

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

**AVALIAÇÃO DO PRECOATING E DOS MEIOS FILTRANTES PARA  
FILTRO DE MANGAS DO PROCESSO DE DESPOEIRAMENTO  
SECUNDÁRIO DA ACIARIA**

São Carlos -SP  
2019

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

**AVALIAÇÃO DO PRECOATING E DOS MEIOS FILTRANTES PARA  
FILTRO DE MANGAS DO PROCESSO DE DESPOEIRAMENTO  
SECUNDÁRIO DA ACIARIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em 26 de fevereiro de 2019, para obtenção do título de mestre em Engenharia Química.

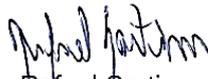
Orientação: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Mônica Lopes Aguiar

São Carlos -SP  
2019

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE BÁRBARA KAROLINNE SILVA ARAÚJO ANDRADE APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 26 DE FEVEREIRO DE 2019.

BANCA EXAMINADORA:

  
Mônica Lopes Aguiar  
Orientadora, UFSCar

  
Rafael Sartim  
UFES

  
Vádila Giovana Guerra Béttega  
UFSCar

*A verdadeira liberdade é estar livre do desejo de ser livre de qualquer coisa.*

*Adyashanti*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Mônica pela orientação e apoio, à Rafael Sartim pela orientação e à ArcelorMittal pelo apoio financeiro e fornecimento dos materiais.

Ao Max por transmitir todo conhecimento nos meses que trabalhamos juntos e à nossa amizade.

Aos meus pais, Josiel e Goreti, que me apoiaram desde o início e possibilitaram tudo o que aconteceu. Grata pelo amor e cuidado de vocês todos esses anos. À minha irmã, Raíssa, que também é companheira de salinha, por tudo que fez e faz por mim, pela nossa amizade e amor.

A todos da família Andrade, sinto saudade do alto astral e da companhia de vocês. Em especial, à Ingrid por ser minha prima-irmã, mais louca, companheira e divertida. Sinto muita saudade e obrigada por ter nos dado a Lore de presente, que me ensinou o que é o amor incondicional de uma tia.

À Vó Catal e à tia Gil, *in memoriam*, por terem me dado o prazer de ter convivido e amado vocês.

A todos da salinha, pelos dias compartilhados, os conhecimentos transmitidos, às risadas e à amizade. Em especial à Dani, por ser essa amiga tão divertida, leal e companheira de todos os momentos, por todas histórias que vivemos juntas e pelas horas de conversa e risadas.

À Thalyne, por termos embarcado juntas nessa jornada e apoiado uma à outra desde o início. Grata por nosso tempo morando juntas, nossos momentos de felicidade e tristeza e à nossa amizade.

Aos alagoanos, Ra, Thalyne, Karla e Neto, vocês fazem a saudade de casa muito menor e meus dias muito mais divertidos. À tia Creuza, tia Sônia e ao tio Braga por tudo que fizeram por mim e pelo carinho, sou muito grata.

Ao Fábio, pela amizade, amor, companheirismo e apoio.

À Amarilis pela amizade, sua sinceridade e por ser companheira de estudos. A todos que fizeram minha vida melhor, me ajudaram e compartilharam momentos comigo em São Carlos.

Aos meus amigos de UFAL, mas que continuam até hoje, Peter, Kuri, Anderson e Allan que apesar da distância física e da vida corrida, continuam presentes e são amigos fiéis. E ao Fidelis, pelos longos anos de amizade e companheirismo.

## RESUMO

A exposição constante a elevadas taxas de concentração de material particulado presente no ar aumentou o número de casos de doenças cardiorrespiratórias e de morte. A partir daí, houve a necessidade de desenvolvimento e aperfeiçoamento de processos e equipamentos de limpeza de gases. Entre estes, tem-se o filtro de mangas que é um dos mais utilizados nas indústrias devido à alta eficiência, acima de 99,9%. Sua eficiência de filtração é diretamente relacionada ao tipo de meio filtrante. O meio filtrante com recobrimento das fibras com uma fina membrana de PTFE tem uma boa aplicação industrial, garantindo altas eficiências de coleta e de limpeza, porém apresenta custo elevado, além de ser menos utilizado que o poliéster. Um pré-tratamento alternativo para aumento da eficiência de coleta em meios filtrantes mais baratos, é o precoating. O qual previne a saturação antecipada do meio filtrante, fazendo um recobrimento da manga com um material particulado, visando impedir a penetração de partículas submicrométricas no primeiro ciclo. É responsável pela colmatação, que é a formação inicial da torta, garantindo a filtração de superfície. A escolha do pó para o precoating e do meio filtrante a ser utilizado é de grande influência à eficiência do processo de filtração. Dessa forma, esse trabalho tem por objetivo determinar o pó de precoating e o meio filtrante mais adequado na filtração de material proveniente do despoeiramento secundário da aciaria de uma siderúrgica. Para tal finalidade, inicialmente foi realizada a caracterização dos materiais particulados. Em seguida, fez-se a caracterização dos meios filtrantes (poliésteres, poliéster com membrana de PTFE e poliésteres com encapsulamento de PTFE) para obter o diâmetro das fibras, a porosidade e a permeabilidade. Assim, foram executados testes de queda de pressão máxima de precoating e avaliado a variação mássica de pó de precoating necessária para se alcançar a menor emissão de material particulado. Também foram avaliadas para os meios filtrantes virgens as eficiências de coleta para micro e nanopartículas. Foram realizados trinta ciclos de filtração com e sem precoating em poliéster até a queda de pressão máxima de 100 mmH<sub>2</sub>O com limpeza por jato de ar pulsante, para verificar a necessidade da aplicação ou não do precoating. Verificou-se que o precoating aumentou a vida útil do poliéster e possibilitou a diminuição da penetração de partículas no meio filtrante. A eficiência das mangas sujas de três compartimentos diferentes foi avaliada e concluiu-se que a eficiência diminuiu em comparação com uma manga virgem. Palavras-chave: Filtro de mangas. Meio Filtrante. Filtração ar-sólido. Precoating. Jato pulsante de ar.

## ABSTRACT

Constant exposure to high concentrations of particulate matter present in the air has increased the number of cases of cardiorespiratory disease and death. Since then, has been a need for the development and improvement of gas cleaning processes and equipments. Among these, we have the bag filter which is one of the most used in the industries due to the high efficiency, above 99.9%. Its filtration efficiency is directly related to the type of filter medium. The filter media with fiber coating with a thin PTFE membrane has a good industrial application, guaranteeing high collecting and cleaning efficiencies, but it is high cost and less used than polyester. An alternative pre-treatment for increasing collection efficiency in cheaper filter media is the precoating. This prevents clogging of the filter media by coating the bags with a particulate material to prevent the penetration of submicron particles in the first cycle. It is responsible for the clogging, which is the initial formation of the cake, ensuring surface filtration. The choice of the precoating powder and the filter medium to be used is of great influence to the efficiency of the filtration process. Thus, this work aims to determine the precoating powder and the most suitable filter media in the filtration of material from the secondary dusting of the steelworks of a steel mill. For this purpose, the characterization of the particulates was initially carried out. Next, the filter media (polyesters, PTFE membrane polyester and PTFE encapsulated polyesters) were characterized to obtain fiber diameter, porosity and permeability. Thus, maximum precoating load loss tests were performed and the precoating mass variation required to achieve the lowest emission of particulate material was evaluated. The collection efficiencies for micro and nanoparticles were also evaluated for virgin filter media. Thirty cycles of filtration with and without precoating in polyester were carried out up to the maximum pressure loss of 100 mmH<sub>2</sub>O with pulsed air jet cleaning to verify the need for precoating or not. It was found that the precoating increased the shelf life of the polyester and allowed the reduction of the penetration of particles in the filter medium. The efficiency of the dirty sleeves of three different compartments was evaluated and it was concluded that efficiency decreased compared to a virgin sleeve.

Keywords: Baghouse; Filter media; Air-solid Filtration; Precoating; Pulse-jet

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Queda de pressão como função da massa acumulada.....                                  | 6  |
| Figura 2 - Determinação do ponto de colmatação .....   | 9  |
| Figura 3 - Mecanismos de captura das partículas.....   | 10 |
| Figura 4 - Curvas de queda de pressão inicial durante a filtração.....                           | 12 |
| Figura 5 - Ciclos de filtração ideal e real.....   | 13 |
| Figura 6 - Ciclos de filtração .....   | 13 |
| Figura 7 - Funcionamento básico de um filtro de mangas .....                                     | 20 |
| Figura 8 - Sistema de limpeza por ar pulsado .....   | 21 |
| Figura 9 - Meio filtrante submetido a precoating .....   | 24 |
| Figura 10 - Distribuição granulométrica em volume da cal hidratada .....                         | 30 |
| Figura 11 - Distribuição granulométrica em volume do calcário dolomítico.....                    | 31 |
| Figura 12 - Distribuição granulométrica aerodinâmica (em massa) da cal hidratada ....            | 32 |
| Figura 13 - - Distribuição granulométrica aerodinâmica (em massa) do calcário<br>dolomítico..... | 32 |
| Figura 14 - Imagens dos materiais particulados no MEV .....                                      | 34 |
| Figura 15 - Imagens do PE 540 no MEV .....   | 35 |
| Figura 16 – Imagens do PE 550 no MEV.....  | 35 |
| Figura 17 – Imagens do PE + PTFE no MEV .....  | 36 |
| Figura 18 – Imagens do PE P 540 no MEV .....   | 36 |
| Figura 19 – Imagens do PE P 600 no MEV .....   | 36 |
| Figura 20 - Esquema de contagem das fibras .....   | 37 |
| Figura 21 - Distribuição de diâmetros das fibras.....  | 38 |
| Figura 22 - Unidade experimental para determinar a permeabilidade .....                          | 39 |
| Figura 23 - Unidade experimental de filtração com contador de partículas.....                    | 41 |
| Figura 24 – Unidade experimental de nanopartículas .....   | 42 |
| Figura 25 – Caracterização das nanopartículas .....  | 43 |
| Figura 26 - Sistema de alimentação de material particulado.....                                  | 44 |
| Figura 27 - Filtro de manga .....  | 45 |
| Figura 28 - Unidade de aplicação da cola.....  | 49 |
| Figura 29 - Amostras da manga.....   | 50 |
| Figura 30 – Eficiência de coleta de micropartículas.....   | 0  |

|  |    |
|--|----|
| Figura 31 - Eficiência de coleta de partículas nanométricas em função do diâmetro de mobilidade elétrica .....   | 1  |
| Figura 32- Queda de pressão em função do tempo .....   | 2  |
| Figura 33 - Queda de pressão em função da massa para o primeiro ciclo .....  | 5  |
| Figura 34 - Eficiência de coleta variando a queda de pressão limite do precoating para cal hidratada.....  | 6  |
| Figura 35 - Eficiência de coleta variando a queda de pressão limite do precoating para calcário dolomítico .....   | 6  |
| Figura 36 - Precoating com as misturas mássicas de cal hidratada .....   | 7  |
| Figura 37 - Precoating com as misturas mássicas de calcário dolomítico.....  | 7  |
| Figura 38 – Trinta ciclos de filtração para PE 550 .....   | 8  |
| Figura 39 - Trinta ciclos de filtração para PE + PTFE .....  | 9  |
| Figura 40 - Queda de pressão residual em função do tempo para os trinta ciclos.....  | 9  |
| Figura 41 - Trinta ciclos de filtração com precoating de cal .....   | 10 |
| Figura 42 - Primeiro ciclo com o precoating de cal .....   | 11 |
| Figura 43 - Primeiro ciclo com precoating em função da massa de cal .....  | 12 |
| Figura 44 - Trinta ciclos de filtração com precoating de calcário .....  | 13 |
| Figura 45 - Primeiro ciclo com o precoating de calcário .....  | 14 |
| Figura 46 - Primeiro ciclo com precoating em função da massa de calcário .....   | 14 |
| Figura 47 - Gráficos dos trinta ciclos comparativos: a) PE e pó de aciaria, b) PE+PTFE e pó de aciaria, c) PE e precoating de cal e d) PE e precoating de calcário ..... | 17 |
| Figura 48 - Seções transversais dos meios filtrantes após os trinta ciclos: a) PE .....  | 18 |
| Figura 49 - Penetração das partículas ao longo da profundidade do meio filtrante .....   | 19 |
| Figura 50 - Eficiência de coleta do compartimento 2.....   | 20 |
| Figura 51 - Eficiência de coleta do compartimento 4.....   | 20 |
| Figura 52 - Eficiência de coleta do compartimento 7.....   | 20 |

**LISTA DE TABELAS**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Materiais particulados para precoating.....                   | 29 |
| Tabela 2 – Massa Específica .....  | 29 |
| Tabela 3 – Distribuição volumétrica dos materiais particulados.....      | 30 |
| Tabela 4 - Distribuição volumétrica mistura mássica cal.....             | 30 |
| Tabela 5 - Distribuição volumétrica mistura mássica calcário.....        | 30 |
| Tabela 6 – Diâmetro aerodinâmico médio .....                             | 31 |
| Tabela 7 - Composição Química .....                                      | 33 |
| Tabela 8 - Diâmetros médios das fibras .....                             | 37 |
| Tabela 9 – Permeabilidade dos meios filtrantes .....                     | 39 |
| Tabela 10 – Valores das constantes de permeabilidade K1 e K2.....        | 40 |
| Tabela 11 – Porosidade dos meios filtrantes. ....                        | 40 |
| Tabela 12 - Condições operacionais das filtrações.....                   | 46 |
| Tabela 13 - Misturas mássicas.....                                       | 47 |
| Tabela 14 – Experimentos realizados.....                                 | 0  |
| Tabela 15 - Eficiência de coleta para faixa de micropartículas.....      | 4  |
| Tabela 16 - Eficiência de coleta e massa retida no filtro absoluto ..... | 8  |
| Tabela 17- Massa retida nos filtros absolutos do PE.....                 | 16 |

## SUMÁRIO

|   |     |
|---|-----|
| RESUMO .....  | i   |
| ABSTRACT .....  | ii  |
| LISTA DE FIGURAS .....  | iii |
| LISTA DE TABELAS .....  | v   |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | 1   |
| <b>2. OBJETIVOS</b> .....   | 5   |
| 2.2 Objetivos específicos .....   | 5   |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                                       | 6   |
| 3.1 Filtração .....   | 6   |
| 3.1.1 Etapas de filtração .....   | 6   |
| 3.1.1.1 Filtração de profundidade ou interna de um feltro (não tecido)..... | 7   |
| 3.1.1.2 Etapa de transição no feltro .....                                  | 7   |
| 3.1.1.3 Filtração superficial do feltro .....                               | 8   |
| 3.2 Ponto de colmatação .....   | 8   |
| 3.3 Mecanismos de captura das partículas .....                              | 9   |
| 3.4 Curvas de Filtração .....   | 11  |
| 3.5 Ciclos de Filtração .....   | 12  |
| 3.6 Parâmetros de Filtração.....  | 14  |
| 3.6.1 Queda de pressão.....   | 14  |
| 3.6.2 Velocidade de Filtração.....  | 15  |
| 3.6.3 Permeabilidade .....  | 16  |
| 3.6.4 Porosidade .....  | 18  |
| 3.6 Filtro de mangas.....   | 19  |
| 3.6.1 Funcionamento .....   | 20  |
| 3.6.2 Sistema de limpeza.....   | 20  |
| 3.7 Meios filtrantes .....  | 22  |
| 3.9 Precoating .....  | 24  |
| 3.10 Estado da Arte sobre Precoating .....                                  | 26  |
| <b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....   | 28  |
| 4.1 Caracterização dos Materiais Particulados .....                         | 28  |
| 4.2 Caracterização dos meios filtrantes virgens.....                        | 35  |
| 4.3 Eficiência para micropartículas .....                                   | 40  |
| 4.4 Eficiência para nanopartículas .....                                    | 41  |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.5 Ensaio de filtração até 100 mmH <sub>2</sub> O .....                       | 44        |
| 4.6 Queda de pressão máxima do precoating .....                                | 46        |
| 4.7 Avaliação da mistura de pós de precoat na eficiência de filtração .....    | 46        |
| 4.8 Ciclos de Filtração .....  | 47        |
| 4.9 Ciclos de Filtração com precoating .....                                   | 48        |
| 4.10 Preparação de amostras para serem submetidas ao MEV .....                 | 48        |
| 4.11 Determinação da penetração das partículas nos meios filtrantes.....       | 50        |
| 4.13 Tabela de Experimentos.....   | 51        |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>  | <b>0</b>  |
| 5.1 Eficiência para micropartículas sem precoating .....                       | 0         |
| 5.2 Eficiência para nanopartículas sem precoating.....                         | 1         |
| 5.3 Ensaio de filtração até 100 mmH <sub>2</sub> O sem precoating .....        | 2         |
| 5.4 Queda de pressão máxima do precoating .....                                | 5         |
| 5.5 Avaliação da mistura de pós de precoating na eficiência de filtração ..... | 7         |
| 5.6 Ciclos de Filtração sem Precoating.....                                    | 8         |
| <b>6. CONCLUSÕES .....</b>   | <b>22</b> |
| <b>7. REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>24</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a poluição do ar tem colocado em perigo a saúde humana, especialmente devido ao problema da névoa ocasionada por materiais particulados. A poluição atmosférica origina-se por diversos fatores, tais como a queima de combustíveis (fósseis, vegetal e outros), poeiras de origem natural ou das atividades humanas e outros aerodispersóides de origens diversas. Estes fatores estão associados ao desenvolvimento urbano, industrial e à crescente utilização de veículos motorizados, o que se reflete, cada vez mais, em efeitos negativos ao equilíbrio dos ecossistemas (ASSUMPÇÃO, 2006).

A poluição do ar atinge tanto a cidade quanto o campo, 96% da população mundial vive em locais onde as leis de qualidade de ar não são respeitadas. À medida que a qualidade do ar diminui, aumenta os casos de derrames, doenças cardíacas, câncer de pulmão, doenças respiratórias crônicas e agudas (OMS, 2018).

Essas doenças são devido à exposição de material particulado, que em 2016, foi responsável pela morte de 4,2 milhões de pessoas. Sendo, 29% dos casos de câncer no mundo, 24% dos casos de derrame, 25% das doenças cardíacas e 43% das doenças pulmonares causadas pela exposição ao material particulado (OMS, 2018).

Com o desenvolvimento industrial de acelerado crescimento desde a Revolução Industrial e o mercado competitivo exigindo grandes volumes de produção, resultou conseqüentemente em uma maior quantidade de poluentes liberada na atmosfera (LORA, 2002). A partir de então, leis e regulamentações começaram a surgir e as indústrias precisaram se moldar a este novo cenário. Conseqüentemente, um maior investimento em pesquisa, desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas de controle de poluição, especialmente do ar, tem sido uma das principais estratégias adotadas pelas indústrias.

No campo industrial, a separação de partículas sólidas pode ser realizada por diferentes equipamentos de coleta, dentre os quais estão o ciclone, o precipitador eletrostático, o lavador de gás e o filtro de mangas. O filtro mais adequado para um determinado processo dependerá das características do poluente a ser tratado e também

da exigência de controle de emissão no meio ambiente (MUKHOPADHYAY, 2009; ZEVENHOVEN, 2004).

Entre os equipamentos de filtração de ar-sólido, destaca-se o filtro de mangas devido à sua alta eficiência de coleta para uma ampla faixa granulométrica, baixo custo e fácil operação. Esses filtros também podem ser aplicados para uma ampla faixa de temperatura desde que construído com o material adequado. Além disso, o filtro de mangas é pouco sensível a flutuações dos parâmetros operacionais, como temperatura, volume do gás e carga de partículas (MUKHOPADHYAY, 2009).

A eficiência de filtração e a seleção dos meios filtrantes está relacionada diretamente com o material particulado a ser filtrado. Assim, deve haver compatibilidade entre o meio filtrante, o material particulado e as características do processo. Para que a filtração apresente alta eficiência para partículas micrométricas, o tipo de meio filtrante, a queda de pressão no filtro, a velocidade do gás, a permeabilidade, a porosidade, a temperatura, a umidade e outras condições operacionais devem ser avaliados.

O meio filtrante pode ser fabricado com vários tipos de tecidos, entre eles os de fibras sintéticas, que são muito utilizadas por apresentar resistência térmica e química, e fibras com diversos diâmetros. Os meios filtrantes mais utilizados atualmente são: poliéster, polipropileno, PTFE (Teflon®), poliamida, entre outros. (BARNETT, 2000; KOCH, 2008).

A constante pressão para reduzir emissões de poluentes fez fabricantes de meios filtrantes desenvolver novos tecidos com recobrimento das fibras com uma fina membrana de politetrafluoretileno (PTFE), conhecido comercialmente como Teflon® que é um dos mais utilizados. Esse recobrimento tem objetivo de dificultar a penetração de partículas finas, garantindo a alta eficiência de coleta (acima de 99,99%). Testes mostraram uma redução nas emissões de material particulado e na queda de pressão utilizando meios filtrantes com estas membranas (BARNETT, 2000).

A fina camada de membrana além de apresentar uma redução da adesão entre a torta e as fibras, e assim, aumentar a eficiência de limpeza, melhora o escoamento de ar e, conseqüentemente, reduz o consumo de energia. Com uma limpeza mais eficiente, é possível diminuir os ciclos de limpeza e a manutenção, assim os meios filtrantes passam a ter maior vida útil. Além das mangas apresentarem menor desgastes das fibras,

prolonga o período de troca das mangas, reduzindo assim os custos operacionais (BARNETT, 2000).

Uma alternativa à membrana de PTFE é o precoat que possui como objetivo reduzir ou prevenir a saturação das mangas (SCHILLER, 2014). O precoat consiste em recobrir o interior e a superfície de meios filtrantes de não-tecidos com material particulado formando uma camada de pó inicial a qual previne as partículas de penetrarem o meio filtrante e causar a saturação. O material particulado vai se acumulando nas fibras e nas partículas já capturadas, formando os dendritos, e em seguida, a torta. O início da formação da torta é estabelecido pelo ponto de colmatação que é obtido pelo gráfico de queda de pressão em função carga mássica no cruzamento da assíntota da curva com o eixo das abcissas. A torta de precoat age como um elemento filtrante apresentando como mecanismo de coleta a filtração de superfície. Além de garantir a passagem do fluxo de ar livremente pela manga, melhorando a performance do meio filtrante enquanto estende a sua vida útil. Também tem como meta aumentar a eficiência de coleta de pó no início da filtração, facilitar a limpeza, promovendo melhor desprendimento da torta (WALSH, 1996; RAVERT, 2005).

Poucos são os artigos que tem como tema o estudo do precoat. O trabalho de Ravert (2005) avalia o precoat para melhorar o fluxo de ar no meio filtrante e se há aumento no tempo de vida útil do tecido. Schiller *et al.* (2016) compararam os valores obtidos de eficiência de coleta e o reuso do precoat 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 precoat, indicando que o meio filtrante PTFE + PI foi o que obteve melhor desempenho.

Observando a deficiência na literatura sobre o tema do precoat, este trabalho tem como objetivo avaliar a necessidade do precoat e comparar a eficiência de coleta obtida no processo de filtração com e sem o precoat. Para tal finalidade serão avaliados os seguintes parâmetros: tipo de pó de precoat, tipo do meio filtrante, eficiência de coleta para micro e nanopartículas, tempo de filtração, queda pressão

residual, aumento da queda de pressão e massa retida após a limpeza por pulso de ar reverso.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é avaliar a influência do precoating na filtração ar-sólido. Para tal finalidade será comparado o poliéster com membrana de Teflon com meio filtrante de poliéster com e sem o precoating. Além de determinar o pó do precoat que confere maior eficiência de coleta. O material particulado utilizado foi proveniente do despoeiramento secundário da aciaria de uma indústria siderúrgica.

### 2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos tem-se:

- realizar trinta ciclos de filtração com precoating com o meio filtrante de poliéster para comparar o comportamento de filtração com os ciclos sem o precoating para o poliéster e poliéster com membrana de PTFE
- avaliar a eficiência de coleta para nano e micropartículas
- analisar os parâmetros de queda de pressão, tempo de filtração, permeabilidade e porosidade e eficiência de coleta
- analisar o pó do precoat (cal hidratada e calcário dolomítico) mais eficiente
- avaliação da necessidade de se utilizar o precoating

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é abordada a filtração e todos seus parâmetros operacionais tais como velocidade de filtração, permeabilidade, meios filtrantes, entre outros. Uma breve descrição da norma VDI 3926 e uma discussão sobre o precoating e seu estado da arte.

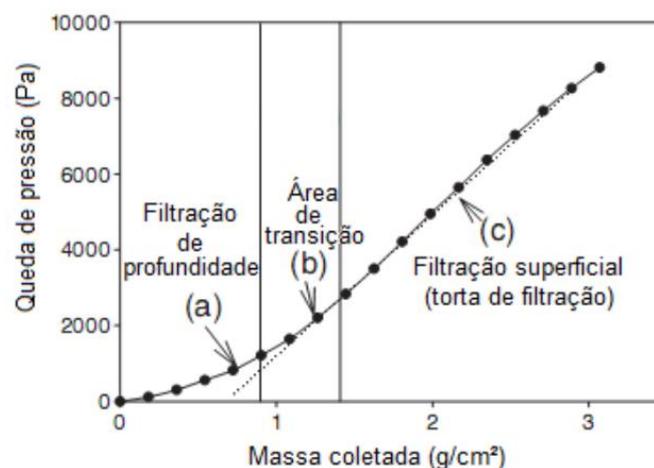
#### 3.1 Filtração

A filtração de gases é uma operação de separação que apresenta como característica principal a remoção de partículas sólidas suspensas na corrente de ar, por meio de um meio filtrante, poroso e permeável. As partículas podem ficar coletadas no interior e/ou na superfície do meio filtrante sendo resultado da formação de uma camada de pó na superfície, denominada por torta de filtração, permitindo somente a passagem dos gases (DULLIEN, 1989; DONOVAN, 1985).

##### 3.1.1 Etapas de filtração

Inicialmente, quando as mangas estão limpas, a filtração se dá pela retenção de partículas na fibra, denominada filtração interna (THEODORE, 2008; RODRIGUES, 2006). Após isso, há um período intermediário com a formação de dendritos, e conseqüentemente, da torta de filtração, chamada etapa de transição (RODRIGUES, 2006). Em seguida, tem-se a última etapa denominada de filtração superficial. A Figura 1 ilustra as etapas da filtração anteriormente mencionadas.

Figura 1 - Queda de pressão como função da massa acumulada



Fonte: SONG, 2006

### **3.1.1.1 Filtração de profundidade ou interna de um feltro (não tecido)**

No primeiro estágio da formação da torta de filtração, denominada filtração de profundidade ou interna, as partículas de pó penetram no filtro virgem. Algumas partículas atravessam pelas mangas. Outras são coletadas pelas fibras na superfície do meio filtrante ou pelas fibras internas. Quando as partículas atravessam o meio filtrante a eficiência de coleta diminui devido à grande parcela de partículas que passam pelas aberturas do tecido (RODRIGUES, 2006; THEODORE, 2008; WALSH, 1996; SEVILLE, 1997).

Esse estágio só ocorre na superfície limpa do meio filtrante ou após a limpeza do filtro, até que uma carga de pó estabelecida seja completamente retida ou acumulada na superfície do tecido de feltro. Assim, a intensidade de penetração das partículas tende a diminuir em função do tempo de filtração e a eficiência de coleta das partículas tende a aumentar. Consequentemente, a queda de pressão no meio filtrante aumenta proporcionalmente ao número de partículas coletadas, o período a ser coletada até a saturação do meio filtrante depende das características do tecido, sendo maior para o tecido virgem e vão diminuindo com os ciclos subsequentes (RODRIGUES, 2006; THEODORE, 2008; WALSH, 1996; ROCHA et al., 2010).

### **3.1.1.2 Etapa de transição no feltro**

A etapa de transição ocorre à medida que a filtração acontece assim, mais material particulado vai se acumulando e depositando, não somente nas fibras da superfície, mas também nas partículas já capturadas. O acúmulo de pó vai aumentando formando os dendritos. Estes dendritos são estruturas formadas pela aglomeração de partículas no interior do meio filtrante, que passa atuar como novos elementos coletores que progressivamente projetam sobre e dentro dos poros das interfibras criando subporos com área e volumes reduzidos. A probabilidade de capturar partículas mais finas aumenta, bem como aumenta a eficiência de coleta. Eventualmente, os poros do meio filtrante são preenchidos e uma “torta” é formada sobre a superfície do tecido. Durante este período, a taxa de crescimento da queda de pressão é não-linear. Essa vai se tornando linear gradualmente à medida que a torta de filtração vai sendo formada (SEVILLE, 1997).

