

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**PRECOATING APLICADO NOS MEIOS FILTRANTES PARA
AUMENTAR A EFICIÊNCIA DE COLETA DOS FILTROS MANGAS
DE UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA**

Renan Paulo Marques Alves Aranha

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos

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

São Carlos - SP

2020

BANCA EXAMINADORA

Orientador(a): Prof^a Dr^a Mônica Lopes Aguiar - DEQ/UFSCar

Convidado(a): Ma. Bárbara Karoline Silva Araújo Andrade - DEQ/UFSCar

Professor da Disciplina: Prof. Dr. Gustavo Dias - DEQ/UFSCar

Trabalho de Graduação apresentado no dia _____ de _____ de _____
perante a seguinte banca examinadora:

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e aos meus pais, Derci e Ivani.

A todos do grupo Controle Ambiental, carinhosamente chamado de Turma da Mônica, e em especial a Prof^a Dr^a Mônica por me conceder a oportunidade de aprender sobre essa área. A Bárbara e ao Max por me ensinarem e terem paciência para me orientar.

Também gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Gustavo por me orientar nessa etapa de conclusão, pelos ensinamentos e conselhos.

Ao pessoal do Apartamento 44, no qual passamos todo o período da faculdade aprendendo uns com os outros.

A todos os familiares por me apoiarem e concederem condições para estudar e ter as ferramentas necessárias para fazer o melhor.

RESUMO

É um equipamento muito utilizado nas indústrias para controlar a emissão de poluentes no ar é o filtro de mangas. Esse equipamento possui elevada eficiência para as partículas micrométricas e aplicação em diferentes tipos de processos, além de possuir baixo custo de operação. Para aumentar a eficiência de coleta de micropartículas (0,5 a 3 μm), algumas indústrias estão empregando o pré-revestimento ou *precoating*, para preencher os poros do meio filtrante com partículas, com a finalidade de melhorar o desempenho da filtração e prolongar a vida-útil da manga. Assim, o presente trabalho propôs estudar o efeito do *precoating* na eficiência de filtração, durante a filtração do pó da aciaria de uma indústria siderúrgica. Todos os materiais particulados utilizados, os *precoatings* e o pó da siderúrgica, foram caracterizados em relação à massa específica e o diâmetro médio volumétrico. Os ensaios, para avaliação da emissão de particulados, foram realizados utilizando um aparato experimental baseado na norma VDI 3926, cuja as condições operacionais considerada padrão diz respeito a uma velocidade de filtração de 2 m/min, a concentração de material particulado próximo ao filtro de 5000 g/L, o excesso de pressão no tanque de ar comprimido de 500 kPa e o tempo do pulso de ar de limpeza de 60 ms. Portanto, os ensaios mostraram que os meios filtrantes com o *precoating* obtiveram eficiência superior à membrana PTFE para partículas inferiores à 3 μm . Sendo o talco, o precoat, com o melhor desempenho. Além disso, a queda de pressão máxima de 20 mmH₂O obteve a eficiência de coleta próxima a 100% sem variações significativas para a faixa de diâmetro aerodinâmico estudado com 10% de mistura mássica de talco.

ABSTRACT

It is a device widely used in industries to control the emission of pollutants in the air and is the bag filter. This equipment has high efficiency for micrometric particles and application in different types of processes, in addition to having low operating costs. To increase the efficiency of collecting microparticles (0.5 to 3 μm), some industries are using pre-coating or pre-coating, to fill the pores of the filter medium with particles, in order to improve the filtration performance and prolong the sleeve life. Thus, the present work proposed to study the effect of pre-coating on the filtration efficiency, during the filtration of the powder from the steelworks of a steel industry. All the particulate materials used, the pre-coatings and the powder of the steel mill, were characterized in relation to the specific mass and the average volumetric diameter. The tests, for the evaluation of the emission of particulates, were carried out using an experimental apparatus based on the VDI 3926 standard, whose operational conditions considered standard refers to a filtration speed of 2 m / min, the concentration of particulate material close to the filter of 5000 g / L, the excess pressure in the 500 kPa compressed air tank and the cleaning air pulse time of 60 ms. Therefore, the tests showed that the filtering media with pre-coating achieved higher efficiency than the PTFE membrane for particles smaller than 3 μm . Talc, the precoat, with the best performance. In addition, the maximum pressure drop of 20 mmH₂O obtained a collection efficiency close to 100% without significant variations for the aerodynamic diameter range studied with 10% talc mass mixture.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 2.1 | Usina integrada | 5 |
| Figura 2.2 | Usina semi-integrada | 6 |
| Figura 2.3 | Determinação do ponto de colmatação | 8 |
| Figura 2.4 | <i>Precoating</i> sendo empregado ao meio filtrante. | 15 |
| Figura 3.1 | Aparato experimental para avaliação da emissão de particulados | 19 |
| Figura 3.2 | Unidade experimental para os ensaios de filtração - norma VDI 3926 | 19 |
| Figura 4.1 | Eficiência de coleta dos meios filtrantes para o pó da aciaria | 23 |
| Figura 4.2 | Eficiência de coleta variando a perda de carga limite do <i>precoating</i> para cal hidratado | 24 |
| Figura 4.3 | Eficiência de coleta variando a perda de carga limite do <i>precoating</i> para calcário dolomítico | 25 |
| Figura 4.4 | Eficiência de coleta variando a perda de carga limite do <i>precoating</i> para talco | 25 |
| Figura 4.5 | Misturas mássicas de <i>precoating</i> de cal | 26 |
| Figura 4.6 | Misturas mássicas de <i>precoating</i> de calcário dolomítico | 27 |
| Figura 4.7 | Misturas mássicas de <i>precoating</i> de talco | 27 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|--|----|
| Tabela 3.1 | Composição química do material pulverulento | 17 |
| Tabela 3.2 | Mistura mássicas | 20 |
| Tabela 4.1 | Distribuição volumétrica e Massa específica dos materiais particulados | 21 |
| Tabela 4.2 | Composição química dos precots em porcentagem mássica | 22 |
| Tabela 4.3 | Diâmetros médios e Porosidade dos meios filtrantes | 22 |

SUMÁRIO

| | |
|---|------------|
| Banca Examinadora | i |
| Dedicatória | ii |
| Agradecimentos | iii |
| Resumo | iv |
| Abstract | v |
| Lista de Figuras | vi |
| Lista de Tabelas e Quadros | vii |
| 1 – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS | 1 |
| 1.1 - Objetivos | 2 |
| 1.1.1 - Objetivos específicos | 3 |
| 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1 - Processo de fabricação do aço | 4 |
| 2.2 - Norma VDI 3926 | 6 |
| 2.3 - Teoria da filtração | 7 |
| 2.4 - Queda de pressão | 8 |
| 2.5 - Velocidade de filtração | 9 |
| 2.6 - Permeabilidade | 10 |
| 2.7 - Porosidade | 10 |
| 2.7.1 – Porosidade em meios filtrantes | 10 |
| 2.7.2 - Porosidade da torta de filtração | 11 |
| 2.8 - Eficiência de coleta | 12 |
| 2.9 - Filtro mangas | 13 |
| 2.10 - Meios filtrantes | 13 |

| | |
|---|-----------|
| 2.11 - Precoating | 14 |
| 3 – MATERIAIS E MÉTODOS | 16 |
| 3.1 - Caracterização dos materiais particulados para o <i>precoating</i> | 16 |
| 3.2 - Caracterização do material pulverulento proveniente da aciaria de uma indústria siderúrgica | 16 |
| 3.3 - Caracterização dos meios filtrantes | 17 |
| 3.4 - Filtração de ar | 18 |
| 3.5 - Unidades Experimentais | 18 |
| 3.6 - Queda de pressão máxima do <i>precoating</i> | 19 |
| 3.7 - Avaliação da mistura de pós de precoat na eficiência de filtração | 20 |
| 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO | 21 |
| 4.1 - Caracterização dos materiais particulados para o <i>precoating</i> e pulverulento | 21 |
| 4.2 - Caracterização dos meios filtrantes | 22 |
| 4.3 - Eficiência de coleta para micropartículas | 23 |
| 4.4 - Avaliação da mistura de pós de <i>precoating</i> na eficiência de filtração | 26 |
| 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES | 29 |
| 5.1 - CONCLUSÕES | 29 |
| 5.2 - SUGESTÕES | 29 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 30 |
| APÊNDICE A - Dados do talco para 10 mmH₂O | 34 |
| APÊNDICE B - Dados do talco para 20 mmH₂O | 36 |
| APÊNDICE C - Dados do talco para 30 mmH₂O | 38 |
| APÊNDICE D - Dados do <i>precoating</i> com 10% de talco | 40 |
| APÊNDICE E - Dados do <i>precoating</i> com 30% de talco | 42 |
| APÊNDICE F - Dados do <i>precoating</i> com 50% de talco | 44 |

