoO ₄	NbO	CaMg(CO ₃) ₂	Mg ⁹⁵ Cu ⁰⁵ O
Pó de sínter	Ca(OH) ₂	KCl	KIO ₃	Mn ₂ SnS ₄	Sb ₂ O ₃	CaF ₂	Si

As curvas de concentração e concentração cumulativa em massa (APS) e volume (Malvern) em função do diâmetro aerodinâmico estão dispostas nas Figura 7 e 8. Analisando as figuras, tanto para cal hidratada (Figura 7a) quanto para o pó de sínter (Figura 7b), a maior porcentagem de concentração em massa é de partículas até 2 μm. Em função do volume, a maior concentração para a cal hidratada (Figura 8a) está entre 10 e 30 μm, enquanto para o pó de sínter (Figura 8b) está entre 6 e 15 μm.

Figura 7 - Curvas de concentração em massa: a) cal hidratada; b) pó de sinterização primária

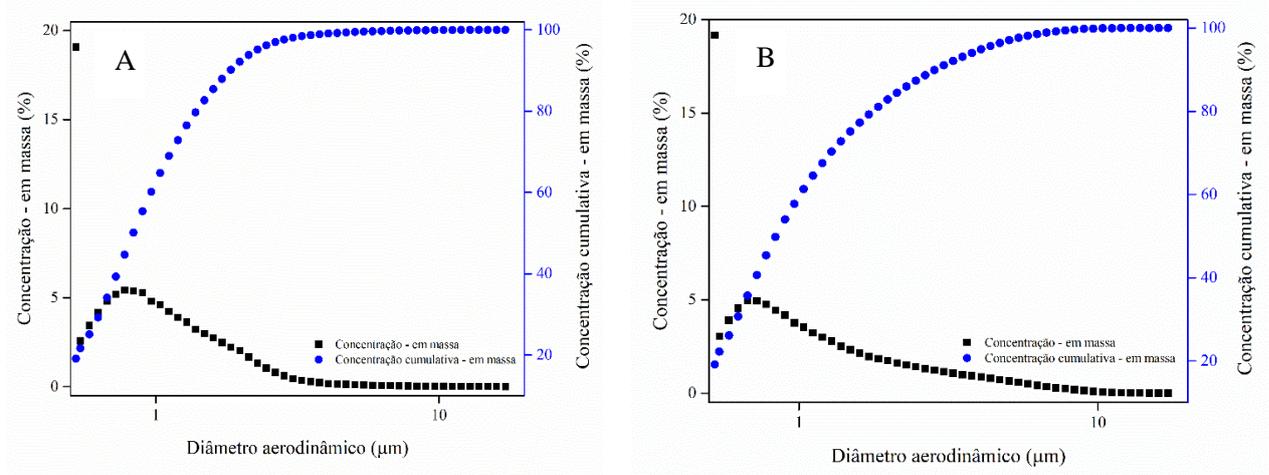
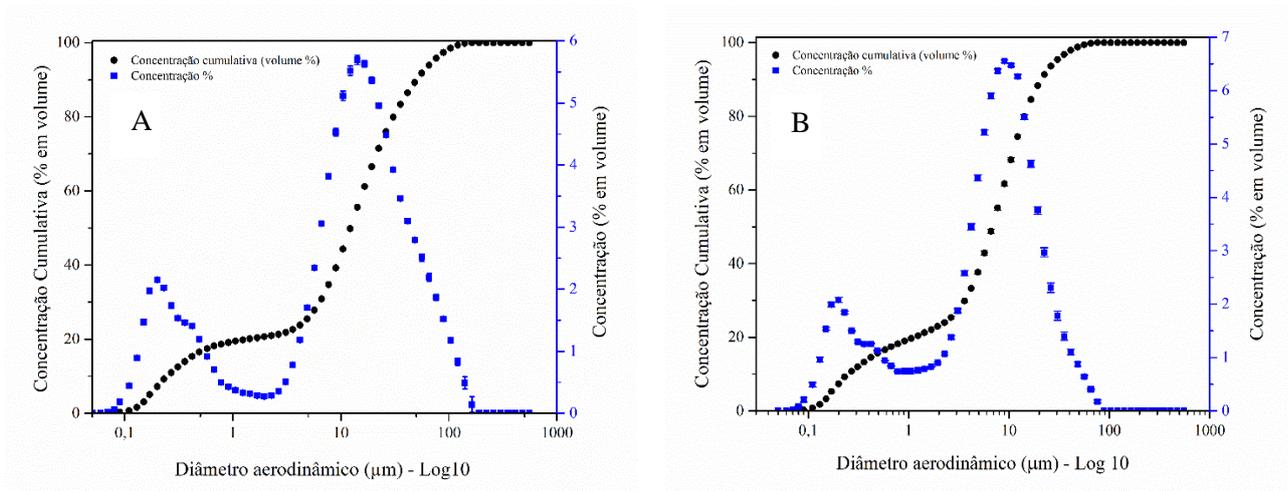


Figura 8 - Concentração volumétrica: a) cal hidratada; b) pó de sinterização primária



2.4.1.1 Pó de sinterização

A composição química do pó de sínter (Tabela 5) foi analisada por FRX e determinação de carbono por queima direta. O pó de sínter é composto em sua maioria por óxido de cálcio.

Tabela 5 - Composição química do pó de sínter

Componentes	% (em massa para óxidos)
SiO ₂	1,15
Al ₂ O ₃	0,25
K ₂ O	2,87
Na ₂ O	0,88
Fe ₂ O ₃	1,07
TiO ₂	0,01
CaO	59,66
MgO	0,47
Mn ₂ O ₃	0,02
P ₂ O ₅	1,76
SO ₃	8,21
Perda ao fogo	23,66
Teor de carbono	1,9

A amostra de sinterização primária (Figura 9) foi caracterizada e disposta na Tabela 6. O pó de sínter apresenta formato e tamanho irregular.

Figura 9 - Pó de sínter: a) 500 vezes de aumento b) 2500 vezes de aumento

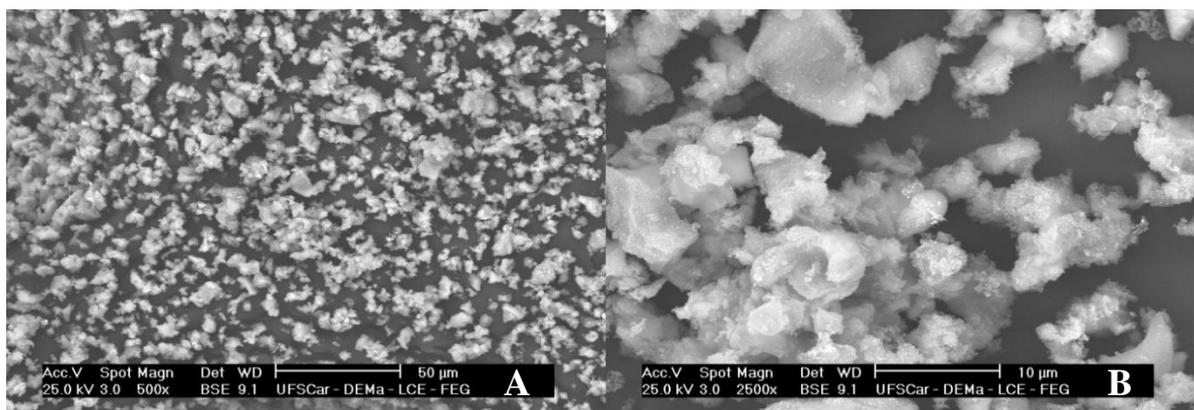


Tabela 6- Caracterização do pó de sinterização primária

Massa específica (g/cm ³)	Porosidade (%)	80% dos Poros (μm)	Penetração (cm ³ /g)	Diâmetro médio do poro (μm)
2,3268 ± 0,004	48,44	0,12 – 0,97	0,040	0,47

A amostra de pó de síter possui porosidade de 48,44% sendo 80% dos poros entre 0,12 e 0,97 μm e valor médio de 0,47 μm .

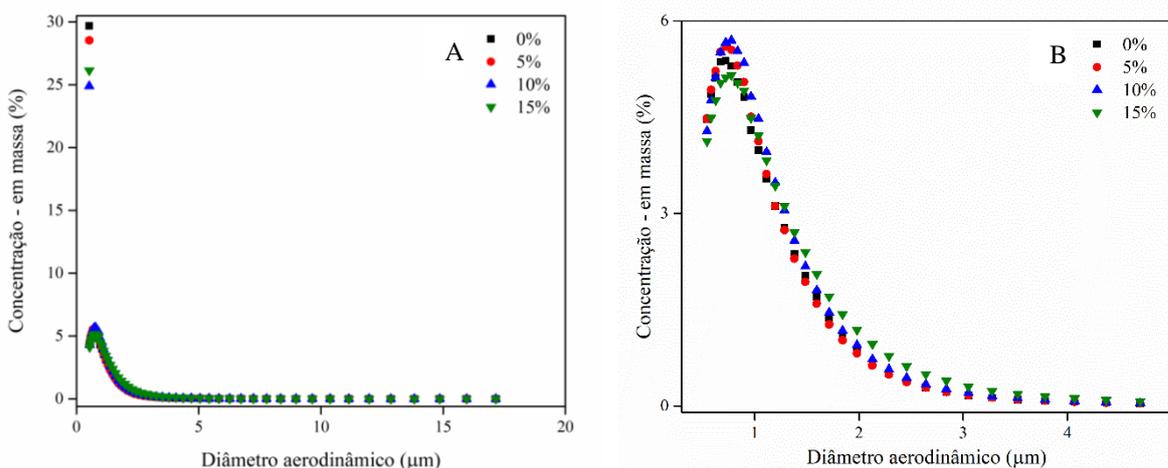
2.4.1.2 Cal hidratada natural

As amostras de cal hidratada foram pesadas e levadas à estufa a 105°C por 24h e então pesadas novamente e foi calculada a umidade das amostras. A cal hidratada natural tem umidade de 1,02%.

2.4.1.3 Cal hidratada úmida

Após umedecer as amostras de cal hidratada seca e esperar 24h para completa homogeneização foi feita a caracterização da concentração em função do diâmetro aerodinâmico como mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Caracterização das amostras de cal hidratada úmidas: a) de 0 à 20 μm b) ampliação de 0 à 6 μm



A concentração, em massa, de partículas até 1 μm diminuem com o aumento da umidade e aumenta a concentração de partículas entre 1,5 e 5 μm . Para 10% de umidade, a concentração de partículas até 1 μm é a menor, pois aumenta a concentração entre 1 e 1,3 μm , enquanto para 15%, entre 1,2 e 4 μm .

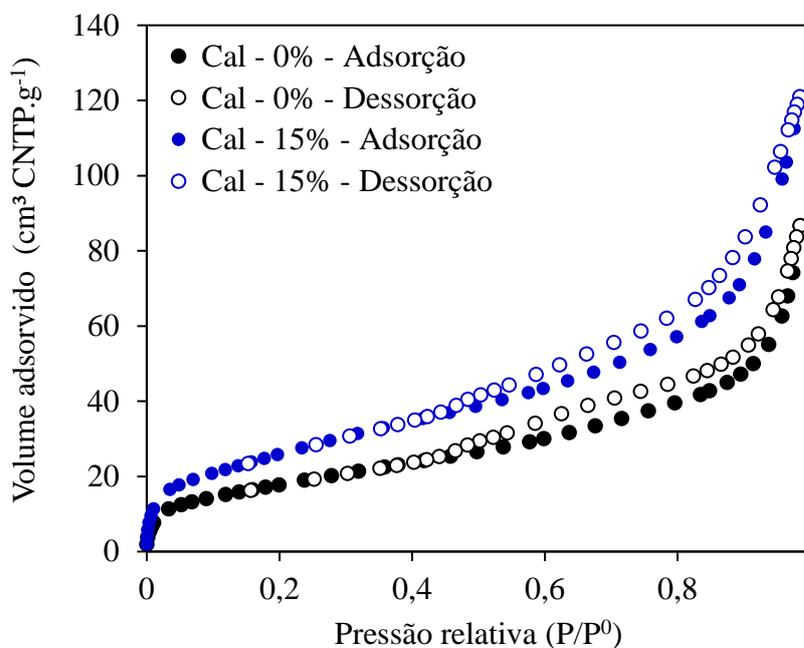
Segundo Cui *et al.* (2020), a formação de hidrato ocorre durante a preparação da cal úmida (que será utilizada como adsorvente no Capítulo 4). A superfície específica aumenta e o volume de poros do adsorvente aumenta por causa da formação de hidrato. Isso é possível observar na Tabela 7, o diâmetro aerodinâmico médio aumenta com a elevação da umidade porque, segundo (JOUBERT *et al.*, 2011) as moléculas de água penetram os poros das partículas de cal hidratada. Além disso, foi possível observar a formação de grânulos devido a maior adesão das partículas umas às outras.

Tabela 7 - Diâmetro aerodinâmico da cal úmida

Umidade (%)	Diâmetro aerodinâmico médio (μm)
0	$1,4367 \pm 0,0251$
5	$2,0467 \pm 0,1457$
10	$2,0533 \pm 0,0986$
15	$2,3133 \pm 0,0907$

A Figura 11 apresenta as curvas de adsorção e dessorção da cal hidratada na análise de BET.

Figura 11 - Curvas de adsorção e dessorção das amostras da cal hidratada



Observa-se que ambas isotermas de adsorção são do tipo II (IUPAC), isso significa que apresenta características de materiais não porosos com forte interação entre adsorvente e adsorvato (cal hidratada e gás nitrogênio) (THOMMES et al., 2015). O volume do adsorvido é maior na cal hidratada com 15% de umidade na adsorção e dessorção, isso significa que a umidade aumenta o volume pela penetração das moléculas de água nos poros da cal. Isso pode ser visto na Tabela 8, que após a dessorção a área superficial da cal hidratada foi superior na amostra com 15%.

Tabela 8 - Caracterização das amostras úmidas de cal hidratada

Amostra	Área superficial (m ² /g)	Densidade (g/cm ³)	Porosidade (%)	80% dos Poros (μm)	Penetração (cm ³ /g)	Diâmetro médio do poro (μm)
Cal 0%	3,86	2,914 ± 0,101	33,58	0,065 - 0,27	0,072	0,14
Cal 5%	20,25	3,011 ± 0,008	31,50	0,087 - 0,32	0,056	0,14
Cal 10%	13,58	2,874 ± 0,003	31,42	0,083 - 0,43	0,028	0,21
Cal 15%	98,4	2,635 ± 0,009	25,05	0,060 - 0,53	0,058	0,16

A área superficial e o tamanho dos poros da cal hidratada aumentam com a presença de umidade. A porcentagem da porosidade diminui com o aumento da umidade.

2.4.1.4 Formação de Grânulos

Com o objetivo de analisar o ponto inicial de formação e o desenvolvimento dos grânulos, as amostras de cal hidratada seca foram umidificadas variando a umidade entre 0 e 15%, como é possível ver na Figura 12.

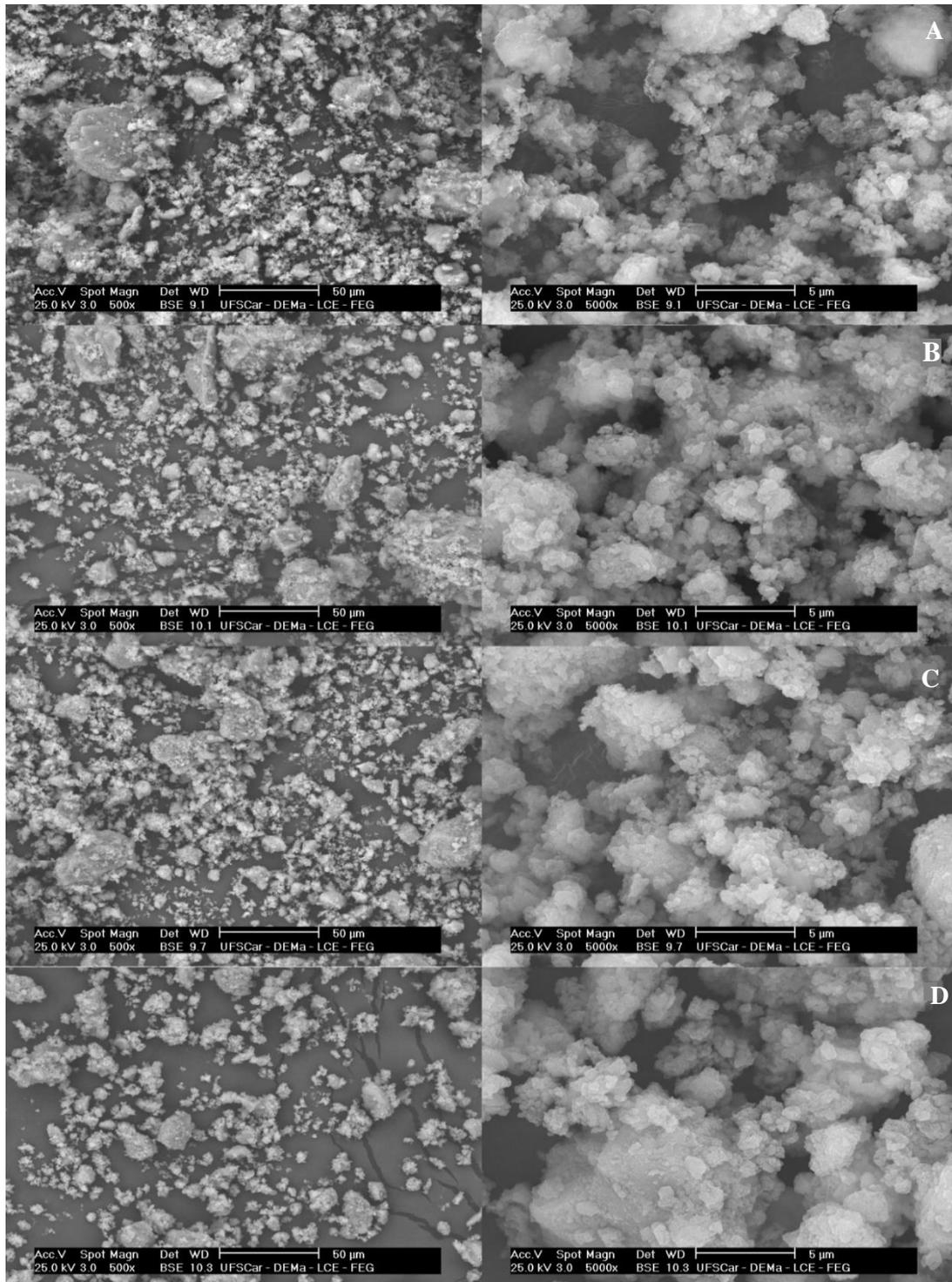
Figura 12 - Formação de grânulos com a umidade



É possível observar que quanto maior a umidade maior a formação de grânulos, a partir da umidade de 1% já é possível ver o início da formação dos grânulos, principalmente a partir

de 5%. A Figura 13 mostra as imagens da cal hidratada obtidas no MEV após umidificar com água destilada variando de 0 à 15% sendo possível observar a aglomeração das partículas.

Figura 13 - Imagens da cal hidratada úmida: a) Seca 0% b) 5 % c) 10% e d) 15%



A partir dessas imagens é possível observar que a formação dos grânulos se dá por coalescência, na qual as partículas vão se agregando por colisão formando partículas irregulares e menos resistentes (ORMENESE, 1989).

2.4.2 Caracterização do meio filtrante

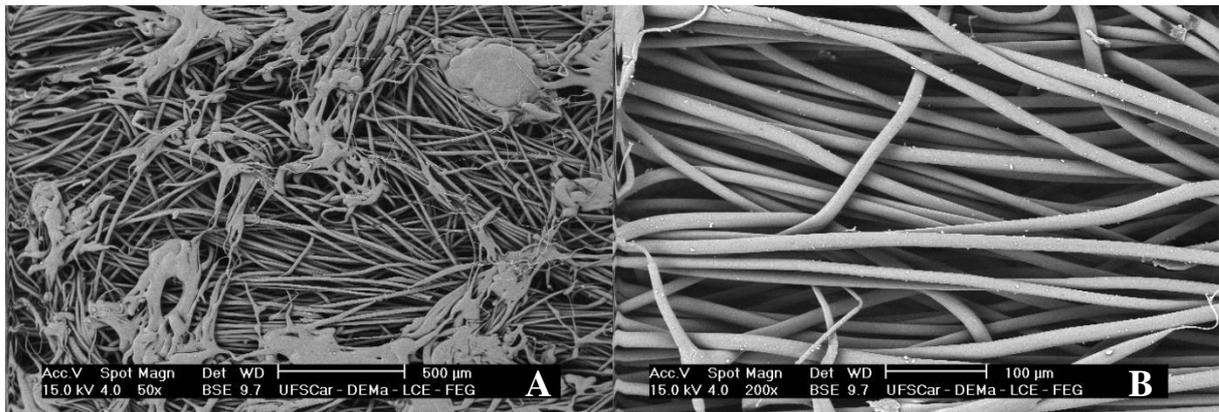
Os resultados da caracterização do poliéster tais como espessura, gramatura e porosidade se encontram na Tabela 9.