A formação da torta é o momento de transição entre filtração superficial e de profundidade, que pode ser entendida como a capacidade de coleta do filtro fibroso,

conhecido por ponto de colmatação ou por ponto de entupimento do meio filtrante (WALSH,1996).

### **3.1.1.3 Filtração superficial do feltro**

Após a formação da torta tem-se a última etapa, denominada de filtração superficial, e que devido à saturação do “não tecido”, passa atuar apenas como suporte para a torta. Esta torta vai agora desempenhar o principal papel como coletor de partículas, sendo possível a captura das partículas mais finas presentes na corrente de gás (OLIVEIRA, 2015).

Ao longo da filtração a espessura da torta aumenta. A taxa de crescimento da queda de pressão se torna constante. Nesta etapa, o mecanismo preponderante de filtração é agora a própria torta em que a eficiência de filtração aumenta ao seu nível máximo, e a queda de pressão também aumenta até alcançar o ponto em que a limpeza do meio filtrante seja necessária (SEVILLE, 1997).

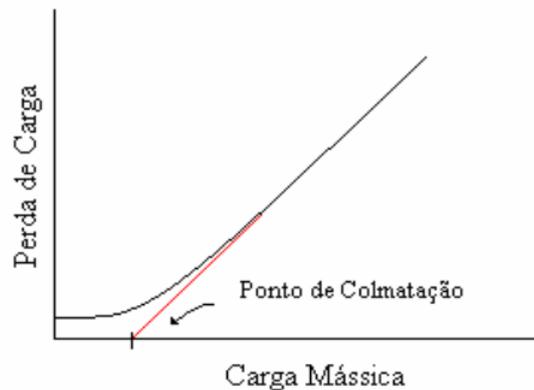
## **3.2 Ponto de colmatação**

A previsão do momento exato de formação da torta é difícil de se obter fisicamente porque os tecidos não são materiais uniformes. Alguns autores reconhecem que o início da formação da torta de filtração é demarcado através de um valor experimental linear, que estabelece um ponto denominado de ponto de colmatação (WASH,1996). O ponto de colmatação é dado pelo lugar geométrico obtido pelo gráfico de queda de pressão em função carga mássica correspondente ao cruzamento da assíntota da curva com o eixo das abcissas, como representado pela Figura 2. A colmatação pode ser mais rápida quanto menores forem as partículas envolvidas (WALSH et al, 1996) e quanto mais densamente empacotados forem os meios filtrantes utilizados (WASH, 1996), uma vez que há espaços menores disponíveis entre as fibras para a deposição das partículas.

O crescimento mais acelerado dos dendritos, que antecedem a formação da torta, foi verificado para os casos em que a captura das partículas se davam predominantemente pelo mecanismo de difusão , sendo este crescimento mais moderado quando a captura das partículas ocorria na faixa de coleta por impactação

direta e mais lento quando a coleta das partículas acontecia no regime inercial (KANAOKA e HIRAGI, 1990).

Figura 2 - Determinação do ponto de colmatação



Fonte: WALSH,1996

### 3.3 Mecanismos de captura das partículas

Há cinco mecanismos básicos no qual uma partícula pode ser depositada em uma fibra: intercepção, impactação inercial, difusão Browniana, atração gravitacional e atração eletrostática (HINDS, 1982). Os três principais são impactação inercial, intercepção e difusão. Os efeitos secundários de coleta derivam da atração eletrostática entre as fibras e o material particulado e entre as partículas individualmente. Em geral, as frações grosseiras do material particulado são capturadas predominantemente por impactação inercial e intercepção, partículas iguais ou menores que  $1\ \mu\text{m}$  são capturadas por difusão, enquanto que menos que  $5\ \mu\text{m}$  podem ser influenciadas por forças eletrostáticas (SEVILLE, 1997).

Intercepção ocorre quando a partícula segue a linha de fluxo do gás a qual tem como distância da fibra o equivalente a um raio da partícula. A partícula atinge a fibra e é capturada devido ao seu tamanho limitado. Dependendo do tamanho da partícula há certas linhas de fluxo que resultarão em captura e outras não. Por pura intercepção é assumido que as partículas seguem as linhas de fluxo perfeitamente, desprezando a inércia ou o movimento Browniano (HINDS, 1982).

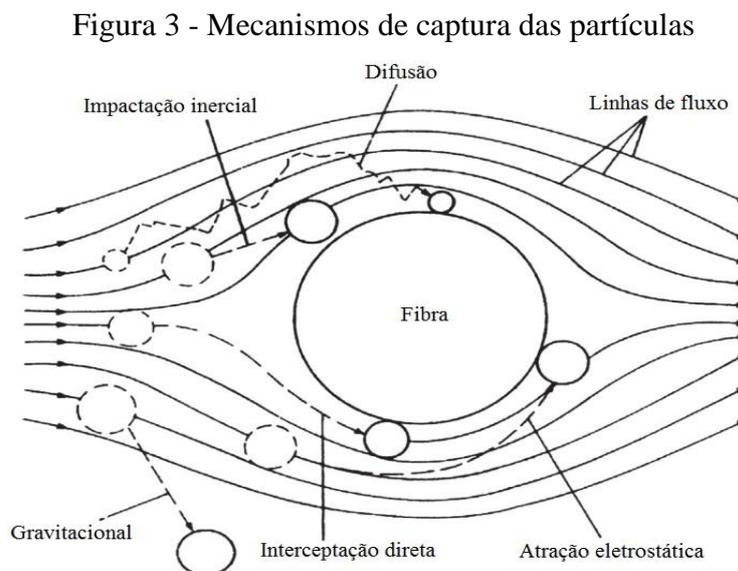
A impactação inercial da partícula na fibra ocorre quando a partícula, por causa da inércia, é incapaz de seguir rápido o bastante a mudança das linhas de fluxo na vizinhança da fibra, cruzando-as e atingindo a fibra (HINDS, 1982).

O movimento Browniano de partículas pequenas é suficiente para aumentar consideravelmente a probabilidade de atingir a fibra enquanto “viaja” em uma linha de fluxo não-interceptora (HINDS, 1982).

O mecanismo gravitacional é decorrente do efeito da gravidade sobre a partícula, causando um desvio da sua trajetória normal, devido à influência da gravidade, favorecendo o contato com o coletor. Por isso, a eficiência de coleta por ação deste mecanismo depende da direção do fluxo, uma vez que, quando o sentido é de cima para baixo, maior é a eficiência. Assim, as partículas maiores que 30  $\mu\text{m}$  estão mais sujeitas a sofrerem esse desvio da trajetória normal (HINDS, 1998). Este mecanismo é dominante para baixas velocidades do gás (COURY, 1983).

Atração eletrostática pode ser extremamente importante, mas é difícil de quantificar porque requer o conhecimento das cargas na partícula e nas fibras. É geralmente desprezível a não ser que as partículas e fibras tenham sido carregadas de algum modo quantificável. Aumentando o carregamento nas partículas ou nas fibras eleva-se a eficiência de coleta. As partículas carregadas serão atraídas para as fibras com cargas opostas (HINDS, 1982).

A Figura 3 mostra todos os mecanismos de captura das partículas por uma fibra.



Fonte: Adaptado de Donovan (1985)

Expressões para o cálculo da eficiência dos diversos mecanismos acima descritos podem ser encontrados na literatura (Donovan, 1985; Seville, 1997 e Hinds, 1998) e, apesar de bastante úteis para o entendimento do fenômeno, são limitadas quanto à aplicabilidade. Consideram apenas a interação fibra-partícula e, portanto, só são válidas para os estágios iniciais do processo.

No caso de filtro de feltro, a eficiência de coleta é normalmente alta (maior que 99% para partículas de  $1\mu\text{m}$ ), satisfazendo na maioria dos casos os limites de tolerância estabelecidos oficialmente. Tal é o caso dos meios filtrantes utilizados nesse estudo, razão pela qual as expressões para os mecanismos de coleta não serão aqui detalhadas.

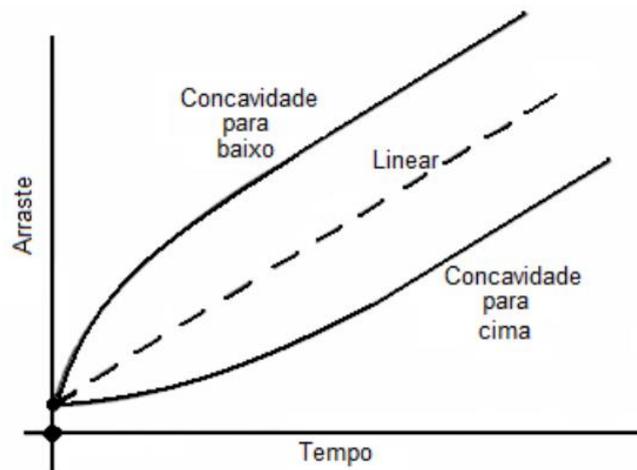
### **3.4 Curvas de Filtração**

A curva de filtração pode assumir três comportamentos distintos: côncava para baixo, côncava para cima e linear, como pode ser observado na Figura 4. No entanto, esses comportamentos são assumidos somente para o primeiro ciclo de filtração. Após a regeneração do filtro, o comportamento da curva pode mudar substancialmente, dependendo do comportamento da limpeza, ou seja, se o filtro foi limpo completamente ou não (TIENI, 2005).

O comportamento linear da curva é observado quando a filtração se dá apenas superficialmente estritamente uniforme em série com o tecido, ou seja, a não penetração de pó no tecido. A queda de pressão no filtro aumenta linearmente com a massa de material particulado coletada. A curva com concavidade para baixo é a mais comum, indica um ciclo de filtração com um rápido aumento na queda de pressão, o que significa uma rápida formação da torta de filtração, sendo que a deposição das partículas ocorre inicialmente no interior do meio filtrante. A curva com concavidade para cima representa um ciclo de filtração quando a torta já foi formada e removida parcialmente conhecido como o fenômeno de Patchy Cleaning, indicando um período maior da etapa da filtração de profundidade (DENNIS et al., 1981; DONOVAN, 1985).

O aumento da espessura da torta resulta em um aumento da queda de pressão no sistema, tornando necessária à limpeza periódica do filtro para remover a mesma e manter a queda de pressão em níveis adequados de operação (TANABE, 2008).

Figura 4 - Curvas de queda de pressão inicial durante a filtração



Fonte: Leith a Allen, 1986

### 3.5 Ciclos de Filtração

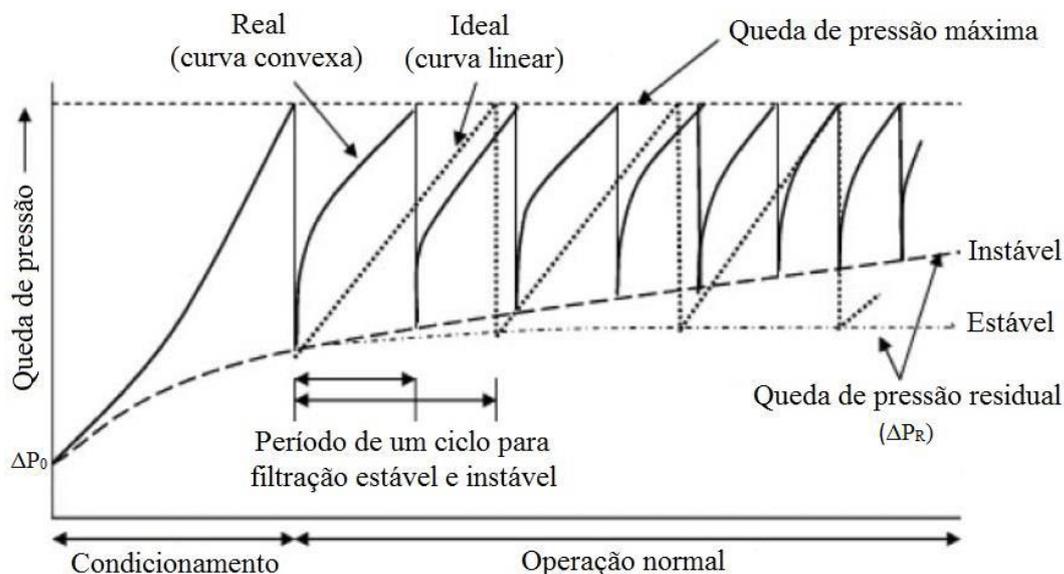
Quando a queda de pressão atingir um valor pré-estabelecido, de acordo com as condições operacionais e econômicas, o meio filtrante é limpo, pela remoção da torta de pó, diminuindo a massa de pó coletada. O tempo gasto na filtração mais o da limpeza é definido como sendo um ciclo de filtração.

Ao atingir um valor de queda de pressão pré-estabelecido, ou um tempo fixo de filtração, é necessário a remoção da camada de partículas formada do ponto de vista econômico e operacional. O período entre dois ciclos de limpeza é chamado de ciclo de filtração (Norma VDI 3926, 2003).

No comportamento ideal de funcionamento de um filtro, a queda de pressão é função linear do tempo de filtração, ou seja, o tempo de filtração é o mesmo para todos os ciclos. Na teoria este comportamento mostra que a remoção é uniforme com fluxos de volumes e de concentrações de pó constantes, o que não se observa na prática e no interior do meio filtrante após a limpeza, causam um aumento na queda de pressão residual, diminuindo então o tempo de filtração dos ciclos seguintes (VDI 3926, 2003).

No comportamento real dos ciclos de filtração, o tempo de filtração reduz muito em comparação com o tempo observado no comportamento ideal e as curvas de filtração não possuem o comportamento linear nos primeiros ciclos. Isto se deve à compressão da torta de pó formada resultando no menor tempo de filtração (VDI 3926, 2003). Isso pode ser observado na Figura 5.

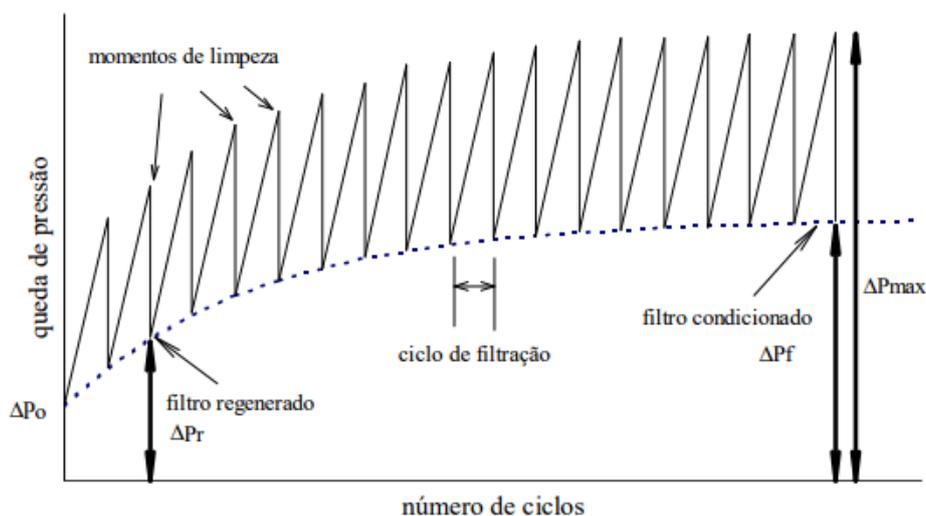
Figura 5 - Ciclos de filtração ideal e real



Fonte: Carvalho, 2018 (Adaptado de Mukhopadhyay, 2009)

Na filtração ideal a torta é removida completamente pela limpeza, logo a queda de pressão total cresce linearmente e  $\Delta P_R$  permanece constante (sistema estável). Mas na prática é comum ocorrer o fenômeno chamado limpeza por blocos (*patchy cleaning*), no qual parte da torta é removida e parte continua aderida à manga. Dessa forma, a queda de pressão residual não se estabiliza, e a curva da queda de pressão total adquire um formato convexo. Ainda nesta figura, nota-se que o primeiro ciclo de filtração exibe uma curva côncava da queda de pressão, característica da filtração de profundidade (*deep filtration*) (MUKHOPADHYAY, 2009).

Figura 6 - Ciclos de filtração



Fonte: INNOCENTINI, 1997

Durante a operação da filtração, devido à regeneração incompleta do filtro, a curva de filtração muda de comportamento após a primeira regeneração. Cada vez que a torta de filtração é removida da superfície do filtro, a camada residual sofre um rearranjo causado pelo pulso de ar de limpeza. O condicionamento do filtro é o termo usado para designar a tendência à estabilização da permeabilidade do filtro com as alterações na estrutura da camada residual. A maioria das partículas é expelida, outras são apenas deslocadas e algumas comprimidas dentro da estrutura porosa. A complexidade é ainda maior se o processo de filtração ocorrer em temperaturas elevadas. Nesse caso, as forças de adesão e coesão podem ser aumentadas, à medida que se aproxima a temperatura de fusão da partícula (softening). A predominância de um mecanismo ou de outro determina a estabilidade ou não da camada residual. Uma camada residual estável é aquela que não apresenta alterações em sua estrutura após um certo número de ciclos de filtração e limpeza. A estabilização é verificada pela constância com o tempo da queda de pressão de regeneração ( $\Delta P_{re}$ ) (SILVA, 2008).

### 3.6 Parâmetros de Filtração

A formação da torta também é influenciada por fatores como a velocidade de filtração, os limites da queda de pressão, permeabilidade e porosidade (SALEEM et al., 2012).

#### 3.6.1 Queda de pressão

Durante a filtração, a carga de material particulado no tecido aumenta e este se torna menos permeável. A diferença na pressão estática antes e depois do filtro é chamada de queda de pressão ( $\Delta P$ ) e é normalmente expressa em pascal ou milímetros de coluna d'água (mmca) (SEVILLE, 1997).

A queda de pressão total ( $\Delta P_T$ ) pode ser definida pela somatória das pressões segundo a equação:

$$\Delta P_T = \Delta P_M + \Delta P_C \quad (1)$$

em que  $\Delta P_M$  é a queda de pressão no meio filtrante;  $\Delta P_C$  é a queda de pressão da torta de filtração.

A faixa de operação, para queda de pressão, da maioria dos filtros coletores está entre 5 e 25 centímetros de coluna de água, porque essa mostrou ser a melhor faixa para operação do ponto de vista econômico, já que quedas de pressões mais altas requerem equipamentos mais potentes e caros, com alto consumo de energia (CAVASSENO, 1980).

A queda de pressão em um filtro aumenta durante o processo devido à coleta de partículas e formação da torta de filtração (TOGNETTI, 2007). Enquanto o valor de  $\Delta P$  aumenta, a energia absorvida pelo soprador se eleva, já que o fluxo de vazão volumétrica não diminui ao mesmo tempo. Consequentemente, torna-se necessário limpar as mangas a fim de diminuir a resistência ao fluxo. A limpeza ocorre quando atinge uma queda de pressão máxima no filtro (SEVILLE, 1997).

Quando se inicia um novo ciclo de filtração, a queda de pressão através do filtro se encontra em um valor bem abaixo daquele imediatamente anterior à limpeza, mas ligeiramente superior ao valor inicial, correspondente ao filtro limpo e virgem. A essa nova queda de pressão registrada logo após a limpeza dá-se o nome de residual. Como justificado anteriormente, isso se deve ao fato de, por mais eficiente que seja a limpeza, algumas partículas não são removidas, permanecendo nos interstícios do tecido (WILDER e BILLINGS, 1970b).

O aumento da queda de pressão residual ocorre em função da deposição das partículas no elemento coletor, devido à diferença de pressão verificada através dos sensores diferenciais de pressão da unidade experimental (SUH *et al.* 2011). Após vários ciclos este valor tende a se estabilizar, porque o tecido fica saturado de pó. O tempo de saturação do tecido depende do tipo do material do filtro, do tamanho das partículas do tempo e do tipo de remoção da torta (CALLÉ *et al.*, 2002).

### **3.6.2 Velocidade de Filtração**

A velocidade do gás na interface do meio filtrante é chamada de velocidade de filtração. É definida como a taxa de fluxo por unidade de área do tecido. Determina a área total de tecido necessária para limpeza do fluxo volumétrico de gás. Apresenta influência significativa nos custos iniciais do equipamento, de manutenção e de energia. Para a maioria das aplicações, utiliza-se entre 0,3 e 3,7 m/min (SEVILLE, 1997).

A velocidade de filtração depende das características do material particulado, da distribuição do tamanho das partículas, da concentração de entrada do material particulado, da temperatura do gás, do método de limpeza do filtro e do tipo de tecido (TIENI, 2005). Vários parâmetros da filtração são influenciados pela velocidade, assim como a queda de pressão do filtro, a compactação da torta de filtração e a porosidade da torta de filtração. Com o aumento da velocidade de filtração, a queda de pressão no filtro e a compactação da torta aumentam e a porosidade da torta diminui (AZEVEDO, 2009).

Altos valores de velocidade de filtração levam a redução no tempo de filtração, alta penetração das partículas no tecido, aumento da potência requerida pelo soprador, o que acarreta no aumento do custo do processo. Também pode dificultar a remoção da torta, ocasionando uma maior queda de pressão residual,  $\Delta P_R$ , e diminuindo a vida útil do tecido. Entretanto, uma alta velocidade de filtração requer menor área de filtração, diminuindo os custos iniciais. Já para baixos valores de velocidade de filtração, tem-se também um maior consumo de energia, porque o tempo de retenção das partículas é maior, mas as partículas ficam menos aderidas às fibras do tecido, favorecendo o processo de limpeza e o tempo de vida útil do tecido (IINOYA e DENNIS, 1987; DONAVAN, 1985; BARROS, 2010).

### **3.6.3 Permeabilidade**

A permeabilidade é um parâmetro que representa a resistência encontrada pelo fluido ao atravessar um meio filtrante. É importante destacar que este parâmetro não leva em conta apenas as características do fluido, mas considera a completa interação entre o fluido e o meio filtrante (BARROS, 2014). A passagem do fluido provoca uma perda de energia, que é refletida na forma de queda de pressão ao longo do meio poroso (INNOCENTINI, 1997, MIGUEL, 2003).

A permeabilidade é controlada pela estrutura do poro criado pela interseção entre fibras e fios. Quando novo, o meio filtrante contém poros significativamente maiores em tamanho do que as partículas. Inicialmente o gás flui predominantemente através dos poros grandes, que oferecem menor resistência ao fluxo (SEVILLE, 1997).

Idealmente, o filtro deveria remover o máximo de impurezas com a mínima resistência ao fluido de arraste. Isso pode ocorrer aumentando o volume de vazios na estrutura (porosidade) ou o tamanho da passagem do fluido (poro). Nas aplicações de filtração, baixas permeabilidades implicam em baixas taxas de filtração, o que não é economicamente vantajoso para o processo. No entanto, estrutura com baixa permeabilidade pode ser requerida como prevenção à penetração de agentes indesejáveis que deterioram o material (INNOCENTINI et al, 1999).

No entanto, a permeabilidade do meio filtrante também corresponde à relação de movimentação dos gases pela operação de limpeza e da estrutura do meio filtrante, visto que, grandes poros no meio filtrante beneficiam a permeabilidade, apesar de reduzir a eficiência de coleta das partículas. O decréscimo do diâmetro dos poros diminui a permeabilidade, contudo, aumenta a retenção de partículas e a queda de pressão no meio filtrante (MÜLLER, 2008; SALVINI et al., 2000). Por isso, a permeabilidade do meio filtrante é um parâmetro importante para o melhor desempenho dos filtros de mangas, porque o desgaste das mangas depende deste parâmetro (TANABE et al., 2011).

A permeabilidade de tecidos de filtração é bastante reduzida pelo depósito de pó residual. Isto leva a uma pequena relação entre a permeabilidade do tecido limpo e a do tecido usado. O objetivo ao confeccionar um filtro é mantê-lo altamente permeável, tanto limpo quanto impregnado de pó, considerando mínima, ou nenhuma quantidade de pó (BUONICORE e DAVIS, 1992).

Para avaliar o escoamento de fluidos em meios porosos são usadas duas equações a de Darcy (2) e de Forchheimer (3).

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 à aplicação de baixas velocidades de filtração (MIGUEL, 2003).

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

em que  $\Delta P$  é a queda de pressão,  $L$  representa a espessura do meio filtrante,  $\mu$  a viscosidade do fluido,  $V_s$  a velocidade superficial do gás e  $k_1$  é a constante de permeabilidade.

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 Forchheimer para caracterizar o sistema. A equação de Forchheimer (3) é empregada para avaliar o escoamento de fluidos em meios porosos, relacionando os valores de queda de pressão com a velocidade superficial (MIGUEL, 2003):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} V_s + \frac{\rho g}{k_2} V_s^2 \quad (3)$$

em que  $L$  representa a espessura do meio filtrante,  $\mu$  a viscosidade do fluido,  $\rho g$  a densidade do gás,  $V_s$  a velocidade superficial do gás,  $k_1$  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 (TANABE, 2011).

Comercialmente, a permeabilidade é normalmente informada como sendo a vazão volumétrica que atravessa uma área útil do meio filtrante e que resulta em determinada queda de pressão nesse filtro. Como por exemplo, pode ter as seguintes unidades:  $(\text{m}^3/\text{min})/\text{m}^2$  para 125Pa ou  $(\text{L}/\text{min})/\text{dm}^2$  para 20mmH<sub>2</sub>O (CARVALHO, 2018).

### 3.6.4 Porosidade

A porosidade é um importante parâmetro estrutural do meio filtrante. Esse parâmetro define a relação de espaços vazios, poros, do meio filtrante. Quanto mais poroso o filtro, maior será a vazão conseguida e mais longa será a vida útil do tecido (SILVA NETO, 2002).

O aumento da queda de pressão se deve pela redução da porosidade do meio filtrante. Consequentemente aumenta-se a energia necessária pelo processo de filtração/limpeza e diminui-se a resistência do tecido (AZEVEDO, 2009).

A porosidade do meio filtrante geralmente é dada pelo fabricante, mas pode ser estimada por correlações existentes na literatura. A Equação de Ergun (1952) pode ser utilizada na determinação da porosidade dos meios filtrantes pelo método indireto, desde que sejam conhecidas a vazão mássica de partículas e dados de queda de pressão por tempo (FARGNOLI, 2010). Muito aplicada para leitos granulares com porosidade

entre 0,1 e 0,75 e para partículas com diâmetros entre 102 e 104  $\mu\text{m}$  e número de Reynolds de partículas maiores que a unidade. Além disso, para partículas muito pequenas (1 a 10  $\mu\text{m}$ ) e número de Reynolds da ordem de  $10^{-2}$ , a equação também pode ser utilizada (SILVA NETO, 2002; RODRIGUES, 2006):

$$\frac{\Delta P}{L_T} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu V_f}{d_p^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_g V_f^2}{d_p} \quad (4)$$

Sendo  $\varepsilon$  a porosidade,  $V_f$  a velocidade de filtração,  $d_p$  o diâmetro médio de Sauter da partícula,  $L_T$  a espessura da torta,  $\rho_g$  a densidade do gás e  $\mu$  a sua viscosidade. O primeiro e o segundo termo representam as contribuições inerciais e viscosas, respectivamente.

### 3.6 Filtro de mangas

O filtro de mangas é um equipamento que compõe um sistema de ventilação local exaustora cuja função é de separar as partículas contidas no gás exaurido. O gás escoar através de uma série de mangas filtrantes, de modo que as partículas são retidas pelo tecido, que funciona também como suporte para a camada de partículas que se deposita sobre ele (COOPER e ALLEY, 2011).

Os filtros de mangas possuem eficiência de coleta extremamente alta em partículas grosseiras e finas. Podem ser projetados para coletar partículas na faixa submicrométrica com 99,9% de eficiência de controle. É bastante versátil, pois pode manipular grandes variedades de poeiras que diferem em propriedades físicas e químicas. É bem-sucedida mesmo sob temperaturas muito altas e sob diferentes condições químicas. O desempenho do filtro de tecido não é afetado negativamente pela alteração do parâmetro de entrada. Além disso, a corrosão não é um problema, não há riscos de alta tensão e apresenta operação simples (AGUIAR; COURY, 1996; HÖFLINGER, 1998).

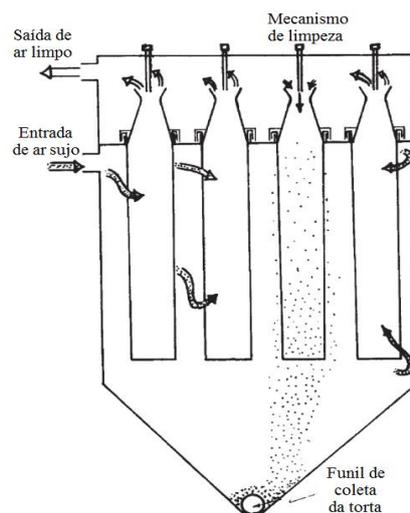
Entretanto, possui algumas desvantagens como: baixos limites de temperatura para meios filtrantes padrão; tem a tendência para a queda de pressão aumentar ao longo da vida da manga; caso houver atrito entre as mangas provavelmente ocorrerá abrasão; temperaturas elevadas de gás com gases ácidos ou alcalinos ou partículas podem reduzir a vida útil do filtro e requisitos de manutenção relativamente elevados. É necessário que

se opere a seco pois a umidade dentro do filtro atrapalha a filtração, sendo recomendada uma umidade abaixo de 50% (STEFFENS e COURY, 2007; HAJRA et al., 2003; VOTORANTIM, 2014).