1 - INTRODUÇÃO

A poluição do ar pode ser compreendida como a presença de substâncias provenientes de atividades humanas ou da natureza que colocam em risco a qualidade de vida dos seres vivos. Conforme a Organização Mundial de Saúde, o ar poluído desencadeia diversas consequências para o corpo, como: a diminuição da eficácia do sistema mucociliar das narinas, aumento dos sintomas de asma, infecções das vias aéreas superiores, incidência de câncer de pulmão e doenças cardiovasculares. As pessoas mais suscetíveis com doenças respiratórias são os idosos e as crianças (CARVALHO, 2018)

Com a elevada emissão de partículas na atmosfera pela ação antropogênica, estudos comprovam uma íntima relação com o aumento de doenças respiratórias como bronquite, alergias e asma que levam milhares de pessoas aos hospitais todos os anos. Isto é favorecido devido às partículas serem finas e ultrafinas possuindo maior capacidade de entrada no organismo através das vias respiratórias causando danos mais significativos (FERNANDES *et al.*, 2010). Algumas publicações como a de Maher *et al.* (2016), apontam que as nanopartículas podem causar doenças degenerativas no cérebro, como Alzheimer, doença mental e redução de inteligência.

Devido ao aumento da poluição do ar, que dependendo das condições climáticas podem ser ainda maiores, dos meios de fiscalização, com leis mais rígidas, e da pressão da população, as indústrias estão mudando seu comportamento buscando equipamentos mais eficientes na separação gás-sólido. Entre os equipamentos mais utilizados para alcançar tais exigências, os filtros de tecido (filtro de mangas) por vem ganhando destaque, devido a sua alta eficiência de remoção de partículas finas e ultrafinas, chegando a alcançar eficiências superiores a 99% dependendo do tamanho da partícula (CIRQUIERA 2017).

As formas mais primitivas da filtração datam de milhares de anos, desde quando os viajantes do deserto usavam tecidos para se protegerem de tempestades de areia. Mais recentemente, médicos usavam gaze para trabalhar com doenças infecciosas e operários de metalurgia usavam tecido para filtrar a poeira e a fumaça, atualmente, os trabalhadores que trabalham em ambientes insalubres utilizam mascarar com filtros (respiradores) (CHEREMISINOFF e YOUNG, 1977).

O processo de filtração é demasiadamente simples, consiste na passagem da corrente gasosa com material particulado por um meio filtrante. No qual a maior parte ficará retida enquanto que uma pequena parcela consegue atravessar o filtro. No decorrer da filtração forma-se na superfície do meio filtrante uma camada de pó, denominada de torta (AGUIAR, 1991), essa cama da de pó aumenta a eficiência de coleta à medida que vai aumentando a sua espessura. No entanto, a queda de pressão também vai aumentando até alcançar um valor limite, determinado previamente, e o filtro tem que ser limpo (CIRQUIERA 2017).

Os meios filtrantes são selecionados com base na eficiência de retenção das partículas, na queda de pressão, na formação da torta e na sua vida útil, operado nas condições de filtração. Segundo Perry (1999), a escolha do meio filtrante é normalmente a decisão mais importante para o sucesso da operação de filtração.

Sabendo da importância de se obter o melhor desempenho dos filtros de mangas, desenvolveu-se um pré-tratamento dos meios filtrantes que consiste em depositar sobre o tecido, ainda virgem, uma camada de material, chamado “precoat” a fim de minimizar a emissão de partículas finas. No entanto, existem poucos estudos que relatam a caracterização de pó utilizado no precoat, como: o diâmetro, a massa depositada no meio filtrante, a velocidade de escoamento e o tempo necessário para que o método seja o mais eficiente. Porque é importante que as partículas do pó de *precoating* possuam tamanho adequado para não causarem o entupimento da manga, além de garantir baixa queda de pressão e alta permeabilidade (ANDRADE, 2019).

Há no mercado o meio filtrante revestido com politetrafluoretileno - conhecido comercialmente como Teflon®, cuja a ideia é similar ao *precoating*, e atualmente esse revestimento consegue atender as necessidades das empresas frente às leis estabelecidas. Entretanto, o meio filtrante com Teflon® possui custo relativamente alto, assim uma alternativa menos onerosa é o *precoating*. Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo realizar uma avaliação da eficiência de coleta do *precoating* na faixa de diâmetro aerodinâmico de 1 a 16 µm, utilizando um equipamento baseado na norma VDI 3926, com os seguintes materiais particulados: Talco, Cal Virgem e Calcário Dolomítico.

OBJETIVOS

Este trabalho tem por finalidade avaliar a eficiência do *precoating* no filtro de mangas durante a filtração de gases.

Objetivos específicos

Como objetivos específicos tem-se:

- Caracterizar os meios filtrantes virgens;
- Caracterizar os materiais particulados utilizados n *precoating*;
- Comparar o desempenho dos meios filtrantes em termos de eficiência de coleta de partículas submetidos aos diferentes *precoatings*;
- Avaliar a eficiência de coleta variando-se a porcentagem mássica do material particulado usado como *precoating*.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir são discorridos os conceitos básicos do processo de filtração de gases, os principais parâmetros envolvidos no processo de filtração, o filtro de mangas, os meios filtrantes, o *precoating*, o processo de fabricação do aço e a Norma VDI 3926.