Tabela 9 - Características do poliéster

Meio filtrante	Espessura (mm)	Gramatura (g/m ²)	Porosidade
Poliéster	1,96 ± 0,20	558,7 ± 11,0	0,6342 ± 0,0034

A Figura 14 apresenta as imagens do MEV para o meio filtrante de poliéster que foram caracterizadas segundo a metodologia de Bortolassi; Guerra; Aguiar, (2017). A partir das imagens é possível ver os tratamentos realizados na superfície do meio filtrante a termofixação, chamuscagem e calandragem. O meio filtrante possui fibras de diâmetro médio de 13,79 ± 2,4 µm, sendo 90% das fibras entre 10 e 20 µm obtidas.

Figura 14 - Imagens do poliéster: a) ampliação de 50 vezes; b) ampliação de 200 vezes



A densidade de empacotamento pode ser descrita como a fração de volume total do elemento filtrante efetivamente ocupada por fibras, conforme a equação (DONOVAN, 1985):

$$\alpha = \frac{m_f}{\rho_f L} = 1 - \varepsilon = 0,3658 \quad (8)$$

em que α é a densidade de empacotamento do filtro (adimensional), m_f é a densidade mássica por área do filtro, ρ_f é a densidade da fibra, L é a espessura do filtro e ε é a porosidade do filtro.

Um valor alto da densidade de empacotamento se reflete em uma menor penetração de partículas, uma vez que assim se aumenta a tortuosidade do gás. Em meios filtrantes com maior

densidade há menos espaço disponível para as partículas se depositarem. Pelo mesmo motivo, a perda de carga também aumenta com a densidade de empacotamento (T. YLITUOMI; STENHOUSE; WALSH, 1995; WALSH et al., 1996).

No caso do poliéster, a densidade de empacotamento apresentou um valor baixo, o que significa uma maior capacidade de penetração devido ao maior espaço disponível no meio filtrante.

2.4.2.1 Permeabilidade do meio filtrante

Os valores de permeabilidade do meio filtrante de poliéster calculados através das equações 1 e 2 estão descritos na Tabela 10. Na literatura, o mais comum é caracterizar o meio filtrante em termos do coeficiente de permeabilidade darciana (K_1) e da constante não-darciana (K_2) presentes na equação 2 de Forchheimer e apenas K_1 segundo a equação 1 de Darcy.

Tabela 10 - Permeabilidade do poliéster

Darcy	Forchheimer		Coeficiente de permeabilidade (m^2s/Kg)
K_1 (m^2)	K_1 (m^2)	K_2 (m)	
$4,20 \times 10^{-11} \pm 1,55 \times 10^{-12}$	$4,65 \times 10^{-11} \pm 0,16 \times 10^{-11}$	$2,45 \times 10^{-05} \pm 0,15 \times 10^{-05}$	$2,86724 \times 10^{-06}$

O trabalho de Carvalho (2018) apresentou de permeabilidade valores próximos aos obtidos experimentalmente, sendo K_1 igual $4,77 \times 10^{-11} m^2$ e para K_2 , $1,062 \times 10^{-05} m$.

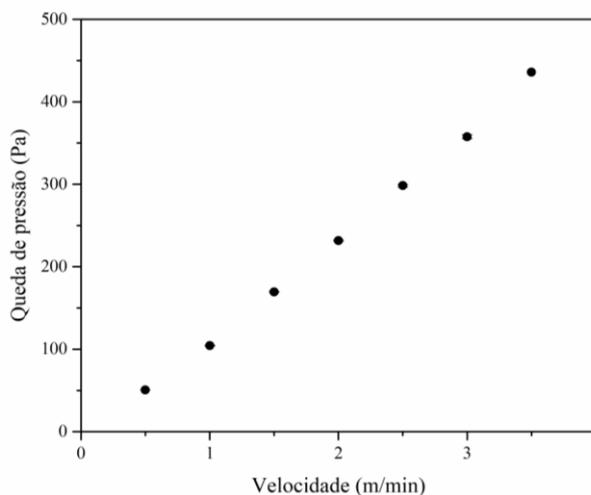
Uma maior inclinação da curva de queda de pressão em função da velocidade superficial de filtração ocorre quando a estrutura superficial é mais fechada, ou seja, há menor presença de espaços vazios (poros). Isso é observado através do valor de porosidade do poliéster de 0,63 mostrado na Tabela 9.

A Figura 15 apresenta a queda de pressão variando a velocidade de filtração no sistema de filtração. A partir da qual foi possível obter o valor médio da resistência específica de $683,58 \pm 50,55 Kg/m^2s$, calculando-se a inclinação da parte linear da curva da queda de pressão no filtro em função da velocidade superficial de filtração, e o quadrado do coeficiente de correlação (R^2) de 0,9366.

Uma maior inclinação da curva de queda pressão em função da velocidade superficial de filtração ocorre quando a estrutura superficial é mais fechada, ou seja, há menor presença de

espaços vazios (poros). Isso é possível observar pelo valor de porosidade do poliéster de 0,63, como mostrado na Tabela 9.

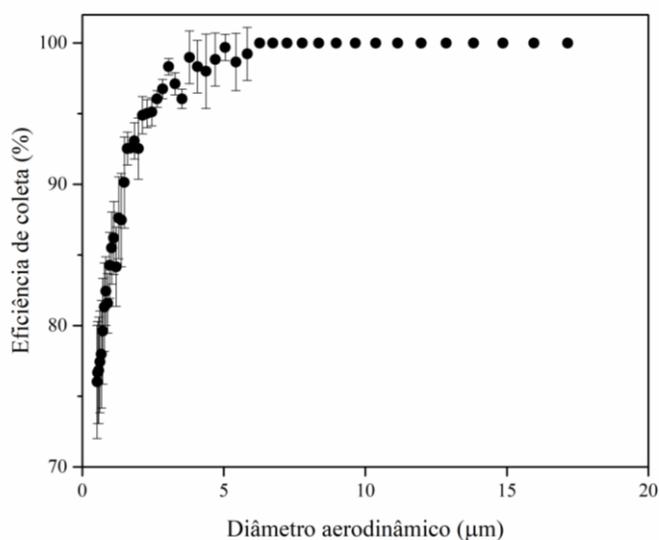
Figura 15 – Queda de pressão em função da velocidade de filtração do poliéster



2.4.2.2 Eficiência de coleta de micropartículas do poliéster

Os experimentos de filtração no meio filtrante de poliéster foram realizados na unidade experimental com contador de partículas do SMPS (Figura 5) para avaliação da eficiência de coleta para micropartículas de pó de sínter. Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 16 -.

Figura 16 - Eficiência de coleta do poliéster sem precoating



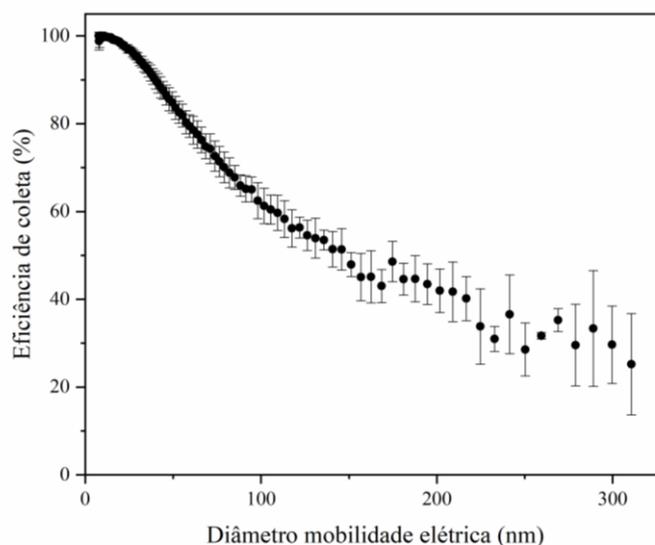
A eficiência de coleta do poliéster foi 100% para partículas maiores que 7µm. Na faixa de diâmetro de 2,5 a 6,5µm há uma menor eficiência porque segundo Hinds, (1982) os

mecanismos de filtração predominantes são apenas devido aos efeitos físicos de interceptação e impactação. O efeito gravitacional, torna-se mais efetivo para as partículas maiores que $4\mu\text{m}$. Nessa faixa há uma baixa na eficiência de coleta em relação ao movimento Browniano.

2.4.2.3 Eficiência de coleta de nanopartículas do meio filtrante

A eficiência de coleta de nanopartículas (7,64 à 310,6 nm) do poliéster pode ser vista na Figura 17.

Figura 17 - Eficiência de coleta de nanopartículas do poliéster



A eficiência caiu com o aumento do diâmetro de mobilidade elétrica pelo fato de que esta é a faixa de tamanho de partículas (3 e 300 nm de diâmetro) mais difícil de ser capturada por um meio filtrante sem tratamento de membrana (denominada Tamanho de Partícula de Maior Penetração). Isso ocorre por serem grandes o suficiente para estarem sujeitas aos efeitos difusionais significativos, e são extremamente pequenas para que os efeitos inerciais atuem (HINDS, 1982; CARVALHO, 2018; HUTTEN, 2016).

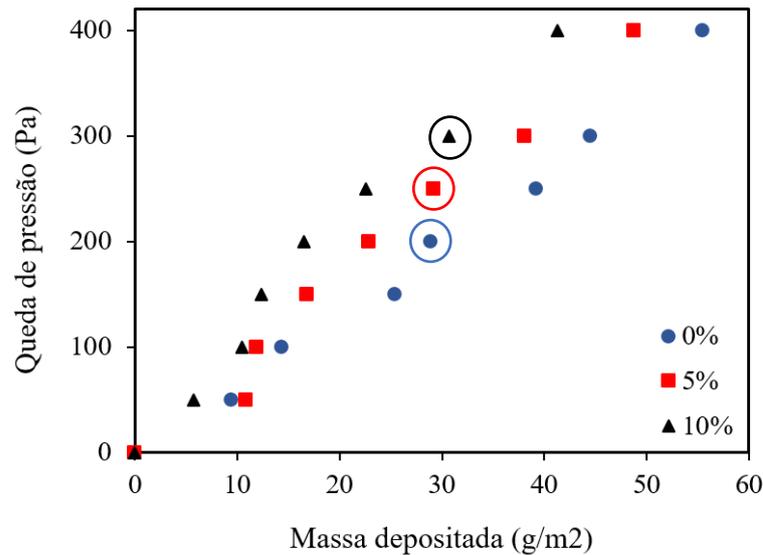
2.4.3 Precoating na remoção de material particulado

Os próximos itens explicarão os resultados de eficiência ao realizar o *precoating* na filtração.

2.4.3.1 Massa depositada do *precoating*

Ao realizar o *precoating* variando a espessura, a massa de pó foi aumentando ao longo do tempo, essa massa foi medida em função da queda de pressão máxima e está descrita na Figura 18.

Figura 18 - Massa depositada de *precoating* e ponto de colmatação variando a umidade em 0, 5 e 10%



Como esperado, quanto maior a massa de cal hidratada depositada, maior era a queda de pressão, para todas as umidades investigadas. Considerando o aumento da umidade da cal hidratada, maior foi a queda de pressão para alcançar o ponto de colmatação do *precoating*, para a mesma quantidade de massa depositada por unidade de massa. A partir da Figura 18, foi possível obter o ponto de colmatação aproximado de cada uma das curvas de umidade, considerando apenas o aumento linear da queda de pressão em função da massa de pó depositada, devido ao início de formação da torta, que ocorreu aproximadamente ao atingir a queda de pressão de 200 Pa para 0% de umidade, de 250 Pa para 5% e de 300 Pa para 10%. Ou seja, mesmo variando a umidade o ponto de colmatação ocorreu em torno de 30 g/m². A diferença nos valores de queda de pressão ocorreu devido a presença de pontes líquidas e maior adesão entre as partículas.

Apesar da queda de pressão na presença de umidade apresentar um valor mais elevado, o tempo para atingir o ponto da colmatação foi mais longo. Existem três razões para explicar o efeito da umidade relativa na queda de pressão: o tamanho da partícula de cal hidratada, que aumentou com a umidade (item 2.4.1.3); o aumento da força de adesão entre as partículas e as fibras do meio filtrante e de coesão entre as partículas devido as pontes capilares, favorecendo

a formação de dendritos; e uma possível redução das cargas eletrostáticas entre as fibras e as partículas. A explicação mais provável para esses fenômenos é a influência da alta umidade nas propriedades elétricas das partículas que alteram a estrutura da torta. Pois, as forças de Van der Waals combinadas com as forças eletrostáticas dipolo induzidas e coulômbicas quando a água líquida está presente, formam as pontes líquidas e aumentam a adesão devido a maior tensão superficial (LI; LI; ZHOU, 2016; MORRIS; ALLEN, 1996).

2.4.3.2 Resistência específica do *precoating*

Os valores de resistência específica da camada de *precoating* à 0% de umidade estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 - Resistência específica do *precoating*

Queda de Pressão (Pa)	Resistência específica do <i>precoating</i> (s ⁻¹)
50	74193
100	111223
150	151955
200	160850
300	213533
400	235707

A resistência específica da camada de *precoating* aumentou com o acréscimo da espessura do *precoating* (aumento da queda de pressão). Isso ocorre porque a porosidade da torta diminui com a maior compactação da torta aumentando a resistência específica do *precoating*. Além disso, o tamanho médio das partículas do material que forma a torta aumenta com o aumento da velocidade de filtração, provavelmente devido à sedimentação da partícula antes de chegar ao filtro e, também, devido à maior umidade da cal hidratada, como foi mostrado no item 2.4.1.3. Esta combinação sugere que o efeito da porosidade é maior em comparação com o diâmetro médio das partículas. Silva; Negrini; Aguiar; Coury (1999) estimaram a força de adesão entre a torta e o meio filtrante e observaram que ela aumentou, bem como a distância efetiva entre as superfícies das partículas diminui com o aumento da velocidade superficial de filtração.

2.4.3.3 Permeabilidade, porosidade e espessura da camada de *precoating*

A Tabela 12 apresenta os valores de permeabilidade, porosidade e espessura das camadas de *precoating* variando a queda de pressão máxima, ou seja, a sua espessura.

Tabela 12 - Permeabilidade e porosidade da camada de *precoating*

ΔP	Porosidade	Coefficiente de permeabilidade (m ³ s/kg)	Espessura (mm)
50	0,90	2,93	0,21
100	0,86	5,85	0,28
150	0,83	9,91	0,30
200	0,83	10,75	0,38
300	0,80	16,87	0,43
400	0,78	19,67	0,52

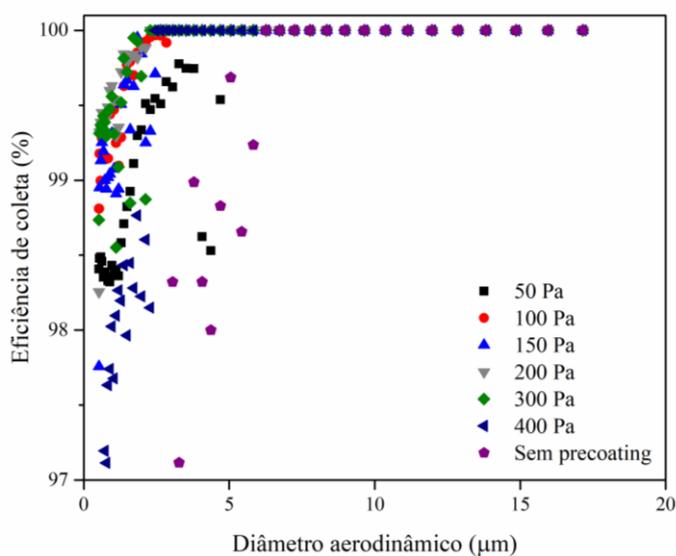
A porosidade do *precoating* diminuiu elevando o valor da queda de pressão. Isso ocorreu devido ao aumento da espessura da torta, indicando que houve uma maior compactação da mesma. O mesmo foi observado por Fagnoli, (2010) e Schmidt (1995). O coeficiente de permeabilidade diminuiu com o aumento da espessura do *precoating*, uma vez que a porosidade diminuiu.

2.4.4 Filtração

2.4.4.1 Efeito da espessura do *precoating* na eficiência de coleta de micropartículas

A eficiência de coleta do *precoating* variando a espessura da camada de *precoating*, ou seja, a queda de pressão em 50, 100, 150, 200, 300 e 400 Pa em função do diâmetro aerodinâmico das partículas, para o poliéster, pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 - Eficiência de coleta do *precoating* variando a espessura da camada de *precoating* (queda de pressão máxima).

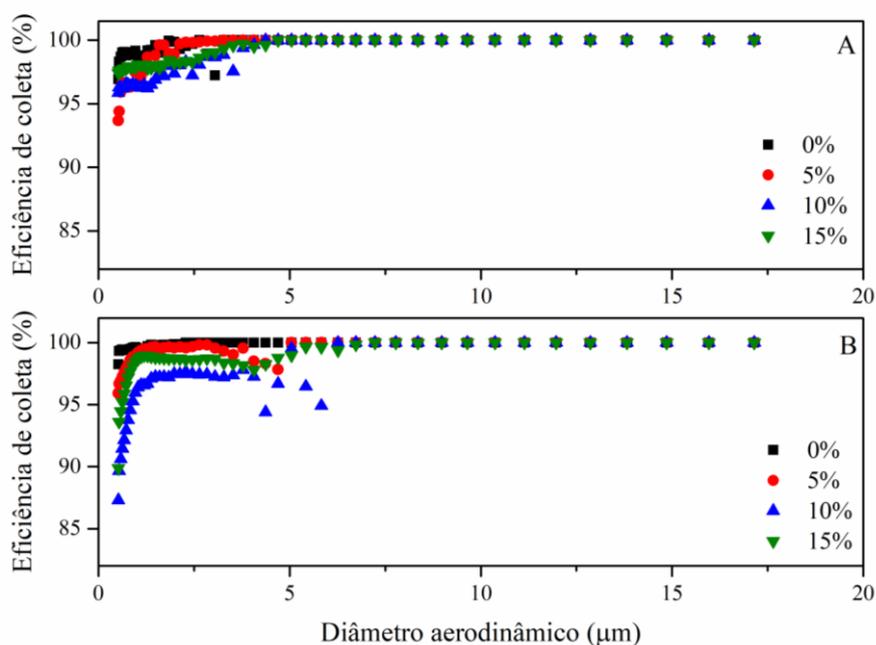


A eficiência de coleta aumentou, em todos os casos, após a aplicação da camada de *precoating* no meio filtrante de poliéster sem *precoating*. A eficiência de coleta apresentou valores maiores a partir de 200 Pa (0,38 mm), uma vez que a torta já está completamente formada, após atingir o ponto de colmatação, conforme foi detalhado no item 2.4.3.1. Para todos os casos, a eficiência de coleta foi 100% para partículas maiores do que 5 μ m.

2.4.4.2 Efeito da umidade do *precoating* na eficiência de coleta de micropartículas

Para observar o efeito da umidade na eficiência de coleta de micropartículas, realizou-se a filtração na unidade experimental utilizando o contador de partículas micrométricas (Figura 5) com cal hidratada com 0, 5, 10 e 15% de umidade. Os valores de eficiência de coleta em função do diâmetro aerodinâmico podem ser observados na Figura 20 e o desvio padrão das curvas variou entre 0 e 2,3%.

Figura 20 - Eficiência de coleta variando a umidade da camada de *precoating*: a) queda de pressão máxima até 150Pa; b) queda de pressão máxima até 200Pa



Em ambos os casos, 0 e 5% de umidade apresentaram maiores eficiências de coleta e, no caso de maiores valores de umidade, os valores de eficiência foram menores. Esse decaimento na eficiência de coleta ao aumentar a umidade ocorreu devido a formação de grânulos. Isso aconteceu devido a maior aglomeração entre as partículas, causando a formação de uma camada de *precoating* mais irregular, com partes mais porosas e outras menos porosas. O aumento da umidade do pó de *precoating* pode provocar a formação de pontes líquidas entre as partículas vizinhas, formando pequenos aglomerados que se aproximavam de uma forma

esférica conforme a umidade aumentava, esse comportamento foi verificado através de observações experimentais. Se a umidade relativa for alta, as forças capilares causadas pela tensão superficial entre as camadas moleculares adsorvidas de vapor de água também são importantes (MORRIS; ALLEN, 1996; PARK; YOO; SEUNG, 2007) e devem ser consideradas.