### 3.6.1 Funcionamento

O filtro de mangas é composto por um conjunto de filtros feitos de materiais naturais ou sintéticos, denominados mangas, como ilustrado na Figura 7. O ar sujo que entra é filtrado nas mangas. As partículas ficam retidas no meio filtrante e o ar sai limpo para a atmosfera. Em um certo período definido ou quando uma queda de pressão máxima no filtro é atingida, ocorre a limpeza das mangas e a torta removida acumula-se na parte inferior da estrutura, onde é recolhida (CARVALHO, 2018).

Figura 7 - Funcionamento básico de um filtro de mangas



Fonte: Adaptado de Wang, Williford e Chen (2004)

### 3.6.2 Sistema de limpeza

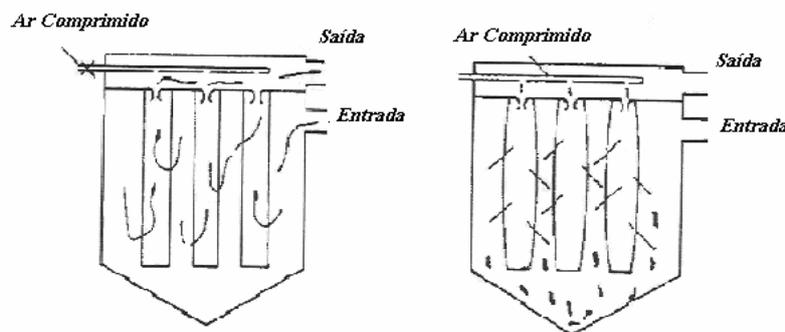
Os métodos de limpeza precisam prover energia suficiente para quebrar as forças de ligação adesivas entre a fibra e a torta ou a força coesiva dentro da estrutura da torta. O método selecionado é influenciado pelas propriedades do material particulado. Podem ser de vários tipos, como vibração mecânica, fluxo reverso ou pulso de ar reverso. Fluxo de gás ou ar reverso em baixas pressões proporcionam a flexão do tecido de forma mais branda para a limpeza (SEVILLE, 1997).

A filtração de gases utilizando a técnica de limpeza do meio filtrante por pulso de ar reverso é considerada um dos mais promissores recursos no controle de particulados e na recuperação de materiais em diversos setores industriais nos últimos anos, visto que, ocorre em processo contínuo por regeneração do filtro em tempo real, mantendo a eficiência de coleta (PARK et al., 2012; LEE ET AL., 2015; SIMON et al., 2014).

Como o nome implica, o sistema de pulso de ar reverso usa o pulso curto de ar comprimido de um reservatório com pressão aproximada de 7 bar. O pulso é dado em sentido oposto ao fluxo de gás principal e dura no máximo 300 ms conforme ilustra a Figura 8. O pulso é geralmente liberado por tubos de jato que estão diretamente acima das filas de mangas. O jato à alta pressão injeta gás na parte superior das mangas inflando-as repentinamente, causando a liberação da torta (SEVILLE, 1997).

Filtros com o sistema de pulso de ar reverso tem a vantagem que as mangas podem ser limpas *online* e frequentemente. Isso permite alta eficiência logo após a limpeza de modo que a alimentação de alta concentração de pó é factível (SEVILLE, 1997). É um processo de filtração no qual a torta forma na superfície externa das mangas (SCHMIDT, 1990).

Figura 8 - Sistema de limpeza por ar pulsado



Fonte: Tognetti, 2007

Esta técnica permite que a relação gás /pano seja mantida na faixa de 4 a 8  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{min}$ , tornando os sistemas mais compactos, as mangas podem ser limpas sem interrupção do processo, com maior eficiência de remoção, resultando em um menor consumo de ar comprimido (LORA, 2002). Em contrapartida, a vigorosa limpeza pode danificar o tecido diminuindo o tempo de vida útil, caso o mesmo não seja apropriado (BUONICORE e DAVIS, 1992).

A quantidade de operações de filtração com as mesmas mangas filtrantes irá depender dos diferenciais de pressão medidos nas mangas. Assim, a eficiência de limpeza pode ser relacionada à queda de pressão residual (LEE et al., 2015).

A eficiência da limpeza depende da maneira como ocorre a deposição das partículas na superfície do filtro e de como foi aplicado o pulso de ar, sua pressão de pulso de limpeza e o seu tempo de duração. Pressões de pulsos mais elevadas proporcionam o aumento da eficiência de limpeza. Por outro lado, pressões muito altas durante a limpeza podem danificar o meio filtrante (BERBNER e PILZ, 1996; CHI et al., 2008).

A eficiência de limpeza por pulso de ar reverso ( $\eta_L$ ), pode ser determinada por meio da queda de pressão no meio filtrante ( $\Delta P_M$ ), da queda de pressão residual ( $\Delta P_R$ ) e da queda de pressão inicial ( $\Delta P_i$ ), representada pela equação (LEE et al., 2015):

$$\eta_L = \frac{\Delta P_M - \Delta P_R}{\Delta P_M - \Delta P_i} \times 100 \quad (5)$$

### 3.7 Meios filtrantes

Os meios filtrantes podem ser constituídos de fibras sintéticas, de fibras naturais e de fibras artificiais. Como fibras sintéticas podem-se citar o poliéster, o polipropileno, o acrílico, o polietileno e a poliamida. Como fibras naturais têm-se o algodão, a lã, o cetim, a celulose, as metálicas (níquel-cromo e césio-cromo), as cerâmicas, entre outras. Como fibras artificiais incluem-se a viscose, o vidro, o silicone e o acetato (CIRQUEIRA, 2013).

Atualmente, as fibras sintéticas estão sendo mais utilizadas que as fibras naturais. As vantagens desse tipo de fibra são menores custos, maior resistência química e mecânica, conseqüentemente maior vida útil, e menor diâmetro das fibras, apesar de possuírem preço mais elevado do que as fibras naturais (MARTINS, 2001; SITAPE, 2013). Além de preencher menos os poros do filtro essas fibras oferecem menos resistência no processo de remoção das partículas aderidas e, por isso, tem obtido maior utilização no mercado de filtros de separação gás sólido (CHOI, 2008). Entre as fibras sintéticas mais utilizadas podem-se citar as formadas por acetatos, acrílicos, poliamidas, poliésteres, polipropileno, entre outros (MARTINS, 2001).

Os tecidos podem receber diversos tipos de tratamento, visando proteger o meio filtrante da abrasão, do ataque químico, da penetração de partículas, das altas temperaturas, entre outros problemas. Que garantem diferenças quanto à permeabilidade, a eficiência de coleta, a queda de pressão, a vida útil, além das condições de descolamento da torta no processo de limpeza. Estes devem conciliar principalmente a redução da queda de pressão, o aumento da eficiência de coleta para partículas ultrafinas, a redução dos ciclos de filtração e o aumento da vida útil da manga, que podem reduzir os custos de operação (TURNER et al., 1998).

Encontrar o meio filtrante adequado para cada processo não é uma simples tarefa, porque eles dependem das propriedades de cada material, da compatibilidade dos meios filtrantes com o material particulado a ser filtrado, das características física (espessura, formato tamanho) e química das fibras, velocidade de filtração, temperatura, umidade, entre outros. O meio filtrante é um elemento crítico para o melhor desempenho do filtro (BARNETT, 2000).

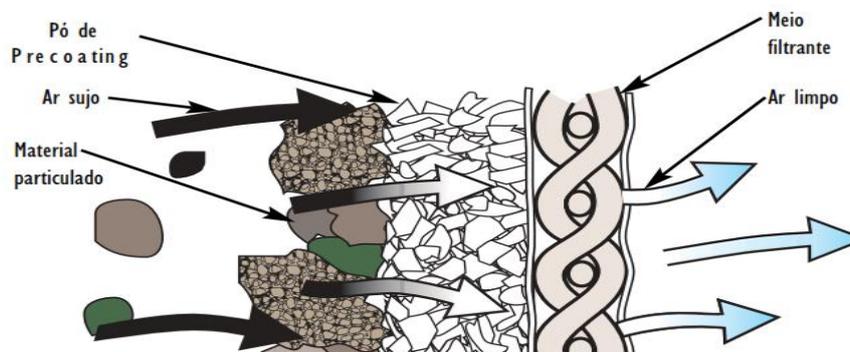
A filtração de superfície elimina a necessidade da formação da torta inicialmente. Esse tipo de filtração não era possível até o desenvolvimento de meios filtrantes com membrana de PTFE (BARNETT, 2000). Meios filtrantes com membrana de PTFE são eficientes do momento da instalação e não necessitam da formação inicial da torta para filtrar efetivamente o particulado. A membrana pode ser aplicada sobre qualquer tecido fornecendo uma superfície não aderente, propiciando melhor desprendimento da torta, alta eficiência de filtração (acima de 99,99%), para particulado fino, e alta permeabilidade, também reduz a aglomeração de particulado e melhora o fluxo de ar com baixo consumo de energia (BARNETT, 2000).

Meios filtrantes com membrana de PTFE possuem menor necessidade de limpeza, assim, a manutenção também é reduzida e as mangas possuem maior vida útil. Reduzir o número de limpezas num sistema de pulso de ar reverso, reduz a necessidade de ar comprimido resultando na redução de custos (BARNETT, 2000). Porém os meios filtrantes com acabamento de PTFE apresentam custo muito elevado em comparação com outros meios filtrantes como o poliéster.

### 3.9 Precoating

Um pré-tratamento utilizado para os meios filtrantes virgens é o precoating, que consiste em recobrir o interior e a superfície de filtros (não tecido) com material particulado, conforme ilustrado na Figura 9. É recomendado quando o material particulado contém quantidade significativa em massa de partículas submicrométricas, que podem atravessar o filtro, principalmente durante o primeiro ciclo de filtração. Este pré-tratamento não é necessário para meios filtrantes com membrana de PTFE, que já possuem alta eficiência de coleta de partículas ultrafinas e vêm como uma alternativa à membrana (RAVERT, 2005).

Figura 9 - Meio filtrante submetido a precoating



Fonte: CARVALHO, 2018 (Adaptado de Ravert, 2005)

O objetivo do precoating é auxiliar a separação do material particulado filtrado e prevenir o entupimento do meio filtrante, garantindo que o gás escoe livremente através do meio filtrante, melhorando a performance e aumentando a vida útil do filtro (SCHMIDT, 1990; SCHILLER, 2015; RAVERT, 2005). Ele é responsável pela formação da torta inicialmente, garantindo a filtração de superfície e, conseqüentemente, melhorando a eficiência de coleta inicial. Filtros com precoating são fáceis de limpar e propiciam melhor liberação da torta (RAVERT, 2005).

A escolha do precoat deve levar em consideração a compatibilidade com o material particulado a ser filtrado e a distribuição de tamanho de partícula. Se o material é muito grosseiro, pode formar uma deposição indesejada entre o alimentador e a câmara do filtro, ou na própria câmara do filtro. Quando o precoat é muito fino, a dispersão na corrente de gás pode ser difícil, além de impedir a formação de um revestimento leve, facilmente removível e permeável. Quanto menores forem as

partículas, maior será a necessidade do precoating (RAVERT, 2005; SCHMIDT; LÖFFLER, 1990a).

Segundo Schiller (2014), as partículas do pó de precoat devem ser grandes o bastante para não saturar o meio filtrante, mas ter alta permeabilidade e boa capacidade de deposição. Além disso, o meio filtrante deve ter baixa queda de pressão e alta eficiência de coleta para o pó de precoat.

É importante que a distribuição do pó de precoat na câmara e nas mangas seja uniforme. Controlar a espessura do precoating pode ser muito difícil devido a inacessibilidade das mangas. Então assume-se que a diferenças de espessura da camada de precoating é a menor possível como resultado de um fluxo homogêneo (SCHMIDT; LÖFFLER, 1990b).

A combinação ótima do filtro e o pó de precoat deve exibir alta eficiência de coleta para material particulado fino e baixa queda de pressão para garantir longos ciclos de filtração (SCHILLER, 2014). Ravert (2005) menciona em suas pesquisas que mangas com precoating são mais fáceis de limpar e promovem melhor remoção da torta.

### 3.9.1 Eficiência do precoating

Segundo Schiller (2016), a eficiência do precoating é a taxa da quantidade do pó de precoat utilizada para separar uma quantidade definida de pó fino do fluxo de gás. Sob a presunção que 100% das partículas são separadas, a quantidade de material particulado fino  $m_{pf}$  pode ser calculado medindo o fluxo de gás ( $Q$ ) e a concentração de massa de partícula no fluxo de gás ( $c_{fd}$ ), tem-se que:

$$M_{fd} = c_{fd} \cdot Q \cdot t \cdot \eta \quad (6)$$

Sabendo a quantidade de precoat e de material particulado fino, a eficiência do precoat após o primeiro ciclo,  $PE_1$ , pode ser calculada pela equação.

$$PE_1 = \frac{m_{FD}}{M_{FP}} \quad (7)$$

em que  $m_{FP}$  é a massa de precoat injetado.

### 3.10 Estado da Arte sobre Precoating

A maior parte dos estudos da literatura sobre filtro de mangas é referente à influência de parâmetros (como o material particulado, meio filtrante, velocidade de filtração, umidade, temperatura do gás, sistema de limpeza, etc) no desempenho da filtração e de fatores como a queda de pressão, eficiência de coleta e de limpeza, penetração, desgaste das fibras, queda de pressão residual, quantidade de ciclos e vida útil. Poucos são os estudos sobre precoating, principalmente em condições de operação industrial.

Ravert (2005) avalia o precoating para melhorar o fluxo de ar no meio filtrante e a influência na vida útil, além de determinar a metodologia do precoating em filtros de manga. Schmidt *et al.* (1990) avalia as forças de adesão e coesão no precoating em filtros com sistema de limpeza por pulso de ar reverso. Schiller; Schmid (2014) avaliou as melhores combinações entre onze meios filtrantes e três pós precoat na filtração de partículas ultrafinas de queima de pellets.

Schiller *et al.* (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.

Schiller *et al.* (2016) comparou 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. E Höflinger (1991) explanou de maneira geral o uso do precoating na filtração de gases e suspensões.

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo explorar ainda mais o precoatando simulando condições operacionais de uma siderúrgica. Avaliando a necessidade do precoatando e comparando a eficiência de coleta obtida com o precoatando e o uso de meios filtrantes com membrana de PTFE. Além de analisar o pó para o precoatando e o meio filtrante que apresentem melhor eficiência de coleta durante o processo de filtração.

#### **4.11 Norma VDI e parâmetros operacionais**

Tanto os valores obtidos com os comuns métodos de verificação para filtros de mangas quanto também os dados técnicos dos meios filtrantes fornecidos pelos fabricantes são insuficientes para uma previsão do comportamento na operação, especialmente a longo prazo. Isso resulta na demanda de métodos aperfeiçoados para caracterização e avaliação de materiais de filtros purificadores (Norma VDI 3926).

A VDI 3926 na versão original é um importante passo no melhoramento da caracterização e classificação de filtros. Isso é possível pela avaliação comparativa em um teste padrão baseado nos resultados de testes de longos prazos incluindo a filtração e o processo de limpeza. Através desse teste é possível testar quase todas as características dos meios filtrantes (GÄNG, 2009).

A norma estabelece três modelos de filtros laboratoriais que devem ser usados para a realização dos testes e suas condições operacionais, além de fundamentar todas as variáveis envolvidas e os comportamentos possíveis ao longo das filtrações (GÄNG, 2009).

Entre a sequências de testes da VDI 3926, tem-se a fase chamada de condicionamento que consiste na realização de trinta ciclos de filtração com queda de pressão limite de limpeza de 100 mmH<sub>2</sub>O, utilizando como método de limpeza o pulso de ar reverso (GÄNG, 2009).

Para realização do teste padrão, a norma estabelece uma velocidade de filtração de 2 m/min com uma tolerância de  $\pm 3\%$ , a concentração de material particulado próximo ao filtro de 5 g/m<sup>3</sup>  $\pm 10\%$ , a utilização do material particulado padrão Plural NF, o excesso de pressão no tanque de ar comprimido de 0,5 Mpa  $\pm 3\%$  e o tempo do pulso de limpeza de 60 ms (GÄNG, 2009).

## 4. 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 e dos meios filtrantes. Seguido dos experimentos de filtração no filtro de tecido, em escala de laboratório, de ensaios teste de precoating e de obtenção de eficiência de coleta para partículas micro e nanométricas, ciclos de filtração com e sem precoating e análise de penetração das partículas.

### 4.1 Caracterização dos Materiais Particulados

O material particulado utilizado nas filtrações neste trabalho foi cedido por uma indústria siderúrgica e foi coletado nas 12 câmaras do filtro de mangas do despoejamento secundário da aciaria, totalizando, portanto, 12 amostras. Em cada amostra foram retiradas 3 subamostras. Com o intuito de obter uma amostra que represente o material particulado que entra no filtro de mangas, foram coletados 1700g de cada uma das 12 amostras, as quais foram misturadas formando uma amostra única de 20400g, a qual foi utilizada nos testes de filtração (CARVALHO, 2018).

Os materiais particulados utilizados como precoating estão dispostos na Tabela 1. A cal hidratada foi escolhida pois é utilizada no precoating do filtro de mangas da etapa da aciaria na indústria siderúrgica em questão. O calcário dolomítico foi escolhido por apresentar características similares à cal hidratada e estava disponível no laboratório.

A caracterização do material particulado proveniente da aciaria está descrita no trabalho de Carvalho (2018). A caracterização dos materiais particulados no precoating seguiu o mesmo procedimento realizado por Carvalho (2018) e está descrito a seguir.

Tabela 1 - Materiais particulados para precoating

| Materiais Particulados para precoating |                         |
|--|-------------------------|
| Cal hidratada                          | Calcário dolomítico     |
| Cal hidratada 10%                      | Calcário dolomítico 10% |
| Cal hidratada 30%                      | Calcário dolomítico 30% |
| Cal hidratada 50%                      | Calcário dolomítico 50% |

Foram feitas misturas de pó de aciaria com cal hidratada e pó de aciaria com calcário dolomítico, variando os pós do precoating em 10, 30 e 50% em massa. Além de utilizar cal hidratada e calcário dolomítico sem mistura.

No Laboratório de Controle Ambiental – AP 4 fez-se as análises de massa específica por picnometria a hélio no equipamento AccuPyc 1330 Micrometrics, sendo o valor da massa específica obtida pela média de três análises. Os valores de massa específica obtidos estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Massa Específica

| Material Particulado | Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------------------|---------------------------------------|
| Cal hidratada        | 2,7742 ± 0,0014                       |
| Calcário Dolomítico  | 2,8222 ± 0,0010                       |
| Pó aciaria           | 3,4179 ± 0,0043                       |
| Cal 10%              | 2,9092 ± 0,0022                       |
| Cal 30%              | 2,8355 ± 0,0024                       |
| Cal 50%              | 2,8492 ± 0,0037                       |
| Calcário 10%         | 2,8851 ± 0,0029                       |
| Calcário 30%         | 2,8654 ± 0,0035                       |
| Calcário 50%         | 2,8671 ± 0,0031                       |

A curva de distribuição granulométrica e os valores dos diâmetros mediano volumétrico dos materiais particulados utilizados neste estudo foram determinados pelo equipamento Malvern Mastersizer Microplus, a partir da média de três medidas que estão listadas nas Tabelas 3, 4 e 5. Os dados do pó de aciaria foram obtidos por Carvalho (2018).

Tabela 3 – Distribuição volumétrica dos materiais particulados

| Distribuição | Cal hidratada | Calcário Dolomítico | Pó de aciaria  |
|--------------|---------------|---------------------|----------------|
| D (v, 0,1)   | 0,42 ± 0,005  | 0,49 ± 0,04         | 0,38 ± 0,01    |
| D (v, 0,5)   | 22,16 ± 11,62 | 27,9 ± 0,81         | 19,5 ± 0,13    |
| D (v, 0,9)   | 99,15 ± 41,50 | 128,27 ± 5,16       | 117,52 ± 18,93 |

Tabela 4 - Distribuição volumétrica mistura mássica cal

| Distribuição | Cal 10%      | Cal 30%      | Cal 50%      |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| D (v, 0,1)   | 1,07 ± 0,19  | 0,30 ± 0     | 0,42 ± 0,01  |
| D (v, 0,5)   | 27,68 ± 0,07 | 9,31 ± 0,11  | 21,32 ± 0,54 |
| D (v, 0,9)   | 76,88 ± 1,93 | 51,24 ± 0,85 | 96,54 ± 5,39 |

Tabela 5 - Distribuição volumétrica mistura mássica calcário

| Distribuição | Calcário 10% | Calcário 30% | Calcário 50% |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| D (v, 0,1)   | 0,37 ± 0     | 0,34 ± 0     | 0,37 ± 0     |
| D (v, 0,5)   | 18,07 ± 0,72 | 17,71 ± 0,47 | 16,80 ± 0,20 |
| D (v, 0,9)   | 92,01 ± 5,03 | 73,42 ± 2,82 | 64,12 ± 1,8  |

Os gráficos apresentados nas Figuras 10 e 11 mostra a distribuição granulométrica em função do diâmetro volumétrico da cal hidratada e do calcário dolomítico, nesta ordem.

Figura 10 - Distribuição granulométrica em volume da cal hidratada

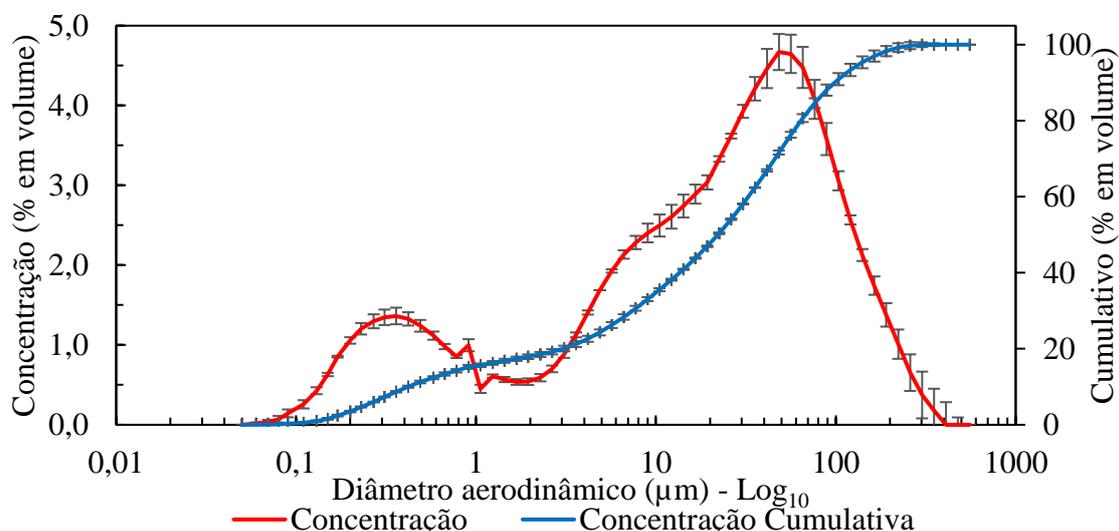
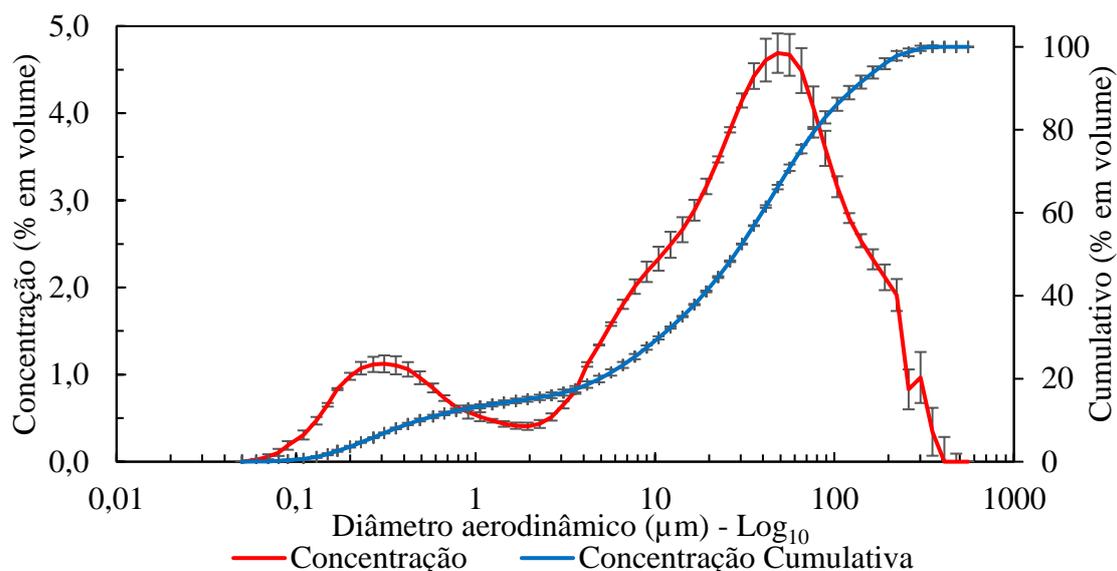


Figura 11 - Distribuição granulométrica em volume do calcário dolomítico



Através das figuras, é possível observar que tanto a cal como o calcário dolomítico são materiais particulados polidispersos. Tanto a cal virgem quanto o calcário dolomítico variam de 0,05 à 555,7  $\mu\text{m}$ .

A distribuição granulométrica e o valor do diâmetro aerodinâmico médio das amostras também foram determinados através do equipamento Aerodynamic Particle Sizer (APS) 3320, da TSI, pelo valor médio da triplicata e estão listados na Tabela 6. Os gráficos da Figura 12 e 13 exibem a distribuição granulométrica em função do diâmetro aerodinâmico da cal hidratada e do calcário dolomítico, respectivamente.