2.1 - PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO AÇO

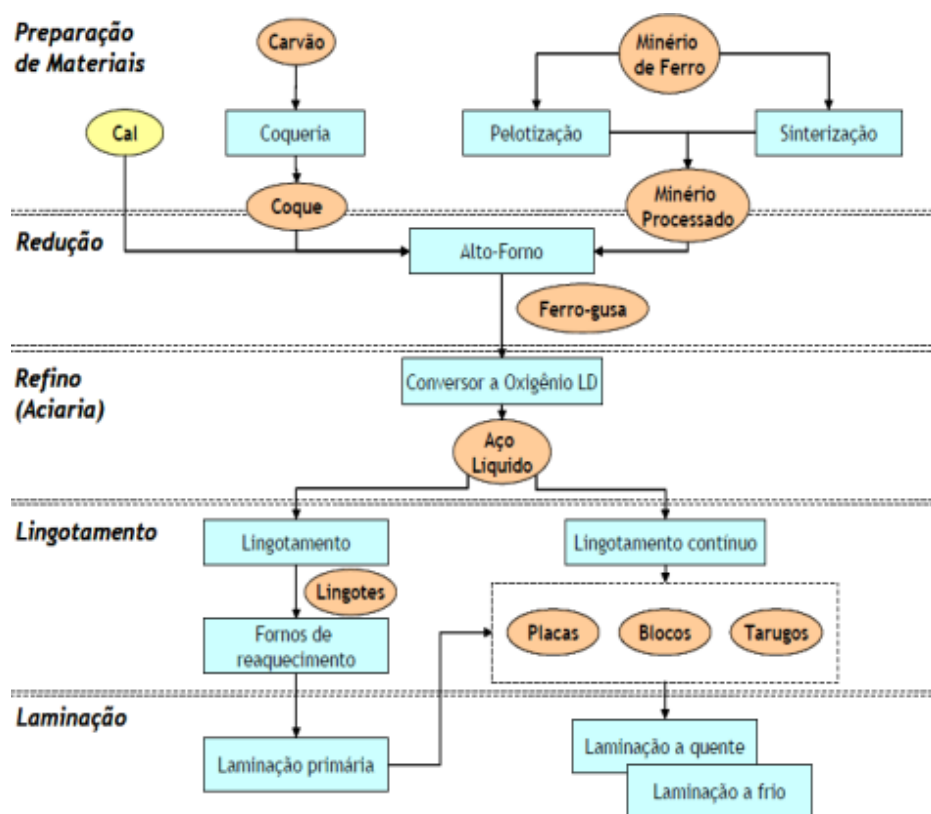
O aço é formado por uma liga de ferro e carbono, cujas as matérias-primas são os óxidos de ferro e o carvão mineral ou vegetal, respectivamente. Na siderurgia há várias etapas até o produto final. Primeiramente tem-se a preparação dos materiais, principalmente o minério de ferro e o carvão. Posteriormente, há a aglomeração do minério, com o intuito de dar uma conformação a carga metálica que alimenta os altos-fornos, tal aglomeração dá-se pela sinterização ou pelletização. Paralelamente, o carvão é transformado em coque metalúrgico nas coqueiras. Em seguida, o ferro é separado do minério, por um processo de redução, cuja as rotas para esse procedimento são: alto-forno, redução direta e fusão redutora. Contudo, a rota por redução via alto-forno abrange mais de 90% do ferro metálico produzido. Já pelo processo de fusão redutora, não há necessidade das instalações de coqueificação e sinterização ou pelletização, empregando diretamente o carvão mineral e o minério de ferro. Dessa forma, o ferro gusa é refinado nas aciarias, na qual é obtido o aço. As aciarias podem ser: por conversor a oxigênio e por forno elétrico a arco. Por fim, as tem-se o lingotamento e a laminação do aço (EPE, 2009).

Nas indústrias siderúrgicas as emissões atmosféricas são constituídas principalmente de material particulado, óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre, óxidos de carbono, metais pesados, compostos orgânicos voláteis, entre outros em menores proporções. As emissões atmosféricas são oriundas das seguintes fontes: transporte e estocagem das matérias-primas, carvão e minério, tráfego de veículo; preparação do carvão na coqueira, seja carregamento, coqueificação, desenformamento e produção de vapor; sinterização, máquina de sínter; alto-forno, sopro e aquecimento do ar; aciaria e lingotamento (CAVALCANTI, 2012).

As usinas siderúrgicas estão divididas em duas rotas tecnológicas: usinas integradas e semi-integradas. A primeira emprega a redução do minério de ferro via alto-forno juntamente com a alimentação do coque gerado pelo carvão mineral, assim, o ferro gusa é transformado em aço na aciaria, através de um forno a oxigênio. Já as usinas semi-integradas são operacionalizadas a partir das etapas de refino, lingotamento e laminação. (EPE, 2009)

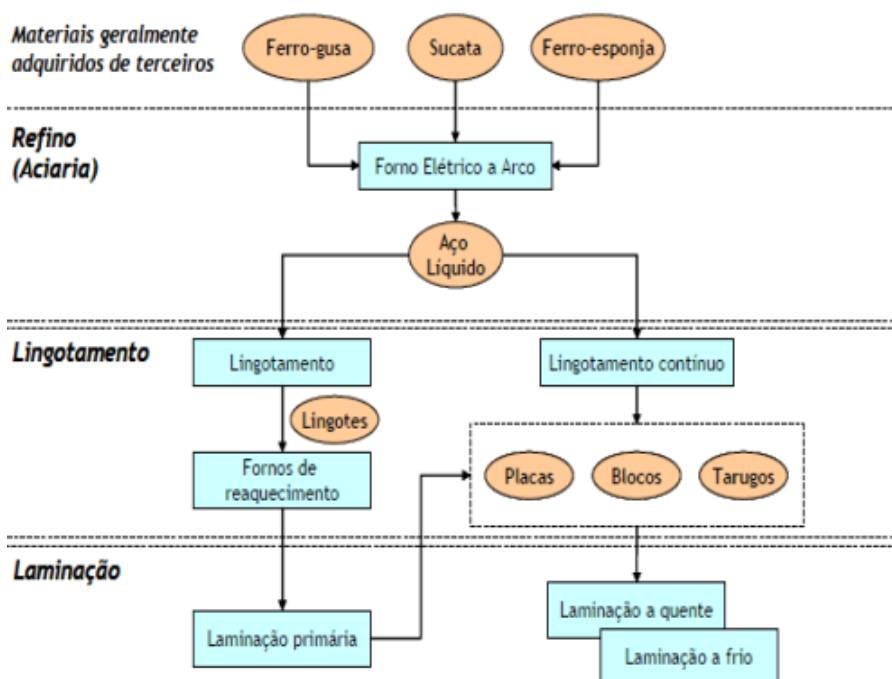
Na Figura 2.1 é apresentada o esquema de uma indústria integrada, uma única unidade industrial, com as etapas de redução, refino e transformação do aço. Na Figura 2.2 é ilustrado o esquema de uma usina semi-integrada, na qual parte-se de fontes de ferro pré-reduzidas e/ou sucatas, fornecida por terceiros.

Figura 2.1 – Usina integrada.



Fonte: EPE (2009)

Figura 2.2 - Usina semi-integrada



Fonte: EPE (2009)

2.2 - NORMA VDI 3926

Com a necessidade de melhor prever o comportamento durante o processo de filtração com filtros mangas, a VDI 3926 visa aprimorar os métodos de caracterização e classificação dos filtros. Sendo um método padrão para testes de longos prazos considerando a filtração e o procedimento de limpeza. A norma estabelece modelos de filtros laboratoriais para serem usados nos testes, assim como, as condições operacionais (GÄNG, 2009).

As condições operacionais considerado padrão pela norma diz respeito a uma velocidade de filtração de 2 m/min, a concentração de material particulado próximo ao filtro de 5000 g/L, o excesso de pressão no tanque de ar comprimido de 500 kPa e o tempo do pulso de ar de limpeza de 60 ms (GÄNG, 2009).

2.3 - TEORIA DA FILTRAÇÃO

A filtração pode ser compreendida como uma operação unitária de separação de um material particulado presente em uma corrente gasosa através de um meio poroso, denominado meio filtrante, que é responsável pela coleta das partículas permitindo somente a passagem do fluido “limpo”. É um dos equipamentos de limpeza de gases mais antigos, que continua sendo ainda muito utilizado, devido a sua alta eficiência, baixo custo operacional e de fácil manuseio (AGUIAR, 1991)

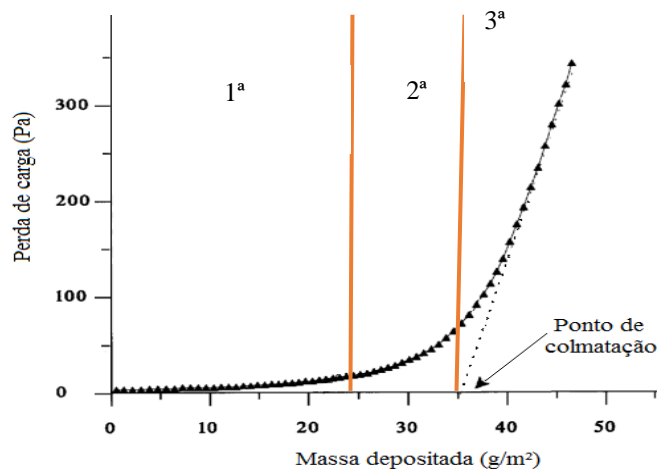
O processo de filtração pode ocorrer em três etapas: filtração de profundidade, formação dos dendritos e filtração superficial, uma representação esquemática dessas etapas pode ser visualizada na Figura 2.3. Na primeira etapa de filtração, denominada filtração interna ou de profundidade, é aquela que acontece no interior do meio filtrante, onde as fibras são as responsáveis pela captura das partículas, a queda de pressão, nessa fase, pode aumentar lentamente, dependendo da porosidade e da permeabilidade do filtro, e, portanto, dos mecanismos de coleta. Nessa fase pode apresentar um comportamento linear em função da massa coletada. Dependendo das características do meio filtrante esta fase pode apresentar maior ou menor duração. (ROCHA, 2010; WALSH, 1996; SONG, 2006).