O *precoating* com 10% de umidade apresentou os menores valores de eficiência de coleta para partículas até 7 μ m. Segundo Morris and Allen (1996) e Park et al. (2007), as características de adesão da torta variam com a umidade, havendo um efeito correspondente na estrutura da torta que reflete nos valores obtidos para a resistência específica da torta. Na verdade, a espessura da torta é ligeiramente aumentada pelo uso de umidade e esse aumento na espessura compensa o aumento da porosidade. Porém, esse efeito só é observado entre 15 e 25% de umidade, por isso o *precoating* com 15% de umidade apresentou maior eficiência do que 10% de umidade.

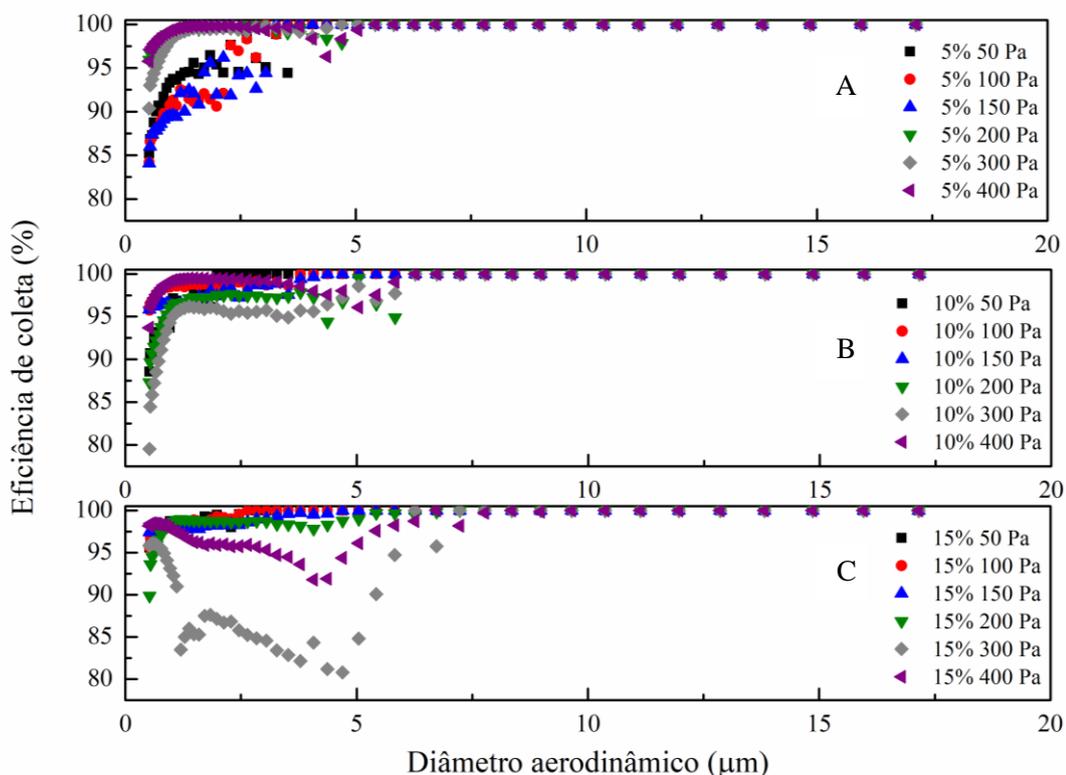
2.4.4.3 Eficiência de coleta da camada do *precoating* variando a umidade e a espessura

Os ensaios experimentais foram realizados na unidade experimental apresentada na Figura 5, para avaliação da eficiência de coleta de partículas menores que 10 micrômetros. Foi variado a umidade (5, 10 e 15%) e a queda de pressão (50, 100, 150, 200, 300 e 400 Pa) da camada de *precoating* conforme o planejamento experimental do item 2.3.4.1. A Figura 21 apresenta os dados de eficiência obtidos dos experimentos.

Nota-se que na Figura 21a que quando se tem uma menor umidade, maiores valores de espessura (queda de pressão máxima) são necessários para obter uma maior eficiência de coleta, pois é necessário que o ponto de colmatação já tenha sido atingido, assim, a camada de *precoating* já completamente formada, atua com maior eficiência. Para valores de queda de pressão até 150 Pa, a torta ainda não estava completamente formada, por isso apresentou valores de eficiência menores e mais dispersos até 5 μ m.

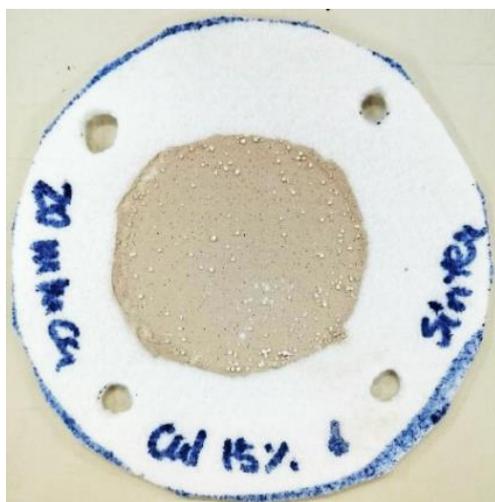
Ao aumentar a umidade para 10%, houve uma maior ligação entre as partículas da cal formando grânulos (Figura 22), o que ocasionou em uma mudança de comportamento durante a filtração. As camadas mais finas de *precoating* (menor queda de pressão máxima) apresentaram maiores valores de eficiência e, as mais espessas tiveram uma queda na eficiência devido ao aumento das irregularidades da camada do *precoating* como explicado no item 2.4.3.3.

Figura 21 - Eficiência de coleta do *precoating* variando a umidade e a queda de pressão: a) *precoating* com 5% de umidade; b) *precoating* com 10% de umidade e c) *precoating* com 15% de umidade



Para 15% de umidade, a formação de grânulos aumentou (é possível ver na Figura 22), sendo necessária uma maior massa de cal hidratada para atingir os valores de queda de pressão máxima. Neste caso, as camadas mais finas de *precoating* apresentaram eficiência de coleta maiores, próximas à 100% ao longo de toda faixa de diâmetro. Enquanto para maiores valores de queda de pressão, a maior presença de grânulos causou uma diminuição na eficiência de coleta devido à menor uniformidade da camada de *precoating*.

Figura 22 - Meios filtrantes de poliéster com *precoating* após a filtração com pó de sínter



A Tabela 13 apresenta os valores de eficiência de coleta global para cada uma das condições apresentadas na Figura 21.

Tabela 13 – Eficiência global de partículas micrométricas

Queda de pressão (Pa)	Umidade (%)		
	5	10	15
50	96,2829 ± 4,1806	97,9375 ± 3,1411	99,1922 ± 1,9973
100	95,5067 ± 5,1129	99,0381 ± 1,0578	99,1805 ± 6,7111
150	95,2064 ± 5,1455	98,3265 ± 1,6035	98,9421 ± 1,7067
200	99,2159 ± 1,2002	98,0404 ± 2,3377	98,5567 ± 1,0999
300	98,8151 ± 1,8642	94,9250 ± 4,6132	86,1086 ± 1,0850
400	99,1979 ± 1,3021	98,8093 ± 1,4267	97,4448 ± 0,9847

Assim como descrito anteriormente na Figura 21, 5% de umidade apresenta maiores valores de eficiência de coleta a partir de 200 Pa. Para 10% de umidade, a eficiência de coleta aumenta entre 100 e 200 Pa, sendo possível observar o efeito de compensação da espessura sobre a umidade aos 400 Pa. Com o aumento da umidade, no caso de 15%, menores valores de queda de pressão tais como 50 e 100 Pa foram mais eficientes. E, assim como anteriormente, a espessura compensou a umidade.

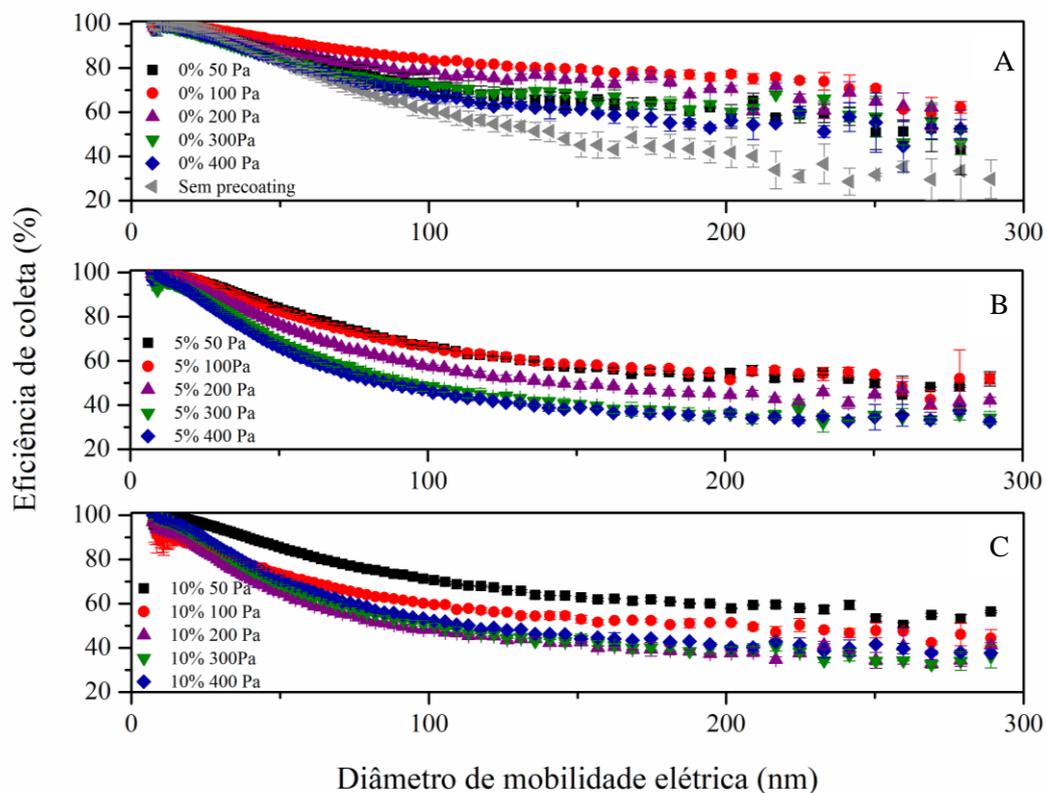
2.4.4.4 Eficiência de coleta do *precoating* para nanopartículas

A eficiência da camada de *precoating* para nanopartículas pode ser vista na Figura 23. Observa-se que o *precoating* aumentou a eficiência de coleta em todos os casos para 0% de umidade. Porém, mesmo com o *precoating* é possível observar a diminuição da eficiência de coleta com o aumento do diâmetro.

Assim como explicado por Hinds (1982) e Lee; Liu (1980), essa faixa de diâmetro é conhecida como MPPS (Most Penetrating Particle Size) que é o resultado dos efeitos combinados de vários mecanismos de captura de partículas, cujas eficiências dependem do tamanho das partículas, bem como das propriedades do filtro. Os meios filtrantes sem tratamentos tendem a ser menos eficazes na captura de partículas de tamanho 300 nm e costumam apresentar eficiência mínima correspondente com a variação dos parâmetros de filtração como: o tamanho da fibra do meio filtrante, a densidade de empacotamento das fibras e a velocidade de filtração. Além disso, nessa faixa de diâmetro 150 a 300nm, os mecanismos

de captura que mais influenciam, difusão, impactação e interceptação, apresentam baixa eficiência por serem mecanismos de coleta com contato.

Figura 23 - Eficiência de coleta do *precoating* para nanopartículas variando a umidade e queda de pressão: a) *precoating* com 0% de umidade; b) *precoating* com 5% de umidade e c) *precoating* com 10% de umidade



Analisando os casos variando a espessura da camada de *precoating*, ou seja, os valores de queda de pressão máxima de 50 até 200 Pa, é possível ver um aumento contínuo na eficiência de coleta na Figura 22a. Porém, a partir de 200 Pa, quanto maior a queda de pressão máxima do *precoating* menor foi a eficiência de coleta. E à medida que a umidade cresce (Figura 22b e c), esse efeito da diminuição da eficiência de coleta com o aumento da espessura se tornou ainda mais visível, como é possível observar em 400 Pa. Isso ocorre porque, como explicado anteriormente, o aumento da umidade elevou as chances de formação de camadas de *precoating* mais irregulares na superfície do meio filtrante, reduzindo, conseqüentemente, a eficiência de coleta, e a espessura passou a ser o efeito dominante.

É possível verificar o mesmo efeito presente na eficiência para as micropartículas, para 10 e 15% de umidade da camada de *precoating*, onde as maiores espessuras compensam a maior umidade e propiciam uma maior eficiência de coleta se igualando à eficiência obtida em 200Pa. Todos os valores de eficiência global podem ser vistos na Tabela 14. Os mesmos comportamentos descritos anteriormente podem ser vistos nos valores de eficiência global.

Tabela 14 – Eficiência global de partículas nanométricas

Queda de pressão (Pa)	Umidade (%)		
	0	5	10
0	76,2189 ± 1,8387	-	-
50	83,7571 ± 1,9994	80,3627 ± 0,4783	82,5534 ± 0,3833
100	89,9852 ± 0,5819	80,2742 ± 0,6117	72,4978 ± 1,4804
200	83,2058 ± 1,9986	75,1384 ± 0,4991	66,8928 ± 0,6739
300	82,9519 ± 0,8647	68,8025 ± 1,0574	69,7859 ± 0,5956
400	81,1925 ± 1,5686	67,7337 ± 0,9128	71,6696 ± 0,3899

O *precoating* aumentou a eficiência de coleta e maiores valores de queda de pressão apresentaram valores de eficiência menores para todos os casos. E para o valor de 10% de umidade foi observado o efeito da umidade na eficiência de coleta.

2.4.5 Resultados gerais

A Tabela 155 apresenta os resultados obtidos em todos os itens apresentados acima como um compilado para facilitar o entendimento do que foi exibido. Os valores globais de eficiência de coleta são apresentados, considerando toda a faixa de diâmetro de 0 até 20 μm para as partículas micrométricas e de 0 até 300 nm para as nanopartículas.

Tabela 15 - Resultados gerais

Experimentos	Sem <i>Precoating</i> (Poliéster limpo)			Com <i>Precoating</i>			
	Queda de pressão máxima (Pa)	Umidade (%)	Resultado	Queda de pressão máxima (Pa)	Umidade (%)	Resultados	
Porosidade	0	0	$0,6342 \pm 0,0034$	50, 100, 150, 200, 300 e 400	0	0,8980 – 0,7843	
Coeficiente de Permeabilidade (m ² s/Kg)	0	0	$2,86724 \times 10^{-06}$	50, 100, 150, 200, 300 e 400	0	2,9262 – 19,6735	
				150 200			0, 5, 10 e 15% 0, 5, 10 e 15%
Eficiência de coleta global para micropartículas (%)	0	0	$92,9398 \pm 1,4456$	50, 100, 150, 200, 300 e 400	0	99,3044 ± 0,6845 - 98,9609 ± 4,7269	
				50, 100, 150, 200, 300 e 400		5% 10% 15%	96,2829 - 99,3317 97,9375 - 98,9316 99,1921 - 97,4447
				50, 100, 150, 200, 300 e 400		0% 5% 10%	83,7570 - 81,1914 100 – 99,5492 99,8734 – 100

2.4.6 Análise estatística

Neste item foi analisado a influência das variáveis de umidade e queda de pressão máxima (espessura) da camada de *precoating* no resultado de eficiência de coleta.

2.4.6.1 Análise estatística da eficiência do *precoating* na coleta de micropartículas

Para a análise estatística foram escolhidos três níveis para cada fator (variável independente) uma vez que para o planejamento é necessário que os fatores possuam a mesma quantidade de níveis. Para a umidade (fator 1), os três níveis foram 5, 10 e 15% e, para a queda de pressão (fator 2), 100, 200 e 300Pa. Desta forma, tendo dois fatores, umidade e queda de pressão, e três níveis, o planejamento fatorial foi do tipo 2^3 .

No diagrama de Pareto (Figura 24), a umidade, linear e quadrática, foi o fator menos influente na eficiência de coleta, devido aos baixos valores de umidade utilizados nos experimentos. A interação entre a umidade e a queda de pressão máxima do *precoating* tem influência negativa, o que significa que ao aumentar os valores de umidade e queda de pressão máxima (espessura) do *precoating*, a eficiência de coleta diminui. Os fatores individualmente apresentam influência positiva, porém pouco significativa.

O mesmo pode ser observado através da Tabela 16 que apresenta os efeitos de cada fator e a combinação entre eles. Os valores em negrito são significativos, pois apresentam o grau de significância estatística (p) menor do que 0,05. É possível observar que somente as interações entre os dois fatores, tanto linear (L) quanto quadrática (Q), que foram significativas. Ou seja, só tem efeito significativo sobre a eficiência de coleta quando as filtrações são realizadas variando tanto a umidade quanto a queda de pressão máxima do *precoating*.

Figura 24 - Diagrama de Pareto

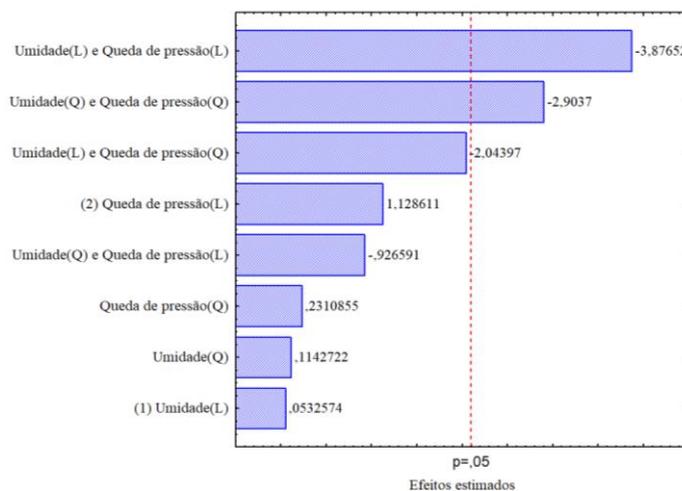


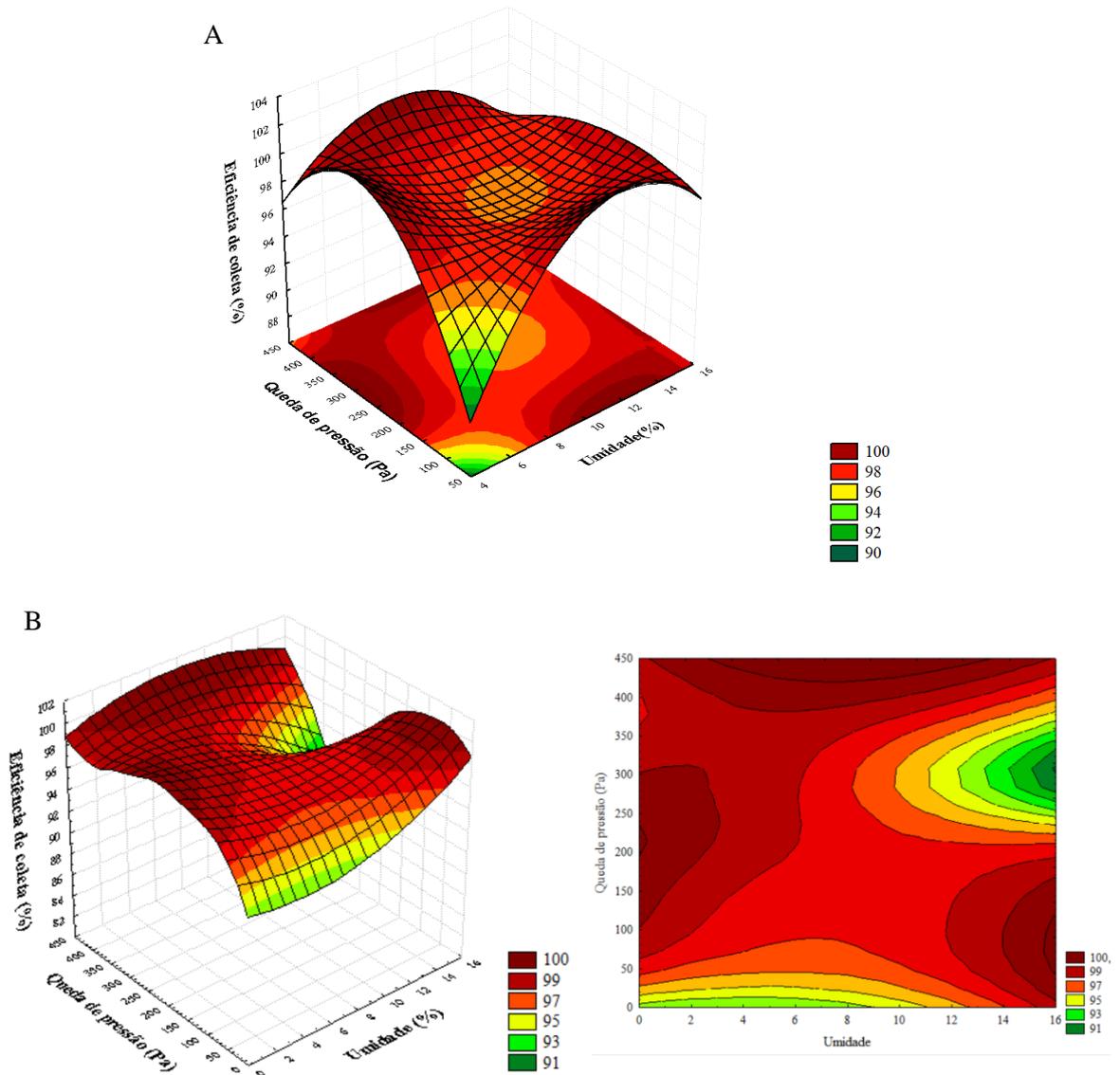
Tabela 16 - Efeito estimado, erro padrão valor de t e grau de significância estatística (p)

Fator	Efeito estimado	Erro padrão	t(18)	p
Média	98,27869	0,241281	407,3204	0,000000
(1) Umidade (L)	0,03148	0,591015	0,0533	0,958113
Umidade (Q)	0,05849	0,511834	0,1143	0,910287
(2) Queda de pressão (L)	0,66093	0,585618	1,1286	0,273880
Queda de pressão (Q)	0,11935	0,516466	0,2311	0,819855
Umidade (L) e Queda de pressão (L)	-2,78037	0,717233	-3,8765	0,001106
Umidade (L) e Queda de pressão (Q)	-1,29289	0,632540	-2,0440	0,055870
Umidade (Q) e Queda de pressão (L)	-0,57554	0,621142	-0,9266	0,366397
Umidade (Q) e Queda de pressão (Q)	-1,59063	0,547795	-2,9037	0,009469

As superfícies de resposta foram plotadas em função da queda de pressão e da umidade, mostrando mais claramente a variação da eficiência de coleta em função das variáveis independentes. A superfície 25-a foi obtida através dos 2 fatores (queda de pressão e umidade) com três níveis cada (5,10 e 15% de umidade e 100, 200, e 300 Pa); enquanto a superfície 26-b foi obtida através de todos os dados experimentais (0, 5, 10 e 15% e 0, 50, 100, 150, 200, 300 e 400 Pa).