Tabela 6 – Diâmetro aerodinâmico médio

| Material Particulado | Diâmetro aerodinâmico médio ( $\mu\text{m}$ ) |
|----------------------|---|
| Cal hidratada        | 3,22  |
| Calcário Dolomítico  | 3,04  |
| Cal 10%              | 12,3  |
| Cal 30%              | 0,685   |
| Cal 50%              | 13,7  |
| Calcário 10%         | 2,74  |
| Calcário 30%         | 13,9  |
| Calcário 50%         | 13,4  |

Figura 12 - Distribuição granulométrica aerodinâmica (em massa) da cal hidratada

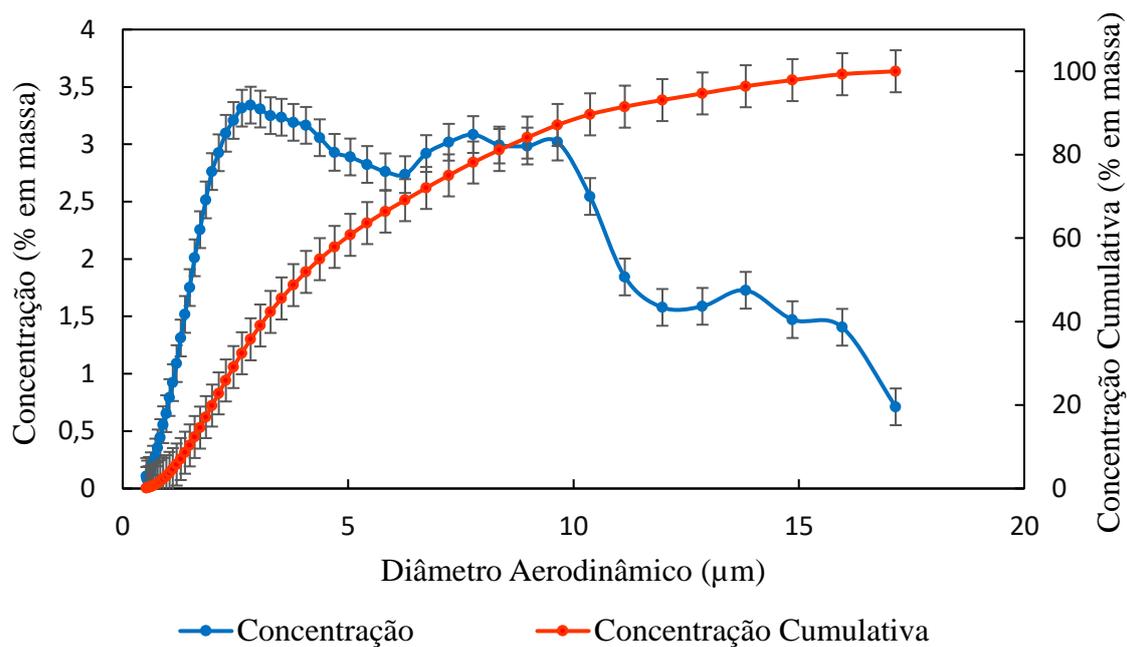
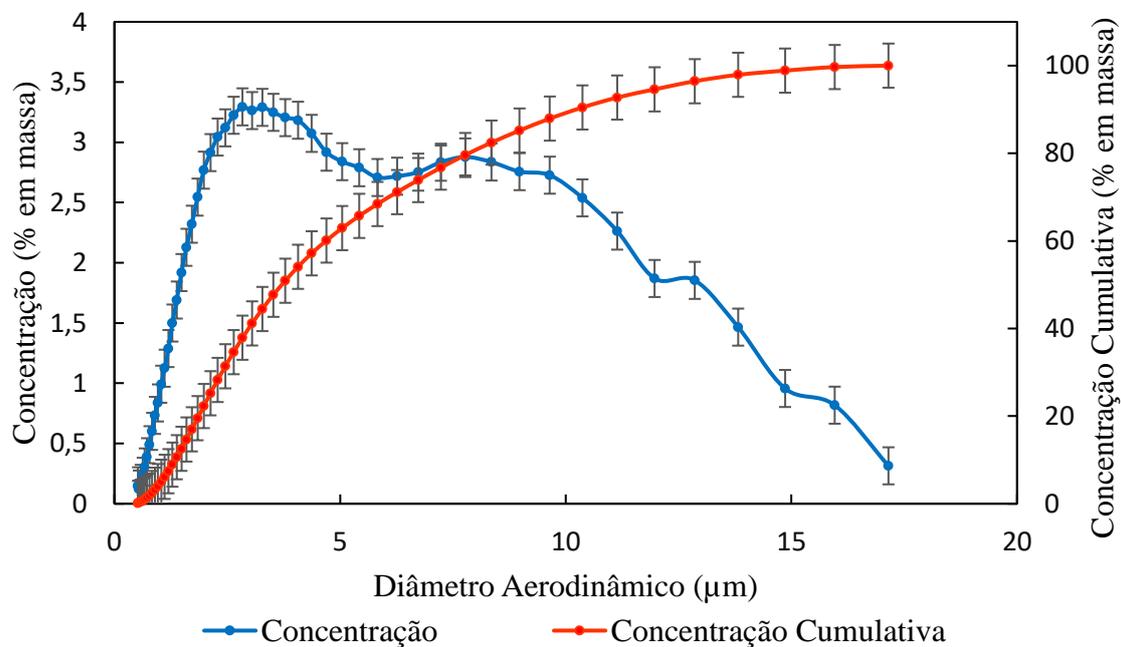


Figura 13 - - Distribuição granulométrica aerodinâmica (em massa) do calcário dolomítico



Através da curva cumulativa em massa da Figura 12 tem-se que a cal hidratada possui diâmetro aerodinâmico mediano de  $4,068 \pm 0,28 \mu\text{m}$ , sendo 50% das partículas

menores que esse valor. Aproximadamente 89,7% são menores que PM 10, 29,1% menores que PM 2,5 e 3,74%, menores que PM 1.

Para o calcário dolomítico, tem diâmetro aerodinâmico mediano de  $3,786 \pm 0,26$   $\mu\text{m}$ , sendo 90,5% das partículas menores que PM 10, 31,4% menores que PM 2,5 e 1,04% menores que PM 1.

Fez-se uma avaliação de composição química por fluorescência de raio X (XRF) e imagens pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) dos precoat no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) ambos no DEMa.

A Tabela 7 apresenta a composição química principal dos materiais particulado e suas porcentagens em massa.

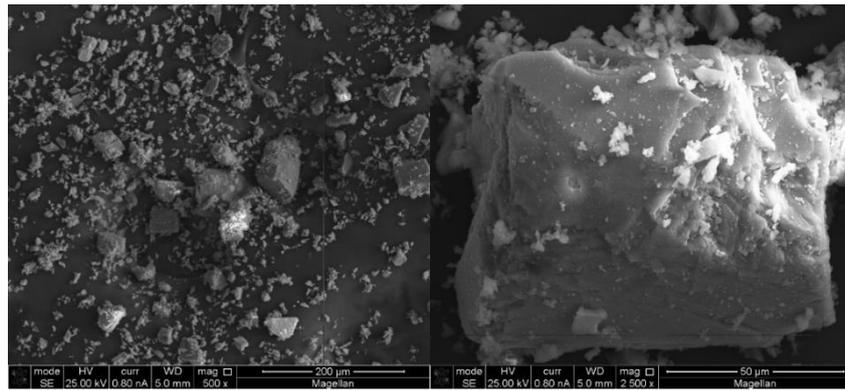
Tabela 7 - Composição Química

| Cal hidratada    |            | Calcário Dolomítico |            |
|------------------|------------|---------------------|------------|
| Composto químico | % em massa | Composto químico    | % em massa |
| Ca               | 89,89      | Ca                  | 76,98      |
| Mg               | 6,46       | Mg                  | 13,66      |
| Si               | 2,46       | Si                  | 3,06       |
| Fe               | 0,43       | Fe                  | 2,58       |
| Al               | 0,3        | Al                  | 1,84       |

Os pós têm composição química similares.

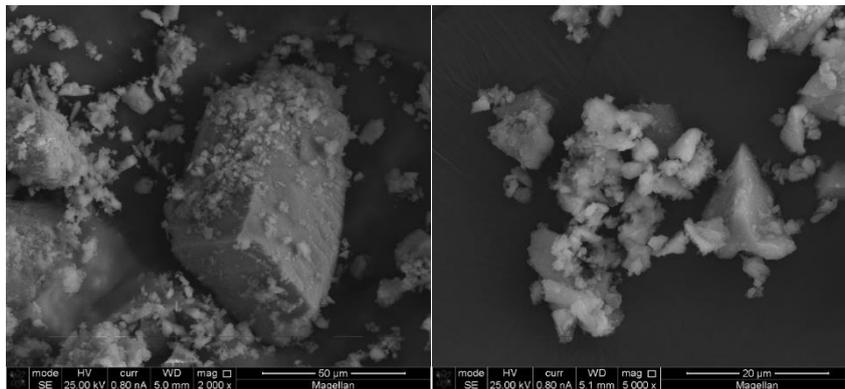
As imagens dos materiais particulados obtidas no MEV estão ilustradas nas Figuras 14, (a), (b), (c) e (d), que são imagens da cal hidratada e (e), (f), (g) e (h), que são imagens do calcário dolomítico.

Figura 14 - Imagens dos materiais particulados no MEV



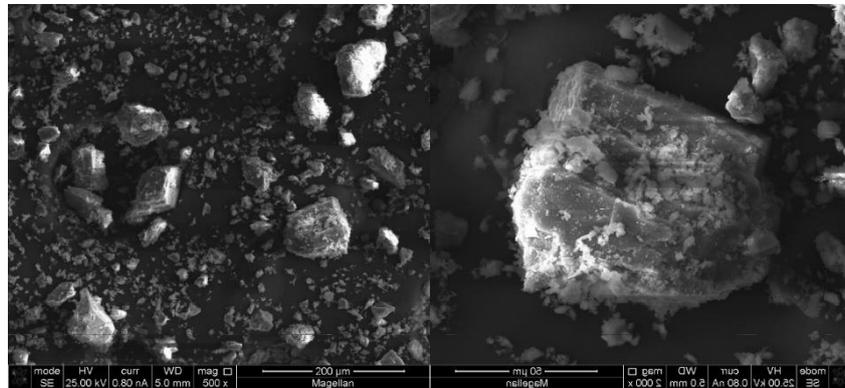
(a)

(b)



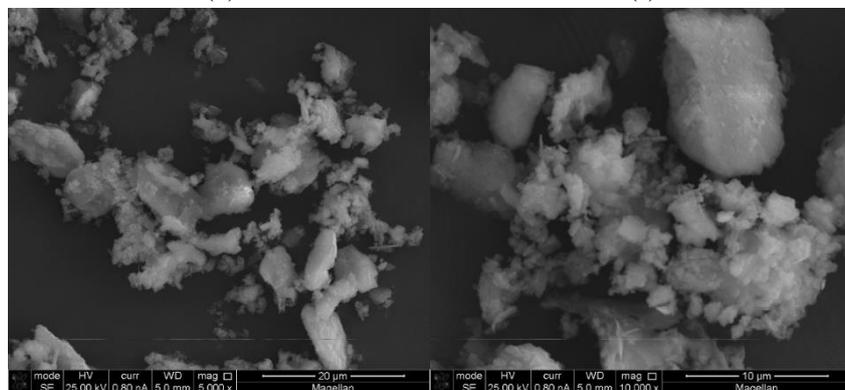
(c)

(d)



(e)

(f)



(g)

(h)

A caracterização completa do pó de aciaria pode ser vista no trabalho de Carvalho (2018).

#### 4.2 Caracterização dos meios filtrantes virgens

Neste trabalho foram utilizados filtros de poliéster com gramatura de 540 e 550 g/cm<sup>2</sup> (PE 540 e 550), poliéster com membrana de PTFE de 550 g/cm<sup>2</sup>, poliéster com encapsulamento de PTFE (PE P) de 540 e 600 g/cm<sup>2</sup>.

Para caracterizar os meios filtrantes obteve-se imagens da superfície e da seção transversal utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), do Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE). As imagens dos meios filtrantes se dispõem nas Figuras 15 à 19, onde a primeira imagem é uma vista superficial ampla do tecido e a segunda, uma imagem de maior ampliação das fibras para cada uma das figuras.

Figura 15 - Imagens do PE 540 no MEV

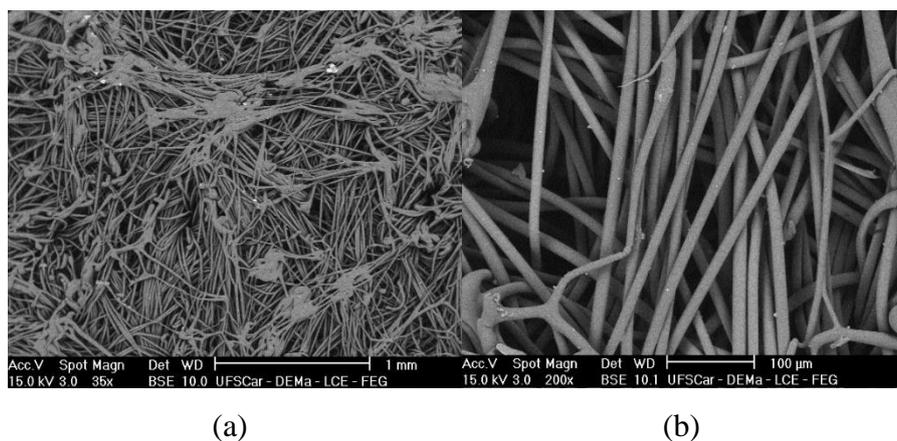


Figura 16 – Imagens do PE 550 no MEV

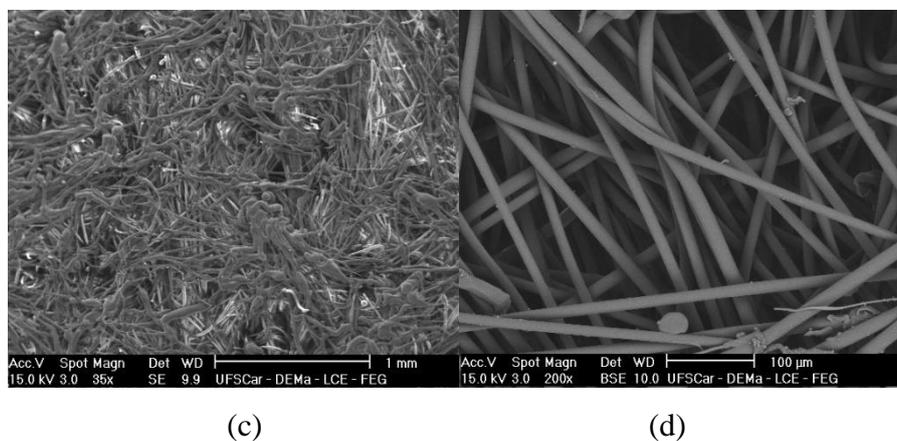
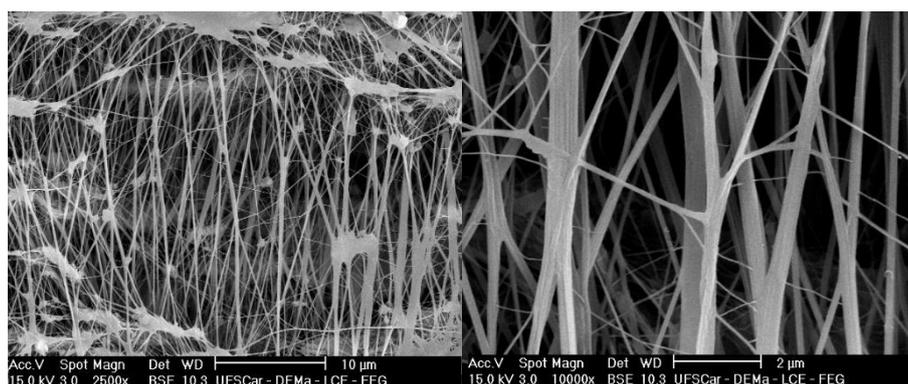


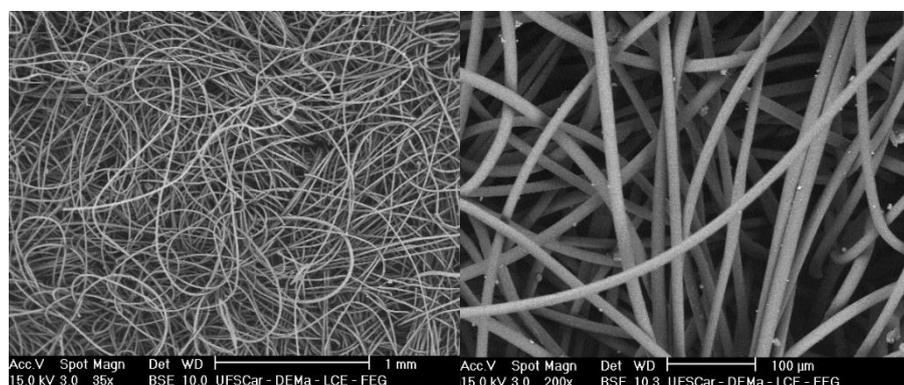
Figura 17 – Imagens do PE + PTFE no MEV



(e)

(f)

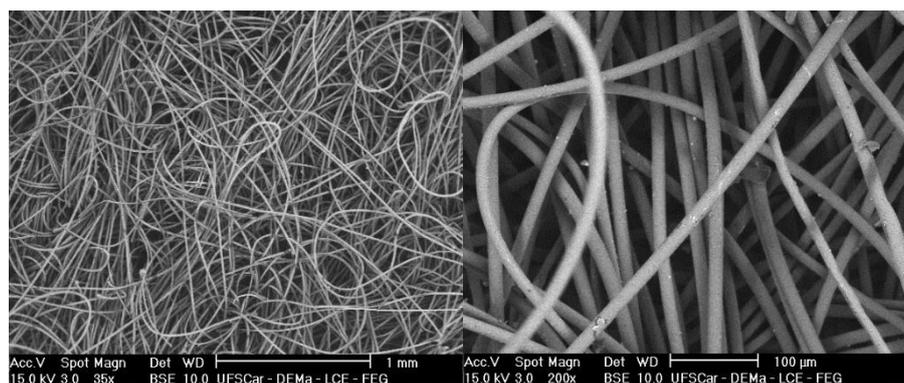
Figura 18 – Imagens do PE P 540 no MEV



(g)

(h)

Figura 19 – Imagens do PE P 600 no MEV



(i)

(j)

O diâmetro das fibras e a distância entre as fibras foram analisados pelo software Image Pro Plus. Inicialmente, calibrou-se e analisou-se as imagens obtidas no MEV com o auxílio da ferramenta do programa *Spatial Calibration*, de acordo com a escala fornecida por cada imagem, conforme o método de Bortolassi, Guerra e Aguiar (2017)

ilustrado na Figura 20. Sendo assim, calculou-se as médias dos diâmetros das fibras de cada amostra analisada. Os dados estão apresentados na Tabela 8.

Figura 20 - Esquema de contagem das fibras

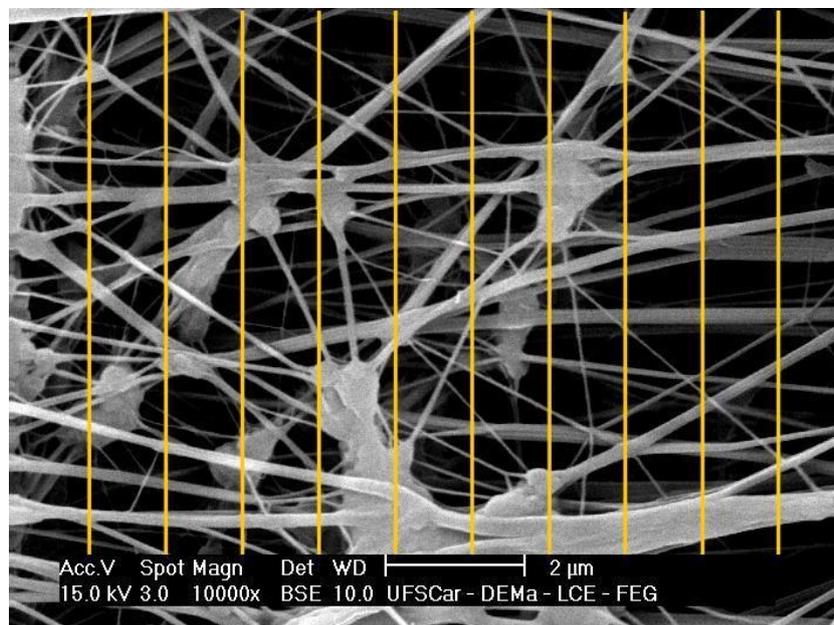


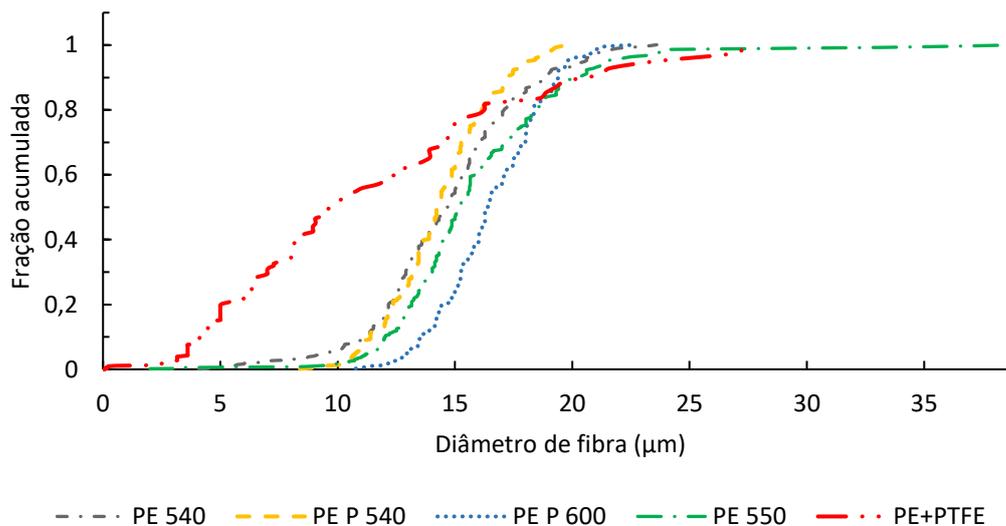
Tabela 8 - Diâmetros médios das fibras

| Meio Filtrante | Diâmetro médio das fibras ( $\mu\text{m}$ ) |
|----------------|---|
| PE 540         | $13,8 \pm 3,5$                              |
| PE 550         | $14,9 \pm 3,9$                              |
| PE + PTFE      | $5,10 \pm 5,7$                              |
| PE P 540       | $13,9 \pm 2,2$                              |
| PE P 600       | $16,2 \pm 2,2$                              |

Observa-se na Tabela 8 que o meio filtrante (MF) de PE P 600 apresentou fibras com maior diâmetro médio de superfície que os demais. O poliéster com membrana de PTFE tem uma fibra com menor diâmetro que os demais meios filtrantes conforme esperado. O diâmetro de superfície médio para MF PE P 540 foi  $0,1 \mu\text{m}$  maior que o MF PE 540, provavelmente devido ao encapsulamento de Teflon. Se formos considerar o erro, eles apresentaram praticamente o mesmo tamanho.

A distribuição de diâmetros das fibras dos tecidos em função da fração acumulada esta apresentada na Figura 21. Observa-se nessa figura que os meios filtrantes sem a membrana apresentaram distribuição muito mais uniforme do que o MF de poliéster com membrana de PTFE. Verifica-se também que para os meios filtrantes com gramatura de 540 g/cm<sup>2</sup>, a faixa de erro se manteve constante.

Figura 21 - Distribuição de diâmetros das fibras



Observa-se na Figura 21 que com exceção do meio filtrante de membrana de PTFE, os filtros possuem a maioria das fibras com diâmetro entre 10 e 25 µm. O MF PE 540 apresentou diâmetros entre 4 a 23,6 µm, sendo mais de 80% estão na faixa de 10 a 20 µm. O MF PE 550 apresentou uma faixa de diâmetros entre 2 e 38,6 µm, sendo mais de 88% entre 10 e 20 µm. O MF PE + PTFE, tem entre 0,03 e 27 µm, sendo mais de 80% das fibras menores que 10 µm. Enquanto o MF PE P 540, foi de 8 a 20 µm, sendo que 60% encontram na faixa de 10 a 15 µm. Por último, MF PE P 600 variou de 10 a 22 µm, onde mais de 60% das fibras têm diâmetros entre 15 e 20 µm.

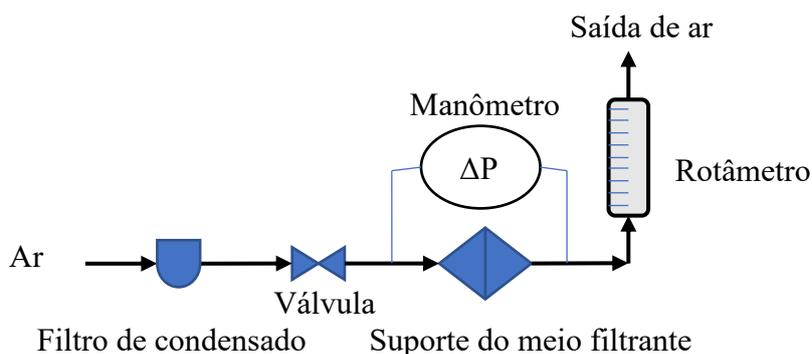
#### 4.2.1 Permeabilidade e porosidade

Fez-se a permeabilidade dos meios filtrantes na unidade experimental da Figura 22. Colocou-se a amostra do filtro no suporte de filtração e variou-se a vazão de ar limpo através dos meios filtrantes. A cada velocidade de filtração avaliada aferiu-se a queda de pressão no filtro registrada por um manômetro digital. Fez-se o procedimento em triplicata para cada amostra de meio filtrante com 59,12 cm<sup>2</sup> de área útil até a vazão

de 65 L/min e verificando os valores de vazão para 125 e 196 Pa. Os valores foram comparados com os fornecidos pelo fabricante.

A permeabilidade foi calculada pela equação 3 e foram determinados o coeficiente de permeabilidade darciana ( $K_1$ ) e a constante não-darciana ( $K_2$ ). A Tabela 9 mostra os valores de permeabilidade obtidos.

Figura 22 - Unidade experimental para determinar a permeabilidade



Fonte: CARVALHO (2018)

Tabela 9 – Permeabilidade dos meios filtrantes

| Meio Filtrante | Permeabilidade ( $\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^2$ ) |                             |                             |                             |
|----------------|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                | Experimental  |                             | Fabricante                  |                             |
|                | $\Delta P = 125 \text{ Pa}$                           | $\Delta P = 196 \text{ Pa}$ | $\Delta P = 125 \text{ Pa}$ | $\Delta P = 196 \text{ Pa}$ |
| PE 540         | 10,6  |                             | 9,1 – 12,2                  | -                           |
| PE 550         | 21,8  | 33,39                       |                             | 15                          |
| PE + PTFE 550  | 3,8   | 4,93                        | -                           | 4,5                         |
| PE P 540       | 10,2  |                             | 9,1 – 12,2                  | -                           |
| PE P 600       | 12  |                             | 9,1 – 13,7                  | -                           |

Todos os meios filtrantes apresentaram os valores de permeabilidade obtidos experimentalmente dentro da faixa ou próximo aos fornecidos pelos fabricantes, exceto o PE 550 foi muito superior ao fornecido. A constantes de permeabilidade estão dispostas na Tabela 10.

Comparando-se os valores das constantes de permeabilidade da Tabela 10 com os obtidos por Carvalho (2018), percebe-se que  $K_1$  apresentou valores aproximados, enquanto  $K_2$  teve uma maior disparidade. Carvalho (2018) obteve  $K_1 = 51,143 \times 10^{-12}$

$m^2$  e  $K_2 = 169,94 \times 10^{-7} m$  para o PE 550 e  $K_1 = 8,246 \times 10^{-12} m^2$  e  $K_2 = 7,749 \times 10^{-7} m$  para PE+PTFE.

Tabela 10 – Valores das constantes de permeabilidade K1 e K2

| Meio Filtrante | $K_1 \times 10^{-12} (m^2)$ | $K_2 \times 10^{-7} (m)$ |
|----------------|-----------------------------|--------------------------|
| PE 540         | $54,379 \pm 0,30$           | $315,67 \pm 78,0$        |
| PE 550         | $57,410 \pm 0,85$           | $237,85 \pm 53,64$       |
| PE + PTFE 550  | $10,945 \pm 1,54$           | $22,53 \pm 7,70$         |
| PE P 540       | $53,011 \pm 0,53$           | $231,47 \pm 38,0$        |
| PE P 600       | $80,530 \pm 2,15$           | $304,84 \pm 34,0$        |

Na Tabela 11 é possível observar os valores de porosidade calculados através da equação 4.

Tabela 11 – Porosidade dos meios filtrantes.

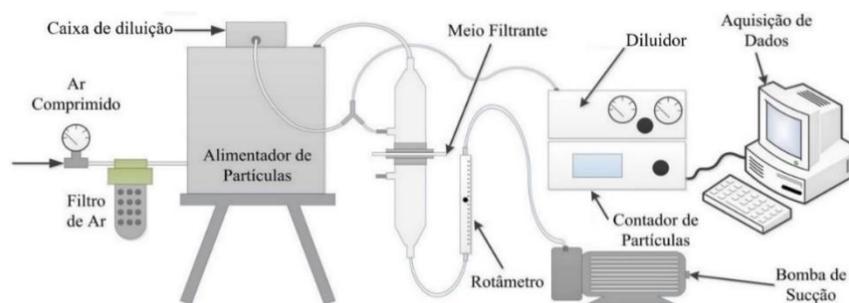
| Meio Filtrante | Porosidade         |
|----------------|--------------------|
| PE 540         | $0,874 \pm 0,0005$ |
| PE 550         | $0,883 \pm 0,0026$ |
| PE + PTFE 550  | $0,999 \pm 0,0013$ |
| PE P 540       | $0,856 \pm 0,0015$ |
| PE P 600       | $0,876 \pm 0,0016$ |

Observa-se que a porosidade do meio filtrante de poliéster com membrana de PTFE foi maior que os de poliéster sem a membrana. Isto já era esperado, uma vez que as fibras de PTFE possuem diâmetros menores que as de poliéster, como indicado pela Tabela 8, e menor permeabilidade e, conseqüentemente, maior porosidade.

### 4.3 Eficiência para micropartículas

Para determinar a eficiência do meio filtrante para partículas menores que 10 micrômetros, utilizou-se o aparato experimental apresentado na Figura 23, através da unidade experimental que era composta por: um gerador de aerossol modelo 3433, um diluidor de aerossol 3302 e um espectrômetro Aerodynamic Particle Sizer (APS) modelo 3320 da TSI e uma bomba de vácuo segundo esquema da Figura 22.

Figura 23 - Unidade experimental de filtração com contador de partículas



(Fonte: Cirqueira, 2017)

Inicialmente, alimentou-se o material particulado, proveniente do processo de aciaria, com ar comprimido até o sistema de filtração (meio filtrante e rotâmetro). Coletou-se amostragens isocinéticas antes e após o meio filtrante, seguiu-se para um diluidor e, em sequência, para um contador de partículas. A caixa de diluição tem um filtro HEPA para filtrar o ar ambiente succionado.