Na segunda etapa, que pode ser representada como uma área de transição, na qual há a formação dos dendritos, que são estruturas formadas pela aglomeração de partículas no interior do meio filtrante, que passam a agir como novos coletores, dando início à formação da torta. Finalizando, na terceira etapa, a torta de filtração passa a atuar como um novo meio filtrante, contribuindo para a retenção de partículas menores, aumentando a espessura da torta. A queda de pressão nesta fase aumenta linearmente com a massa de material particulado depositada até alcançar a queda de pressão máxima (ROCHA, 2010; WALSH, 1996; SONG, 2006).

O momento exato de formação da torta de filtração de gases é difícil de ser obtido, porque os meios filtrantes geralmente não apresentam características uniformes. Alguns autores adotam um valor experimental para obter o ponto em que a torta começa a se formar, denominado de ponto de colmatação. Walsh (1996) propôs um método que é possível encontrar o ponto de transição entre a filtração interna e a filtração superficial, pelo prolongamento da parte linear da curva ao eixo das abcissas a partir da curva de queda de pressão em função da massa acumulada, esse ponto que é chamado de ponto de colmatação

ou ponto de saturação do filtro, conforme apresentado na Figura 2.3. citado por RODRIGUES, 2006; WALSH, 1996.

Figura 2.3: Determinação do ponto de colmatação.



Fonte: Adaptado de (WALSH; STENHOUSE, 1997)

2.4 - QUEDA DE PRESSÃO

A queda de pressão é dada pela diferença entre a pressão de entrada e a pressão de saída do filtro. Ou então como a soma da queda de pressão do meio filtrante com a queda de pressão proporcionado pela torta, conforme é demonstrado na equação:

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_{torta} \quad (1)$$

A queda de pressão do meio filtrante e da torta é dada, respectivamente, por:

$$\Delta P_0 = K_1 V_f \quad (2)$$

$$\Delta P_{torta} = \frac{K_2 V_f M}{A} \quad (3)$$

Em que A corresponde a área superficial de filtração, M a massa depositada sobre o meio filtrante, V_f é a velocidade de filtração e K_1 e K_2 são as constantes de resistência específica do filtro e da torta, respectivamente.

A filtração acontece até chegar a uma queda de pressão máxima, geralmente entre 100 a 150 mmH₂O. Após alcançado esse valor ocorre a limpeza do meio filtrante. Depois da limpeza há a permanência de partículas no interior do filtro resultando em uma queda de pressão maior do que a inicial, denominada queda de pressão residual (CIRQUEIRA, 2013).

2.5 - VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO

Velocidade superficial de filtração (V_f) é aquela verificada na interface do tecido. Esta diretamente ligada com a área efetiva de filtração (A) e a vazão de escoamento (Q), como demonstrado na equação:

$$V_f = \frac{Q}{A} \quad (4)$$

Quanto menor a área de filtração maior será a velocidade de filtração para que o fluido atravesse o meio filtrante. Portanto, é um parâmetro importante para o dimensionamento do filtro e determinação da potência requerida na operação de filtração que interfere diretamente no custo de equipamento (DONOVAN, 1985).

Altas velocidades de filtração reduzem o tamanho da área filtrante, entretanto aumenta a potência requerida pelo soprador e conseqüentemente aumenta o custo do processo, além de diminuir o tempo de vida das mangas outro fator que eleva os custos de operação. Por outro lado, baixas velocidades de filtração reduzem a potência requerida, no entanto exigem maiores áreas de filtração, necessitando de grandes espaços para a colocação dos filtros (DONOVAN, 1985).

Vários parâmetros de filtração são influenciados pela velocidade, assim como a queda de pressão do filtro, o tempo de filtração está intimamente ligado com os valores de velocidade de filtração, para velocidades altas o tempo diminui e para baixas velocidades de

filtração maior será o tempo de filtração. No primeiro caso as partículas penetram mais no tecido o que ocasionará uma menor eficiência na limpeza e assim maior perda de carga residual. No segundo caso a remoção das partículas será mais eficiente pois a interação partícula-tecido será menor. Outros aspectos relevantes são a compactação da torta de filtração e a porosidade da torta de filtração, que alteram a vida-útil das mangas, com altas velocidades de filtração o tempo de filtração será menor, devido a maior compactação da torta e diminuição da porosidade, que dificulta o escoamento do ar, aumentando a queda de pressão, logo, mais ciclos serão necessários aumentando o desgaste das mangas (DONOVAN, 1985).

2.6 - PERMEABILIDADE

A permeabilidade além de ser descrita pelo fluido em escoamento, leva em consideração as características do filtro, pois é este que interage com o fluido. A permeabilidade diz respeito a resistência ao escoamento provocado pelo meio filtrante (BARROS, 2014; INNOCENTINI, 1997).

Na maioria das vezes ela pode ser representada pela equação de Darcy:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{V_f \mu}{K_p} \quad (5)$$

Sendo que ΔP é a perda de carga, L é a espessura do meio, V_f é a velocidade de filtração, μ é a viscosidade cinemática do gás e K_p é o coeficiente de permeabilidade de Darcy (INNOCENTINI, SEPULVEDA e ORTEGA, 2005; TANABE 2011). Na equação de Darcy apenas os efeitos viscosos são considerados.

2.7 - POROSIDADE

2.7.1 - Porosidade em meios filtrantes

Esse importante parâmetro mede a quantidade de vazios no meio filtrante, pois quanto maior for a porosidade mais partículas serão depositadas no interior do meio filtrante. A queda de pressão relaciona-se com a porosidade, de modo que quanto menor a porosidade maior será a perda de carga oferecida (CIRQUEIRA, 2013).

A equação de Ergun (1952) é uma ótima aproximação para a determinação do valor da porosidade média da torta e é descrita pela seguinte expressão:

$$\frac{\Delta P}{L_T} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu V_f}{d_p^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_g V_f^2}{d_p} \quad (6)$$

Sendo L_T a espessura da torta, ε a porosidade, μ a sua viscosidade, V_f a velocidade de filtração, d_p o diâmetro médio de Sauter da partícula e ρ_g a densidade do gás.

2.7.2 - Porosidade da torta de filtração

De modo análogo ao definido na porosidade do meio filtrante, a porosidade da torta de filtração determina a quantidade de espaços vazios na torta e está relacionada com o número de contatos partícula-partícula, e conseqüentemente, com a resistência de um aglomerado. (CIRQUEIRA, 2013).

A porosidade da torta de filtração é uma propriedade estrutural muito importante, pois tanto a queda de pressão no filtro durante a operação de filtração quanto à força de ruptura necessária para remover a torta deposita no meio filtrante são dependentes deste parâmetro. Entretanto, devido a grande fragilidade da camada de material particulado, é extremamente difícil obter este parâmetro experimentalmente. São encontrados na literatura, dois métodos que são atualmente utilizados para a determinação da porosidade da torta de filtração de gases, o método indireto e o direto (CIRQUEIRA, 2013).

Para o método indireto a porosidade pode ser estimada através de equações encontradas na literatura. Dentre elas pode-se citar a equação de Ergun (1952), que foi apontada por Aguiar (1995) como a relação que melhor representa o valor da porosidade real da torta, quando a queda de pressão e a espessura da torta são fatores conhecidos. No entanto, como o valor da espessura da torta é um valor difícil de obter, a equação de Ergun (equação

5) pode ser modificada definindo-se a vazão mássica como (AGUIAR, 1995 e COURY, 1983):

$$M = Q t = L_T A \rho_p (1 - \varepsilon) \quad (7)$$

Em que M é a massa de partículas depositada na superfície de área A da torta em um determinado tempo de filtração t, Q é a vazão mássica de partículas e ρ_p é a densidade da partícula.