Na superfície 25-a, nota-se que os menores valores de eficiência ocorrem com baixa queda de pressão limite (espessura) e baixa umidade. A eficiência de coleta aumentou ao se utilizar uma baixa queda de pressão e alta umidade, e, baixa umidade e alta queda de pressão limite (espessura). Assim como explicado anteriormente, é possível ver o efeito significativo sobre a eficiência de coleta quando a umidade e a queda de pressão apresentam valores elevados.

Figura 25 - Superfícies de resposta: a) 2 fatores e 3 níveis b) todos os dados experimentais



Na superfície 25-b, considerando todos os dados experimentais, os menores valores de eficiência de coleta ocorrem ao fazer a filtração sem *precoating* e com o *precoating* com alta umidade e queda de pressão entre 250 e 350 Pa. Os maiores valores de eficiência de coleta ocorrem no *precoating* com baixa umidade e alta queda de pressão e com alta umidade e baixa queda de pressão limite (espessura).

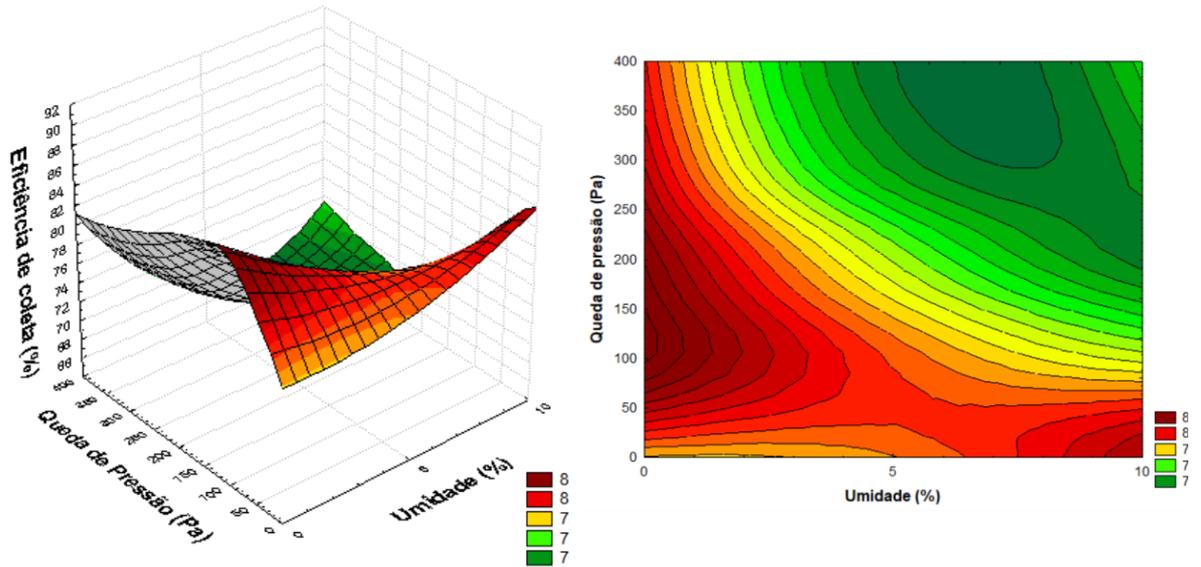
2.4.6.2 Análise estatística da eficiência do *precoating* na coleta de nanopartículas

A Figura 26 apresenta as superfícies de resposta de eficiência de coleta de nanopartículas em função da queda de pressão e da umidade obtida através de todos os dados experimentais (0, 5, 10% e 0, 50, 100, 200, 300 e 400 Pa).

É possível observar que os menores valores de eficiência ocorrem para alta queda de pressão limite (espessura) e alta umidade, ou seja, o inverso do obtido na coleta de

micropartículas. E, os maiores valores de eficiência ocorreram com baixa queda de pressão (50 Pa) e alta umidade (10%) assim como para micropartículas, e, baixa umidade (0%) e queda de pressão entre 50 e 250 Pa. Ou seja, para que haja uma maior eficiência de coleta tanto para micro quanto para nanopartículas a faixa ideal de baixa queda de pressão, entre 150 e 250 Pa, e umidade acima de 10%.

Figura 26 - Superfícies de resposta para nanopartículas



2.5 CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos no Capítulo 2 sobre o *precoating* na filtração de gases, pode-se concluir que de forma geral, o *precoating* aumentou a eficiência de coleta de micro e nanopartículas, a resistência específica, o coeficiente de permeabilidade e a porosidade em relação ao poliéster virgem. A formação da torta apresentou maiores valores de ponto de colmatação com o aumento da umidade. E a eficiência de coleta do *precoating* foi maior para valores de queda de pressão máxima acima de 200 Pa sem a presença de umidade.

Ao realizar o *precoating*, quanto maior a massa alimentada, maior a espessura obtida, o que ocasiona em uma maior compactação aumentando, assim, a queda de pressão. A maior compactação, devido ao aumento da espessura, causou uma diminuição da porosidade, que levou à uma maior resistência específica e ao aumento do coeficiente de permeabilidade da camada de *precoating*.

Com o aumento da umidade da cal hidratada, houve um aumento do diâmetro aerodinâmico e da área superficial. E, quanto maior a umidade, mais grânulos são formados. No caso do *precoating* com 15% de umidade, um aumento na espessura da torta que compensou o aumento da porosidade e resultou em uma maior eficiência de coleta. Além disso, durante a filtração com o aerossol de nanopartículas de NaCl, o *precoating* apresentou uma menor eficiência de coleta acima de 0,3827 mm de espessura (200 Pa) e 10% de umidade.

Avaliando a umidade e a espessura em conjunto para coleta de micropartículas, notou-se que somente as interações entre umidade e a queda de pressão (espessura), tanto linear (L) quanto quadrática (Q), foram significativas. A umidade (0 a 15%) foi o fator que menos influenciou na eficiência de coleta. Os maiores valores de eficiência de coleta de micropartículas ocorrem ao fazer o *precoating* com baixa umidade e alta queda de pressão (maior espessura) e com alta umidade e baixa queda de pressão limite (menor espessura). E, os menores valores de eficiência ocorrem ao fazer o *precoating* com baixa queda de pressão limite (menor espessura) e baixa umidade ou sem *precoating*. Para coleta de nanopartículas, os maiores valores de eficiência ocorreram com baixa queda de pressão (50 Pa) e alta umidade (10%) assim como para micropartículas, e, baixa umidade (0%) e queda de pressão entre 50 e 250Pa. Ou seja, para que haja uma maior eficiência de coleta tanto para micro quanto para nanopartículas a faixa ideal de baixa queda de pressão, entre 150 e 250 Pa, e umidade acima de 10%.

3 CAPÍTULO 3 – INFLUÊNCIA DA UMIDADE E ESPESSURA DO PRECOATING NOS CICLOS DE FILTRAÇÃO

O Capítulo 3 aborda a aplicação do processo de *precoating* e a influência da umidade e da espessura ao longo dos ciclos de filtração. O objetivo dessa etapa consiste em determinar as condições operacionais do *precoating* que maximizam a eficiência de coleta de partículas e o tempo de vida útil em comparação com o filtro virgem.

3.1 OBJETIVOS

3.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento da filtração ao longo dos ciclos de filtração variando a espessura e umidade do *precoating*.

3.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos tem-se:

- Avaliar o ponto de colmatção em uma filtração no equipamento da norma VDI 3629;
- Avaliar a influência da umidade e da espessura da camada de *precoating* na eficiência de coleta de partículas micrométricas ao longo de 50 ciclos de filtração;
- Avaliar a influência da umidade e da espessura do *precoating* no tempo de duração de 50 ciclos de filtração.

3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.2.1 Filtro de Mangas

O filtro de mangas (Figura 27) consiste em um ou mais compartimentos isolados contendo fileiras de sacos de tecido na forma de tubos redondos, planos ou moldados ou cartuchos plissados que são chamados de mangas. O gás carregado de partículas passa (normalmente) ao longo da superfície das mangas e depois radialmente através do tecido. As partículas são retidas na superfície das mangas e o fluxo de gás limpo é liberado para a atmosfera. O filtro é operado ciclicamente, alternando entre períodos relativamente longos de filtração e curtos períodos de limpeza. Durante a limpeza, o pó acumulado nas mangas é retirado da superfície do tecido e depositado em uma moega/tremonha para posterior descarte (TURNER *et al.*, 2002).

Figura 27- Filtro de mangas



Fonte: Autor

Os filtros de mangas coletam partículas com tamanhos de diâmetro, finas e até ultrafinas (PMs 20, 10, 5), com eficiências geralmente acima de 99 ou 99,9%. As quedas de pressão de operação estão geralmente na faixa de 750 a 2000 Pa. Além de flexibilidade para vários tipos de particulado e uma ampla gama de vazões volumétricas de gás e podem ser operados com baixas quedas de pressão. Essas boas características de desempenho tornam os filtros de tecido a escolha preferida para problemas convencionais de limpeza de gás. Possíveis desvantagens incluem que são geralmente limitados a filtrar a seco, altas temperaturas e certos produtos

químicos podem danificar alguns tecidos e podem exigir uma grande área para instalação (SEVILLE, 1997).

O meio filtrante é costurado em mangas filtrantes (Figura 28) que são abertas em apenas uma extremidade. Existem, portanto, duas configurações básicas de filtro de tecido: com coleta de poeira na parte interna das mangas ou com coleta de poeira na parte externa (SEVILLE, 1997).

Figura 28 – Mangas filtrantes



Fonte: Adaptado de Solaft

Os filtros de mangas removem as partículas de uma corrente de gás pela passagem através de um meio filtrante no qual as partículas são coletadas na forma de uma camada de pó. À medida que a filtração prossegue, mais poeira se acumula, não apenas nas superfícies de fibra expostas remanescentes, mas também nas partículas já capturadas. Desenvolvem-se crescimentos dentro agregados de poeira que são em forma de cadeia chamados de dendritos. Estes se projetam progressivamente para e através dos poros interfibras para criar novos subporos de área e volume reduzidos. Essa camada de pó, chamada de torta, coletada no tecido é a principal responsável pela alta eficiência (SEVILLE, 1997).

Durante este período de acúmulo de material particulado, a taxa de aumento da queda de pressão não é linear. É alto inicialmente, mas reduz gradualmente à medida que a torta se forma e a taxa de aumento da queda de pressão torna-se mais ou menos constante (SEVILLE, 1997).

A torta é uma barreira com poros tortuosos que prendem as partículas à medida que viajam pela torta. Filtros de tecido são usados onde a coleta de partículas de alta eficiência é necessária. As limitações são impostas pelas características do gás (temperatura e corrosividade) e pelas características das partículas (principalmente viscosidade) que afetam o tecido ou sua operação e que não podem ser acomodadas economicamente. A torta de filtro deve então ser removida de tempos em tempos por algum tipo de processo de limpeza. O filtro de mangas é compartimentado para que um compartimento possa ser limpo enquanto outros ainda estão em serviço (SEVILLE, 1997; THEODORE, 2008; TURNER et al., 2002).

Existem dois tipos básicos de filtração que ocorrem em filtros de tecido comerciais; o primeiro é referido como filtração da fibra, e o segundo é a filtração da torta. Na filtração da fibra, o pó é retido nas próprias fibras por sedimentação, impactação, interceptação e difusão. Na filtração da torta a fibra atua como um suporte sobre o qual uma camada de poeira é depositada para formar uma camada microporosa capaz de remover partículas adicionais por peneiramento, bem como outros mecanismos básicos de filtração (impactação, interceptação, difusão, sedimentação e atração eletrostática). Em filtros de mangas industriais, ambos os métodos ocorrem, mas a filtração da torta é o processo mais importante após o novo meio filtrante da manga ficar completamente impregnado de particulado (THEODORE, 2008).

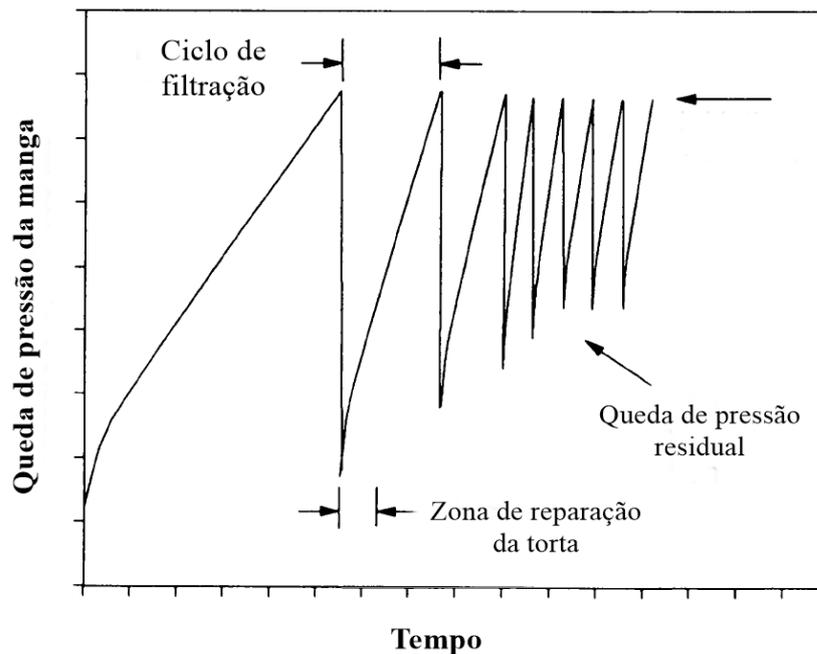
O processo básico de filtração pode ser conduzido em muitos tipos diferentes de filtros de tecido nos quais o arranjo físico e o método de remoção do material coletado do meio filtrante variam. As diferenças essenciais podem estar relacionadas, em geral, ao seguinte: tipo de tecido, mecanismo de limpeza, geometria do equipamento, modo de funcionamento. Além disso, o projeto e a operação para serem bem-sucedidos necessitam de uma interação equilibrada entre quatro fatores de projeto: a queda de pressão, a velocidade de filtração, o meio filtrante e a técnica de limpeza (SEVILLE, 1997).

3.2.2 Queda de pressão

Durante a filtração, a taxa de aumento da queda de pressão não é linear. É alto inicialmente, mas reduz gradualmente à medida que a camada de torta se forma até tornar-se aproximadamente constante. À medida que o valor da queda de pressão aumenta, a potência absorvida pelo ventilador aumentará. Consequentemente, torna-se necessário limpar o tecido para diminuir a resistência ao fluxo (SEVILLE, 1997).

Eventualmente, a queda de pressão atingirá um valor determinado para que a remoção da torta se torne necessária. Neste momento, acontece a limpeza, resultando em uma queda de pressão mais baixa, e a formação da torta começa novamente. Uma variação da queda de pressão a longo do tempo é mostrada na Figura 29.

Figura 29 - Ciclos de Filtração



Fonte: Adaptado de Seville, (1997)

O período entre os ciclos de limpeza é geralmente organizado para controlar queda de pressão na faixa necessária, e alguns sistemas de controle permitem que os ciclos de limpeza sejam controlados por uma queda de pressão máxima do filtro. A permeabilidade do meio filtrante ao fluxo de gás é controlada pela estrutura de poros criada pela interseção das fibras e fios componentes. Quando novos, os tecidos contêm poros significativamente maiores em tamanho do que as partículas que eles são capazes de coletar. Inicialmente o fluxo de gás é predominantemente pelos poros maiores, que oferecem menor resistência ao fluxo (SEVILLE, 1997).

Em particular, pressões mais altas podem produzir uma torta mais compacta, com menor permeabilidade (ou maior resistência ao fluxo). Na prática, isso significa que a capacidade não necessariamente aumenta proporcionalmente à pressão aplicada. No caso de alta compressibilidade, a capacidade total de um filtro pode de fato cair em pressões de filtração mais altas. Um resultado importante da compressibilidade da torta ocorre em fluxo constante, a queda de pressão no meio filtrante e na combinação da torta de filtro aumentará à medida que

a torta cresce. Em baixa queda de pressão, a compressão na torta será baixa, mas uma pressão crítica pode ser atingida, acima da qual a torta fica comprimida. Para conduzir o mesmo volume de fluido através da torta, mais pressão é necessária, o que comprime ainda mais a torta (SEVILLE, 1997).

3.2.3 Meios Filtrantes

O tipo de material filtrante usado em mangas depende da aplicação específica e a composição química associada do gás, temperatura operacional, carregamento de particulado e as características físicas e químicas do particulado. Para tecidos, o tipo de fio (filamento, fiado ou grampo), o diâmetro do fio e a torção também são fatores na seleção de tecidos adequados para uma aplicação específica. Algumas aplicações são difíceis, ou seja, têm pequenas ou partículas lisas que penetram prontamente na torta e no tecido, ou têm partículas que aderem fortemente ao tecido e são difíceis de remover, ou têm alguma outra característica que degrada a partícula coleta ou limpeza. Para algumas aplicações, é utilizada uma membrana laminada de politetrafluoretileno (PTFE) com poros pequenos (1 ou 2 μm a menos de 1 μm) que são vantajosas por capturarem partículas pequenas quase imediatamente após o início da filtração (TURNER et al., 2002).

3.2.4 Mecanismo de limpeza

Para que a limpeza da manga ocorra de forma efetiva, o mecanismo de limpeza deve fornecer energia suficiente para quebrar a força de adesão entre a torta e o meio filtrante ou quebrar a força de coesividade da torta. O mecanismo de limpeza é escolhido por parâmetros tais como as propriedades do material particulado, temperatura do gás e dimensão do filtro de mangas e deve garantir uma boa combinação entre as forças dinâmicas e a flexão da manga para que não haja desgaste nas mangas e garanta uma alta eficiência de limpeza.

Para que o processo de limpeza seja bem-sucedido, três condições devem ser satisfeitas: primeiro, uma força suficientemente grande deve ser aplicada a manga do filtro para criar uma força de separação entre a torta e o tecido; em segundo lugar, a força adesiva entre a torta e o tecido deve ser quebrada; e terceiro, deve-se permitir que a torta fraturada passe para a tremonha de coleta de pó sem retornar para o filtro. Após a limpeza, o tecido volta a acumular particulado com uma queda de pressão aceitável. O filtro, portanto, passa por ciclos de carga e limpeza. É

comum que partes do filtro sejam limpas sequencialmente, de forma que a variação de queda de pressão e vazão sejam minimizadas (SEVILLE, 1997).