Para calibrar o fluxo de ar coletado, colocou-se um rotâmetro no ponto da coleta da amostra e estrangulou-se a mangueira da caixa de diluição até obter a vazão desejada no rotâmetro. Eliminou-se o ar limpo por uma bomba de sucção. Os dados foram coletados em um computador.

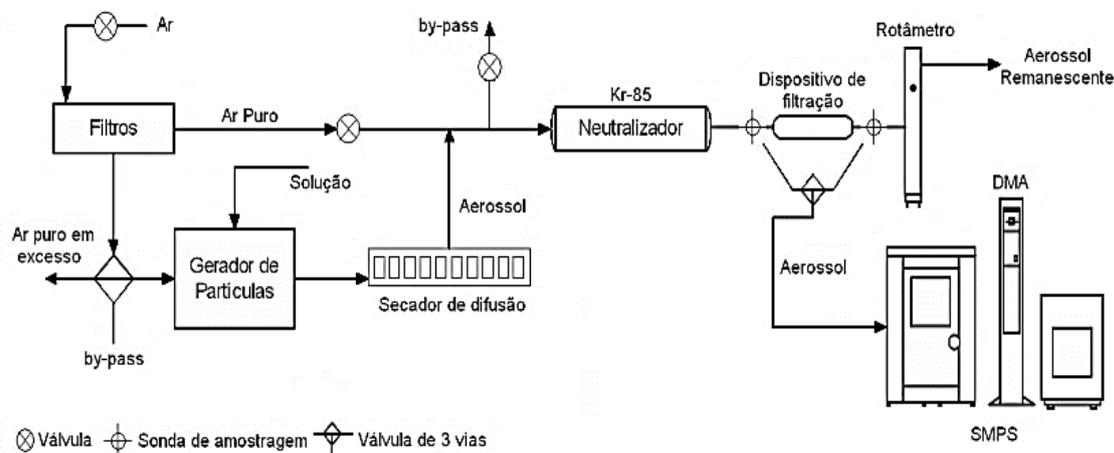
Os meios filtrantes possuíam área útil de filtração de  $17,57 \text{ cm}^2$  (diâmetro de  $4,73 \text{ cm}$ ). Operou-se com uma relação ar-pano de  $2 \text{ m/min}$ , que era a mesma operada pelo VDI, esse valor foi padronizado para todos os ensaios de filtração.

Foram utilizados os meios filtrantes PE 540, PE 550, PE+PTFE 550, PE P 540 e PE P 600.

#### 4.4 Eficiência para nanopartículas

Para determinada a eficiência de coleta de nanopartículas na faixa de  $6$  a  $300 \text{ nm}$  de diâmetro aerodinâmico, os meios filtrantes (PE 540, PE 550, PE+PTFE 550, PE P 540 e PE P 600) foram submetidos a ensaios de filtração na unidade experimental ilustrada na Figura 24.

Figura 24 – Unidade experimental de nanopartículas



Fonte: Carvalho (2018)

Seguindo o procedimento de Carvalho (2018), uma solução com concentração de 1g/L de NaCl foi adicionada em um gerador de partículas modelo 3079 da TSI, o qual produziu aerossol na vazão de 200 ml/h. O aerossol passou por um secador de difusão modelo 3062 da TSI para remoção da umidade e foi injetado em uma corrente de ar previamente filtrada.

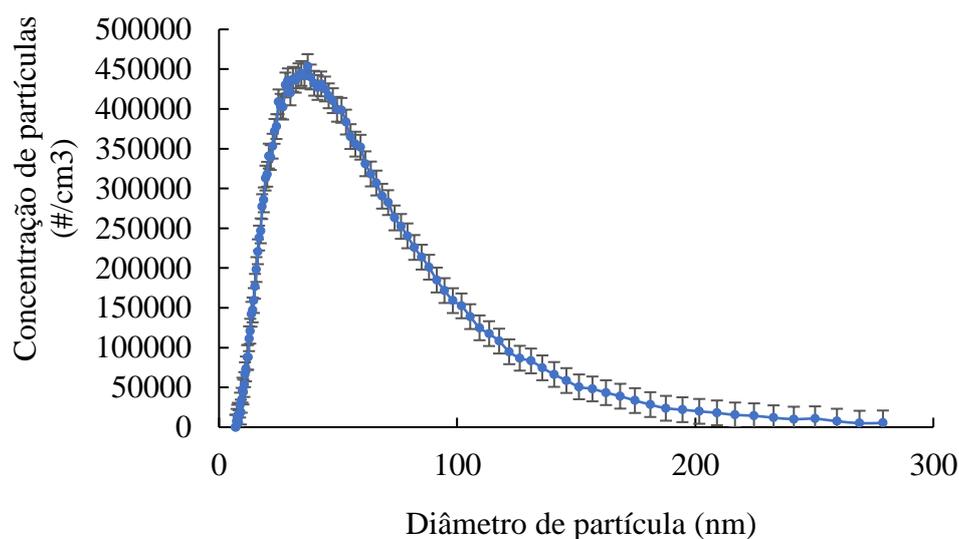
Em seguida, o ar com partículas de NaCl atravessou um neutralizador contendo Criptônio 85 (Kr-85) para remover eventuais cargas eletrostáticas, evitando possível deposição de partículas na superfície da tubulação. O ar então seguiu para o dispositivo de filtração, o qual consiste em um suporte para alocar uma amostra de meio filtrante de 40,15 cm<sup>2</sup> de área útil, onde amostragens isocinéticas foram coletadas a montante e jusante do mesmo e enviadas para um espectrômetro. Este último é um analisador de partículas por mobilidade elétrica (SMPS) modelo 3936 da TSI que registra a concentração de partículas nanométricas por faixas de diâmetro aerodinâmico. Ele é composto por um classificador eletrostático modelo 3080 e de um contador de partículas ultrafinas modelo 3776.

Por fim, o ar filtrado passou por um rotâmetro modelo GF-2400 da Gilmont® com escala até 40 L/min e foi liberado para o ambiente. A vazão de ar alimentada foi ajustada neste rotâmetro em 8 L/min para corresponder a uma velocidade de filtração de 2 m/min, a qual foi a mesma aplicada nos demais ensaios deste trabalho.

O diâmetro de mobilidade elétrica das nanopartículas foi gerado na unidade experimental ilustrada na Figura 24. O analisador de partículas por mobilidade elétrica (SMPS) que determina a quantidade de nanopartículas entre 10 e 300nm, que penetram e atravessam o meio filtrante, assim obtém-se a distribuição de diâmetro das partículas. Dessa forma, utilizando-se o software 390062 da TSI registrou-se o número de partículas por faixa de diâmetro antes e após o meio filtrante e, através da Equação 21, calculou-se a eficiência de coleta.

Este equipamento (Figura 24) se encontra no Laboratório de Controle Ambiental do DEQ na UFSCar, é um dos poucos equipamentos existentes no Brasil. Portanto, as partículas foram geradas a partir de uma solução de 1 g/L de NaCl e a velocidade de filtração foi mantida em 2 m/min durante todo o experimento conforme a norma VDI. A Figura 25 ilustra a concentração de partícula em função do diâmetro.

Figura 25 – Caracterização das nanopartículas



Os diâmetros das partículas geradas variaram entre 6,85 e 278,8 nm. Observa-se na Figura 3 que a maior concentração de partículas foi na faixa de 40 nm, sendo a maioria em quantidade inferior a 100 nm.

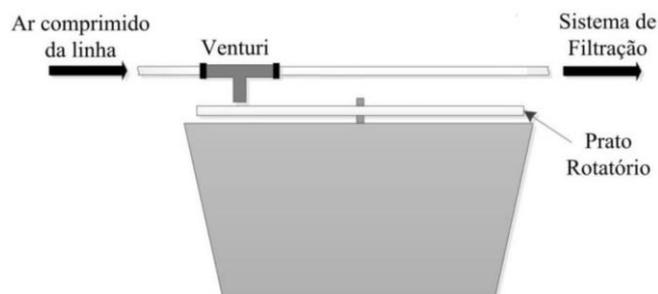
#### 4.5 Ensaio de filtração até 100 mmH<sub>2</sub>O

Os experimentos de filtração foram realizados no laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. O equipamento de filtração utilizado está ilustrado na Figura 26. Este equipamento foi construído baseado na norma VDI 3926, e simula um filtro de mangas industrial.

O ar alimentado no sistema tem origem na linha de ar comprimido do laboratório, e antes de entrar na caixa de alimentação de pó ele passa em uma coluna de sílica para remoção de umidade. Ao entrar na caixa, o ar comprimido arrasta o material particulado que está sobre o prato rotatório por meio de um tubo Venturi, como ilustrado na Figura 25, e o aerossol formado é disperso em uma câmara que antecede o meio filtrante (CARVALHO, 2018).

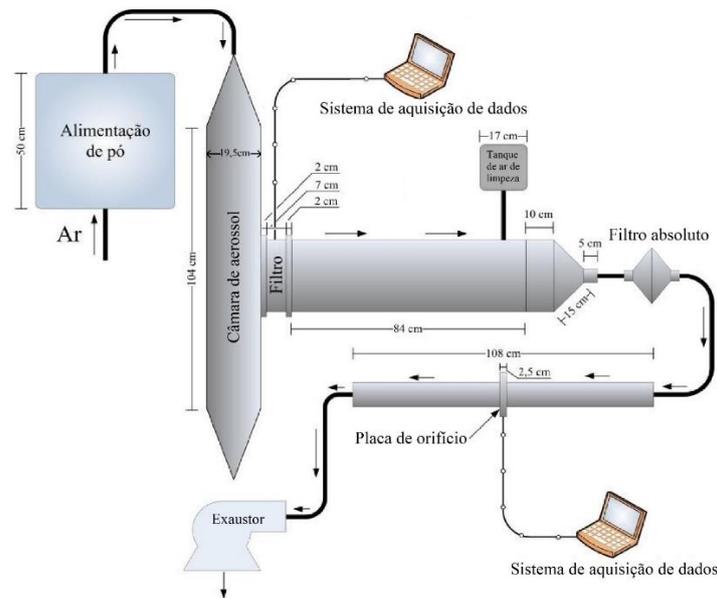
Um exaustor instalado no final do equipamento promove a sucção do ar presente na câmara, e conseqüentemente o pó fica retido em um filtro de 201,06 cm<sup>2</sup> de área útil (160 mm de diâmetro), que por sua vez fica acomodado em um suporte como mostra a Figura 26. As partículas que conseguiram atravessar o meio filtrante ficavam retidas em um filtro absoluto localizado a jusante, assim a eficiência de coleta pode ser calculada por gravimetria (CARVALHO, 2018).

Figura 26 - Sistema de alimentação de material particulado



Fonte: Adaptado de Cirqueira (2017)

Figura 27 - Filtro de manga



Fonte: CIRQUEIRA et al. (2017)

Ciclos de filtração para cada um dos meios filtrantes alimentados de pó de despoejamento secundário da aciaria, foram realizados até que o sistema atingisse a queda de pressão limite de 100 mmH<sub>2</sub>O. A filtração foi executada no filtro de tecido laboratorial e seguiu a norma VDI 3926, com concentração de partículas no filtro de 5g/m<sup>3</sup> e relação ar-pano de 2m/min.

Os filtros (estudado e o absoluto) foram pesados antes e após cada experimento para calcular a eficiência de filtração por gravimetria. Comparou-se os filtros em relação à eficiência de coleta, tempo de filtração e massa retida. Foram utilizados os meios filtrantes PE 540, PE 550, PE+PTFE 550, PE P 540 e PE P 600 como filtros principais e Polipropileno 550 g/cm<sup>2</sup> como filtro absoluto.

A eficiência de coleta (E), que representa a fração das partículas retidas pelo meio filtrante, foi calculada utilizando a equação:

$$E = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100\% \quad (8)$$

Em que, C<sub>i</sub> e C<sub>f</sub> são, respectivamente, a concentração de partículas antes e após o filtro medidas pelo equipamento.

Tanto os ensaios até 100 mmH<sub>2</sub>O como os ciclos de filtração foram realizados nas

condições operacionais dispostas na Tabela 12 que foram baseadas na norma VDI 3926.

Tabela 12 - Condições operacionais das filtrações

| Dado   | Valor                  |
|--|------------------------|
| Velocidade de filtração                      | 2 m/min                |
| Diâmetro útil do meio filtrante <sup>1</sup> | 160 mm                 |
| Vazão volumétrica de ar                      | 40 L/min               |
| Concentração de pó no filtro <sup>1</sup>    | 5000mg/m <sup>3</sup>  |
| Vazão mássica de pó alimentado               | 790 mg/min             |
| Tempo de uma volta do prato de alimentação   | 3min18seg              |
| Temperatura de filtração <sup>1</sup>        | Ambiente               |
| Queda de pressão máxima                      | 100 mmH <sub>2</sub> O |

#### 4.6 Queda de pressão máxima do precoating

Fez-se o precoating no filtro da Figura 27 variando as perdas de carga máxima. O precoating foi feito em meios filtrantes virgens de PE até as perdas de carga máxima de 10, 20, 30 e 40 mmH<sub>2</sub>O. Utilizou-se como pós de precoating cal virgem e calcário dolomítico. A razão ar-pano foi de 2 m/min.

Em seguida, os meios filtrantes que receberam o precoating foram levados para unidade experimental com contador de partículas ilustrada na Figura 23. Fez-se filtrações com o pó de aciaria para análise da eficiência de coleta para micropartículas a fim de determinar a partir de qual queda de pressão conferia alta eficiência de coleta. Além disso, observou-se visualmente a queda de pressão que apresentava a torta já formada.

#### 4.7 Avaliação da mistura de pós de precoat na eficiência de filtração

Para avaliar a influência da massa de pó de precoat durante a filtração, fez-se seis misturas, conforme Tabela 13, entre cal hidratada e calcário dolomítico com o pó de aciaria. Variou-se as porcentagens mássicas de cal e do calcário em 10, 30 e 50%. O objetivo foi avaliar a influência da massa, de cal e de calcário, na eficiência de coleta durante o precoating.

Tabela 13 - Misturas mássicas

| <b>Misturas mássicas</b> |                            |
|--------------------------|----------------------------|
| Aciaria + 10 % de cal    | Aciaria + 10 % de calcário |
| Aciaria + 30 % de cal    | Aciaria + 30 % de calcário |
| Aciaria + 50 % de cal    | Aciaria + 50 % de calcário |

Foram feitas filtrações com o precoating, na unidade experimental com contador de partículas da Figura 23, utilizando o PE como meio filtrante. O pó do precoating foi alimentado até que a queda de pressão de 20 mmH<sub>2</sub>O fosse alcançada e em seguida foi realizada a filtração com o pó de aciaria.

O precoating foi realizado com oito materiais particulados: apenas cal hidratada, apenas calcário dolomítico e cada uma das seis misturas mássicas.

Realizaram-se filtrações com precoating no filtro da Figura 27 até queda de pressão máxima de 100 mmH<sub>2</sub>O. O precoating foi feito com cal hidratada até 20 mmH<sub>2</sub>O, em seguida foi filtrado pó de aciaria até 100 mmH<sub>2</sub>O. O filtro absoluto foi pesado a fim de analisar o quanto de massa de material particulado atravessou o meio filtrante com precoating.

#### **4.8 Ciclos de Filtração**

Foram realizados trinta ciclos de filtração, em duplicata, para cada um dos meios filtrantes: poliéster e poliéster com membrana de PTFE com gramatura de 550 g/cm<sup>2</sup>. As filtrações foram realizadas no filtro da Figura 27 até a queda de pressão limite de 100 mmH<sub>2</sub>O e o material particulado foi o pó de despoejamento secundário da aciaria. A filtração seguiu as condições operacionais da norma VDI 3926, o material particulado foi alimentado de modo a ter no filtro uma concentração de 5g/m<sup>3</sup> e a relação ar-pano foi de 2 m/min.

Ao atingir o valor da queda de pressão máxima foi realizada a limpeza através de um pulso de ar com duração de 60 milissegundos, segundo a VDI, na direção contrária à filtração, quando se iniciou automaticamente um novo ciclo até alcançar  $\Delta P_{\text{máx}}$  novamente.

#### **4.9 Ciclos de Filtração com precoating**

Foram realizados utilizando o meio filtrante de poliéster com gramatura de 550 g/cm<sup>2</sup>, para cada pó de precoating trinta ciclos de filtração em duplicata, sendo alimentado no sistema de filtração o precoating apenas no primeiro ciclo. Alimentou-se o pó do precoating, cal hidratada ou calcário dolomítico, até que a queda de pressão máxima atingisse o valor de 20mmH<sub>2</sub>O. Em seguida, o sistema foi alimentado com o pó de despoejamento secundário da aciaria até a queda de pressão limite de 100 mmH<sub>2</sub>O. As filtrações seguiram as condições operacionais e de limpeza da norma VDI 3926, assim como no item 4.8.

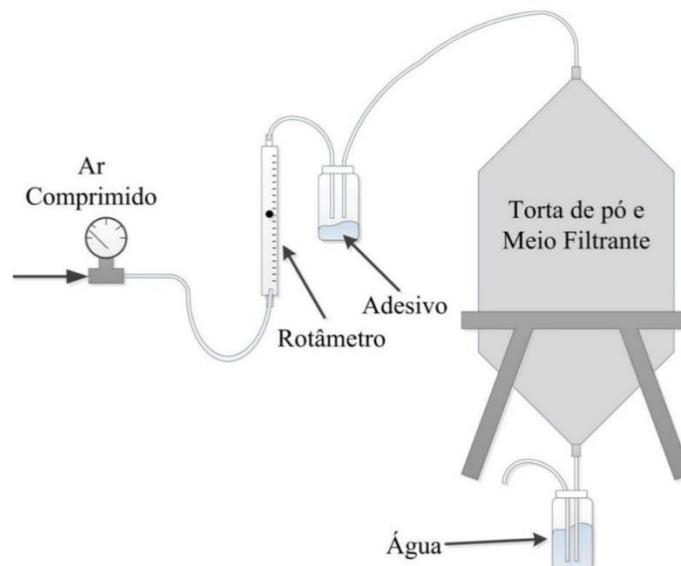
#### **4.10 Preparação de amostras para serem submetidas ao MEV**

Após os ciclos de filtração, os meios filtrantes foram preparados para serem analisados no MEV, seguindo a metodologia de Aguiar e Coury (1996). O processo permite obter imagens da seção transversal do meio filtrante, com objetivo de analisar a penetração das partículas nos meios filtrantes.

O meio filtrante após os trinta ciclos de filtração recebeu uma fina camada de adesivo Loctite 416 com finalidade de ter maior estabilidade no particulado residual no filtro.

O processo foi realizado na unidade da Figura 28. Uma corrente de ar arrastava o adesivo até o meio filtrante durante 42 horas a uma vazão de 1,5 L/min, aplicando-se 3 gotas de adesivo por hora no recipiente. Um frasco com água no final da linha retinha o excesso do adesivo.

Figura 28 - Unidade de aplicação da cola



Cada meio filtrante com adesivo era disposto em um recipiente de vidro com uma camada de esponja. Onde era encharcado, por difusão, com uma solução de 12 gotas de catalisador com resina selante Loctite® PMS-10E. O filtro encharcado era preso com presilhas sobre uma placa de vidro e levado à estufa à 60 °C por 48 horas até secagem completa, resultando em um filtro enrijecido.

Cortou-se 1 cm<sup>2</sup> de cada meio filtrante e estas amostras foram colocadas com a face transversal voltada para cima em moldes circulares de PVC, e com a base presa com silicone sobre um suporte de vidro. Os moldes foram previamente untados na face interna com vaselina para a facilitar a posterior remoção dos mesmos. Eles então foram encharcados com a resina de poliéster incolor da marca Du Látex misturada com catalisador na proporção de 100/1,5 em massa. Após 24 horas, ou quando a resina estivesse completamente endurecida, os moldes foram removidos e as amostras embutidas foram lixadas e polidas em uma das faces, até atingir uma aparência espelhada, livre de riscos, que pode ser observada em um microscópio ótico (CARVALHO, 2018).

Em seguida, as amostras foram levadas ao Laboratório de Caracterização Estrutural do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar onde foram recobertas com uma fina camada de ouro e então levadas ao MEV.

#### 4.11 Determinação da penetração das partículas nos meios filtrantes

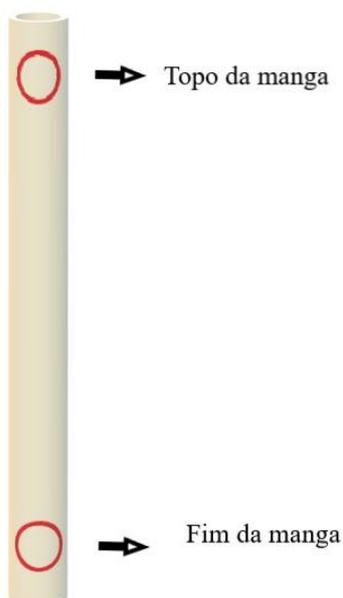
As imagens obtidas no MEV para cada meio filtrante foram posicionadas de forma a mostrar toda a seção transversal. Em seguida, as imagens foram binarizadas pelo *software Image Pro Plus 7.0* com o objetivo de destacar as partículas do restante do filtro, e assim, ser possível a contagem destas partículas e a determinação dos seus diâmetros.

#### 4.12 Avaliação da eficiência de mangas sujas

A indústria siderúrgica forneceu três mangas sujas, que foram utilizadas por 38 meses, provenientes de três compartimentos diferentes (2, 4 e 7) de um mesmo filtro de mangas da etapa de aciaria. De cada manga foram extraídas duas amostras, uma na parte inicial, 10 cm abaixo do topo e outra na parte final, 10 cm acima do fim da manga, segundo esquema da Figura 29.

Foram feitas filtrações para cada amostra, na unidade experimental com contador de partículas da Figura 29, alimentando o pó de aciaria.

Figura 29 - Amostragens da manga



### **4.13 Tabela de Experimentos**

A Tabela 14 mostra todos os experimentos realizados e suas condições experimentais.

Tabela 14 – Experimentos realizados

| Ensaio  | Equipamento(s)  | Meio(s) Filtrante(s)                         | Material Particulado | Pós de precoating                   | Velocidade de filtração | Queda de pressão máxima do precoating | Queda de pressão máxima |
|---|---|--|----------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| Eficiência para micropartículas                     | Unidade com contador de partículas APS (Figura 23)                    | PE 540, PE 550, PE P 540, PE P 600 e PE+PTFE | Pó de aciaria        | -                                   | 2 m/min                 | -                                     | -                       |
| Eficiência para nanopartículas                      | Unidade com contador de partículas SMPS (Figura 24)                   | PE 540, PE 550, PE P 540, PE P 600 e PE+PTFE | Solução de NaCl      | -                                   | 2 m/min                 | -                                     | -                       |
| Ensaio de Filtração                                 | Filtro baseado na Norma VDI 3926 (Figura 27)                          | PE 540, PE 550, PE P 540, PE P 600 e PE+PTFE | Pó de aciaria        | -                                   | 2 m/min                 | -                                     | 100 mmH <sub>2</sub> O  |
| Queda de pressão máxima do precoating               | Filtro baseado na Norma VDI (Figura 27) e Unidade com APS (Figura 23) | PE 550                                       | Pó de aciaria        | Cal hidratada e calcário dolomítico | 2 m/min                 | 10, 20, 30 e 40 mmH <sub>2</sub> O    | -                       |
| Avaliação das misturas mássicas de pó de precoating | Unidade com APS (Figura 23)   | PE 550                                       | Pó de aciaria        | Cal e calcário (10, 30, 50 e 100%)  | 2 m/min                 | 20 mmH <sub>2</sub> O                 | -                       |
|   | Filtro baseado na Norma VDI (Figura 27)                               | PE 550                                       | Pó de aciaria        | Cal e calcário (10, 30, 50 e 100%)  | 2 m/min                 | 20 mmH <sub>2</sub> O                 | 100 mmH <sub>2</sub> O  |
| Trinta ciclos de filtração sem precoating           | Filtro baseado na Norma VDI (Figura 27)                               | PE 550 e PE+PTFE                             | Pó de aciaria        | -                                   | 2 m/min                 | -                                     | 100 mmH <sub>2</sub> O  |
| Trinta ciclos de filtração com precoating           | Filtro baseado na Norma VDI (Figura 27)                               | PE 550                                       | Pó de aciaria        | Cal hidratada e calcário dolomítico | 2 m/min                 | 20 mmH <sub>2</sub> O                 | 100 mmH <sub>2</sub> O  |
| Avaliação da eficiência de coleta de mangas sujas   | Unidade com APS (Figura 23)   | PE + PTFE                                    | Pó de aciaria        | -                                   | 2 m/min                 | -                                     | -                       |

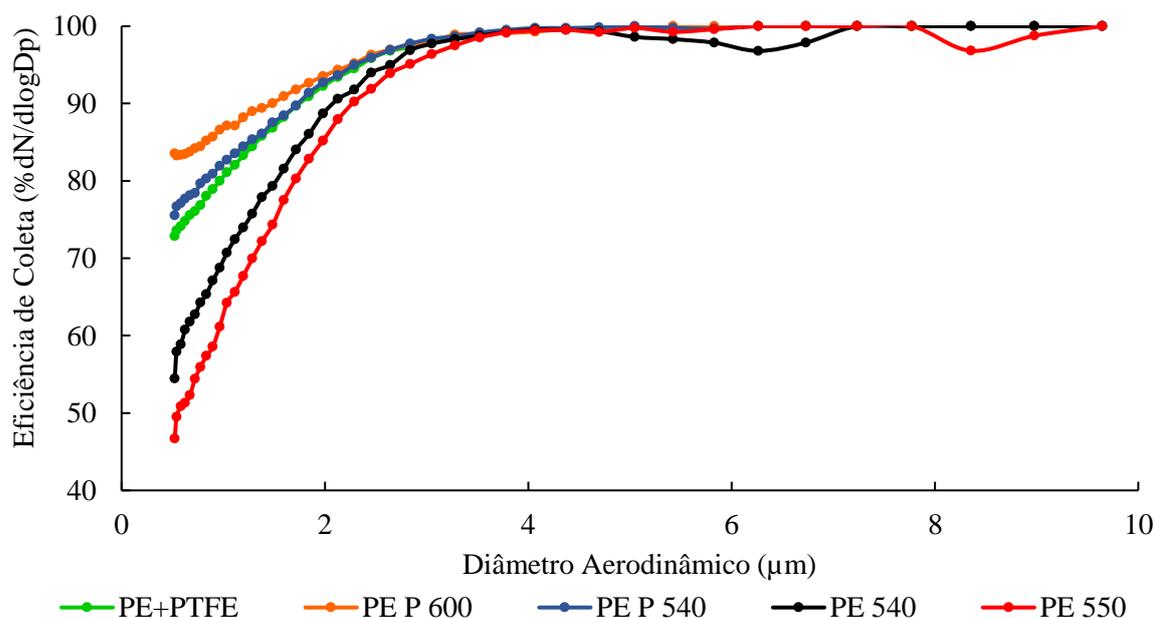
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na realização dos experimentos expostos no capítulo 4. Além das discussões desses resultados e seu embasamento teórico encontrado na literatura.

### 5.1 Eficiência para micropartículas sem precoating

As eficiências de coleta em função do diâmetro aerodinâmico para micropartículas de até 10  $\mu\text{m}$  obtidas no aparato experimental com contador de partículas da Figura 23 são ilustradas na Figura 30. O contador de partículas analisa a faixa de 0,523  $\mu\text{m}$  à 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro aerodinâmico. Observa-se na Figura 30 que os meios filtrantes encapsulados com Teflon (PE P) apresentaram maior eficiência de coleta que os demais para partículas menores que 3  $\mu\text{m}$ . A maior gramatura propiciou uma maior eficiência para as partículas PM 2,5 e PM1. A membrana de PTFE (PE+ PTFE) proporcionou um comportamento similar ao encapsulado de 540  $\text{g}/\text{cm}^2$  (PE P 540). Comparando-o com o poliéster de mesma gramatura (PE 550), verifica-se que a membrana de PTFE foi responsável por um aumento significativo na eficiência para partículas com diâmetro inferior à 3  $\mu\text{m}$ .