Substituindo a equação de (6) na (5), obtém-se a espessura da torta por meio da queda de pressão e o tempo

$$\frac{\Delta P}{t} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{Q \mu V_f}{A \rho_p d_p^2} + 1,75 \cdot \frac{1}{\varepsilon^3} \cdot \frac{Q \rho_g V_f^2}{A \rho_p d_p} \quad (8)$$

Pelo método direto, analisam-se imagens geradas pela Microscopia Eletrônica de Varredura que passam por um tratamento no software *Image Pro Plus*, de tal forma a destacar as partículas possibilitando a determinação da porosidade por meio da relação entre a área de vazios (não-destacada) e a área total (AGUIAR, M. L.; COURY, J. R, 1995).

2.8 - EFICIÊNCIA DE COLETA

A eficiência de coleta é quantidade de material particulado no qual o filtro é capaz de reter, podendo ser calculada pela equação:

$$E = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100\% \quad (9)$$

Sendo C_i e C_f são, respectivamente, a concentração de partículas antes e após o filtro medidas pelo contador. As concentrações antes e após o filtro são lidas por meio do contador

de partículas, assim os valores de eficiência serão calculados para diferentes faixas de diâmetro aerodinâmico (BARROS, 2014). Através desta metodologia, é calculado um valor de eficiência para cada faixa de diâmetro aerodinâmico.

2.9 - FILTRO DE MANGAS

Registros datam que a primeira patente sobre filtro de mangas foi em 1852, quando S. T. Jones realizou um projeto para recuperação do particulado de óxido de zinco. A partir da década de 80, empresas passaram a utilizar filtros com milhares de mangas nas indústrias de fundição. Pela segurança fornecida, o filtro de mangas, é comumente utilizado no meio industrial, é considerado também como um separador de alta eficiência e de fácil operação. O filtro de mangas emprega tecidos como meio filtrantes e é capaz de recolher partículas resultantes dos mais diversos segmentos da indústria, como, por exemplo: cimento, cerâmica, gesso, siderúrgica, mineração e muitos outros (ROCHA, 2010).

A filtração no filtro de mangas ocorre pela passagem do gás carregado por partículas através das mangas. O material particulado que fica retido na superfície das mangas e nos poros das fibras constitui a torta responsável pela filtração. Ao se atingir a queda de pressão máxima permitida, a torta deverá ser removida. O filtro de mangas quando bem projetado, pode alcançar eficiência de coleta de aproximadamente 99,9%, para material particulado com tamanho superior a 1 μ m (ROCHA, 2010). Um ótimo desempenho das mangas depende da qualidade dos meios filtrantes escolhidos para a confecção das mangas.

2.10 - MEIOS FILTRANTES

Devido a necessidade de operar em situações críticas, novas fibras foram desenvolvidas para que houvesse o controle apropriado da emissão de particulados. As fibras constituem a estrutura básica dos filtros e têm origem na natureza ou em processos industrializados. Já os tecidos empregados nos processos industriais são: tecidos trançados e não trançados (DONOVAN, 1985; ROCHA, 2010).

Os tecidos trançados são utilizados quando o gás flui de dentro para fora das mangas. De acordo com a ABNT/TB-392, um tecido trançado é uma estrutura produzida pelo

entrelaçamento de um conjunto de fios de trama formando um ângulo de (ou próximo de) 90°, sendo que sua estrutura básica é o urdume, conjunto de fios que estão dispostos longitudinalmente (ROCHA, 2010).

Os tecidos não trançados são mais adequados quando o sistema de limpeza é realizado por jato pulsante. Esse tipo de tecido possui uma vida útil mais longa, entretanto oferece maior resistência ao escoamento do gás do que os tecidos trançados. A estrutura do tecido não trançado é plana, flexível e porosa, constituída de um véu ou manta de fios cujas fibras podem ser orientadas numa direção ou depositadas ao acaso e consolidado por vias mecânicas, químicas ou térmicas (DONAVAN, 1985; ROCHA, 2010).

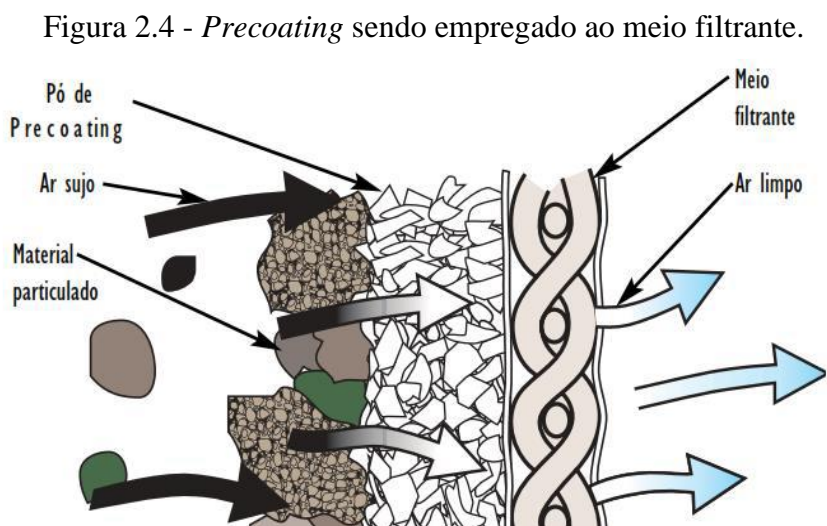
Para se atingir elevadas eficiências as características dos tecidos de filtração têm influência marcante, pois é onde acontece a coleta do material particulado e a remoção desse durante a operação de limpeza. Na escolha do meio filtrante deve-se considerar a compatibilidade com o pó a ser coletado e as particularidades da operação de filtração: temperatura, abrasão, propriedades da filtração, resistência a ácidos, álcalis e oxigênio, o custo relativo do material e o tipo de limpeza (ROCHA, 2010).

2.11 – PRECOATING

Conforme é abordado por Ravert (2005), em muitos processos de filtração de ar industrial utiliza-se o *precoating* ou o pré-revestimento. Este procedimento visa preencher os poros do tecido, de modo que a filtração predominante seja a superficial. Os fabricantes de meios filtrantes garantem que melhora o desempenho da filtração enquanto prolonga a vida útil do filtro e potencialmente fornece enorme economia de custos quanto ao tempo de substituição das mangas do filtro e de mão-de-obra. No entanto, não se sabe qual o melhor pó e sua granulometria é capaz de maximizar esta eficiência. Além do que, se realmente, tendo essas partículas na superfície do tecido, o pré-revestimento melhora a eficiência de coleta de material particulado já no início do processo de filtração. A Figura 2.4 ilustra o meio filtrante submetido ao *precoating*.

Pode-se destacar também, com a evolução dos meios filtrantes, o revestimento com nanofibras, pois com a emissão de partículas finas e ultrafinas surge a necessidade de procedimentos que consiga retê-las cada vez mais com maior eficiência possível (próximo a 100%). Há uma crescente preocupação quanto aos efeitos adversos causados por esse

material particulado à saúde pública, devido à capacidade destas nanopartículas depositar-se em áreas profundas do trato respiratório até mesmo na corrente sanguínea, causando danos irreversíveis a saúde da população exposta a essas partículas finas (MAHER *et. al*, 2016).



Fonte: Adaptado de Ravert (2005)

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir são apresentados os materiais e a unidade experimental para a realização dos experimentos. A metodologia se divide em caracterização dos materiais pulverulentos e dos meios filtrantes, os ensaios de filtração e os cálculos de eficiência de filtração.