Para limpeza das mangas há vários tipos de mecanismos, entre eles vibração mecânica, ultrassônico, fluxo de ar reverso e pulso de ar reverso. Em geral, os mecanismos de limpeza podem ser divididos naqueles que envolvem flexão e aquelas envolvendo um fluxo reverso de ar pulsante. A vibração mecânica consiste em utilizar um motor para promover a vibração mecânica, gerando uma aceleração no tecido. É considerado o método mais antigo e de menor custo. Possui a vantagem de ter um sistema de operação e montagem simples e desvantagem de ter necessidade de interromper o processo de filtração para a limpeza (SEVILLE, 1997; TURNER et al., 2002).

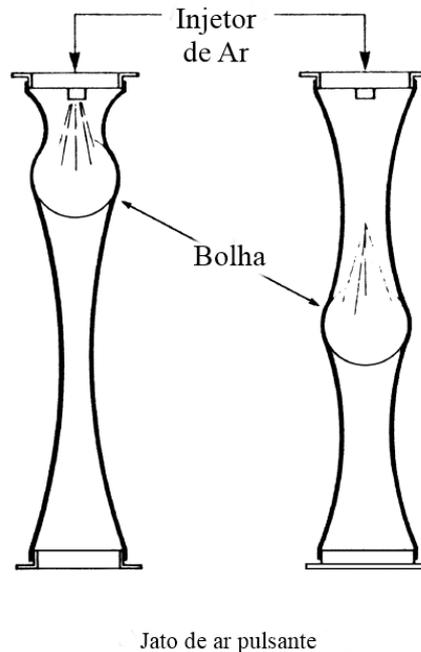
A limpeza de ar reverso foi desenvolvida como uma forma menos intensiva de transmitir energia às mangas. Na limpeza de ar reverso, o fluxo de gás para as mangas é interrompido no compartimento sendo limpo e o fluxo de ar reverso (de fora para dentro) é direcionado através das mangas. Esta inversão de o fluxo de gás colapsa suavemente as mangas em direção a suas linhas centrais, o que faz com que a torta se solte da superfície do tecido. O descolamento é causado por forças de cisalhamento desenvolvidas entre as poeira e tecido à medida que este muda de forma. Tampas de metal para apoiar as tampas das bolsas são uma parte integrante da bolsa, assim como vários anéis costurados que envolvem as bolsas para evitar que colapso total durante a limpeza. Sem esses anéis, a poeira coletada tende a sufocar a manga à medida que o tecido se dobra sobre si mesmo durante a limpeza (TURNER et al., 2002).

O fluxo de ar reverso consiste na passagem de ar limpo no sentido inverso da filtração removendo uma quantidade significativa da torta. Esta técnica permite que o tecido tenha uma vida útil mais longa devido ao impacto mecânico ser menor e possui a desvantagem da necessidade de interrupção do processo para a limpeza. O pulso de ar reverso consiste na passagem de um pulso de ar no sentido inverso ao da filtração removendo a torta formada, nesta técnica não é necessária a interrupção da filtração durante a limpeza, pois esta ocorre em frações de segundo, porém, possui a desvantagem do tecido ter um tempo de vida útil reduzido devido a um maior desgaste das fibras (CONAMA, 2018).

O *pulse-jet* ou jato de ar pulsante (Figura 31), consiste em um jato de ar comprimido no sentido contrário da filtração, na parte superior e interna da manga. O jato forma uma pressão que expande a manga e causa o deslocamento da torta, e conseqüente limpeza. Uma vantagem da limpeza por jato de ar pulsante em comparação com os filtros de manga com agitador ou ar reverso é a redução no tamanho do filtro de manga, e, conseqüentemente de custo. No entanto,

quanto maior a pressão do ar comprimido utilizado durante a limpeza, maior é o gasto energético e financeiro (TURNER et al., 2002).

Figura 30 – Mecanismo de limpeza de jato de ar pulsante (*pulse-jet*)



Fonte: Adaptado de Turner et al., (2002)

Frequentemente, nos filtros de mangas de jato de pulso as mangas são limpas uma linha de cada vez quando um temporizador inicia o jato de ar de limpeza através de uma válvula de abertura rápida. Um tubo em cada fileira de bolsas transporta o ar comprimido. O tubo tem um bocal acima de cada manga para que o ar de limpeza saia diretamente para a manga. Alguns sistemas direcionam o ar através de um venturi curto que se destina a introduzir ar de limpeza adicional. O pulso se opõe e interrompe o fluxo de gás para frente por apenas alguns décimos de segundo. No entanto, a retomada rápida do fluxo direto deposita a maior parte do pó de volta na manga limpa ou nas adjacentes. Esta ação tem a desvantagem de inibir o pó de caindo na tremonha, mas a vantagem de retomar rapidamente a torta de pó que fornece coleta eficiente de partículas (SEVILLE, 1997).

3.2.5 Norma VDI 3926

A Norma VDI 3926 foi desenvolvida pela Associação de Engenheiros Alemães (VDI). O objetivo desta diretriz VDI é a apresentação de um método de teste para a caracterização comparativa de meios filtrantes laváveis a seco sob condições padronizadas. Essas condições são selecionadas entre uma infinidade de condições possíveis para que correspondam a um

modo de operação típico e, assim, forneçam indicações do comportamento de operação e separação do meio durante o uso prático (VDI 3926, 2004).

A parte 1 da diretriz VDI 3926 descreve o teste padrão de laboratório com relação ao comportamento cíclico de um meio filtrante. Além das condições de teste, são especificados o procedimento de teste, as principais características da instalação de teste necessária e a avaliação e apresentação dos resultados. Exemplos de resultados de teste são demonstrados em um relatório de teste. O anexo mostra dois exemplos detalhados da configuração de teste. Folhas adicionais contêm a avaliação dos filtros de acordo com os critérios de emissão e a classificação dos filtros com base no método de teste apresentado (VDI 3926, 2004).

Segundo essa norma, os testes de avaliação de eficiência e queda de pressão ao longo do tempo devem ser realizados utilizando as condições operacionais de alimentação de pó 5 g/m³, a velocidade de filtração de 2m/min e pulso de limpeza de 5 bar em temperatura ambiente.

3.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com objetivo de simular o comportamento em um filtro de mangas, foram realizados ciclos de filtração no equipamento de filtração da norma VDI 3926 da Figura 31 da FilTEq GmbH. O equipamento é composto por um alimentador e dispersor de material particulado (Figura 32), fotômetro, medidores de pressão, suporte para meio filtrante (Figura 33), módulo de controle de concentração, unidade controladora e de aquisição de dados, sistema de limpeza *pulse-jet*, além do suporte para meio filtrante e o filtro absoluto.

Figura 31 – Equipamento de filtração da norma VDI 3926



Figura 32 – Alimentador e dispersor de material particulado



Figura 33 - Fotômetro, medidores de pressão e suporte de meio filtrante

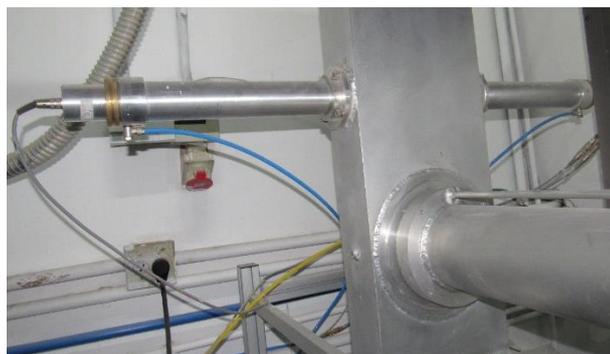


Figura 34 - Módulo de controle de concentração e alimentação, unidade controladora e de aquisição de dados e bombas

Figura 35 - Sistema de limpeza *pulse-jet*

Figura 36 – Suporte para filtro absoluto



Figura 37 - Software de controle e aquisição de dados



Foi utilizado um meio filtrante de não tecido de poliéster, o pó de cal hidratada para realizar o *precoating* e o material particulado a ser filtrado foi pó de sinterização primária, em todos os experimentos. Os parâmetros do *precoating* variaram em umidade e queda de pressão (variável de controle da espessura) assim como apresentado no Capítulo 2.

A fim de observar a influência do *precoating* e sua variação em umidade e espessura ao longo do tempo, foram realizados 50 ciclos de filtração para cada um dos casos, seguindo o planejamento da Tabela 17. O *precoating* foi realizado como descrito no Capítulo 2, no qual foi alimentado a cal hidratada até atingir a queda de pressão máxima (200 ou 400Pa), e em seguida, foi alimentado pó de sinterização primária até atingir a queda de pressão máxima de 1000Pa, neste ponto ocorreu a limpeza por pulso de ar reverso e um novo ciclo de filtração era iniciado. O *precoating* foi realizado apenas no primeiro ciclo, nos demais ciclos foi alimentado apenas utilizando o pó de sinterização.

Tabela 17 – Experimentos VDI

	Ciclos	Particulado filtrado	<i>Precoating</i>	Queda de Pressão (Pa)	Umidade (%)
A	50	sínter	-	1000	0
B	50	sínter	Cal hidratada	200	0
C	50	sínter	Cal hidratada	200	10
D	50	sínter	Cal hidratada	400	0
E	50	sínter	Cal hidratada	400	10

Os meios filtrantes, o não tecido de poliéster utilizado na filtração e o HEPA no filtro absoluto, foram pesados antes e após os experimentos a fim de calcular a eficiência de coleta por gravimetria. Além disso, foram avaliados os primeiros ciclos de filtração variando a umidade e a espessura da camada de *precoating*. As condições operacionais utilizadas nos testes

são provenientes da norma VDI 3926 foram a vazão mássica de alimentação de pó 5 g/m^3 , a velocidade de filtração de 2 m/min em temperatura ambiente e pulso de limpeza de 5 bar .

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os 50 ciclos de filtração para cada um dos casos apresentados na Tabela 15 estão dispostos na Figura 38. É possível observar que a camada de *precoating* aumentou o tempo do ciclo de filtração, isso ocorreu porque, sem a camada inicial de *precoating* ocorre maior entupimento e compactação da torta o que faz com que a queda de pressão aumente de forma acelerada. Ao aumentar a queda de pressão máxima estabelecida para o *precoating* de 200 para 400Pa, nota-se o aumento do tempo do ciclo de filtração, Figuras 30b e d (ambos com 0% de umidade) mesmo após as consecutivas limpezas ao longo dos ciclos.

No caso da adição da umidade, causou uma diminuição no tempo total de ciclos, uma vez a umidade cria arranjos de partículas mais compactos no interior do filtro devido a adesão mais forte das partículas na superfície ou maior coesividade entre as partículas. O caso C, de queda de pressão máxima de 200Pa e 10% de umidade, está em destaque uma vez que apresentou comportamento irregular da queda de pressão e no tempo muito longo do ciclo (52442s) em todas as réplicas realizadas, provavelmente devido ao descalibramento no sensor de pressão do equipamento. Por isso, será desconsiderado nas comparações, com os resultados apenas explanativos.

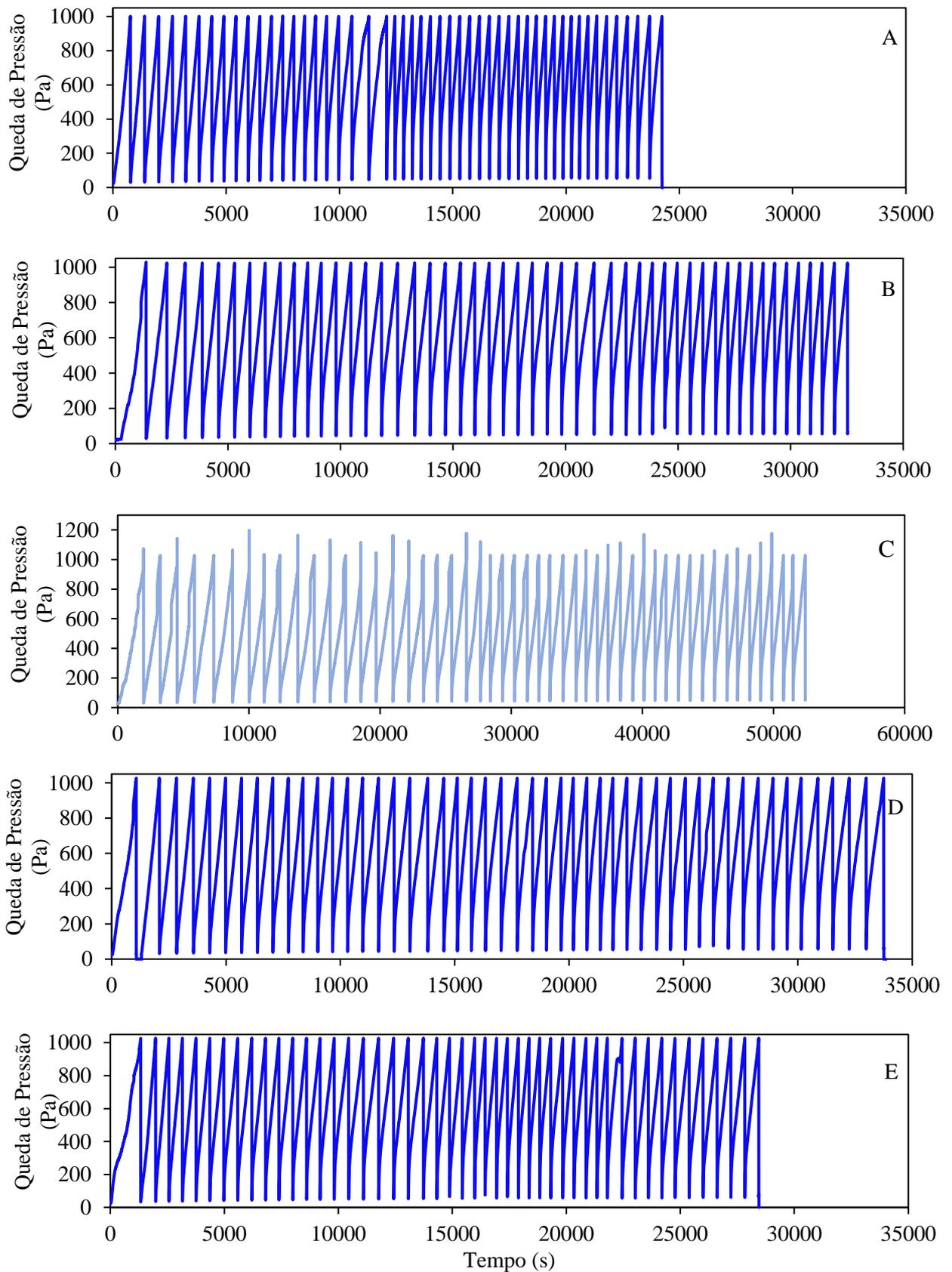
O *precoating* com maior espessura, com queda de pressão máxima de 400Pa, e 0% de umidade apresentou o melhor resultado ao se observar o tempo total dos 50 ciclos de filtração (desconsiderando o caso C). Como apresentado na Tabela 18, o caso D (400Pa e 0%) apresentou 9531s a mais que A (sem *precoating*), 1241s a mais que o obtido com a menor espessura do *precoating* (200Pa e 0% de umidade), de 5323s a mais que 400Pa e 10% (E).

Tabela 18 – Queda de pressão residual

	Queda de Pressão do <i>precoating</i> (Pa)	Umidade (%)	Tempo total (s)	Queda de Pressão inicial do filtro (Pa)	Queda de pressão após 50 ciclos (Pa)	Queda de pressão residual (Pa)
A	-	0	24239	24,35	57,40	33,05
B	200	0	32529	23,66	55,28	31,62
C	200	10	52425	28,99	49,89	20,99
D	400	0	33770	23,80	57,13	33,33
E	400	10	28447	26,87	61,84	34,97

Analisando a queda de pressão residual na Tabela 18, é possível observar que após os 50 ciclos houve um aumento na pressão residual do filtro, superior a 23Pa e não apresentou uma diferença significativa na variação dos parâmetros.

Figura 38 - 50 Ciclos de filtração: a) pó de síter sem *precoating*; b) *precoating* 200Pa 0%; c) *precoating* 200Pa 10%; d) *precoating* 400Pa 0% e e) *precoating* 400Pa 10%.



A Tabela 19 apresenta os valores de eficiência no primeiro ciclo, a eficiência do início do segundo ciclo (após a primeira limpeza) até completar 50 ciclos e a eficiência total do meio filtrante.

Tabela 19 – Eficiência de coleta dos ciclos de filtração

	Queda de Pressão (Pa)	Umidade (%)	Eficiência de coleta total Ciclo 1(%)	Eficiência de coleta total Ciclos 2-59 (%)	Eficiência de coleta total (%)
A	1000	0	99,61%	99,24%	99,72%
B	200	0	99,80%	99,69%	99,82%
C	200	10	99,29%	99,12%	99,60%
D	400	0	99,704%	99,74%	99,86%
E	400	10	99,36%	99,42%	99,69%

Os valores de eficiência de coleta total aumentaram após o *precoating*. Porém no caso E, com 10% de umidade, houve uma redução desde o primeiro ciclo provavelmente associada à formação de grânulos e formação irregular da camada do precoating na superfície do meio filtrante de poliéster devido a presença da maior umidade. O aumento na espessura do *precoating* também causou uma elevação no valor da eficiência. O caso D com 400Pa e 0% apresentou maior eficiência de coleta.

3.5 CONCLUSÃO

Ao realizar os 50 ciclos de filtração com e sem *precoating*, notou-se que o *precoating* aumentou o tempo de ciclo de filtração e a eficiência de coleta, dois parâmetros muito importante no funcionamento do filtro de mangas. O maior tempo do ciclo de filtração garante uma maior vida útil das mangas e um menor número de limpezas para um mesmo período, economizando em trocas de mangas e em gasto energético.

Os parâmetros de espessura e umidade, influenciaram o comportamento da filtração ao longo dos ciclos de filtração. A maior espessura, obtida com 400Pa, aumentou o tempo de ciclo em 1241s e 0,025% de eficiência de coleta. Porém, a umidade ocasionou um efeito negativo diminuindo o tempo de ciclo em 5323s e a eficiência de coleta em 0,15% devido à formação de grânulos. A melhor condição observada foi ao realizar o *precoating* com 400Pa e 0% de umidade.

4 CAPÍTULO 4 - DESSULFURIZAÇÃO

O Capítulo 4 irá avaliar a aplicação da cal hidratada na dessulfurização em uma unidade de limpeza de gases.

O objetivo dos experimentos na linha de dessulfurização é possibilitar a comparação na dessulfurização de duas formas, no lavador de gases que compõe a linha, no qual foram realizados os experimentos deste capítulo; e, potencial uso da camada de *precoating* para dessulfurização funcionando como um lavador a seco ou semi-seco (indicação para trabalhos futuros).

4.2 OBJETIVOS

4.2.1 Objetivo Geral

Implementar uma unidade de dessulfurização de gás e analisar a sua eficiência.

4.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos tem-se:

- Analisar a eficiência da unidade de dessulfurização;
- Analisar a eficiência de adsorção da cal hidratada na unidade de dessulfurização.

4.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.3.1 Dióxido de enxofre - SO₂

O dióxido de enxofre forma aerossóis de sulfato que têm um efeito significativo no clima global e regional. Os aerossóis de sulfato refletem a luz solar para o espaço e atuam como núcleos de condensação, que tendem a tornar as nuvens mais reflexivas e alterar suas vidas úteis, causando um resfriamento líquido. A mudança do forçamento radiativo causada pelos aerossóis de sulfato pode ser superada apenas pela causada pelo dióxido de carbono, embora na direção oposta (SMITH et al., 2011).

A exposição ao gás dióxido de enxofre em baixas concentrações produz um efeito irritante nas membranas mucosas dos olhos, nariz, garganta e pulmões devido à formação de ácido sulfuroso quando o gás entra em contato com a umidade dessas superfícies. Os efeitos do dióxido de enxofre de acordo com a via de exposição são os seguintes (Compressed Gas Association, 1990).

A exposição aguda por inalação pode resultar em secura e irritação do nariz e da garganta, asfixia, espirros, tosse e broncoespasmo. A superexposição severa pode causar a morte por acidose sistêmica, edema pulmonar ou parada respiratória. A exposição prolongada ou repetida pode causar comprometimento da função pulmonar, bronquite, tosse seca, irritação e corrimento nasal, aumento da fadiga, alteração dos sentidos do paladar e do olfato e maior duração de resfriados comuns. Em casos extremos, cáries dentárias, perda de obturações, distúrbios da gengiva e destruição rápida e indolor dos dentes podem resultar da superexposição repetida (Compressed Gas Association, 1990).

Na Resolução do CONAMA nº 382 de 2006 e 436 de 2011 de Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos gerados em indústrias siderúrgicas integradas e semi-integradas em fontes de emissão pontual, mais precisamente no sistema despoeiramento primário da sinterização estabelece como limite de emissão 70 mg/Nm³ para material particulado e, 600 mg/Nm³ para SO₂ (CONAMA, 2006).