Figura 30 – Eficiência de coleta de micropartículas

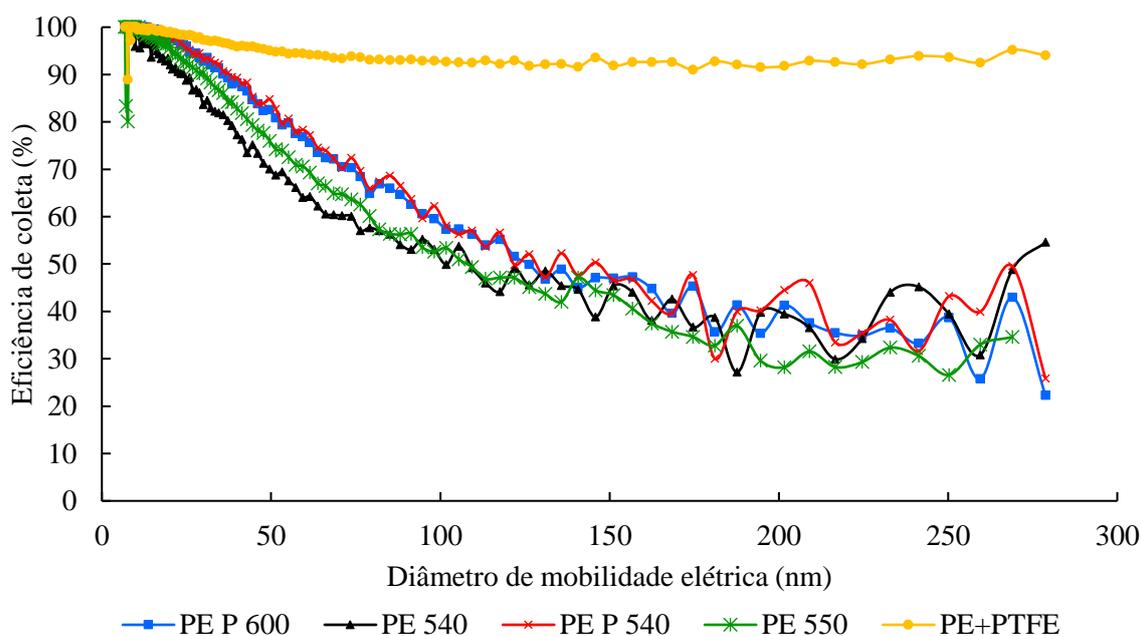


O poliéster com as fibras encapsuladas de Teflon com gramatura de 540 g/cm<sup>2</sup> apresentou maior eficiência que o poliéster de mesma gramatura sem o tratamento para diâmetros inferiores à PM 2,5. O encapsulamento ou a membrana de Teflon permitiu uma maior eficiência que os demais para PM 2,5 e, principalmente, PM1. Para PM10, todos os meios filtrantes tiveram 100% de eficiência.

## 5.2 Eficiência para nanopartículas sem precoating

A eficiência de coleta de partículas nanométricas em função do diâmetro de mobilidade elétrica, para cada meio filtrante que foi submetido a ensaios de filtração na unidade experimental da Figura 24, está ilustrada na Figura 31.

Figura 31 - Eficiência de coleta de partículas nanométricas em função do diâmetro de mobilidade elétrica



Observa-se na Figura 31 que a eficiência de coleta diminuiu com o aumento do diâmetro da partícula para os quatro meios filtrantes, exceto o meio filtrante de poliéster com membrana de PTFE que se mantém praticamente estável. Esse comportamento de decréscimo de eficiência pode ser explicado pelo fato de que as partículas na faixa de tamanho 3 e 300 nm de diâmetro são grandes o suficiente para estarem sujeitas a efeitos difusionais significativos, e são extremamente pequenas para apresentarem efeitos inerciais (HINDS, 1982; CARVALHO, 2018). Assim, esta é a faixa de tamanho de

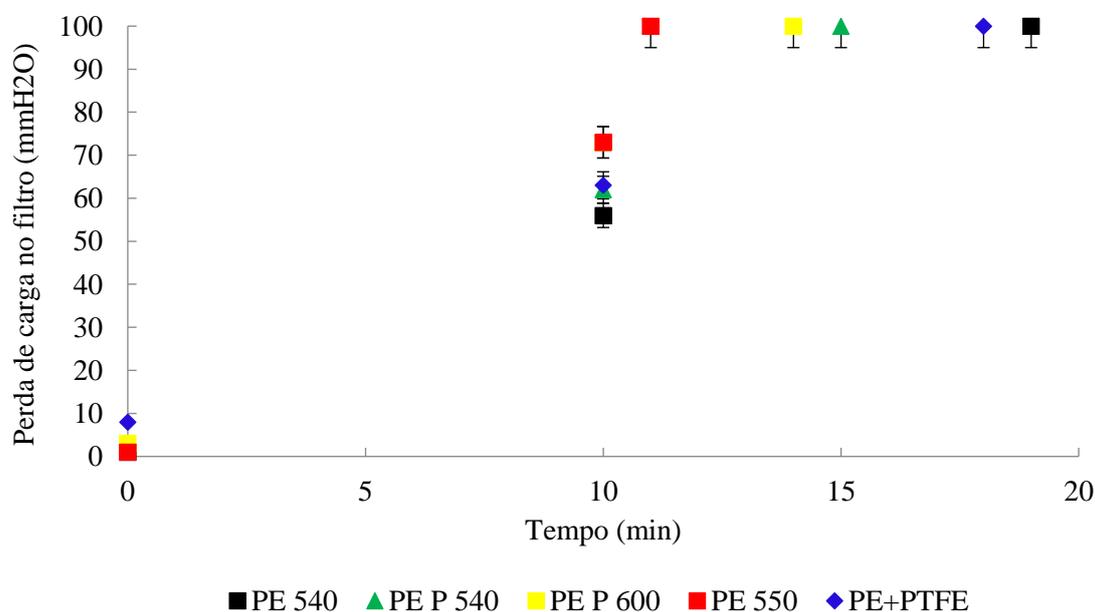
partículas mais difícil de ser capturada por um meio filtrante sem tratamento de membrana, e é denominada Tamanho de Partícula de Maior Penetração (*most penetrating particle size* - MPPS) (HUTTEN, 2016).

A alta eficiência de coleta se deu porque segundo Barnett (2000), meios filtrantes com membrana de PTFE são eficientes do momento da instalação e não necessitam da formação inicial da torta para filtrar efetivamente o particulado. A membrana fornece uma superfície não aderente, propiciando melhor desprendimento da torta, uma alta eficiência de filtração (acima de 99,99%) para particulado fino. Isso pôde ser observado nos resultados obtidos.

### 5.3 Ensaio de filtração até 100 mmH<sub>2</sub>O sem precoating

Utilizando o pó da aciaria e o equipamento da Figura 27 foram feitos ensaios de filtração até 100 mmH<sub>2</sub>O através dos quais foi possível obter os gráficos da queda de pressão do filtro em função do tempo, conforme ilustrado na Figura 32, correspondendo ao primeiro ciclo de filtração.

Figura 32- Queda de pressão em função do tempo



O meio filtrante que apresentou menor tempo de filtração foi o de poliéster com gramatura de 550 g/cm<sup>2</sup>, ocorrendo em 11 minutos. Seguida dos meios filtrantes de poliéster com encapsulamento de Teflon, PE P 600 em 14 min e PE P 540 em 15 minutos, respectivamente. O poliéster com membrana de PTFE chegou aos 100 mmH<sub>2</sub>O

em 18 minutos. E por último, com maior tempo de filtração, 19 min, foi o poliéster (PE 540), gramatura de 540 g/cm<sup>2</sup>.

Kanaoka et al. (2001) concluíram que o tempo de filtração é maior para filtros de maior permeabilidade. Conforme calculado anteriormente, a permeabilidade média (da triplicata), do meio filtrante PE 540 foi de 10,6 m<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup>, a do PE 550 foi de 21,8 m<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup>, a do PE + PTFE 550 foi de 3,8 m<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup>, a do PE P 540 é 10,2 ± 0,3 m<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup> e do PE P 600 é 12 m<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup> para uma queda de pressão de 125 Pa. O tempo de filtração foi menor para o meio filtrante com maior permeabilidade, contrariando a literatura.

As curvas de filtração da Figura 32 tiveram uma rápida colmatção, apresentando como mecanismo a filtração superficial na maior parte do ciclo, o que resultou em baixa penetração das partículas no interior do tecido. O mesmo comportamento das curvas de filtração foi verificado no trabalho de Rodrigues (2006), uma rápida formação da torta de filtração e grande acúmulo de partículas na superfície do tecido, resultando uma alta eficiência de coleta (TOGNETTI, 2007).

Como a taxa de alimentação de pó era mantida constante, para um tempo de filtração maior significou em maior quantidade de partícula coletada, para um mesmo valor de queda de pressão.

É desejável que o filtro tenha um maior tempo de filtração para atingir a queda de pressão máxima. Conseqüentemente ele terá uma menor frequência de pulsos de ar para limpeza por jato pulsante, resultando em um menor desgaste para as mangas. Sendo assim, prolonga-se a vida útil dos meios filtrantes e reduz-se o gasto energético com o sistema de limpeza (CARVALHO, 2018).

A Tabela 15 apresenta os valores de eficiência total de coleta dos meios filtrantes calculados conforme a Equação 8, no equipamento da Figura 27.

Tabela 15 - Eficiência de coleta para faixa de micropartículas

| Meio filtrante | Eficiência Total de Coleta |
|----------------|----------------------------|
|                | Mássica (%)                |
| PE + PTFE      | 99,99975                   |
| PE 540         | 99,99944                   |
| PE P 540       | 99,99914                   |
| PE P 600       | 99,99902                   |
| PE 550         | 99,99564                   |

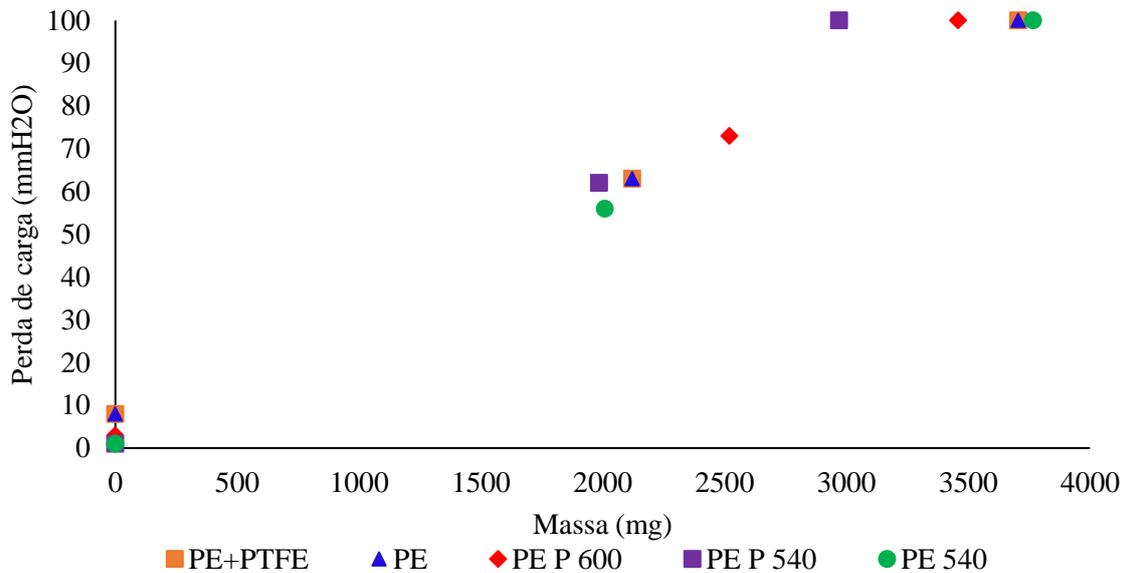
Todos os meios filtrantes apresentaram praticamente a mesma eficiência de coleta, acima de 99,99%, para partículas micrométricas, sendo que o PE+PTFE apresentou uma eficiência de coleta levemente maior que os demais meios filtrantes em um tempo de filtração de 18 min. O PE 540 apresentou eficiência um pouco inferior ao PE+PTFE, porém os 100 mmH<sub>2</sub>O foram atingidos em 19 min.

Segundo CLARK (2001), a eficiência de coleta de um meio filtrante aumenta com o decréscimo do diâmetro das fibras que o constituem. Isso pôde ser confirmado, já que o meio filtrante PE + PTFE foi o q obteve diâmetro médio (5,10 µm) e maior eficiência de coleta. Isso pôde ser visto no PE 540 que apresenta um diâmetro de 13,8 µm, menor que os demais meios filtrantes, e segunda maior eficiência de coleta.

Portanto, os meios filtrantes PE 540 e PE + PTFE obtiveram os melhores resultados durante o primeiro ciclo de filtração, uma vez que apresentaram um maior tempo de filtração e melhores eficiências de coleta que os demais meios filtrantes.

A Figura 33 ilustra a queda de pressão em função da massa de material particulado alimentada ao longo do primeiro ciclo de filtração.

Figura 33 - Queda de pressão em função da massa para o primeiro ciclo

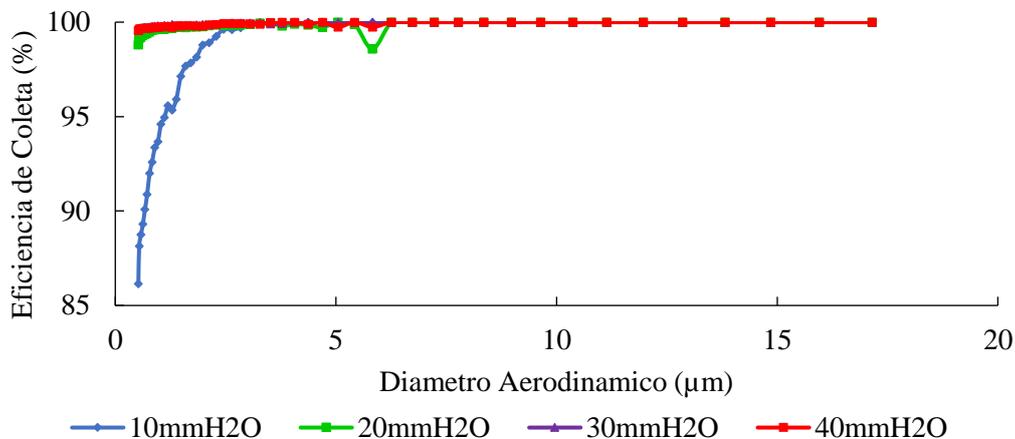


Observa-se na Figura 33 que meio filtrante PE P 540 precisou de uma menor quantidade de material particulado para atingir os 100 mmH<sub>2</sub>O o equivalente a 2970 mg, seguido do PE P 600 (3459 mg), PE 550 (3706 mg) e PE+PTFE (3706 mg) e por último, PE 540 com 3767 mg.

#### 5.4 Queda de pressão máxima do precoating

Foi realizado, em meios filtrantes virgens de PE 550, o precoating até as perdas de carga máxima de 10, 20, 30 e 40 mmH<sub>2</sub>O no filtro da Figura 27. Em seguida, os meios filtrantes com precoating foram levados à unidade da Figura 23, onde foram realizadas filtrações a fim de analisar a eficiência de coleta do meio filtrante com precoating para micropartículas em função do diâmetro aerodinâmico conforme ilustrado na Figura 34.

Figura 34 - Eficiência de coleta variando a queda de pressão limite do precoating para cal hidratada

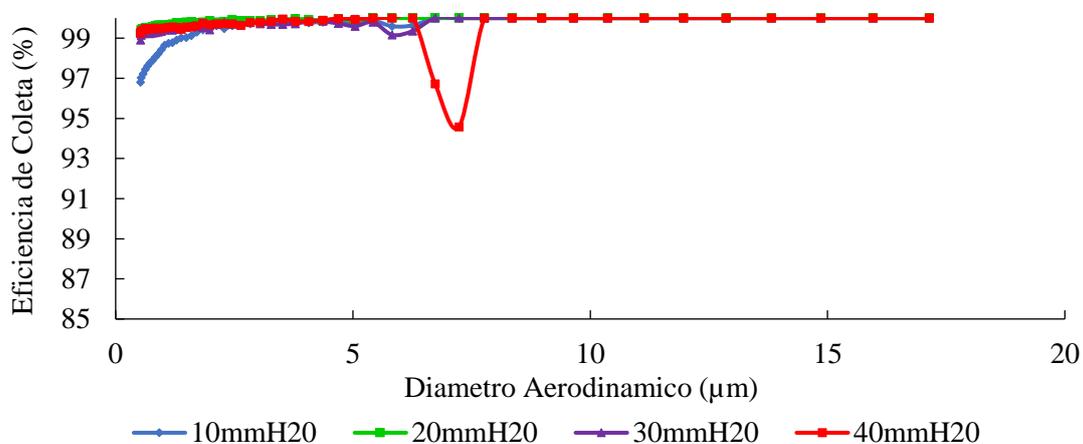


Verifica-se que a eficiência de coleta é quase 100% após o precoating com queda de pressão limite de 20 mmH<sub>2</sub>O. Em 20 mmH<sub>2</sub>O acontece a colmatção, é possível ver a torta já formada, por isso, há uma maior eficiência de coleta.

O mesmo pode ser visto na Figura 35, quando foi utilizado calcário dolomítico.

Em ambos os gráficos é possível observar que na faixa de diâmetro de 5 à 8 µm há uma queda na eficiência de coleta. Uma possível explicação para tal pode ser devido ao efeito dos diâmetros da partícula e da fibra que passam a ter mais interferência nessa faixa de diâmetros. Quanto maiores o tamanho da fibra e o diâmetro de partícula, menor é a eficiência de coleta, e isso se torna efetivo de 5 à 8 µm.

Figura 35 - Eficiência de coleta variando a queda de pressão limite do precoating para calcário dolomítico

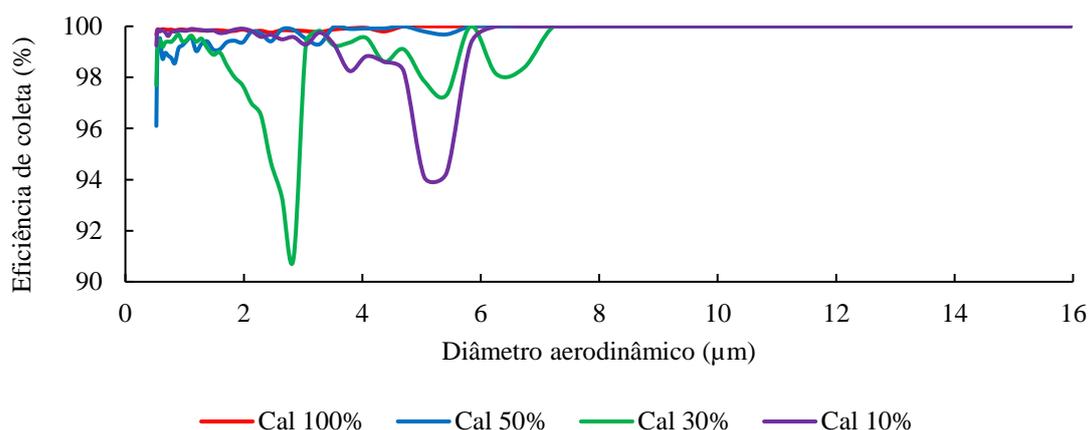


Com o precoating utilizando tanto a cal virgem quanto o calcário dolomítico, observa-se que a eficiência de coleta permaneceu próxima à 100% a partir de 20 mmH<sub>2</sub>O.

### 5.5 Avaliação da mistura de pós de precoating na eficiência de filtração

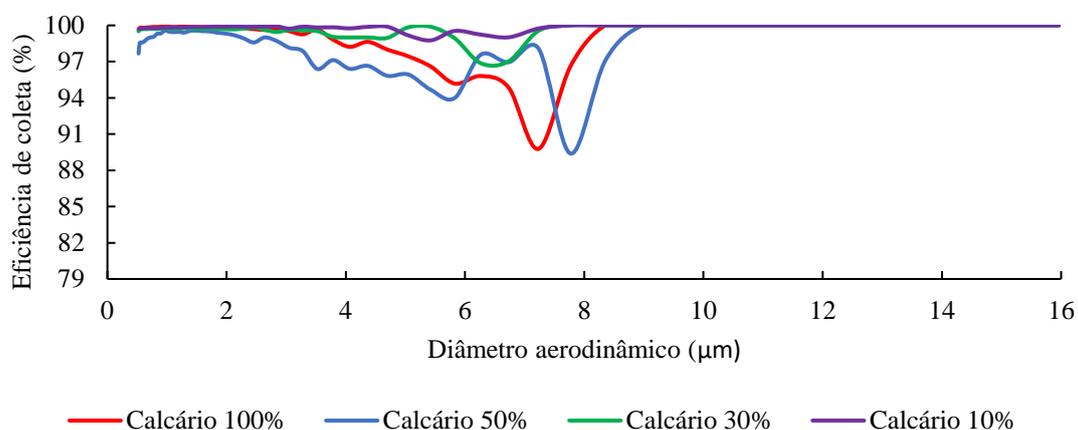
Fez-se o precoating até a queda de pressão máxima que garantiu melhor eficiência de coleta de acordo com o item 5.4 na unidade experimental da Figura 23. Foram utilizados meios filtrantes virgens de PE 550 e os oito materiais particulados apresentados na Tabela 13. E, então foram aferidas as eficiências de coleta em função do diâmetro aerodinâmico obtidas para cada material particulado utilizado no precoating do poliéster (PE 550) conforme estão ilustradas nas Figuras 36 e 37.

Figura 36 - Precoating com as misturas mássicas de cal hidratada



Quanto maior a proporção de cal hidratada no precoating, maior foi a eficiência de coleta do pó de aciaria.

Figura 37 - Precoating com as misturas mássicas de calcário dolomítico



Utilizando o calcário dolomítico no precoating, teve efeito contrário em comparação com a cal hidratada. Quanto maior a massa de calcário no precoating, maior foi a variação da eficiência de coleta para uma faixa de 2 à 10  $\mu\text{m}$ .

A partir dos ciclos de filtrações realizados no filtro da Figura 25, foi possível calcular a eficiência gravimétrica de coleta e a quantidade de particulado que passou pelo meio filtrante e ficou retida no filtro absoluto. Estes valores estão dispostos na Tabela 16.

Tabela 16 - Eficiência de coleta e massa retida no filtro absoluto

| Porcentagem mássica de cal hidratada (%) | Eficiência Total de Coleta Mássica (%) | Massa retida no filtro absoluto (g) |
|--|--|-------------------------------------|
| 10                                       | $99,9984 \pm 0,0001$                   | $0,10 \pm 0,02$                     |
| 30                                       | $99,9988 \pm 0,001$                    | $0,05 \pm 0,01$                     |
| 50                                       | $99,9987 \pm 0,002$                    | $0,03 \pm 0,03$                     |

Observa-se que quanto maior a porcentagem mássica de cal no precoating menor (considerando o erro) é a quantidade de massa que passa pelo meio filtrante ficando retida no absoluto.

## 5.6 Ciclos de Filtração sem Precoating

As Figuras 37 e 38 mostram os trinta ciclos de filtração até a queda de pressão máxima de 100 mmH<sub>2</sub>O sem o precoating feitos no filtro da Figura 27 utilizando o pó de aciaria e os meios filtrantes de PE 550 e PE + PTFE, respectivamente.

Figura 38 – Trinta ciclos de filtração para PE 550

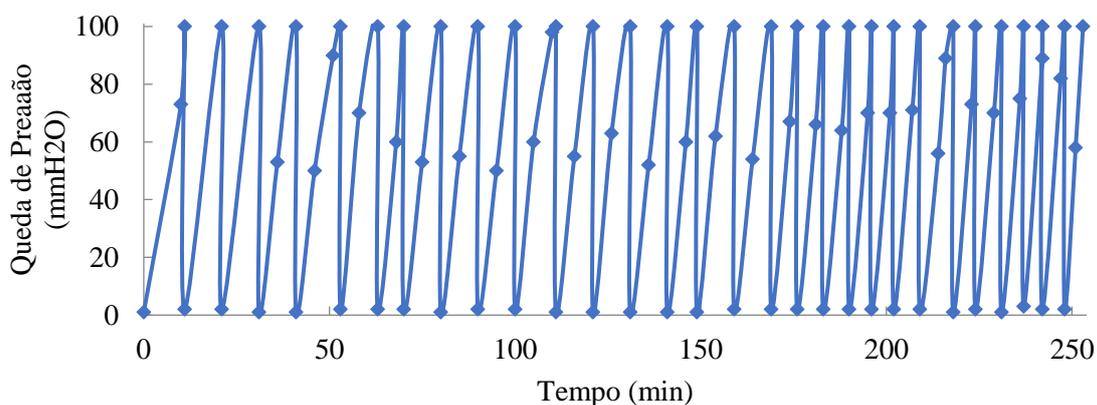
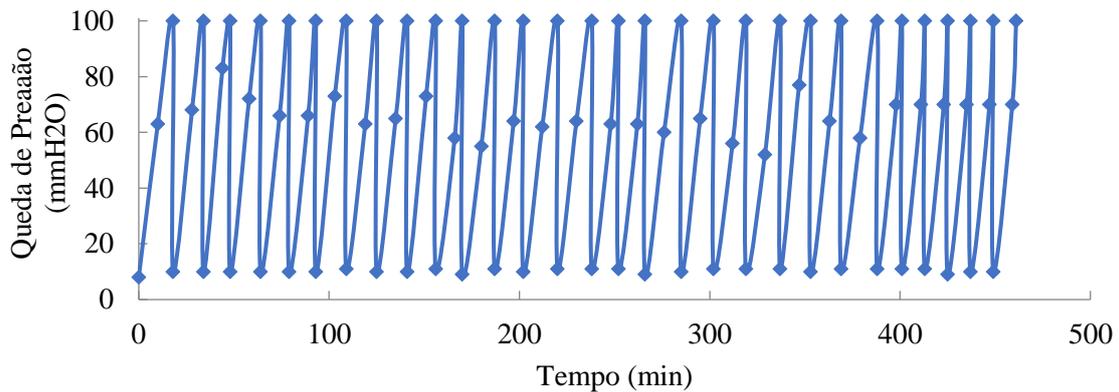


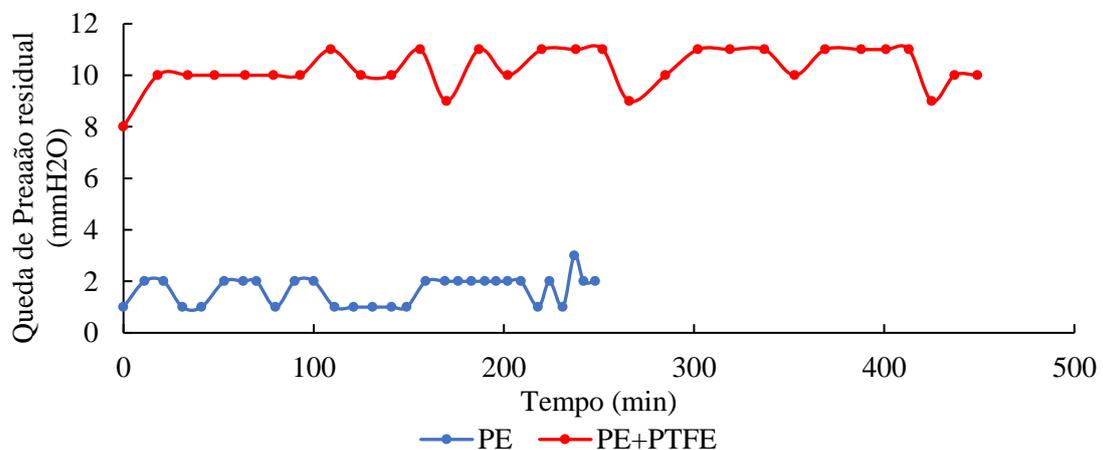
Figura 39 - Trinta ciclos de filtração para PE + PTFE



Os ciclos com o meio filtrante com membrana de PTFE foram mais longos que o com poliéster, quase o dobro do tempo. O PE 550 fez trinta ciclos de filtração em 253 min, enquanto que o PE + PTFE fez em 461 minutos.

A Figura 40 ilustra as perdas de carga residuais em função do tempo ao longo dos ciclos. O meio filtrante PE variou entre 1 e 3 mmH<sub>2</sub>O, se mantendo estável em 2 mmH<sub>2</sub>O. Enquanto o PE+PTFE, variou de 8 à 11 mmH<sub>2</sub>O, tendo momentos de estabilidade em 10 e 11 mmH<sub>2</sub>O.

Figura 40 - Queda de pressão residual em função do tempo para os trinta ciclos



Ambos os meios filtrantes apresentaram uma pequena variação na queda de pressão residual ao longo dos trinta ciclos. O meio filtrante PE variou de 1 até 3 mmH<sub>2</sub>O, se mantendo constante a maior parte dos ciclos em 2 mmH<sub>2</sub>O. Enquanto o PE+PTFE variou de 9 à 11 mmH<sub>2</sub>O, se mantendo constante em 10 mmH<sub>2</sub>O.