3.1 - Caracterização dos materiais particulados para o *precoating*

Foram analisados os precoats com os seguintes materiais: Talco, Calcário Dolomítico e Cal Hidratada. Para cada material de precoat será obtido os seguintes dados:

- Massa específica por picnometria a hélio no equipamento AccuPyc 1330 Micrometrics - Laboratório de Controle Ambiental do DEQ/UFSCar;
- Distribuição granulométrica e diâmetro médio volumétrico pelo equipamento Malvern Mastersizer Microplus – DEQ/UFSCar.
- Composição química por fluorescência de raio X (XRF)

Os materiais particulados Calcário Dolomítico e Cal Hidratada estão caracterizados no trabalho de Andrade (2019). O Talco foi escolhido neste estudo por ser um material com particularidades diferentes e por estar disponível no laboratório.

3.2 - Caracterização do material pulverulento proveniente da aciaria de uma indústria siderúrgica

De acordo com Carvalho (2018) o material pulverulento é proveniente de uma indústria siderúrgica, no qual foi obtido das câmaras do filtro de mangas do despoeiramento secundário da aciaria. A massa específica foi determinada por picnometria a hélio por meio do equipamento AccuPyc 1330 Micrometrics presente no Laboratório de Controle Ambiental do DEQ/UFSCar, cuja a massa específica obtida foi de $3,4179 \pm 0,0043 \text{ g/cm}^3$.

A distribuição granulométrica por volume foi determinada pelo equipamento Malvern Mastersizer Microplus, empregando-se a técnica de difração a laser, cuja a distribuição granulométrica foi a seguinte:

- $D(v, 0,1) = 0,38 \pm 0,01 \mu\text{m}$;
- $D(v, 0,5) = 19,50 \pm 0,13 \mu\text{m}$;
- $D(v, 0,9) = 117,52 \pm 18,93 \mu\text{m}$

A composição química do material pulverulento é ilustrada na Tabela 3.1 na qual foi determinada pelo método de fluorescência de raio-X (XRF) no LCE/Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da UFSCar. Todavia, para complementar esse método foi necessário calcular a quantidade de carbono através da combustão direta no CCDM/DEMa da UFSCar.

Tabela 3.1 – Composição química do material pulverulento

| Composição química | % em massa |
|--------------------------------|------------|
| CaO | 51,20 |
| Fe ₂ O ₃ | 43,23 |
| C | 2,84 |
| Al ₂ O ₃ | 1,94 |
| SiO ₂ | 0,79 |

Fonte: CARVALHO (2018)

Para mais informações tal material está caracterizado no trabalho de Carvalho (2018).

3.3 - Caracterização dos meios filtrantes

O diâmetro médio das fibras fora determinado pelo software *Image Pro Plus*. Embasado no método de Bortolassi, Guerra e Aguiar (2017), Andrade (2019) calculou as médias dos diâmetros das fibras do PE e do PE+PTFE.

Inicialmente, utilizou-se os filtros de tecido de poliéster (PE). Com esse filtro foi feito ensaios de filtração sem o carregamento de pó, ou seja, meio filtrante virgem. O ensaio consistiu em ajustar a entrada de ar através da válvula, registrando a queda de pressão no meio filtrante em função da velocidade de filtração, no qual ao aplicar a Equação 6

determinou-se o parâmetro que mede a quantidade de vazios no filtro, a porosidade (ϵ). De modo análogo, fez-se para o meio filtrante com PTFE.

A eficiência de coleta dos filtros PE e PE+PTFE virgens e após o filtro PE submetido ao *precoating* foi dada pelas concentrações de pó de aciaria de uma indústria siderúrgica antes e após o filtro que foram lidas por meio do contador de partículas – vide Figura 3.1 – assim, a eficiência no qual o filtro foi capaz de reter, obteve-se pela Equação 9 para as diferentes faixas de diâmetro aerodinâmico.

3.4 - Filtração de ar

Inicialmente serão analisados os meios filtrantes de poliéster (PE) e poliéster com Teflon® - (PE + PTFE). Para isso, as filtrações com o pó de aciaria de uma indústria siderúrgica foram realizadas no equipamento VDI 3926, com a finalidade de analisar a eficiência do teflon no meio filtrante. Posteriormente, os ensaios empregaram o precoat de talco para o tratamento da superfície do meio filtrante de poliéster com o intuito de verificar a necessidade do *precoating* e as melhores condições para tal.

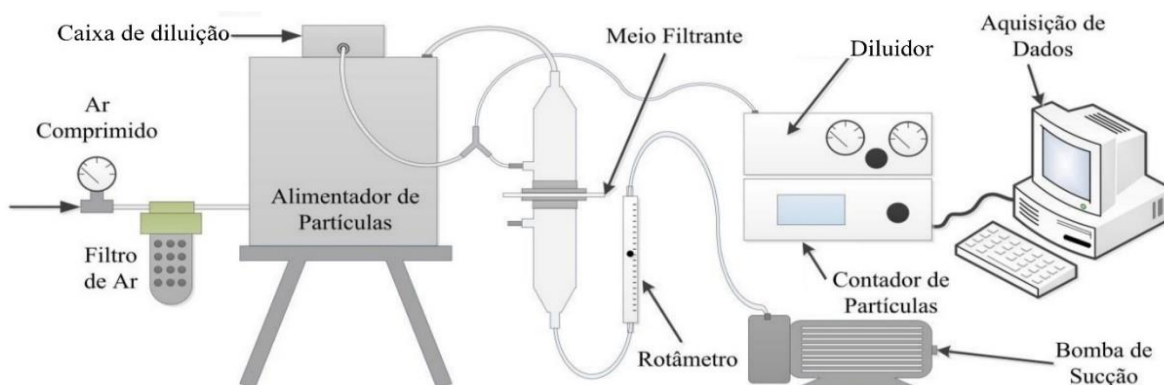
Em seguida, iniciou-se o processo de filtração com o pó de aciaria de uma indústria siderúrgica até a queda de pressão máxima de 100 mmH₂O. Com os resultados, foram obtidas as eficiências médias para cada filtro do processo, calculadas pela Equação 9.

3.5- Unidades Experimentais

A Figura 3.1 mostra o aparato experimental a ser utilizado para cálculo de eficiência para micropartículas. A unidade consistiu de um sistema de geração e controle de umidade do ar, sistema de dispersão do pó, carregador e contador de partículas, suporte de filtração, equipamentos de medida e sistema de aquisição de dados.

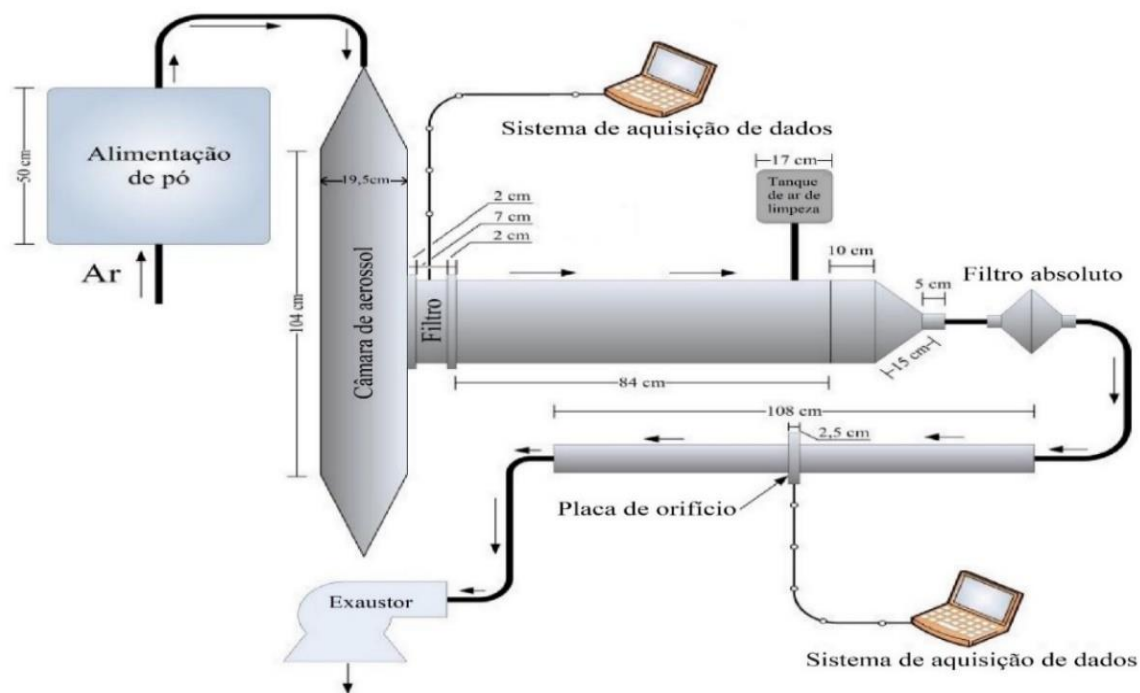
A Figura 3.2 apresenta o equipamento que ocorreram os ensaios para a realização do *precoating*. Tal equipamento segue as condições da norma VDI 3926.