Estudos controlados com indivíduos asmáticos praticando exercício físico indicam que algumas pessoas apresentam alterações na função pulmonar e sintomas respiratórios após curtos períodos de exposição, como 10 minutos. Outros estudos associam exposição de curto prazo ao SO₂ e aumento de visitas a serviços de emergência e de internações hospitalares por doenças respiratórias, principalmente por idosos, asmáticos e crianças (CETESB, 2005).

4.3.2 Padrões de emissão poluentes atmosféricos gerados em indústrias siderúrgicas integradas e semi-integradas

A OMS orienta em uma média de 24 horas, a concentração de $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e com valor de segunda média intermediária, $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. No sistema secundário de despoeiramento há a emissão de material particulado. O limite de emissão desses poluentes estabelecido na Resolução do CONAMA 382 é de $70 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ para material particulado, $600 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ para SO_2 e $700 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ para NO_x (CONAMA, 2006; OMS, 2021)

4.3.3 Dessulfurização

As instalações de dessulfurização de gases de combustão são necessárias para cumprir os regulamentos de SO_2 e minimizar emissões. A maior parte dos processos de recuperação de SO_2 o recuperam na forma de SO_2 líquido, ácido sulfúrico ou sulfato de amônio ou cálcio (MOREIRA, 1994; (WANG; ZHANG, 2011a)

Os processos de FGD (dessulfurização de gases de combustão) mais utilizados são classificados nas quatro categorias principais: lavadores úmidos, lavadores por spray, injeção de adsorvente e processos regeneráveis. Cada categoria principal é dividida em várias subcategorias, dependendo de reações químicas específicas e condições de fluxo. O lavador úmido que produz gesso é, de longe, a técnica mais popular, com uma participação de mercado mundial de cerca de 62% do efeito instalado, tem sido amplamente comercializada na indústria para obter uma remoção de SO_2 superior a 95%. No entanto, esse tipo de tecnologia gera uma grande quantidade de resíduos sólidos úmidos e requer tratamento de águas residuais. Também envolve uma configuração complicada e uma operação cara (WANG; ZHANG, 2011b).

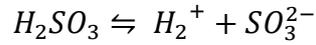
4.3.4 Modelo de dessulfurização

A reação do processo de dessulfurização gás-líquido pode ser dividida nos seguintes passos (KOHL; NIELSEN, 1997):

- 1) O SO_2 difunde-se da fase gasosa para a interface gás-líquido.

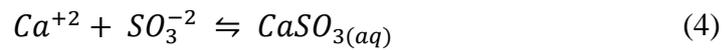


- 2) O SO_2 difunde-se da interface gás-líquido para a fase líquida e começa a se dissolver na superfície da membrana líquida.
- 3) O SO_2 se dissolve na água e gera H_2SO_3 e depois se dissocia.

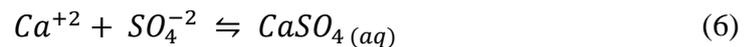


A quantidade de dióxido de enxofre absorvida pelo sistema aquoso pode ser aumentada pelo aumento da alcalinidade e pela remoção do HSO_3^- ou SO_3^{2-} . Na presença de óxido de cálcio (cal) ou calcário, as seguintes reações ocorrem (KOHL; NIELSEN, 1997):

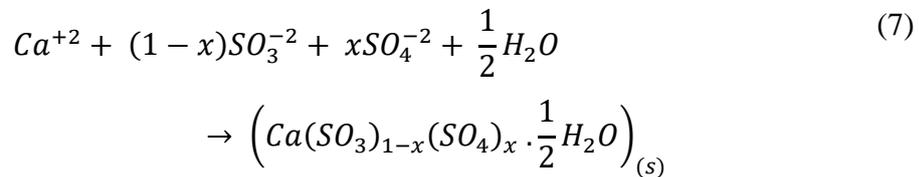
1) Reação com SO_2 dissolvido



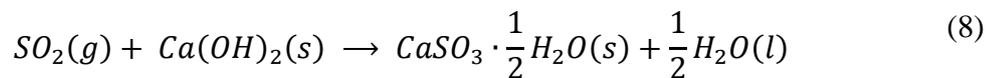
2) Oxidação



3) Coprecipitação



A equação geral da reação é expressa em:



4.3.5 Eficiência de dessulfurização

A eficiência de remoção de SO_2 é definida como (MA et al., 2000):

$$\eta_{SO_2} = \frac{C_{e,SO_2} - C_{s,SO_2}}{C_{e,SO_2}} \times 100\% \quad (9)$$

em que C_{e,SO_2} e C_{s,SO_2} são a concentração de SO_2 na entrada e concentração de SO_2 na saída, respectivamente.

A eficiência máxima de dessulfurização é definida como a eficiência máxima que durante o processo de dessulfurização, reflete a cinética da reação química dos adsorventes sob uma condição de reação específica e é influenciada pela temperatura de preparação e pelo tempo de hidratação dos adsorventes. O tempo efetivo de dessulfurização é definido como o tempo de execução em que a eficiência aumenta de zero para o máximo e depois diminui para 50% e está relacionada ao número de reciclagem de adsorventes (CUI et al., 2020).

4.3.6 Cinética Geral

A velocidade da reação completa representa a combinação de efeitos de difusão através da camada laminar do fluido, difusão interfacial e adsorção no interior dos poros de superfície. Pode-se dividir como possíveis etapas controladoras (PERUCH, 2002):

- a) Controle da reação química: a moderadas temperaturas, a reação química que se processa na superfície será lenta. A velocidade de conversão dos reagentes na superfície é muito lenta comparada com velocidade de difusão dos reagentes e produtos. Considera-se como constante a concentração do material sólido carbonoso.
- b) Controle da difusão nos poros: com o aumento da temperatura, a difusão dos gases através das partículas se tornará difícil devido ao aumento dos choques e a movimentação desordenada das moléculas de gás. O acesso do gás reagente ao interior da superfície sólida não se faz de maneira suficiente.
- c) Controle da camada hidrodinâmica: com temperaturas ainda mais altas, a concentração do meio gaseificante no interior da partícula é muito pequena. O acesso dos reagentes à superfície externa controlará todo o processo de conversão dos mesmos. A velocidade controladora o processo é àquela que acontece mais lentamente. (PERUCH, 1997)

4.3.7 FGD – Sistemas de dessulfurização de gases de combustão

O termo sistema de dessulfurização de gases de combustão (FGD) refere-se tradicionalmente à lavadores úmidos que removem as emissões de SO₂ de grandes caldeiras elétricas. Os sistemas de FGD surgiram no campo industrial das usinas a carvão e em alguns processos industriais no início dos anos 70 nos Estados Unidos e no Japão, e expandiu-se rapidamente na década de 1980 na Europa (CÓRDOBA, 2015). Tornou-se a técnica mais usada para controlar as emissões de dióxido de enxofre ao lado dos combustíveis de baixo teor de enxofre (MILLER, 2017).

Os processos de FGD são geralmente classificados como lavadores úmidos ou secadores, mas também podem ser classificados como segue (MILLER, 2017):

- Lavadores úmidos
- Secadores por spray
- Processos de injeção a seco (sorvente)
- Processos regeneráveis
- Lavadores circuladores de leito fluidizado e leito móvel
- Sistemas combinados de remoção de SO₂ / NO_x

No processo FGD, o gás de combustão interage com um absorvente meio em um vaso absorvedor ou em um lavador. A Agência de Proteção Ambiental dos EUA classifica os sistemas FGD como processos não regeneráveis e regeneráveis com base na separação dos compostos, o absorvente como subproduto ou descartado juntamente com o absorvente como produto residual (CÓRDOBA, 2015).

Com base na natureza dos resíduos/subprodutos gerados, uma tecnologia FGD descartável disponível comercialmente pode ser classificada como úmida ou seca. Um processo de FGD úmido produz um desperdício de chorume ou um subproduto de chorume vendável. Uma aplicação de processo de FGD seco resulta em um resíduo sólido, cujo transporte e descarte são mais fáceis em comparação com o resíduo/ subproduto de aplicações de FGD úmido. Os processos regeneráveis de FGD produzem um subproduto de SO₂ concentrado, geralmente ácido sulfúrico ou enxofre elementar. Geralmente, os sistemas a seco são considerados mais econômicos para usinas de energia com baixo teor de enxofre, enquanto sistemas com base úmida são selecionados para aplicações com alto teor de enxofre (MILLER, 2017).

O lavador úmido é um termo usado para descrever uma variedade de equipamentos que usam base úmida para remover poluentes. Em um lavador de gases úmido, o fluxo de gás sujo é colocado em contato com o líquido de lavagem forçando-o através de um filme líquido ou por algum outro método de contato. Os lavadores úmidos removem as partículas capturando-as em gotículas líquidas. Quaisquer gotículas que estiverem no gás de combustão devem então ser separados do fluxo de exaustão limpo por meio de equipamento. Além disso, o líquido de lavagem resultante deve ser tratado antes de qualquer descarga final ou reutilizado na planta. Lavadores úmidos que removem poluentes gasosos são chamados de absorvedores. Um bom contato gás-líquido é essencial para obter altas eficiências de remoção em absorvedores (JOSEPH; BEACHLER, 1998).

Um sistema de lavagem seco ou semi-seco, ao contrário do lavador úmido, não satura com umidade do fluxo de gás de combustão que está sendo tratado. Em alguns casos, nenhuma umidade é adicionada; enquanto em outros projeta-se apenas a quantidade de umidade que pode ser evaporada no gás de combustão sem condensação. Portanto, os lavadores a seco não possuem uma pluma de vapor chaminé ou requisitos de tratamento/eliminação de águas residuais (JOSEPH; BEACHLER, 1998).

Os sistemas de lavagem a seco são usados para remover ácidos gases (como SO_2 e HCl) principalmente de fontes de combustão. Existem vários tipos de projetos de sistemas de lavadores à seco. No entanto, todos consistem em duas seções ou dispositivos principais: um dispositivo para introduzir o material adsorvente de gás ácido na corrente de gás e um dispositivo de controle de material particulado para remover produtos de reação, excesso de material adsorvente, bem como qualquer material particulado já no gás de combustão (JOSEPH; BEACHLER, 1998).

A injeção de adsorvente a seco envolve a adição de um material alcalino (geralmente cal hidratada ou carbonato de sódio) na corrente de gás para reagir com os gases ácidos. Estes reagem com os adsorventes alcalinos para formar sais sólidos que são removidos no equipamento de controle de particulado. Esses sistemas simples podem atingir apenas eficiências limitadas de remoção de gás ácido (SO_2 e HCl) (JOSEPH; BEACHLER, 1998).

4.3.8 Absorção

Para lavadores úmidos, que são os mais utilizados, a remoção dos gases ocorre por absorção. O filme líquido aumenta a absorção do gás fornecendo uma maior área de superfície para contato gás-líquido, proporciona um contato turbulento entre as duas fases e propicia maior tempo de contato (JOSEPH; BEACHLER, 1998).

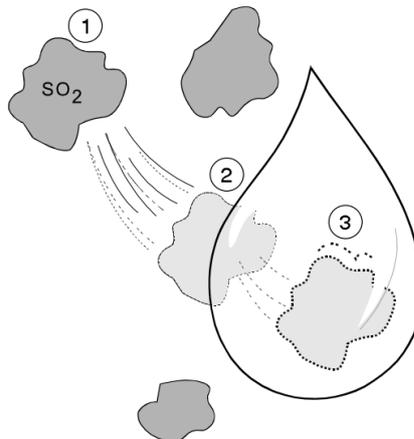
Numerosas variáveis operacionais afetam a eficiência de absorção. De primordial importância é a solubilidade dos gases poluentes. Poluentes que são facilmente solúveis no líquido de lavagem podem ser facilmente removidos sob uma variedade de condições de operação (JOSEPH; BEACHLER, 1998).

O processo de dissolução de poluentes gasosos em um líquido é referido como absorção. A absorção é uma operação de transferência de massa. A transferência de massa refere-se ao processo de transferência de um componente de uma fase ou corrente para outra. A transferência de massa pode ser comparada à transferência de calor, pois ambas ocorrem porque

um sistema está tentando atingir condições de equilíbrio. Na absorção, massa é transferida como resultado de uma diferença de concentração. A absorção continua enquanto existir um diferencial de concentração entre o líquido e o gás do qual o contaminante está sendo removido (JOSEPH; BEACHLER, 1998).

Para remover um poluente gasoso por absorção, o fluxo de exaustão deve estar em contato com um líquido. A Figura 39 ilustra as três etapas envolvidas na absorção. Na primeira etapa, o poluente gasoso se difunde da área principal da fase gasosa para a interface gás-líquido. Na segunda etapa, o gás se move (transfere) através da interface para a fase líquida. Esta etapa ocorre de forma extremamente rápida uma vez que as moléculas do gás (poluente) chegam à área de interface. Na terceira etapa, o gás se difunde na área do líquido, abrindo espaço para que moléculas de gás adicionais sejam absorvidas. A taxa de absorção (transferência de massa do poluente da fase gasosa para a fase líquida) depende das taxas de difusão do poluente na fase gasosa (primeira etapa) e na fase líquida (terceira etapa) (JOSEPH; BEACHLER, 1998).

Figura 39 - Etapas da absorção



Fonte: Adaptado de Joseph; Beachler (1998).

A absorção depende da solubilidade do gás no líquido. Esta relação de solubilidade determinará o tipo e a quantidade de líquido utilizado. Uma vez definido, as chaves para obter uma boa eficiência de remoção são: fornece uma grande área de contato entre o gás e o líquido, boa mistura e permitir residência adequada ou tempo de contato entre o gás e o líquido (JOSEPH; BEACHLER, 1998).

4.3.9 Adsorção

Em sistemas de lavagem a seco, o mecanismo de remoção de gás ácido envolve os processos de adsorção e absorção. A adsorção ocorre quando as moléculas de gás ácido aderem

à superfície do sorvente sólido. A absorção ocorre quando os gases ácidos se dissolvem nas gotículas líquidas. Em ambos os casos, os gases ácidos eventualmente reagem com o sorvente alcalino para formar um sal (JOSEPH; BEACHLER, 1998).

Os materiais sorventes alcalinos usados em sistemas de lavagem a seco são escolhidos devido à sua capacidade de reagir ou neutralizar os gases ácidos. Os materiais, à base de cálcio ou sódio, são minúsculos sólidos porosos que têm a capacidade de adsorver o material de gás ácido. Tanto a adsorção quanto a absorção são processos de transferência de massa que envolvem difusão de gás para fornecer remoção efetiva de gás ácido em sistemas de lavagem a seco (JOSEPH; BEACHLER, 1998).

Um injetor de adsorvente seco remove gases ácidos causando contato direto entre o adsorvente alcalino e os gases ácidos. Os gases ácidos são adsorvidos na partícula adsorvente sólida e o material alcalino reage com os gases ácidos para formar sais sólidos. Nesses sistemas simples, o grau em que o material alcalino pode ser colocado em contato íntimo com os gases ácidos é a chave para obter uma remoção eficaz. Além disso, a área de superfície do adsorvente e a reatividade com gases ácidos são parâmetros primários que controlam a coleta (JOSEPH; BEACHLER, 1998).

Um aprimoramento do sistema à seco é transformá-lo em um sistema semi-seco com adição de água ao adsorvente alcalino em um vaso de reação. A água esfria e umidifica a corrente de gás, aumentando a eficiência da reação. A remoção do dióxido de enxofre, então, se dá principalmente pela adsorção física e química que ocorre na superfície e no interior dos adsorventes. A adsorção física refere-se principalmente à adsorção do adsorvente e do SO₂ por gravitação intermolecular, que depende das características do tamanho dos poros e da área superficial específica. A adsorção química refere-se à combinação de grupos químicos entre o adsorvente e o dióxido de enxofre através de ligações químicas e a reação química entre si (CUI et al., 2020).

A separação por adsorção é baseada em três mecanismos distintos: mecanismos estérico, de equilíbrio e cinético. No mecanismo de separação estérica, o sólido poroso tem poros com dimensão tal que permite a entrada de pequenas moléculas, excluindo a entrada de moléculas grandes. O mecanismo de equilíbrio é baseado no sólido com habilidades diferentes para acomodar espécies diferentes, ou seja, as espécies adsorvidas mais fortes são removidas preferencialmente pelo sólido. O mecanismo cinético é baseado nas diferentes taxas de difusão

de diferentes espécies no poro; assim, controlando o tempo de exposição, as espécies de difusão mais rápida são preferencialmente removidas pelo sólido (DO, 1998).

Quando um gás é colocado em contato com um sólido evacuado, uma parte do gás é absorvida pelo sólido, semelhante ao caso de moléculas que absorvem líquidos. As moléculas que permanecem na superfície do sólido são adsorvidas. Os dois processos podem ocorrer simultaneamente. Se o processo ocorrer em volume constante, a pressão do gás cai; se a pressão constante, o volume diminui. Para estudar a adsorção, a temperatura, a pressão e a composição devem ser tais que ocorra pouca absorção. Se um gás permanecer na superfície de um sólido, duas coisas podem acontecer: pode haver uma interação fraca entre sólido e gás semelhante à condensação, ou pode haver uma forte interação semelhante à reação química. A primeira interação é denominada adsorção física ou adsorção de van der Waals. O nome van der Waals implica que as mesmas forças que estão ativas na condensação, ou seja, as forças de van der Waals, também estão ativas na adsorção física. A segunda interação, na qual as forças envolvidas são fortes como na ligação química, é denominada adsorção química, quimissorção ou adsorção ativada. A implicação aqui é que esse tipo de adsorção requer uma energia de ativação, assim como nas reações químicas (SCHNELLE; BROWN, 2016).

Essencialmente, a dessorção física pode ser chamada de condensação da superfície e a quimissorção pode ser chamada de reação da superfície. Um mecanismo adicional ao qual os gases adsorvidos podem sofrer é a condensação capilar. A maioria dos adsorventes é cheio de capilares e os gases penetram adsorvendo nas laterais do poro. Se um líquido molha as paredes de um capilar, a pressão do vapor será menor que a pressão do vapor a granel. Assim, assumiu-se que a adsorção nos capilares ocorre a uma pressão consideravelmente mais baixa que a pressão de vapor. Os capilares com os diâmetros menores enchem primeiro nas pressões mais baixas. À medida que a pressão aumenta, os capilares maiores são preenchidos até a pressão de saturação, todos os poros são preenchidos com líquido. É evidente que a condensação capilar desempenha um papel na adsorção física. A adsorção multimolecular e a condensação capilar são necessariamente precedidas pela adsorção unimolecular (SCHNELLE; BROWN, 2016).

4.3.10 Difusão

A difusão da fase gasosa é afetada por vários parâmetros controláveis. De importância primordial é o tipo de lavador e o grau de contato gás-líquido fornecido. Em segundo lugar, o coeficiente de transferência de massa do filme de gás é diretamente proporcional à velocidade com que o gás e o líquido escoam, cada um elevado a uma potência geralmente menor que uma.

Para uma planta de tamanho determinado, a vazão volumétrica de gás é constante e a velocidade do gás determina o diâmetro de o lavador e o tamanho dos ventiladores usados. Um terceiro parâmetro que afeta a taxa de difusão da fase gasosa é a concentração de SO_2 em equilíbrio com o líquido. Um quarto fator que influencia a absorção gás-líquido é a temperatura do gás de entrada. Há um declínio na eficiência de remoção de SO_2 à medida que a temperatura do gás aumenta. Em temperaturas mais altas do gás, o filme líquido é aquecido, reduzindo a solubilidade do SO_2 através da mudança na constante da lei de Henry (NANNEN; WEST; KREITH, 1974).

4.3.9 Cal hidratada

As principais vantagens da utilização da cal em dessulfurização incluem: baixo custo e considerável eficiência (70 a 99%), além da possibilidade da incorporação dos subprodutos (cinzas) em outros processos, como nas indústrias de cimento e cerâmica, reduzindo a quantidade dos resíduos sólidos gerados em unidades FGD (CÓRDOBA, 2015).

4.3.10 Umidade

Com maior umidade do gás, é necessário vazão mássica menor de cal para remover a mesma quantidade de dióxido de enxofre (KAISER et al., 2000). Na dessulfurização semi-seca dos gases de combustão, a pasta de cal fica seca no lavador. O processo de secagem pode ser dividido em estágio de taxa constante, estágio de redução e estágio de quase-equilíbrio. A reação de remoção do SO_2 ocorre no primeiro estágio ou nos dois primeiros estágios. No estágio de quase-equilíbrio, a reação de gás sólido ocorre na superfície externa das partículas absorventes devido à menor quantidade de água líquida. A taxa de reação é muito lenta (WANG; ZHANG, 2011b).

A água pode dissolver uma pequena parte do SO_2 , portanto a água é muito importante para a reação de dessulfurização. O teor de umidade determina a distribuição da água na superfície do adsorvente e afeta todo o processo de reação (CUI et al., 2020).