## 5.7 Ciclos de Filtração com Precoating

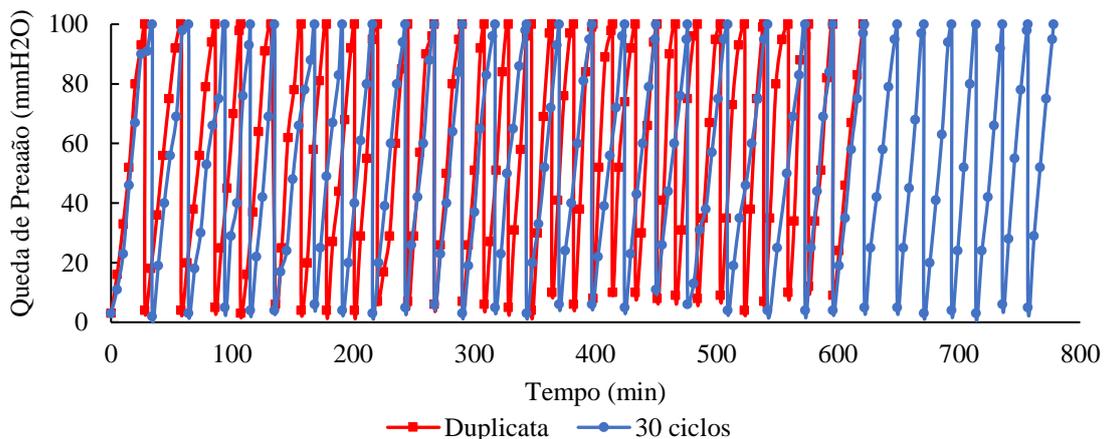
Nos ciclos de filtração com o precoating foi analisada a queda de pressão em função do tempo, dando-se destaque ao primeiro ciclo, no qual a massa também foi observada.

Os ciclos de filtração com precoating foram realizados no filtro da Figura 27. Fez o precoating apenas no primeiro ciclo de filtração até 20 mmH<sub>2</sub>O, em seguida alimentou-se pó de aciaria até atingir 100 mmH<sub>2</sub>O. Depois foi feita a limpeza e dando continuidade aos demais ciclos de filtração foi alimentado apenas pó de aciaria.

### 5.7.1 Ciclos de Filtração com Precoating Cal

A Figura 41 ilustra a duplicata dos trinta ciclos de filtração para PE 550 utilizando a cal hidratada como pó de precoating realizados no filtro da Figura 27.

Figura 41 - Trinta ciclos de filtração com precoating de cal



Os primeiros trinta ciclos levaram um tempo de 778 minutos para serem feitos, em comparação com os trinta ciclos sem precoating, o precoating conferiu um tempo 3 vezes maior na realização dos trinta ciclos com PE e 300 minutos a mais em comparação ao tempo obtido utilizando PE+PTFE.

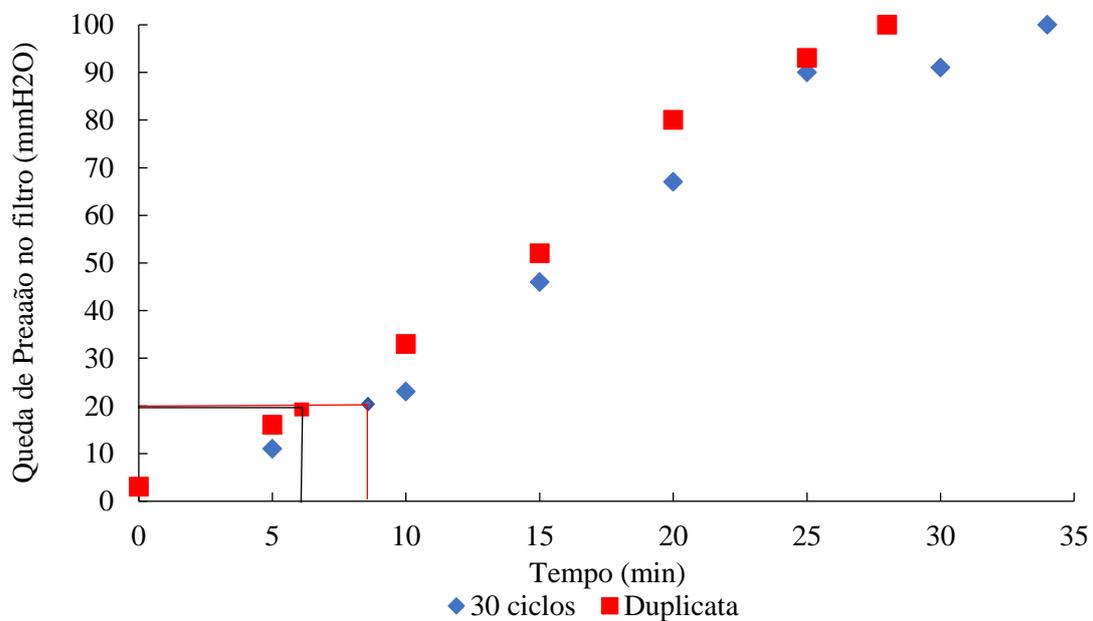
A duplicata dos trinta ciclos de filtração foi realizada em 621 minutos, 157 minutos a menos em comparação com os trinta ciclos realizados anteriormente. Ainda assim, apresentou um tempo 2,57 vezes maior em comparação aos trinta ciclos no PE e aproximadamente, 200 minutos a mais em relação ao PE+PTFE.

A queda de pressão inicial do meio filtrante para os primeiros trinta ciclos era de 3 mmH<sub>2</sub>O e no final dos trinta ciclos da queda de pressão residual foi de 5 mmH<sub>2</sub>O. Na duplicata, começou com 3 mmH<sub>2</sub>O e no final dos trinta ciclos, foi de 9 mmH<sub>2</sub>O.

A diferença de tempo entre as duplicatas pôde ter sido causada por ter sido utilizado diferentes amostras da manga, que pode ter uma diferença de permeabilidade e porosidade. Além disso, a alimentação do sistema não tem um controlador, o que gera irregularidades na alimentação.

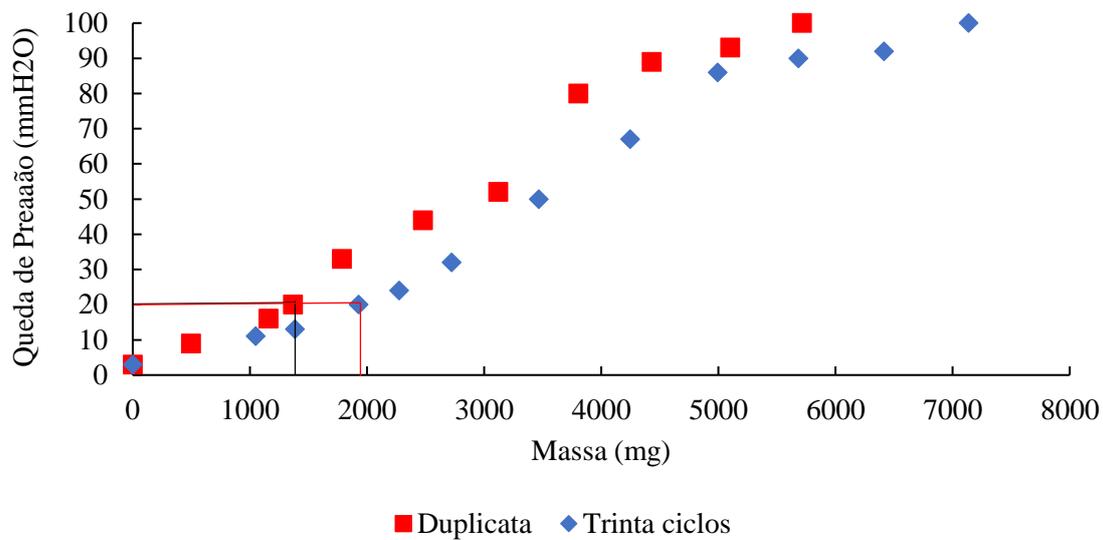
A Figura 42 ilustra queda de pressão em função do tempo de filtração para o primeiro ciclo com a realização do precoating.

Figura 42 - Primeiro ciclo com o precoating de cal



O precoating com a cal hidratada demorou 9 minutos e 22 segundos para atingir 20 mmH<sub>2</sub>O nos trinta ciclos feitos inicialmente, conforme destacado na Figura 42. Enquanto na duplicata, a queda de pressão limite do precoating foi atingida após 6 minutos e 45 segundos do início da filtração.

Figura 43 - Primeiro ciclo com precoating em função da massa de cal



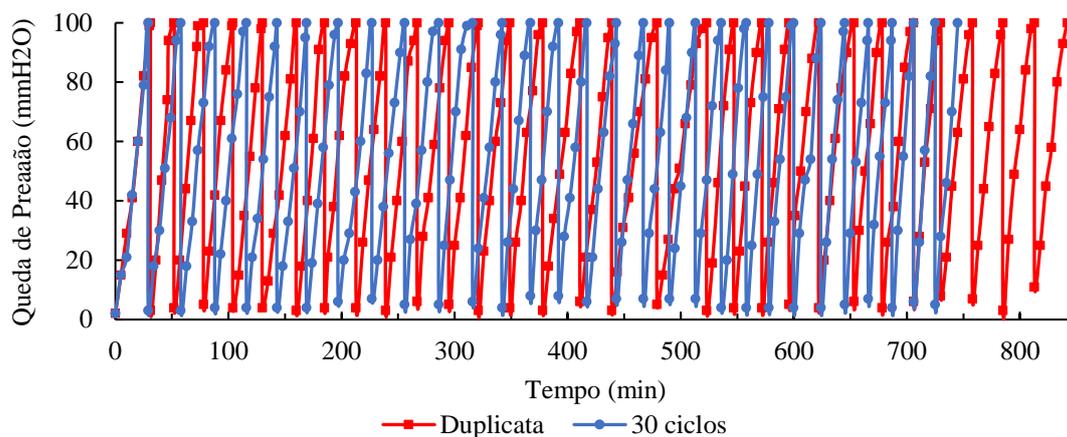
Alimentou-se 1928 mg de cal hidratada no precoating para que a queda de pressão atingisse 20 mmH<sub>2</sub>O nos trinta ciclos feitos inicialmente, enquanto na duplicata foram necessários 1369 mg conforme ilustrado na Figura 43.

O primeiro ciclo de filtração dos trinta ciclos mostrou um período de filtração interna maior, o que deve ter resultado em uma penetração maior de partículas no interior do meio filtrante. Esse comportamento refletiu no desempenho dos próximos ciclos formando uma torta menos porosa, aumentando o tempo total de filtração para os trinta ciclos em relação ao primeiro ciclo da duplicata. O qual depositou uma menor quantidade nas fibras internas do meio filtrante formando uma torta mais compacta na superfície do meio filtrante, dificultando a remoção da torta o que levou a um menor tempo de filtração para os trinta ciclos de 157 min.

### 5.7.2 Ciclos de Filtração com Precoating Calcário Dolomítico

A Figura 44 apresenta os trinta ciclos para PE 550 utilizando calcário dolomítico como pó de precoating.

Figura 44 - Trinca ciclos de filtração com precoating de calcário



Os trinta ciclos foram realizados em um tempo de 745 minutos, em comparação com os trinta ciclos sem precoating, o precoating conferiu 492 min a mais na realização dos trinta ciclos no PE e 284 minutos a mais em comparação ao tempo obtido com o PE+PTFE.

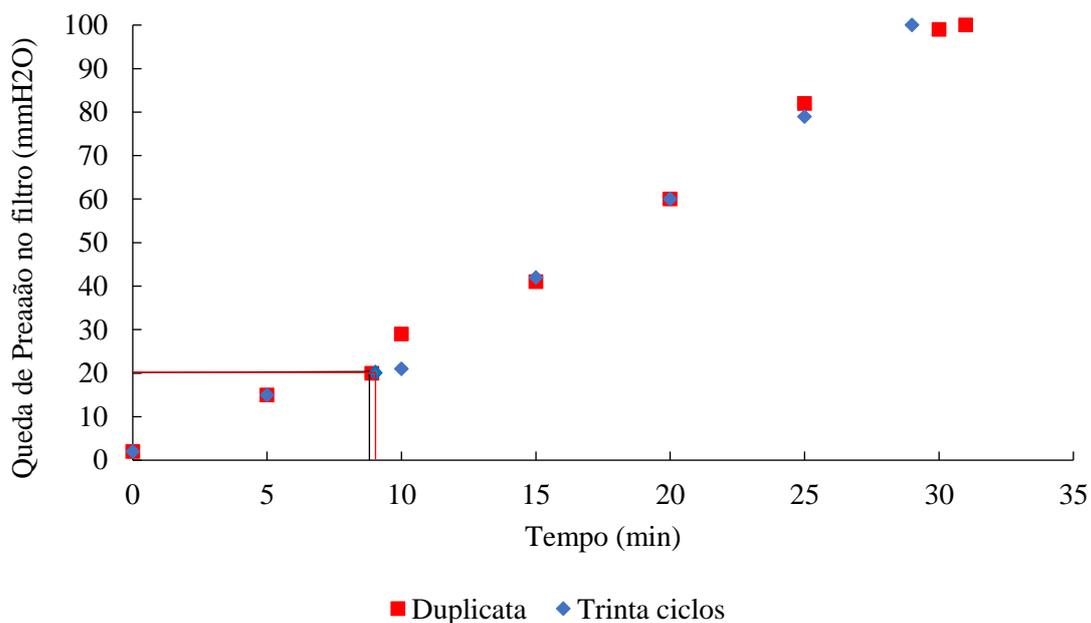
A duplicata dos trinta ciclos foi realizada em um tempo de 842 minutos devido a um vazamento. Em comparação com os trinta ciclos anteriores o vazamento propiciou um aumento de 97 minutos.

A queda de pressão inicial do meio filtrante para os primeiros trinta ciclos era de 2 mmH<sub>2</sub>O e no final dos trinta ciclos da queda de pressão residual foi de 5 mmH<sub>2</sub>O. Na duplicata, começou com 1 mmH<sub>2</sub>O e no final dos trinta ciclos, foi de 11 mmH<sub>2</sub>O.

A diferença no tempo total necessário para os trinta ciclos pode ser explicada por utilizar amostras diferentes de uma manga e pela falta de controle na alimentação. Além disso, o equipamento é muito suscetível à variações.

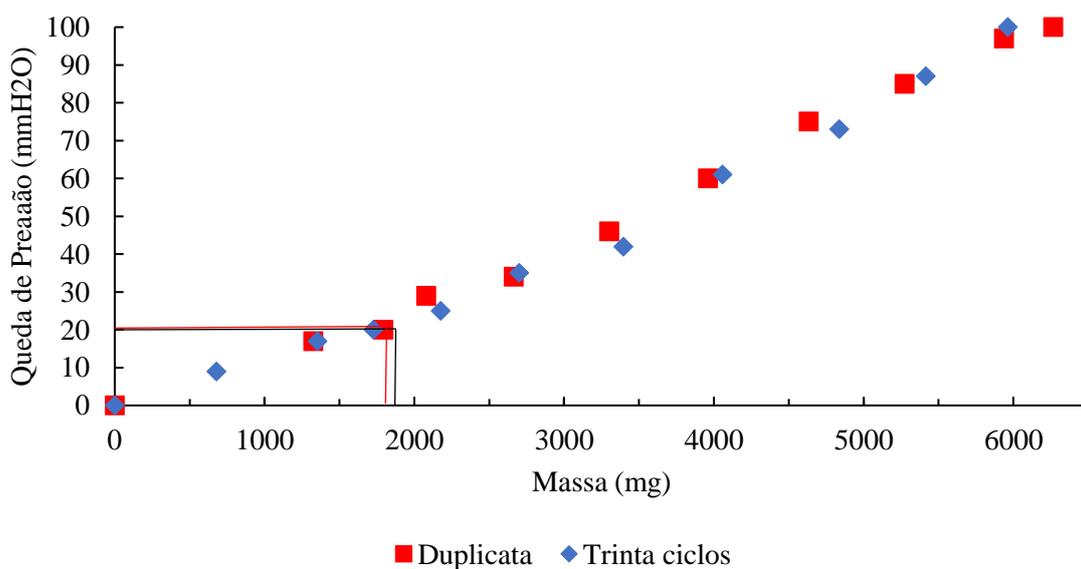
A Figura 45 ilustra queda de pressão em função do tempo no primeiro ciclo com a realização do precoating.

Figura 45 - Primeiro ciclo com o precoating de calcário



O precoating com a calcário dolomítico demorou 8 minutos e 30 segundos para atingir 20 mmH<sub>2</sub>O nos trinta ciclos feitos inicialmente. Enquanto na duplicata, a queda de pressão limite do precoating foi atingida após 8 minutos e 50 segundos do início da filtração.

Figura 46 - Primeiro ciclo com precoating em função da massa de calcário



Alimentou-se 1727 mg de cal hidratada no precoating para que a queda de pressão atingisse 20 mmH<sub>2</sub>O nos trinta ciclos feitos inicialmente, enquanto na duplicata foram necessários 1794 mg conforme ilustrado na Figura 46.

A duplicata do primeiro ciclo para o calcário foi semelhante, depositando praticamente a mesma quantidade de massa durante todo o período de filtração. No entanto, para os trinta ciclos, a duplicata levou um tempo maior de 97 minutos em relação ao primeiro teste. Isso mostra que qualquer variação que possa ocorrer durante os ciclos de filtração acarreta em aumento ou diminuição do tempo em cada período de filtração.

### **5.8 Comparação entre todos os trinta ciclos**

A Figura 47 ilustra todos os ciclos para facilitar o comparativo entre eles. A partir dela é possível observar que, conforme esperado, o PE apresentou menor tempo para realização dos trinta ciclos e o PE+PTFE tem um tempo maior devido à presença da membrana.

O menor tempo de ciclo do PE em relação aos demais deve ter ocorrido devido à uma maior compactação da torta, com maior entupimento dos poros já que o filtro não possui qualquer tipo de tratamento. O PE+PTFE teve um comportamento melhor que o PE, aumentando o tempo de ciclo em 208 minutos devido à membrana que tem como um dos objetivos aumentar o tempo de ciclo de filtração.

Nota-se que o PE com precoating foi bem melhor que o PE e PE+PTFE. Conferiu um aumento no tempo dos ciclos em comparação ao PE de 525 e 368 min para cal e, 492 min para o calcário. Ou seja, melhorou o desempenho da filtração, aumentando o tempo gasto em cada ciclo de filtração, e, portanto, o tempo total. É um resultado muito bom, pois apresenta maior rendimento para um meio filtrante muito mais barato.

Analisando os primeiros trinta ciclos com precoating, a cal conferiu 33 minutos a mais em relação ao calcário. Dada a diferença de tempo observada entre a cal hidratada e o calcário dolomítico, sugere-se que o calcário confere uma maior vida útil ao meio filtrante. Porém, devido à sensibilidade do sistema às variações dos parâmetros, isso não pode ser confirmado com os dados obtidos.

Os dados obtidos sugerem que o precoating é melhor que a membrana de PTFE, pois é mais barato e propicia um maior tempo de ciclo, o que confere uma maior vida útil ao meio filtrante devido ao menor número de limpezas necessárias.

As massas retidas nos filtros absolutos após os trinta ciclos realizados no meio filtrante PE com e sem precoating, estão dispostas na Tabela 17.

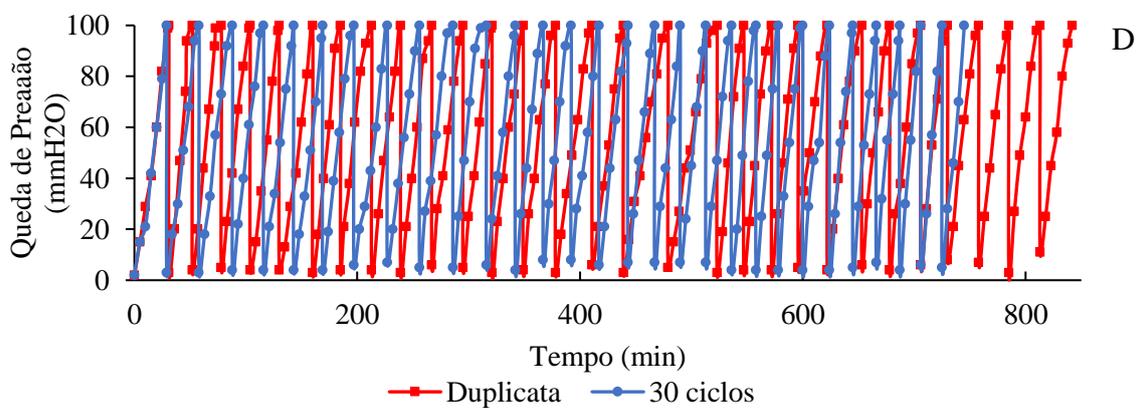
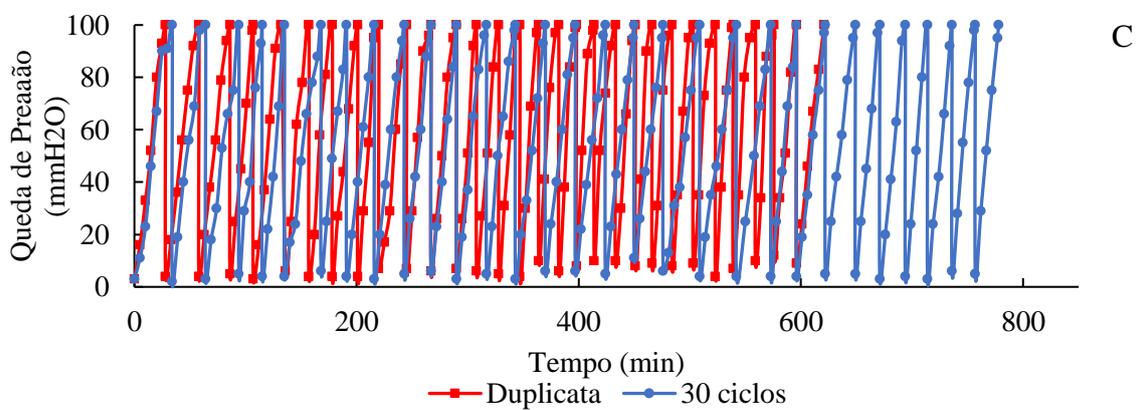
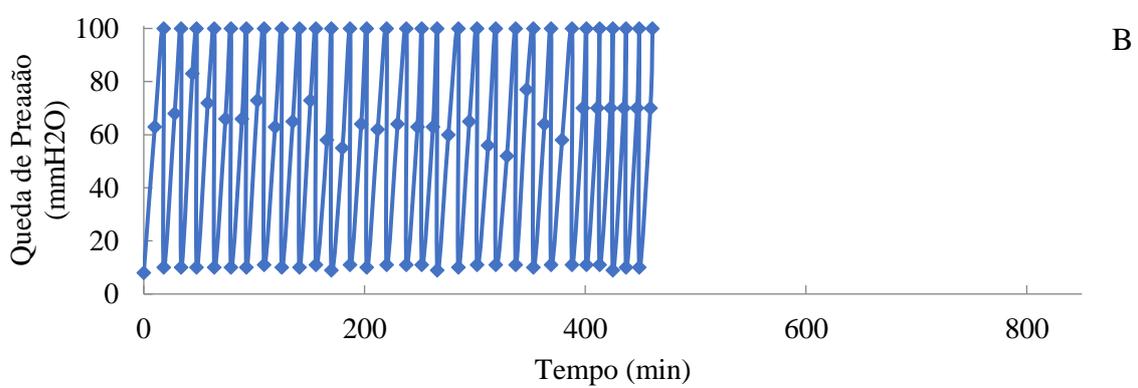
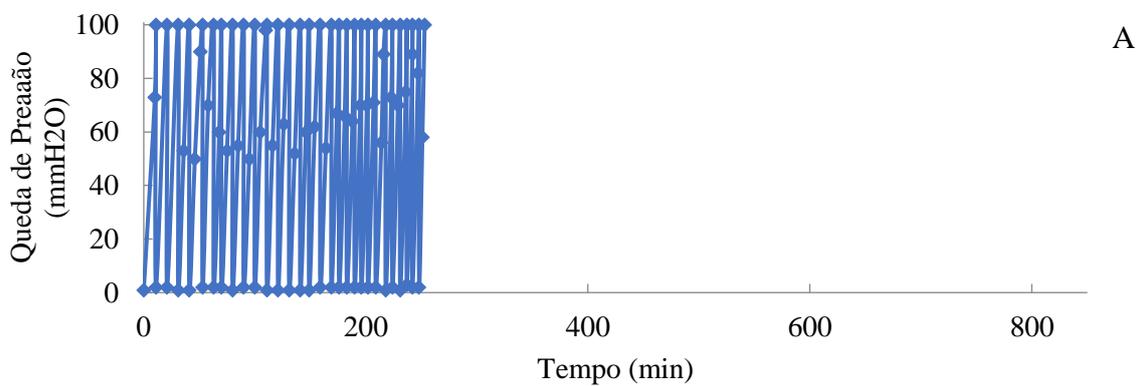
Tabela 17- Massa retida nos filtros absolutos do PE

| Trinta ciclos                      | Massa retida no filtro absoluto (g) |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| PE sem precoating                  | 0,3151                              |
| PE - Precoating cal                | 0,1272                              |
| PE - Precoating cal duplicata      | 0,0984                              |
| PE - Precoating calcário           | 0,0924                              |
| PE - Precoating calcário duplicata | 0,9677                              |

Observa-se que os filtros absolutos das filtrações com precoating apresentaram menor massa retida, três vezes menos, em relação à obtida no filtro absoluto quando não houve precoating. Logo, o precoating aumenta a eficiência de coleta do meio filtrante.

A massa retida no filtro absoluto para a duplicata do precoating com calcário foi muito superior as demais, 0,9677g, o devido ao vazamento.

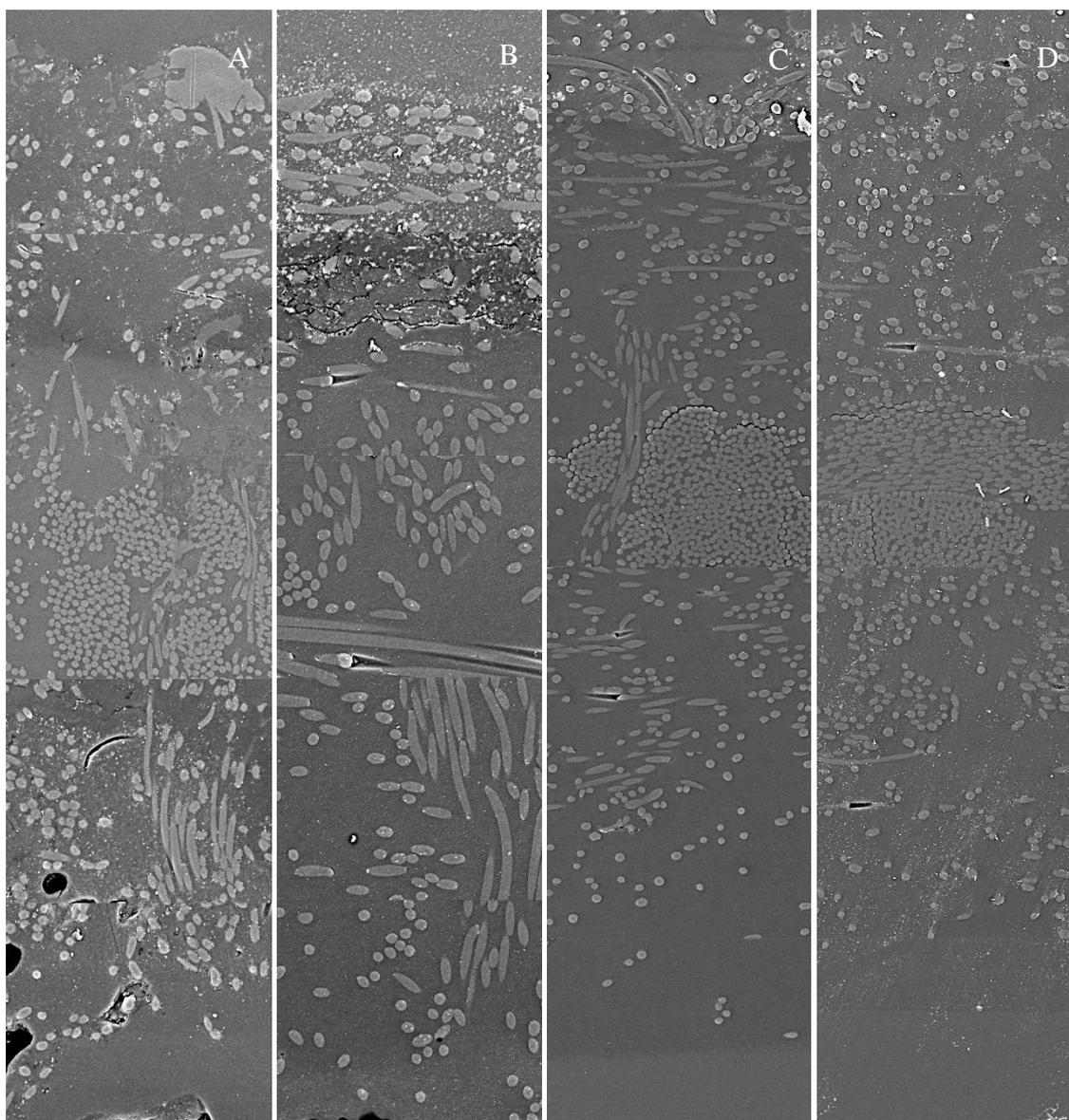
Figura 47 - Gráficos dos trinta ciclos comparativos: a) PE e pó de aciaria, b) PE+PTFE e pó de aciaria, c) PE e precoating de cal e d) PE e precoating de calcário



### 5.9 Determinação da penetração das partículas nos meios filtrantes após trinta ciclos

As imagens obtidas no MEV após os trinta ciclos de filtração conforme apresentado no item 4.11, foram posicionadas de forma a mostrar toda a seção transversal e estão dispostas abaixo.