Figura 3.1 - Aparato experimental para avaliação da emissão de particulados.



Fonte: Adaptado de Cirqueira (2017)

Figura 3.2 - Unidade experimental para os ensaios de filtração - norma VDI 3926.



Fonte: Adaptado de CIRQUEIRA; TANABE; AGUIAR, 2017

3.6 - Queda de pressão máxima do precoating

Desenvolveu-se o *precoating* no equipamento apresentado na Figura 3.2 variando as perdas de carga máxima, os valores de perda de carga máximas adotados foram 10, 20 e 30

mmH₂O em meios filtrantes virgens de PE. O pó de *precoating* empregado foi o talco, sendo a razão ar-pano de 2 m/min.

Posteriormente, os meios filtrantes com a perda de carga delimitada foram levados ao equipamento apresentado na Figura 3.1. Assim, as filtrações com o pó de aciaria foram acompanhadas para a análise da eficiência de coleta para micropartículas, de forma a determinar a partir de qual queda de pressão obterá alta eficiência de coleta.

3.7 - Avaliação da mistura de pós de precoat na eficiência de filtração

A fim de analisar a influência da massa do material particulado do precoat durante a filtração, realizou-se três misturas mássicas, apresentada na Tabela 3.2, entre o talco e pó de aciaria. As porcentagens mássicas foram variadas entre 10, 30 e 50%, cujo o objetivo foi analisar o comportamento da eficiência de coleta com as diferentes quantidades de massa de precoat.

Tabela 3.2 – Mistura mássicas

| Misturas mássicas |
|-------------------------|
| Aciaria + 10 % de talco |
| Aciaria + 30 % de talco |
| Aciaria + 50 % de talco |

Fonte: Acervo Pessoal.

O *precoating* foi aplicado com quatro materiais particulados: apenas talco e cada uma das três misturas mássicas.

As filtrações com o *precoating* ocorreram na unidade experimental apresentada na Figura 3.1, o meio filtrante empregado foi o PE. A alimentação de pó de *precoating* ocorreu até o momento em que a queda de pressão atingiu 20 mmH₂O conforme abordado por Andrade (2019), posteriormente, ocorreu a alimentação com o pó de aciaria. Desenvolveu-se as filtrações para três coletas de dados sobre a eficiência em função do diâmetro aerodinâmico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Caracterização dos materiais particulados para o *precoating* e pulverulento

Os valores de massa específica e do diâmetro mediano volumétrico dos materiais particulados utilizados no *precoating* e na filtração estão apresentados no Quadro 4.1 sendo os dados referentes a Cal hidratada e Calcário dolomítico foram obtidos por Andrade (2019).

Tabela 4.1 – Distribuição volumétrica e Massa específica dos materiais particulados

| Distribuição | Cal hidratada | Calcário Dolomítico | Talco |
|-----------------------------|----------------------|----------------------------|---------------------|
| D (v, 0,1) μm | $0,423 \pm 0,006$ | $0,49 \pm 0,04$ | $6,52 \pm 0,02$ |
| D (v, 0,5) μm | $22,18 \pm 0,87$ | $27,9 \pm 0,81$ | $25,09 \pm 0,09$ |
| D (v, 0,9) μm | $99,15 \pm 9,93$ | $128,27 \pm 5,16$ | $56,72 \pm 0,55$ |
| ρ (g/cm ³) | $2,7742 \pm 0,0014$ | $2,8422 \pm 0,0010$ | $3,0061 \pm 0,0012$ |

Fonte: Adaptado de Andrade (2019)

Observa-se na Tabela 4.1 que os pós do *precoating* como o pó da aciaria apresentam uma distribuição bastante polidispersa. O pó da aciaria apresenta um diâmetro mediano menor (19,5 μm) que os pós utilizados no *precoating* (de 22 a 28 μm).

A Tabela 4.2 mostra os principais componentes químicos dos materiais particulados e suas respectivas porcentagem mássica. Os dados referentes a cal hidratada e o calcário dolomítico são apresentados por Andrade (2019), nos quais estes pós apresentam composição química semelhante, contudo, o precoat com o material particulado de talco apresenta em maior quantidade o componente Silício, ao invés do Cálcio como observa-se para a cal hidratada e o calcário dolomítico.

Tabela 4.2 – Composição química dos precoat em porcentagem mássica

| Cal hidratada | | Calcário dolomítico | | Talco | |
|----------------------|-------|----------------------------|-------|------------------|-------|
| Composto Químico | % | Composto Químico | % | Composto Químico | % |
| Ca | 89,89 | Ca | 76,98 | Si | 72,68 |
| Mg | 6,46 | Mg | 13,66 | Mg | 25,12 |
| Si | 2,46 | Si | 3,06 | Al | 1,31 |
| Fe | 0,43 | Fe | 2,58 | Fe | 0,79 |
| Al | 0,3 | Al | 1,84 | Ca | 0,05 |

Fonte: Adaptado de Andrade (2019)

4.2 - Caracterização dos meios filtrantes

Os dados referentes aos diâmetros médios das fibras e da porosidade dos meios filtrantes estão apresentados no Quadro 2 e foram obtidos por Andrade (2019).

Tabela 4.3 - Diâmetros médios e Porosidade dos meios filtrantes

| Meio Filtrante | Diâmetro médio das fibras (μm) | Porosidade |
|---------------------------------|---|--------------------|
| PE 550 g/cm ² | 14,90 \pm 3,9 | 0,883 \pm 0,0026 |
| PE + PTFE 550 g/cm ² | 5,10 \pm 5,7 | 0,999 \pm 0,013 |

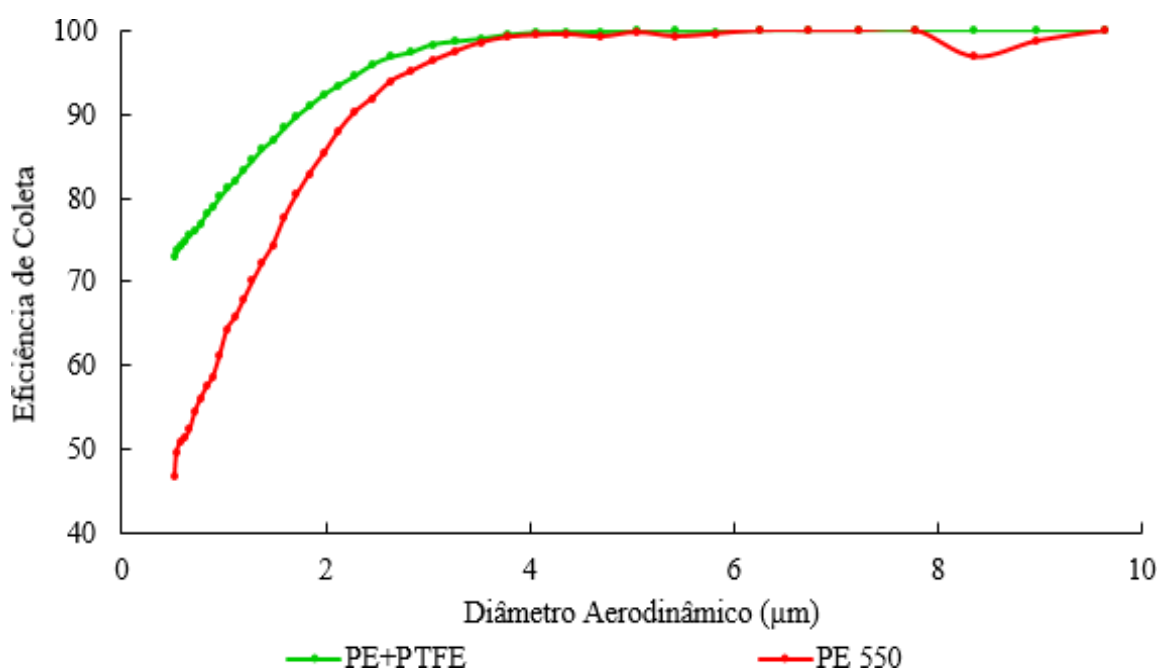
Fonte: Adaptado de Andrade (2019)