4.4 MATERIAIS MÉTODOS

Para realização dos experimentos, inicialmente ocorreu a montagem da unidade de dessulfurização, em seguida serão realizados experimentos de eficiência no lavador de gás da própria linha.

O objetivo da linha de dessulfurização é possibilitar a dessulfurização de duas formas, no lavador de gases que compõe a linha, no qual foram realizados os experimentos deste capítulo; e, possivelmente na camada de *precoating* funcionando como uma lavagem a seco ou semi-seco (indicação para trabalhos futuros).

4.4.2 Unidade de dessulfurização

Inicialmente foi necessário a montagem da unidade de dessulfurização (Figura 4040), pois não havia um equipamento de teste de eficiência para gases tóxicos no laboratório.

Figura 40 - Unidade de dessulfurização com monitor de SO₂, suporte para meio filtrante e lavador de gás



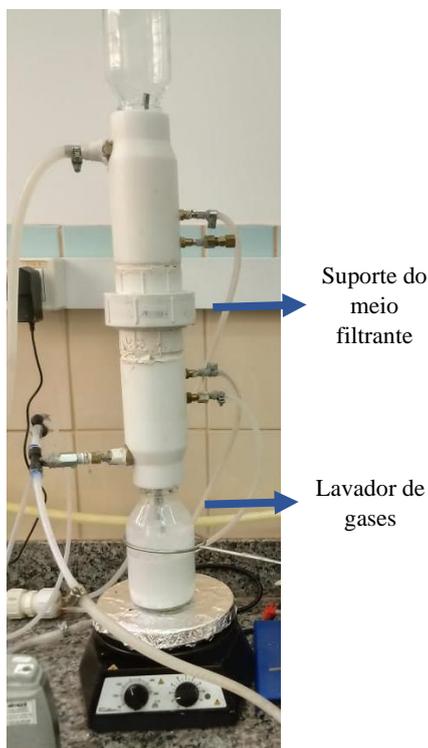
A unidade de dessulfurização, mostrada na Figura 40, é composta por um misturador de gases da Figura 41 com duas pequenas sondas de inox que alimentam o dióxido de enxofre (SO₂) e o nitrogênio (N₂) dos cilindros para o misturador e, uma sonda longa que direciona o gás misturado no suporte central. Aqui os gases são misturados e aquecidos à uma temperatura de 40°C.

Figura 41 - Misturador de gases



Em seguida, esse gás misturado é direcionado para o suporte central mostrado na Figura 42, que conta com uma sonda de aço inox que direciona o gás para o recipiente de vidro, esse gás passa através do meio filtrante com *precoating* que fica na parte central do suporte. E em seguida, é captado por outra sonda de inox que o direciona para um lavador de gases que, já limpo, é jogado no ambiente. O lavador de gases é aquecido à temperatura pré-determinada.

Figura 42 - Suporte central com lavador de gás aquecido



Existem quatro pontos de medição de SO_2 : depois do misturador (1), antes (2) e depois (3) do filtro e na saída do lavador (4); dois pontos de medição de pressão, antes (2) e depois (3) do meio filtrante e um sensor de medição de H_2S , temperatura e umidade (4) na saída do lavador (Figura 43). O ponto de amostragem de SO_2 é controlado através de uma válvula de 3 vias. Os

sensores de medição de SO_2 e de pressão foram feitos através de um sistema de Arduino, no qual há um monitor de dados (Figura 44) e em um software de aferição de dados (Figura 45) no computador. O esquema geral da linha de dessulfurização está disposto na Figura 46.

Figura 43 - Sensores de gás e de pressão



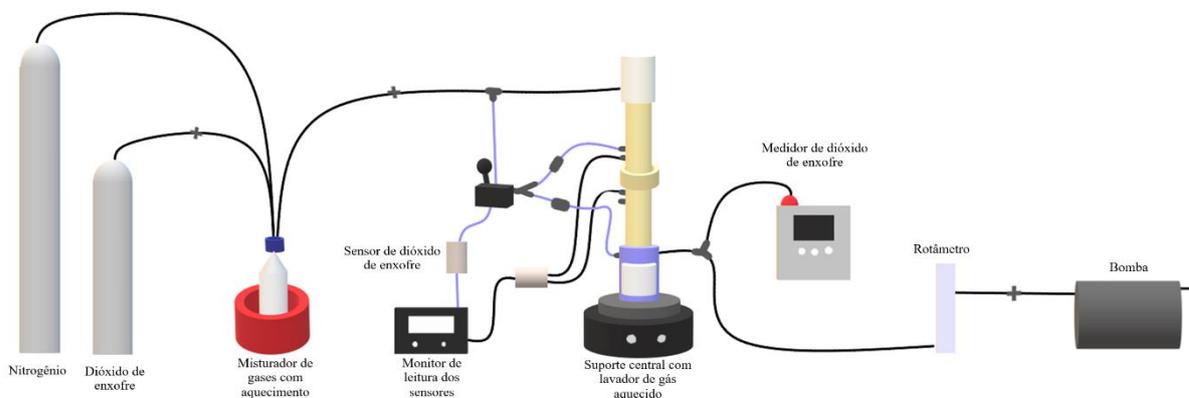
Figura 44 - Monitor de leitura dos sensores



Figura 45 - Software de leitura do Arduino



Figura 46 – Esquema da linha de dessulfurização



4.4.3 Gases

O gás de dióxido de enxofre (SO₂) usado nos experimentos tem 99,9% de pureza e o nitrogênio (N₂) tem 99,99% de pureza e foi escolhido por ser inerte.

4.4.4 Dessulfurização do lavador de gases

Os experimentos na unidade de dessulfurização foram feitos sem a presença do meio filtrante. A lama de dessulfurização, mistura cal hidratada e água destilada, foi utilizada à 80% de umidade e agitada em um tempo de hidratação de 1h. Além disso, foram feitas imagens de MEV da cal hidratada à 80% de umidade. A lama foi aquecida até 80 °C e ao atingir a estabilização iniciou-se a alimentação dos gases. Os gases N₂ e SO₂ foram misturados e aquecidos até 40°C e alimentados no lavador na forma de batelada, onde alimentou-se 22,3ppm no lavador e esperou a reação ao longo do tempo; e de forma contínua, na qual o gás foi alimentado continuamente variando a concentração entre 1 e 4ppm.

4.4.4.1 *Dessulfurização em sistema em batelada*

Na alimentação em batelada, foi realizado todo o processo descrito anteriormente, e, em seguida, alimentou-se a unidade de dessulfurização com 22,3ppm de SO₂ em 350mL de lama de cal hidratada. Foram aferidas as concentrações de SO₂ até que todo enxofre fosse absorvido.

4.4.4.2 *Dessulfurização em sistema contínuo*

Na alimentação contínua, foi realizado todo o processo descrito no item 4.4.4, e, em seguida, foi pré-estabelecido um tempo de alimentação dos gases de 80min com base no tempo de reação em batelada, depois desse tempo, a alimentação foi encerrada. A intenção era alimentar 1ppm de SO₂ em 350mL de lama de cal hidratada continuamente, porém o sistema apresentou instabilidade na alimentação devido à baixa pressão do SO₂. As concentrações de SO₂ foram aferidas até que todo enxofre presente no lavador fosse absorvido.

4.4.4.3 *Caracterização da cal da lama*

Amostras do material particulado da lama, no caso a cal hidratada com os produtos adsorvidos, foram levadas para análises de FRX para observar a presença de enxofre.

Os testes de dessulfurização na camada de precoating não puderam ser realizados devido à limitações na linha de dessulfurização que causavam vazamentos e uma instabilidade na alimentação dos gases.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

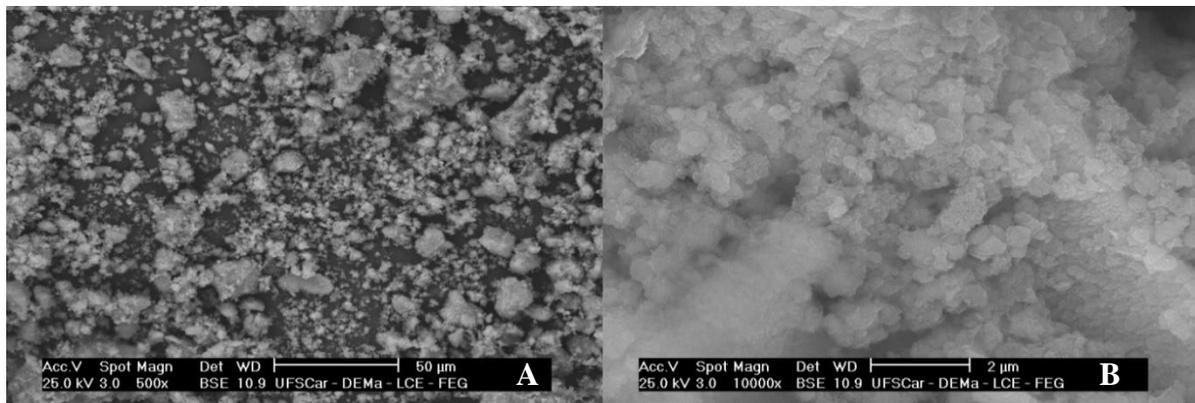
4.5.2 Dessulfurização do lavador de gases

Os resultados obtidos nos experimentos de dessulfurização nos dois tipos de regime de alimentação se encontram dispostos nos itens a seguir.

4.5.2.1 Dessulfurização em sistema batelada

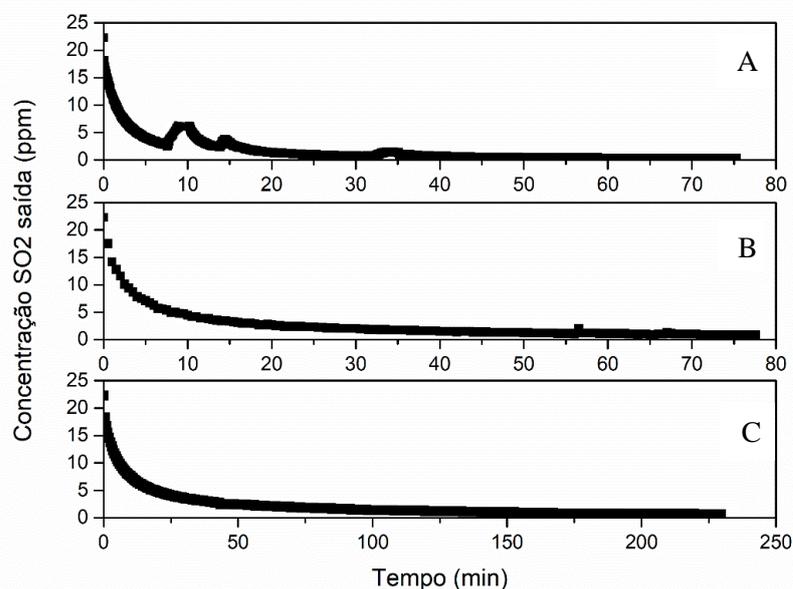
A Figura 47 mostra as imagens de MEV da cal após ser hidratada à 80% de umidade. É possível ver o aglomerado de partículas formando grânulos de até 40 μ m.

Figura 47 - MEV da cal hidratada 80%: a) ampliação de 500 vezes; b) ampliação de 10000 vezes



A Figura 48 mostra o decaimento da concentração de SO₂ ao longo do tempo em regime de batelada. É possível observar que a lama na concentração de 80% de umidade foi responsável para a dessulfurização de 22,3ppm até 0ppm em todos os casos.

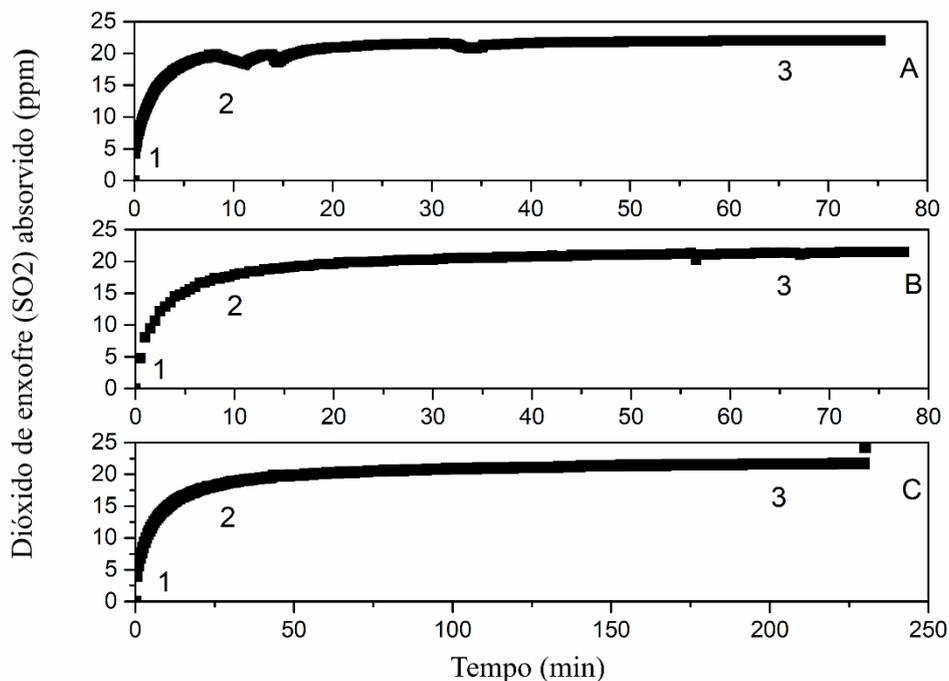
Figura 48 - Concentração SO₂ ao longo do tempo no lavador batelada



Porém, na triplicata (Figura 48c), o tempo para que todo o dióxido de enxofre fosse reagido foi três vezes maior que na primeira. Isso ocorreu porque o SO₂ absorvido levou o dobro do tempo para difundir inicialmente, e quanto mais lenta a reação inicial maior o tempo efetivo de dessulfurização.

A Figura 49 apresenta a absorção do SO₂ ao longo do tempo, a curva de absorção começa a estabilizar por volta dos primeiros 10 minutos para os primeiros dois casos, e, por 25min para o terceiro caso. Ou seja, a maior concentração de SO₂ é absorvida logo no início da reação, isso acontece porque a superfície da cal hidratada é envolvida por um filme de água e o SO₂ se difunde rapidamente.

Figura 49 - Absorção do SO₂ ao longo do tempo no lavador batelada



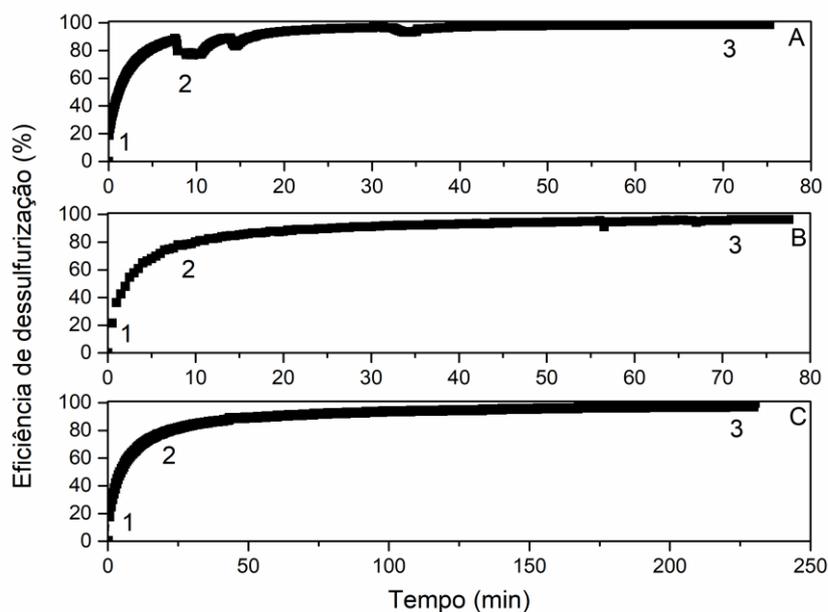
Assim como explicado por Cui et al. (2020), o processo de dessulfurização pode ser dividido em dois estágios: estágio dinâmico (1-2) e estágio de transição (2-3). No primeiro estágio, 1-2, há a difusão do SO₂ na superfície da cal hidratada. No ponto 1-2 há a formação de CaSO₃ e CaSO₄ resultando no aumento da resistência à difusão e na diminuição da difusão do gás. A taxa de difusão total das moléculas de SO₂ é igual à taxa de reação de dessulfurização (ponto 2), e o ponto 2 é chamado de ponto de equilíbrio de difusão dinâmica.

Com o progresso da reação, tanto a área de reação quanto a superfície dos absorventes se expandem continuamente formando uma camada de produto compactada e contínua, o que aumenta significativamente a resistência à difusão. Neste momento, a difusão da fase gasosa

para a fase sólida torna-se a etapa de controle da reação, e a eficiência da dessulfurização diminui, o que pode ser visto claramente na Figura e na Figura 50a. A reação de dessulfurização entra no estágio de transição (estágio 2-3) até o final da reação de dessulfurização, e é chamado de zona de difusão de potência.

A Figura 50 apresenta os valores de eficiência durante toda a reação. É possível observar que a eficiência é coerente com todo processo de absorção descrito anteriormente, aumentando rapidamente na zona dinâmica (1-2) e se estabilizando até o fim da reação na zona de transição ou de difusão (2-3).

Figura 50 - Eficiência de dessulfurização em lavador batelada



Nos experimentos em batelada observou-se a formação de H_2S em concentrações acima de 10ppm.

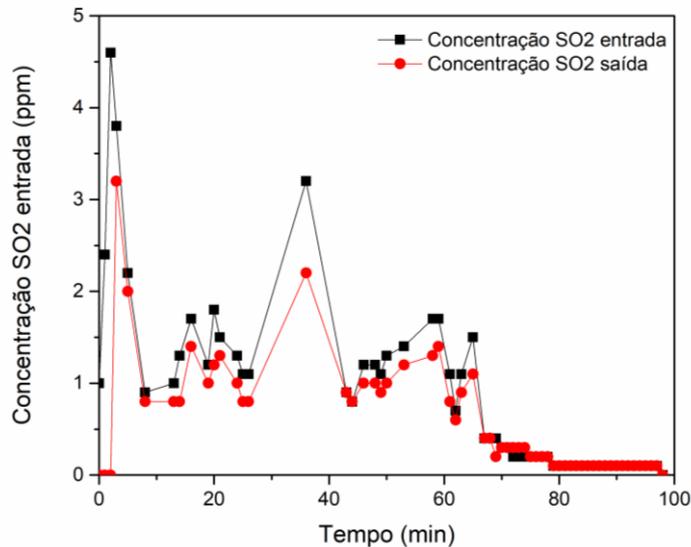
4.5.2.2 Dessulfurização em sistema contínuo

Analisando agora os resultados do lavador em sistema contínuo na Figura 51, é possível perceber que o sistema de alimentação é instável, apresentando muita diferença na concentração ao longo do tempo, até que a concentração foi reduzida em um tempo pré-determinado de 80min.

Nesse tipo de regime de alimentação do gás, a dessulfurização apresentou um comportamento diferente variando com a instabilidade de SO_2 no lavador. Segundo Zhai *et al.* (2017), na teoria do processo de absorção, o aumento de Ca/S estimula a dissolução do SO_2 , de

modo que a transferência de massa diminui na fase gasosa e a taxa de dessulfurização da solução aumenta. Isso é possível observar na Figura 51.

Figura 51 - Concentrações de SO₂ no lavador contínuo



É possível observar na Figura 52, que o dióxido de enxofre (SO₂) apresentou picos de absorção ao longo do tempo. Isso ocorre segundo Zhai et al., (2017), porque a taxa de dessulfurização da solução aumenta lentamente conforme a razão molar Ca/S. De acordo com o mecanismo de reação, a capacidade de absorção de SO₂ por unidade de tempo aumenta conforme a razão líquido-gás, o que contribui para a absorção de SO₂. Além disso, a resistência da transferência de massa está no filme líquido que também contribui para a absorção de SO₂. Por isso, os maiores valores de SO₂ absorvido ocorrem com o aumento da concentração na entrada do lavador.