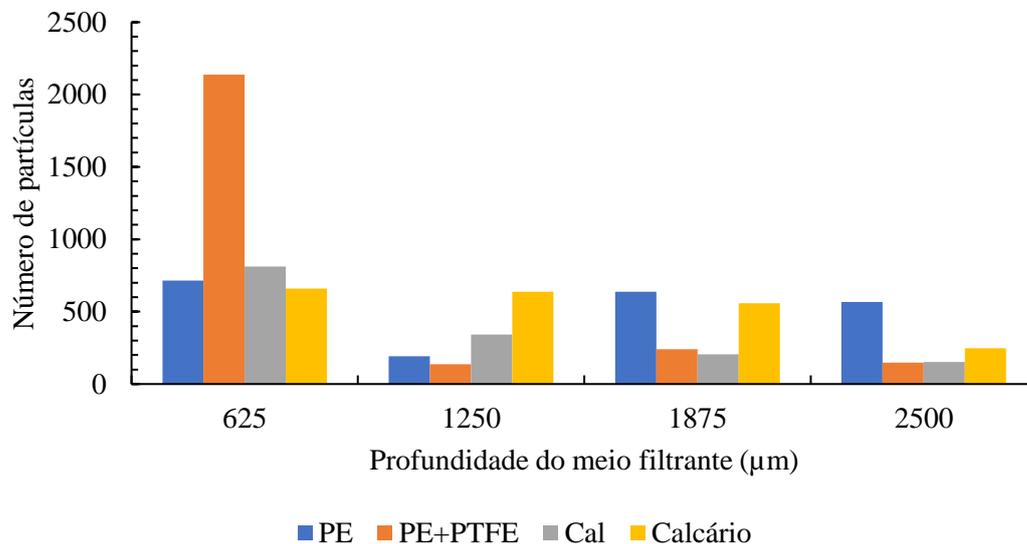
Figura 48 - Seções transversais dos meios filtrantes após os trinta ciclos: a) PE  
b) PE+PTFE c) Precoating cal d) Precoating calcário



Após a binarização destas foi possível a contagem do número de partículas que penetraram nos meios filtrantes conforme ilustrado na Figura 48. Devido à baixa qualidade das imagens a contagem foi dificultada.

O PE apresentou uma alta penetração das partículas, se mantendo praticamente constante no final do meio filtrante. O meio filtrante PE+PTFE apresentou maior número de partículas na superfície, sendo bem inferior na parte interna.

Figura 49 - Penetração das partículas ao longo da profundidade do meio filtrante



O meio filtrante com precoating de cal, apresentou maior número de partículas até 625 μm, diminuindo ao longo do filtro. Apresentou valores próximos aos obtidos com o PE+PTFE a partir de 1250 μm de profundidade. O mesmo aconteceu com o meio filtrante que recebeu calcário no precoating, porém apresentou uma maior penetração até 1875 μm.

### 5.10 Avaliação da eficiência de mangas sujas

Conforme item 4.12, foram extraídas duas amostragens (topo e fundo) de três mangas sujas, usadas por 38 meses na indústria siderúrgica, de três compartimentos diferentes (2,4 e 7) de um filtro de mangas. Estas amostras tiveram a eficiência de coleta para micropartículas analisadas na unidade da Figura 23.

A eficiência de coleta em função do diâmetro aerodinâmico para cada um dos compartimentos nas partes inicial e final de uma mesma manga estão ilustradas nas Figuras 50, 51 e 52.

Figura 50 - Eficiência de coleta do compartimento 2

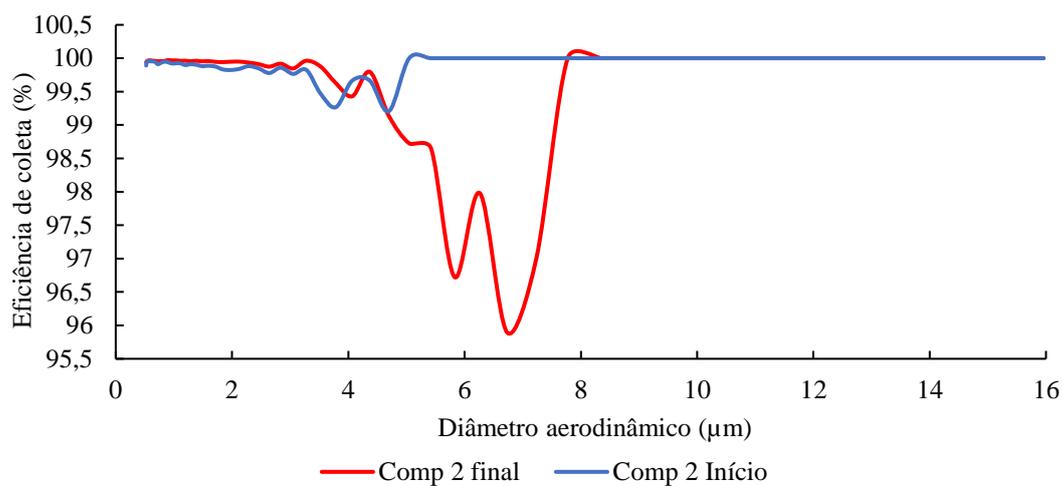


Figura 51 - Eficiência de coleta do compartimento 4

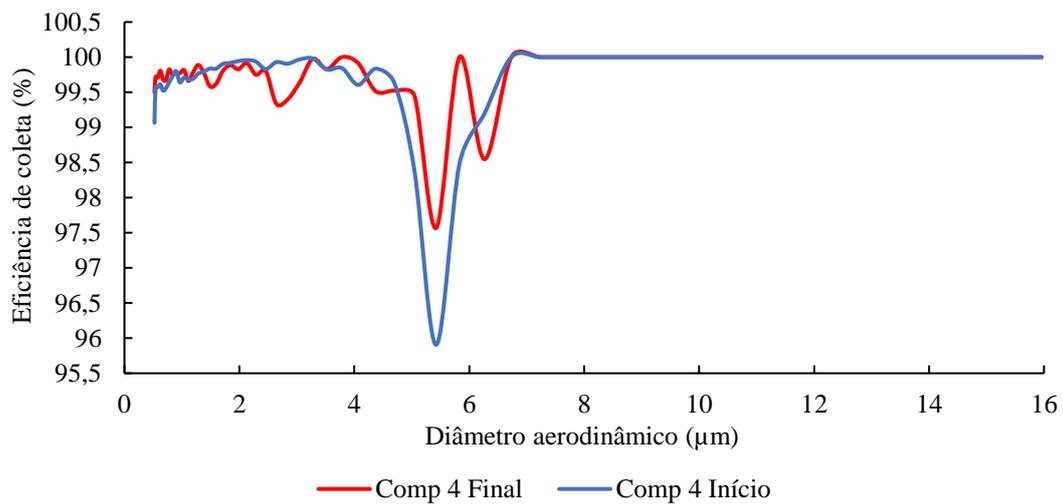
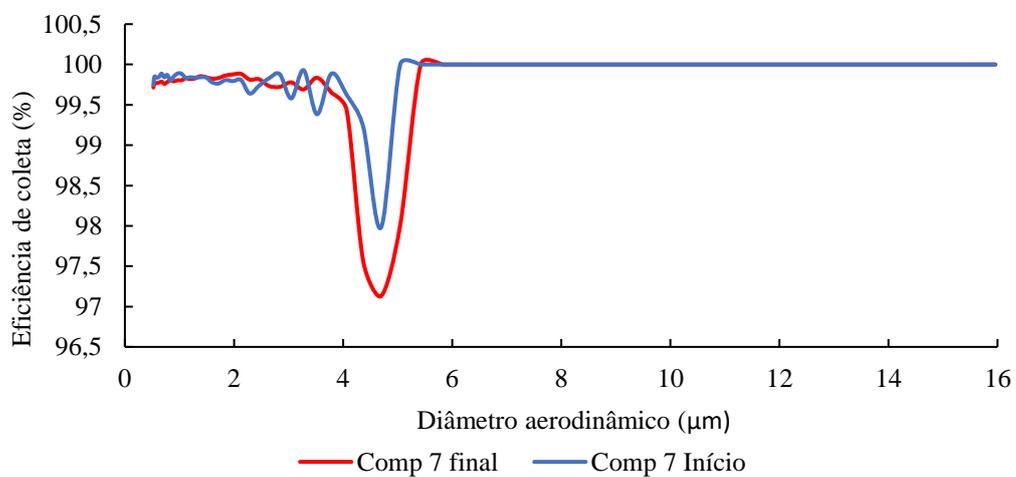


Figura 52 - Eficiência de coleta do compartimento 7



Para todos as amostras dos meios filtrantes sujos, há uma faixa de 4 a 8  $\mu\text{m}$  onde há uma queda da eficiência de coleta. Para os compartimentos 2 e 4, as amostras da parte final das mangas apresentaram maior queda na eficiência, enquanto no compartimento 4, a parte inicial da manga teve menor eficiência para a faixa anteriormente mencionada. Para material particulado com diâmetro superior à 8  $\mu\text{m}$  a eficiência de coleta foi de 100% em todas as amostras analisadas.

Comparando com os dados da Figura 30, nota-se uma queda da eficiência que no filtro virgem é 100% para quase toda faixa de diâmetro analisada.

## 6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados no capítulo 5, foi possível obter as conclusões abaixo.

O meio filtrante de poliéster com membrana de PTFE (PE+PTFE) apresentou o melhor resultado de eficiência de coleta para nanopartículas, se mantendo acima dos 90% para toda a faixa de diâmetro de 3 à 300nm.

Para a eficiência de coleta de micropartículas, os meios filtrantes com encapsulamento se mostraram mais eficientes para partículas menores do que 3 µm.

Nos ensaios de filtração até queda de pressão máxima de 100 mmH<sub>2</sub>O, o ciclo teve um tempo maior de duração ao utilizar o meio filtrante de poliéster com gramatura de 540 g/cm<sup>2</sup> (PE 540), seguido do meio filtrante PE+PTFE.

Em relação ao precoating, os testes de queda de pressão máxima indicaram alta eficiência de coleta, acima de 90%, a partir da queda de pressão máxima de 20 mmH<sub>2</sub>O, tanto para a cal hidratada quanto para o calcário dolomítico.

Para as misturas mássicas variando em 10, 30 e 50% em massa de cal hidratada e pó de aciaria para a realização do precoating, observou-se que quanto maior a proporção de cal hidratada no precoating, maior foi a eficiência de coleta do pó de aciaria e menor é a massa retida de material particulado no filtro absoluto.

Em relação às misturas mássicas variando em 10, 30 e 50% em massa de calcário dolomítico e pó de aciaria, notou-se que quanto maior a massa de calcário no precoating, maior foi a variação negativa da eficiência de coleta para uma faixa de 2 à 10 µm.

O meio filtrante com membrana de PTFE (PE+PTFE) fez os trinta ciclos de filtração com o pó de aciaria num tempo duas vezes maior que o obtido com o PE 550. Indicando que o PE+PTFE teria maior vida útil devido a menor necessidade de limpeza.

O precoating com cal conferiu um tempo 3 vezes maior, 368 à 525 min, na realização dos trinta ciclos com PE e 200 a 300 minutos a mais em comparação ao tempo obtido utilizando PE+PTFE.

Os trinta ciclos com o precoating de calcário tiveram um tempo 3 vezes maior, 549 min, na realização dos trinta ciclos no PE e de 284 minutos a mais em comparação ao tempo obtido com o PE+PTFE.

Tanto no precoating com a cal hidratada como com o calcário dolomítico, o tempo obtido na realização dos trinta ciclos foi superior ao obtido nos ciclos com PE+PTFE. Isto indica que o precoating confere maior vida útil ao meio filtrante devido à menor necessidade de limpeza, além disso, o precoating é um processo mais barato que adquirir meios filtrantes com membrana de PTFE.

O precoating conferiu um tempo três vezes maior na realização dos ciclos no PE sem precoating. E por volta de 300 à 400 minutos a mais aos obtidos nos trinta ciclos no PE+PTFE. Ou seja, o precoating aumenta o tempo de ciclos, diminuindo o número de limpezas, aumentando assim, a vida útil do tecido.

Além disso, os filtros absolutos das filtrações com precoating apresentaram menor massa retida, três vezes menos, em relação à obtida no filtro absoluto quando não houve precoating. Logo, o precoating aumenta a eficiência de coleta do meio filtrante do filtro sem tratamento.

Na determinação de penetração de partículas, o meio filtrante PE+PTFE apresentou maior número de partículas na superfície, sendo bem inferior na parte interna. O PE apresentou uma alta penetração das partículas, se mantendo praticamente constante no final do meio filtrante.

O meio filtrante com precoating de cal, apresentou maior número de partículas na superfície, diminuindo ao longo do filtro. O mesmo aconteceu com o meio filtrante que recebeu calcário no precoating, porém apresentou uma maior penetração até 1875  $\mu\text{m}$ .

Na avaliação de eficiência dos meios sujos, há uma faixa de 4 a 8  $\mu\text{m}$  onde há uma queda da eficiência de coleta. Para os compartimentos 2 e 7, as amostras da parte final das mangas apresentaram maior queda na eficiência, enquanto no compartimento 4, a parte inicial da manga teve menor eficiência para a faixa anteriormente mencionada. Para material particulado com diâmetro superior à 8  $\mu\text{m}$  a eficiência de coleta foi de 100% em todas as amostras analisadas.

## 7. REFERÊNCIAS

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

ASSUMPÇÃO, L.F.J. Sistema de Gestão Ambiental: Manual prático para implementação de SGA e Certificação de ISO 14.001. 3.ed. Curitiba: Juruá, 2006. p.204.

AZEVEDO, S. G. R. Estudo da Influência do Formato das Partículas na Operação de Filtração de Gases. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

BANDA, S. G. Desenvolvimento de uma metodologia experimental, para determinar a força de adesão entre partículas e uma superfície plana, utilizando a técnica centrífuga. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

BARNETT, T. Improving the performance of fabric filter dry dust collection equipment. *Filtration and Separation*, 28-32, 2000.

BARROS, P. M. de; Estudo de Força de Adesão de Tortas de Filtração de Gases em Diferentes Condições Operacionais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

BARROS, P. M. de; Avaliação do Desempenho de Meios Filtrantes Fibrosos na Remoção de Partículas Nanométricas. Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

BARROS, P. M.; TANABE, E. H.; AGUIAR, M. L. Performance of fibrous filters during nanoparticle cake formation. **Separation Science and Technology (Philadelphia)**, v. 51, n. 6, p. 1042–1052, 2016.

BERBNER, S.; PILZ, T. Characterization of the filtration and regeneration behaviour of rigid ceramic barrier filters at high temperatures. **Powder Technology**, v.86, p.103–111, 1996.

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

BUONICORE, A. J.; DAVIS, W. T.; Air Pollution Engineering Manual. p. 118-131. Air & Waste Management Association. Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.

CALLÉ, S.; CONTAL, P.; THOMAS, D.; BÉMER, D.; LECLERC, D. Evolutions of efficiency and pressure drop of filter media during clogging and cleaning cycles. **Powder Technology**, v. 128, n. 2–3, p. 213–217, 2002.

CARVALHO, M. V. A. de; Avaliação de meios filtrantes para filtro de mangas com sistema de limpeza de jato de ar pulsante do processo de despoeiramento secundário da aciaria de uma indústria siderúrgica. Dissertação de mestrado – UFSCar. São carlos-SP, 2018.

CAVASSENO, V. **Industrial air pollution engineering**. McGraw-Hill, 1980.

CHOI, K-J. Morfologia e eficiência de filtração de ar por materiais não trançados carregados. **Revista da Sociedade Brasileira de Controle e Contaminação**. p. SBCC 40-42, 2008.

CHI, H.; YU, L.; CHOI, J-H.; JI, Z. Optimization of Nozzle Design for Pulse Cleaning of Cleaning of Ceramic Filter. **Chinese Journal Of Chemical Engineering**, v. 16, p. 306-313, 2008.

CIRQUEIRA, S. S. R. Avaliação do desempenho dos ciclos de filtração e regeneração dos meios filtrantes com limpeza por pulso de ar reverso. dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos 2013.

CIRQUEIRA, S. S. R. Avaliação do Desempenho dos Tratamentos das Superfícies dos Meios Filtrantes submetidos à Filtração por Pulso de Ar Reverso. , p. 124, 2017.

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

CLARK, G. Design considerations of needlefelts used for air filtration applications. **The Journal of the Filtration Society**, v.01, 2001.

- COOPER, C.D. and Alley, F.C. (2011). *Air Pollution Control: A Design Approach*, 4th ed. Waveland Press, Long Grove.
- COURY, J. R. **Eletrostatic effects in granular bed filtration of gases**. [s.l.] University of Cambridge, 1983.
- DENNIS, R.; WILDER, J. E.; HARMON, D. L. Predicting pressure loss for pulse jet filters. **Journal of the Air Pollution Control Association**, v. 31, n. 9, p. 987–992, 1981.
- DONOVAN, R. P. **Fabric Filtration for Combustion Sources - Fundamentals and Basic Technology**. New York and Basel: Marcel Dekker, 1985.
- DULLIEN, F. A. L. **Introduction to industrial gás cleaning**. Academic Press, 1989.
- ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. **Chemical Engineering Progress**, v. 48, n. 2, p. 89–94, 1952.
- FARGNOLI, A. G. **Estudo da compressibilidade de tortas de filtração de gases em filtros de tecido**. Dissertação de Mestrado. Universidade federal de São carlos, São Carlos-SP, 2010.
- FELICETTI, M. A. Investigação da influência do tamanho das partículas de materiais pulverulentos sobre a força de adesão em diferentes substratos aplicando a Técnica Centrífuga Investigação da influência do tamanho das partículas de materiais pulverulentos sobre a força d. , p. 285, 2008.
- FORCHHEIMER. P. Wasserbewegung durch Boden. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieuer*, 45 edition, 1901
- Gäng P. Testing and selection of filter media for dedusting **Part 1: Standard laboratory tests** in acc. with VDI/DIN 3926, F & S Filtrieren und Separieren, International edition, no. 9/2009, p. 6-16
- HAJRA, M.G & MEHTA, K & CHASE, G.G. Effects of Humidity, Temperature, and Nanofibers on Drop Coalescence in Glass Fiber Media. *Separation and Purification Technology*. 30, p. 79-88, 2003. doi: 10.1016/S1383-5866(02)00134-X.
- HINDS, W. C. **Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles**. New York: John Wiley & Sons, 1982.

- HÖFLINGER, W. Habilitation Thesis, University of Vienna, 1991.
- HÖFLINGER, W. Fundamentals of the Compression Behavior of Dust Filter Cakes, Chapter 18. In: SPURNY, K. R. (Ed.). . **Advances in Aerosol Filtration**. 1. ed. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1998. p. 349–360.
- HUTTEN, I. M. **Handbook of Nonwoven Filter Media**. Kidlington: Elsevier Science & Technology Books, 2016.
- INNOCENTINI, M. D. M. Filtração de gases a altas temperaturas. 1997. 266p. Tese (Doutorado em Engenharia Química)-Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 1997.
- INNOCENTINI, M. D. M.; PARDO, A. R. F.; SALVINI, V. R.; PANDOLFELLI, V. C. How accurate is Darcy's law. **American Ceramic Society Bulletin**, p.64-68, Nov, 1999.
- IINOYA, K.; DENNIS, R. Industrial gas filtration. In MATTESON, M. J.; ORR, C. **Filtration: principles and practices**. 2<sup>a</sup>ed, New York: Dekker. p. 201-248, 1987.
- LEE, K. S.; SOHN, J. R.; PARK, Y. O. Filtration performance characteristics of ceramic candle filter based on inlet structure of high-temperature and high-pressure dust collectors. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 21, p. 101–110, 2015.
- LEITH, D.; ALLEN, R. W. K. Dust filtration by fabric filters. In: WAKMAN, R. J. **Progress in Filtration**. 9. ed. Elsevier, 1986. v.4, p.1-57.
- LORA, Electo Eduardo Silva. **Prevenção e controle da poluição nos setores energéticos, industrial e de transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.
- KANAOKA, C.; AMORNKITBAMRUNG, M. Effect of filter permeability on the release of capture dust from a rigid ceramic filter surface. **Powder Technology**, v.118, p.113-120, 2001.
- KOCH, M. Cake filtration modeling – Analytical cake filtration model and filter medium characterization. Thesis for the degree of philosophiae doctor. Faculty of Engineering Science and Technology. Department of Energy and Process Engineering, Trondheim, 2008.

MARTINS, Jaqueline Costa. **Estudo da deposição de material particulado no meio filtrante durante a filtração gás-sólido**. 2001. 164 f. Dissertação (Mestrado em Controle Ambiental) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

MIGUEL, A.F. Effect of air humidity on the evolution of permeability and performance of fibrous filter during loading with hygroscopic and nonhygroscopic particles. *Aerosol Science*, v.34, p.783-799, 2003.

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

MUKHOPADHYAY, A. Pulse-jet filtration: An effective way to control industrial pollution Part I: Theory, selection and design of pulse-jet filter. **Textile Progress**, v. 41, n. 4, p. 195–315, 2009. Disponível em:  
<<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00405160903437948>>.

MÜLLER, D. Desenvolvimentos de filtros cerâmicos fibrosos para gases a altas temperaturas. 12p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

OLIVEIRA, F. M. Estudo do efeito eletrostático na filtração de partículas de cimento em filtros de mangas. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

PARK, B. H.; KIM, S. B.; JO, Y. M.; LEE, M-H. Filtration Characteristics of Fine Particulate Matters in a PTFE/Glass Composite Bag Filter. **Aerosol and Air Quality Research**, v.12, p. 1030-1036, 2012.

PETEAN, P. G. da C. Determinação da força de adesão entre partícula e Superfícies rugosas através da técnica centrífuga. Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

RAVERT, E. Precoating new filters for better airflow, longer filter life. **Powder and Bulk Engineering**, 2005. Disponível em:  
<<http://www.clarcorindustrialair.com/Portals/38/Documents/industrial-filtration/articles/uas/filter-precoating-better-airflow-longer-life-uas-technical-article.pdf>> . .

ROCHA, S. M. S.; VASCONCELOS, C. B.; VIEIRA, L. G. M.; AGUIAR, M. L.; DAMASCENO, J. J. R. The Influence of the Velocity of Filtration in the Formation and Removal the Dust Cake. **Materials Science Forum**, v. 660–661, p. 46–51, 2010.

Disponível em: <<http://www.scientific.net/MSF.660-661.46>>. .

RODRIGUES, K. B. FILTRAÇÃO DE GASES : ESTUDO DA DEPOSIÇÃO DE MEIOS FILTRANTES. , 2006.

SALEEM, M.; KRAMMER, G.; KHAN, R. U.; TAHIR, M. S. Influence of operating parameters on cake formation in pilot scale pulse-jet bag filter. **Powder Technology**, v. 224, p. 28–35, 2012.

SALVINI, V.R.; INNOCENTINI, M.D.M.; PANDOLFELLI, V.C. Correlação entre permeabilidade e resistência mecânica de filtros cerâmicos no sistema Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC. *Cerâmica*, v.46, n. 298, mai/jun, 2000.

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

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

SCHILLER, S.; HELLMICH, C.; SCHMID, H.-J. Evaluation of the efficiency of filtration process using precoat materials. *Chemical Engineering Technology*, v. 39, n 3, p. 491-498, 2016.

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

SEVILLE, J. P. K.(Ed.). **Gas cleaning in demanding applications**. Blackie Academia and Professional. School of Chemical Engineering; The University of Birmingham, 1997.

SILVA, G. M. O. da, Desempenho de filtros cerâmicos na filtração de gases a altas temperaturas. Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

SILVA NETO, Olimpio Gomes de. **Estudo da porosidade de tortas em filtros de**

**manga operando na filtração de gases**. 2002. 180 f. Tese (Doutorado em Controle Ambiental) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

SIMON, X.; BÉMER, D.; CHAZELET, S.; THOMAS, D. Downstream particle puffs emitted during pulse-jet cleaning of a baghouse wood dust collector: Influence of operating conditions and filter surface treatment. **Powder Technology**, v. 261, p. 61–70, 2014.

SITAPE. Empresa de Engenharia do Ambiente. Disponível em:  
<<http://www.sitape.pt/Empresa.asp>> . Acesso em 29 de setembro de 2018.

SONG, C. B.; PARK, H. S. Analytic solutions for filtration of polydisperse aerosols in fibrous filter. **Powder Technology**, v. 170, p. 64-70, August. 2006.

STEFFENS, J.; COURRY, J. R. Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles: I – Homogeneous fiber. **Separation and Purification Technology**, v. 58, p. 99-105, 2007.

SUH, J.; LIM, Y.; ZHU, J. Influence of pulsing-air injection on pressure drop in a coke dust bagfilter. **Korean J. Chem. Eng.**, v.28, p. 613-619, 2011.

TANABE, H. E. Estudo do comportamento da deposição das partículas em diferentes meios filtrantes. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2008.

TANABE, E. H. Desempenho De Meios Filtrantes Na Filtração De Gases a Altas Alta Pressões. , p. 150, 2011.

TANABE, E. H.; BARROS, P. M.; RODRIGUES, K. B.; AGUIAR, M. L. Experimental investigation of deposition and removal of particles during gas filtration with various fabric filters. **Separation and Purification Technology**, v. 80, n. 2, p. 187–195, 2011.

TAKEUCHI, M. “Adhesion forces of charged particles” **Chemical Engineering Science**, pg. v.61:2279 – 2289, 2006.

THEODORE, L. **Air Pollution Control Equipment and Calculation**. 2008.

- TIENI, E. F. **Filtração de gases: estudo do fenômeno da limpeza por blocos**. 2005. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.
- TOGNETTI, E. R. Influência das condições operacionais na formação e remoção de tortas de filtração de gases. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2007.
- TURNER, J. H. et al. **Particulate Matter Controls**. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/ttnca1/dir1/cs6ch1.pdf>>. Acesso em: 1 set. 2018.
- TYKHONIUKA, R.; TOMASA, J.; LUDING, S.; KAPPLC, M.; HEIMC, L.; BUTTC, H. Ultrafine cohesive powders: From interparticle contacts to continuum Behaviour, *Chemical Engineering Science* 62, 2843 – 2864, (2007).
- VDI 3926: verificação de meios de filtros para filtros purificáveis: verificação padrão para avaliação comparativa de filtros purificáveis. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure - VDI, 2003. (Instruções VDI). [Título original: VDI 3926. Part 1: testing of filter media for cleanable filters Standard test for the evaluation of cleanable filter media].
- VOTORANTIM CIMENTOS S.A., Treinamento técnico operacional. Itaú de Minas-MG, 2014.
- WALSH, D. C. Recent advances in the understanding of fibrous filter behaviour under solid particle load. **Filtration and Separation**, v. 33, n. 06, 1996
- WALSH, D. C.; STENHOUSE, J. I. T.; SCURRAH, K. L.; GRAEF, A. The effect of solid and liquid aerosol particle loading on fibrous filter material performance. *Journal of Aerosol Science*, v. 27, suppl.1, p. 5617-618, 1996.
- 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**, v. 28, n. 2, p. 307–321, 1997.
- WANG, L. K.; WILLIFORD, C.; CHEN, W. Fabric Filtration. **Handbook of Environmental Engineering Volume 1: Air Pollution Control Engineering**. v. 1, p.59–95, 2004. New Jersey: Humana Press.
- WILDER, J.E., BILLINGS, C.E. Performance of fabric filtration systems. Second

International Clean Air Congress, 1970.

ZEVENHOVEN, R; KILPINEN,P. Particulates. In: Control of pollutants in flue gases and fuel gases. Finlândia, p. 5-33, 2004.