Figura 52 - SO₂ absorvido no lavador contínuo

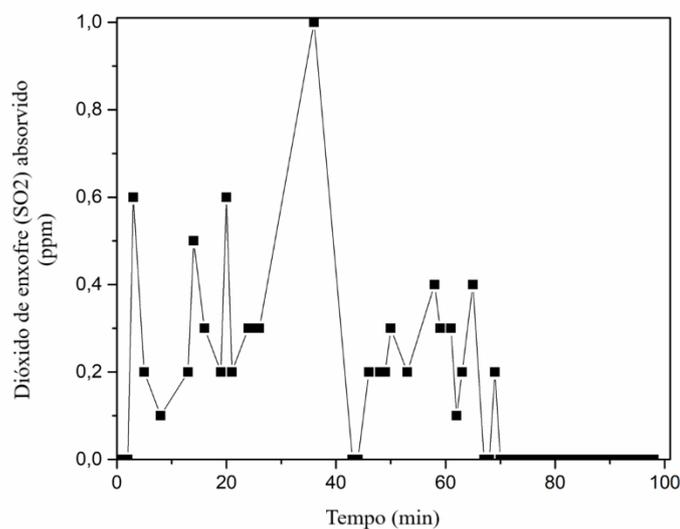
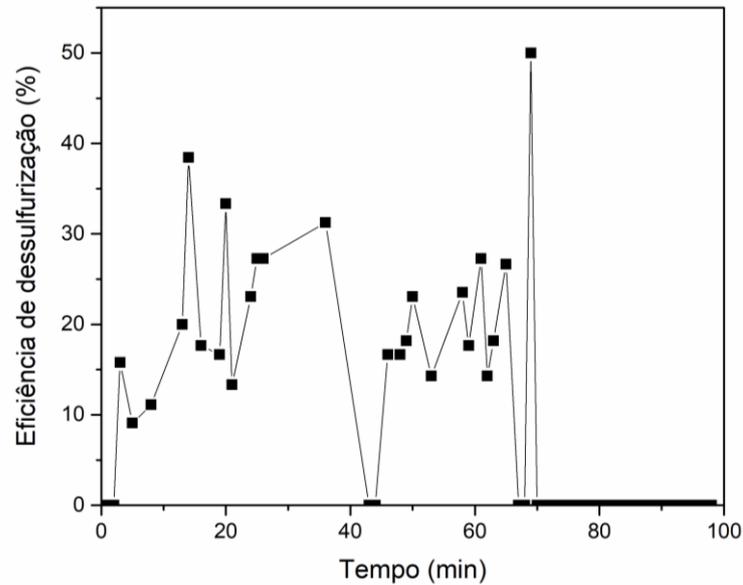


Figura 53 - Eficiência de dessulfurização no lavador contínuo



A Figura 53, confirma que a curva de dessulfurização aumenta com o aumento da razão Ca/S, em concordância com todas as explicações apresentadas anteriormente. Os pontos de maior concentração de alimentação do SO₂, apresentaram maior eficiência.

4.5.2.3 Caracterização da cal da lama

Na Tabela 20 é possível observar os resultados obtidos na análise de FRX da cal hidratada após a realização dos experimentos de dessulfurização.

Tabela 20 - FRX da cal adsorvida

Amostra	Ca (%)	S (%)
Batelada 1	98,814	1,186
Batelada 2	98,850	1,150
Batelada 3	98,898	1,102
Contínuo	98,887	1,132

Através dos dados da tabela acima é possível observar que houve a adsorção do enxofre na cal hidratada e as amostras em batelada apresentaram resultados similares. A amostra da triplicata, que apresentou um tempo de reação de 250min, teve uma menor quantidade de enxofre adsorvido na cal. O lavador contínuo apresentou uma porcentagem de enxofre adsorvido similar ao obtido na alimentação em batelada.

4.6 CONCLUSÕES

No lavador em batelada utilizando a lama à 80% de umidade e 80°C, a dessulfurização atingiu 100% de eficiência em todos os experimentos. A maior concentração de SO₂ é adsorvida logo no início da reação devido ao se difundir rapidamente na superfície da cal hidratada é envolvida por um filme de água, a esse estágio dá-se o nome de estágio dinâmico. Quando a maior concentração de SO₂ é adsorvida, há um aumento da resistência à difusão e tem-se a diminuição da difusão. Neste ponto, a difusão da fase gasosa para a fase sólida torna-se a etapa de controle da reação, e a eficiência da dessulfurização diminui, dando-se o nome de zona de difusão de potência. Quando a difusão inicial, por algum motivo, ocorre de forma mais lenta, toda a reação se desencadeia de forma ainda mais demorada chegando a apresentar um tempo três vezes maior de dessulfurização e com menor valor de enxofre adsorvido.

No lavador em sistema contínuo, o sistema de alimentação se mostrou instável, apresentando muita diferença na concentração ao longo do tempo. Neste caso, a taxa de dessulfurização aumentou conforme a razão molar Ca/S, pois a transferência de massa diminuiu na fase gasosa estimulando a dissolução do SO₂. Nos picos de maior concentração de SO₂ na alimentação do lavador houve, dessa forma, maior adsorção e maior foi a eficiência.

Analisando a porcentagem de enxofre adsorvido, não houve diferença significativa entre os sistemas de alimentação contínuo e batelada. A adsorção com cal hidratada é eficiente, como esperado, e resulta em uma eficiência positiva na redução de gases.

5 SUSGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, indica-se realizar mais ciclos de filtração e com mais condições de parâmetros no Capítulo 3 para avaliar de forma mais profunda a influência de todos os parâmetros em uma maior faixa de tempo.

Em relação ao Capítulo 4, realizar mais testes experimentais no lavador variando temperatura e umidade em regime batelada e contínuo. E realizar testes de dessulfurização com o meio filtrante com a camada de precoating variando a umidade e espessura antes do lavador de gases. E comparar e analisar as condições operacionais que garantem melhores valores de eficiência de dessulfurização, taxa de adsorção e tempo efetivo de dessulfurização. A automatização na linha de dessulfurização garantiria maior estabilidade na alimentação dos gases e menor risco de vazamento.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-OTOOM, Awni Y. Prediction of the collection efficiency, the porosity, and the pressure drop across filter cakes in particulate air filtration. **Atmospheric Environment**, [S. l.], v. 39, n. 1, p. 51–57, 2005. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.09.057.

ANDRADE, Bárbara Karolinne Silva Araújo. **Avaliação do Precoating e dos Meios Filtrantes para Filtro de Mangas do Processo de Despoeiramento Secundário da Aciaria**. 2019. Universidade Federal de São Carlos, [S. l.], 2019.

BENNETT, Keith; META, Stella. Precoat Filtration. **Filtration + Separation**, [S. l.], 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**, [S. l.], v. 175, p. 79–86, 2017. DOI: 10.1016/j.seppur.2016.11.010.

BOURROUS, S.; BOUILLOUX, L.; OUF, F. X.; LEMAITRE, P.; NERISSON, P.; THOMAS, D.; APPERT-COLLIN, J. C. Measurement and modeling of pressure drop of HEPA filters clogged with ultrafine particles. **Powder Technology**, [S. l.], v. 289, p. 109–117, 2016. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.11.020.

CARVALHO, MAX VINÍCIUS APARECIDO DE. **AVALIAÇÃO DE MEIOS FILTRANTES PARA FILTRO DE MANGAS COM SISTEMA DE LIMPEZA DE JATO DE AR PULSANTE DO PROCESSO DE DESPOEIRAMENTO SECUNDÁRIO DA ACIARIA DE UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**. 2018. UFSCar, [S. l.], 2018.

CARVALHO, Pedro Sergio Landim De; MESQUITA, Pedro Paulo Dias; MELO, Luciane. **Panoramas Setoriais - Mudanças Climáticas - Siderurgia**. [s.l: s.n.].

CESTESB. **Dióxido de Enxofre**. [s.l: s.n.].

CETESB. Decreto Estadual nº 8468/76. . 23 abr. 2013.

CHOI, Joo Hong; HA, Soon Jong; JANG, Hyuk Jin. Compression properties of dust cake of fine fly ashes from a fluidized bed coal combustor on a ceramic filter. **Powder Technology**, [S. l.], v. 140, n. 1–2, p. 106–115, 2004. DOI: 10.1016/j.powtec.2003.10.017.

COMPRESSED GAS ASSOCIATION. **Handbook of Compressed Gases**. Boston, MA: Springer US, 1990. DOI: 10.1007/978-1-4613-0673-3. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4613-0673-3>. Acesso em: 29 jun. 2023.

CONAMA, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 382. . 26 dez. 2006, p. 131–137.

CONAMA, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução Nº 436. . 22 dez. 2011.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. 491. Resolução Nº 491. . 19 nov. 2018.

CÓRDOBA, Patricia. Status of Flue Gas Desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs. **Fuel**, [S. l.], v. 144, p. 274–286, 2015. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.12.065.

CUI, S.; NIU, F.; WANG, N. J.; ZHOU, J. M.; WANG, J. P.; LI, J. S. Study on desulfurization mechanism of adsorbents prepared by high ratio circulating fly ash and lime. **Fuel**, [S. l.], v. 277, n. October 2019, 2020. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118051.

DO, Duong D. **Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics**. [s.l: s.n.]. v. 2 DOI: 10.1142/9781860943829.

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

ERGUN, Sabri. Determination of Geometric Surface Area of Crushed Porous Solids. **Analytical Chemistry**, [S. l.], v. 24(2), n. 70, p. 388–393, 1952.

FARGNOLI, Amélia Giovana. **Estudo da compressibilidade de tortas de filtração de gases em filtros de tecido**. 2010. UFSCar, [S. l.], 2010.

GUPTA, Ajay; NOVICK, Vincent J.; BISWAS, Partim; MONSON, Paul R. Effect of humidity and particle hygroscopicity on the mass loading capacity of high efficiency particulate air (hepa) filters. **Aerosol Science and Technology**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 94–107, 1993. DOI: 10.1080/02786829308959624.

HINDS, William C. **Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles**. New York: John Wiley & Sons, 1982. v. 1

ITO, L. X.; AGUIAR, M. L. A study of the porosity of gas filtration cakes. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, [S. l.], v. 26, n. 2, p. 307–315, 2009. DOI: 10.1590/S0104-66322009000200008.

JOSEPH, Gerald T.; BEACHLER, David S. **Scrubber Systems Operation Review - Self-Instructional Manual APTI Course SI:412C**. [s.l.] : United States Environmental Protection Agency; North Carolina State University, 1998.

JOUBERT, A.; LABORDE, J. C.; BOUILLOUX, L.; CALLÉ-CHAZELET, S.; THOMAS, D. Influence of humidity on clogging of flat and pleated HEPA filters. **Aerosol Science and Technology**, [S. l.], v. 44, n. 12, p. 1065–1076, 2010. DOI: 10.1080/02786826.2010.510154.

JOUBERT, A.; LABORDE, J. C.; BOUILLOUX, L.; CHAZELET, S.; THOMAS, D. Modelling the pressure drop across HEPA filters during cake filtration in the presence of humidity. **Chemical Engineering Journal**, [S. l.], v. 166, n. 2, p. 616–623, 2011. DOI: 10.1016/j.cej.2010.11.033.

KAISER, S.; WEIGL, K.; SPIESS-KNAFL, K.; AICHERNIG, C.; FRIEDL, A. Modeling a dry-scrubbing flue gas cleaning process. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, [S. l.], v. 39, n. 5, p. 425–432, 2000. DOI: 10.1016/S0255-2701(99)00107-5.

KANAOKA, Chikao; HIRAGI, Sotoji. Pressure drop of air filter with dust load. **Journal of Aerosol Science**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 127–131, 1990. DOI: 10.1016/0021-8502(90)90027-U.

KHIROUNI, Nassim; CHARVET, Augustin; DRISKET, Clara; GINESTET, Alain; THOMAS, Dominique; BÉMER, Denis. Precoating for improving the cleaning of filter media clogged with metallic nanoparticles. **Process Safety and Environmental Protection**, [S. l.], v. 147, p. 311–319, 2021. DOI: 10.1016/j.psep.2020.09.045.

KOHL, Arthur L.; NIELSEN, Richard. **Gas Purification**. [s.l.] : Gulf Professional Publishing, 1997.

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**, [S. l.], v. 30, n. 4, p. 377–381, 1980. DOI: 10.1080/00022470.1980.10464592.

LI, Jianlong; LI, Shihang; ZHOU, Fubao. Effect of moisture content in coal dust on filtration and cleaning performance of filters. **Physicochemical Problems of Mineral Processing**, [S. l.], v. 52, n. 1, p. 365–379, 2016. DOI: 10.5277/ppmp160131.

LI, Xiao Zhong; HESS, Harald; HÖFLINGER, Wilhelm. Influence of operating parameters on precoat layers built up under crossflow condition. **Separation and Purification Technology**, [S. l.], v. 31, n. 3, p. 269–280, 2003. DOI: 10.1016/S1383-5866(02)00204-6.

MA, Xiaoxun; KANEKO, Takao; TASHIMO, Tsutomu; YOSHIDA, Tadashi; KATO, Kunio. Use of limestone for SO₂ removal from flue gas in the semidry FGD process with a powder-particle spouted bed. **Chemical Engineering Science**, [S. l.], v. 55, n. 20, p. 4643–4652, 2000. DOI: 10.1016/S0009-2509(00)00090-7.

MELO, Bruna Râmela De. **Precoating: uma alternativa mais econômica para melhorar a performance dos meios filtrantes em filtros de mangas da indústria siderúrgica**. 2021. Universidade Federal de São Carlos, [S. l.], 2021.

MIGUEL, A. F. Effect of air humidity on the evolution of permeability and performance of a fibrous filter during loading with hygroscopic and non-hygroscopic particles. [S. l.], v. 34, p. 783–799, 2003. DOI: 10.1016/S0021-8502(03)00027-2.

MILLER, Bruce G. **Formation and Control of Sulfur Oxides**. [s.l.: s.n.]. v. 1 DOI: 10.1016/b978-0-12-811365-3.00009-0.

MORRIS, K.; ALLEN, R. W. K. The influence of dust and gas properties on cake adhesion in fabric filters. **Filtration and Separation**, [S. l.], v. 33, n. 4, p. 339–343, 1996. DOI: 10.1016/S0015-1882(97)84224-3.

MUKHOPADHYAY, Arunangshu. Pulse-jet filtration: An effective way to control industrial pollution Part II: Process characterization and evaluation of filter media. **Textile Progress**, [S. l.], v. 42, n. 1, p. 1–97, 2010. DOI: 10.1080/00405160903438367.

NANNEN, L. W.; WEST, R. E.; KREITH, F. Removal of SO₂ from low sulfur coal combustion gases by limestone scrubbing. **Journal of the Air Pollution Control Association**, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 29–39, 1974. DOI: 10.1080/00022470.1974.10469890.

OMS, Organização Mundial da Saúde. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2,5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. . 2021.

ORMENESE, Agostinho Antonio. **Granulação de cloreto de potássio em leito fluidizado**. 1989. Universidade Federal de São Carlos, [S. l.], 1989.

PARK, Ok Hyun; YOO, Gab Jun; SEUNG, Bong J. A lab-scale study on the humidity conditioning of flue gas for improving fabric filter performance. **Korean Journal of Chemical Engineering**, [S. l.], v. 24, n. 5, p. 717–722, 2007. DOI: 10.1007/s11814-007-0032-8.

PERUCH, Maria da Glória Bublione. **Mecanismo de redução de SO₂ utilizando carvão vegetal ativado e grafite**. 2002. Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 2002.

RAVERT, Ed. Precoating new filters for better airflow, longer filter life. **Powder and Bulk Engineering**, [S. l.], 2005.

SCHILLER, Sascha; HELLMICH, Christoph; SCHMID, Hans Joachim. Evaluation of the Efficiency of Filtration Processes Using Precoat Materials. **Chemical Engineering and Technology**, [S. l.], v. 39, n. 3, p. 491–498, 2016. DOI: 10.1002/ceat.201500385.

SCHILLER, Sascha; SCHMID, Hans Joachim. Ultrafine dust filtration using precoat materials considering the influence of filter media. **Chemical Engineering and Technology**, [S. l.], v. 37, n. 6, p. 1009–1020, 2014. a. DOI: 10.1002/ceat.201300856.

SCHILLER, Sascha; SCHMID, Hans Joachim. Ultrafine dust filtration using precoat materials considering the influence of filter media. **Chemical Engineering and Technology**, [S. l.], v. 37, n. 6, p. 1009–1020, 2014. b. DOI: 10.1002/ceat.201300856.

SCHILLER, Sascha; SCHMID, Hans Joachim. Highly efficient filtration of ultrafine dust in baghouse filters using precoat materials. **Powder Technology**, [S. l.], v. 279, p. 96–105, 2015. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.03.048.

SCHMIDT, S. Experimental Investigations into the Compression of Dust Cakes Deposited on Filter Media. **Filtration & Separation**, [S. l.], n. September, p. 789–793, 1995.

SCHNELLE, Karl B.; BROWN, Charles A. **Air pollution control technology handbook**. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.1016/s0304-3894(02)00253-4.

SEVILLE, J. P. K. (ORG.). **Gas Cleaning in Demanding Applications**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997. DOI: 10.1007/978-94-009-1451-3. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-94-009-1451-3>. Acesso em: 30 jan. 2023.

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

SMITH, S. J.; VAN AARDENNE, J.; KLIMONT, Z.; ANDRES, R. J.; VOLKE, A.; DELGADO ARIAS, S. Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 1101–1116, 2011. DOI: 10.5194/acp-11-1101-2011.

SNYDER, Todd R.; BUSH, P. Vann; ROBINSON, Michael S. **CHARACTERIZATION AND MODIFICATION OF PARTICULATE PROPERTIES TO ENHANCE FILTRATION PERFORMANCE**. Birmingham, Alabama.

T. YLITUOMI; STENHOUSE, J. I. T.; WALSH, D. C. AEROSOL PARTICLE BOUNCE. **Journal of Aerosol Science**, [S. l.], v. 26, p. 917–918, 1995.

THAD GODISH. **Air Quality**. 4th. ed. [s.l.] : Lewis Publishers, 2004. v. 8 DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004.

THEODORE, Louis. **Air pollution control equipment calculations**. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2008.

THOMMES, Matthias; KANEKO, Katsumi; NEIMARK, Alexander V; OLIVIER, James P.; RODRIGUEZ-REINOSO, Francisco; ROUQUEROL, Jean; SING, Kenneth S. W. Physisorption of gases , with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). [S. l.], v. 87, p. 1051–1069, 2015. DOI: 10.1515/pac-2014-1117.

TURNER, James H.; MCKENNA, John D.; MYCOCK, John C.; NUNN, Arthur B.; VATAVUK, William M. **EPA Air Pollution Control Cost Manual. Chapter 1 Baghouses and Filters**. Daniel C. Mussatti, , 2002.

VDI 3926. . 2004.

WALSH, D. C.; STENHOUSE, J. I. T. The effect of particle size, charge, and composition on the loading characteristics of an electrically active fibrous filter material. **Journal of Aerosol Science**, [S. l.], v. 28, n. 2, p. 307–321, 1997. a. DOI: 10.1016/S0021-8502(96)00434-X.

WALSH, D. C.; STENHOUSE, J. I. T. Clogging of an electrically active fibrous filter material: Experimental results and two-dimensional simulations. **Powder Technology**, [S. l.], v. 93, n. 1, p. 63–75, 1997. b. DOI: 10.1016/S0032-5910(97)03260-9.

WALSH, D. C.; STENHOUSE, J. I. T.; SCURRAH, K. L.; GRAEF, A. Effect of solid and liquid aerosol particle loading on fibrous filter material performance. **Journal of Aerosol Science**, [S. l.], v. 27, n. Suppl 1, p. S617–S618, 1996. DOI: 10.1016/0021-8502(96)00381-3.

WANG, Fei; CHEN, Jian qi; CHEN, Liang; MA, Shi hao; CHENG, Fang qin; LV, Wen jie. Regulation of precoating filtration process based on SERS detection technology. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, [S. l.], v. 147, n. November 2019, p. 107692, 2020. DOI: 10.1016/j.cep.2019.107692.

WANG, Naihua; ZHANG, Xiaoping. Effect of humidification water on semi-dry flue gas desulfurization. **Procedia Environmental Sciences**, [S. l.], v. 11, n. PART B, p. 1023–1028, 2011. a. DOI: 10.1016/j.proenv.2011.12.156.

WANG, Naihua; ZHANG, Xiaoping. Effect of humidification water on semi-dry flue gas desulfurization. **Procedia Environmental Sciences**, [S. l.], v. 11, n. PART B, p. 1023–1028, 2011. b. DOI: 10.1016/j.proenv.2011.12.156.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Sustainability Indicators**. , 2022. Disponível em: <https://worldsteel.org/steel-topics/sustainability/sustainability-indicators/>.

ZHAI, Ming; GUO, Li; SUN, Lin; ZHANG, Yu; DONG, Peng; SHI, Weiqiang. Desulfurization performance of fly ash and CaCO₃ compound absorbent. **Powder Technology**, [S. l.], v. 305, p. 553–561, 2017. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.10.021.

ZHOU, Guangyu; LOW, Ze-Xian; FENG, Shasha; ZHANG, Feng; ZHONG, Zhaoxiang; XING, Weihong. Effect of relative humidity and dust moisture content on filtration performance of bag filter. **Separation and Purification Technology**, [S. l.], v. 308, p. 122952, 2023. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.122952.