Observa-se na Tabela 4.3 que a porosidade do meio filtrante de poliéster com membrana de PTFE foi maior que a de poliéster sem a membrana. Isto já era esperado, uma vez que as fibras com membrana de PTFE apresentam diâmetros menores que as de poliéster.

As eficiências de coleta em função do diâmetro aerodinâmico para micropartículas são apresentadas na Figura 4.1. Comparando o meio filtrante com a membrana de PTFE com o de poliéster de mesma gramatura, verifica-se que a membrana foi responsável por um

aumento significativo na eficiência de coleta para partículas com diâmetro inferior a 3 μm , mesmo apresentando uma porosidade maior. Esse comportamento também foi verificado no trabalho Bortolassi, Guerra & Aguiar (2015), que observaram que as partículas tenderam a se depositar mais facilmente nas fibras de menores diâmetros e Podgórski, Balazy & Gradón (2006) avaliaram um meio filtrante convencional e cinco filtros com nanofibras e os resultados dos experimentos confirmaram que meios filtrantes contendo nanofibras possuem maiores eficiências de filtração.

Figura 4.1- Eficiência de coleta dos meios filtrantes para o pó da aciaria



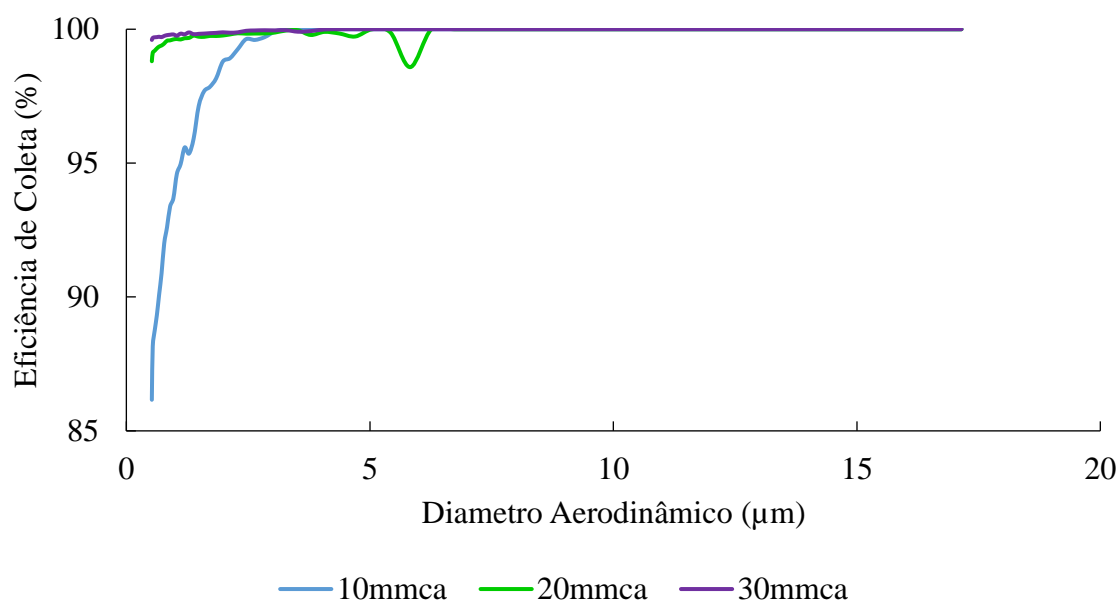
Fonte: Adaptado de Andrade (2019)

4.3 - Eficiência de coleta para micropartículas

As Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 ilustram as eficiências de coleta para o meio filtrante de poliéster após o *precoating* com a cal hidratada e o calcário dolomítico obtidas do trabalho de Andrade (2019) e o talco, respectivamente, variando a perda de carga limite do processo de *precoating*. Observa-se na Figura 4.1, com o pó de *precoating* da cal hidratada, que a eficiência ficou próxima de 100%, para partículas acima de 4 μm para todas as camadas de *precoating* aplicadas, sendo que para partículas abaixo de 3 μm a eficiência para camada de 10 mmH_2O foi diminuindo até chegar em 85 %. Já para o *precoating* com o calcário

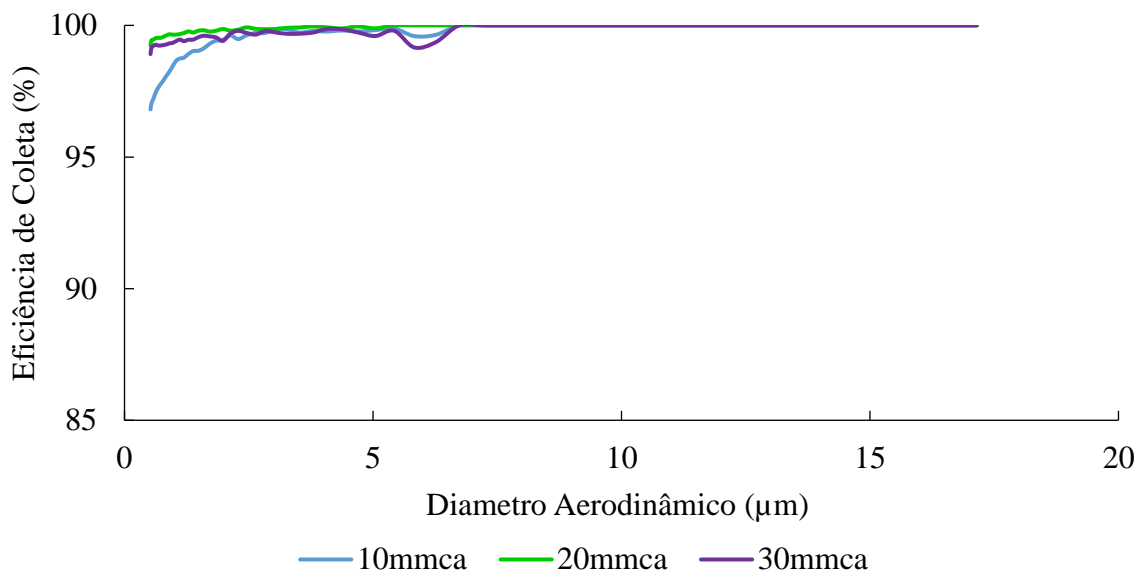
dolomítico (Figura 4.2) a eficiência ficou acima de 96% para todas as camadas de *precoating*, para os diâmetros variando de 0 a 20 μm , sendo que para a camada de 10 mmH₂O teve o pior desempenho para partículas menores que 3 μm . Entretanto, para o *precoating* de talco, a eficiência de coleta ficou muito próxima a 100% independente da camada de talco aplicada na superfície do meio filtrante, apresentando a melhor performance. Portanto, dependendo do material particulado utilizado no *precoating* não é necessário aplicar camadas mais espessas desse pó, uma fina camada de *precoating* já é o suficiente para aumentar a eficiência de coleta para partículas superfinas. Verifica-se também que a composição química e física da partícula deve ser analisada antes de se escolher o pó do *precoating* a ser utilizado na filtração de filtros de mangas.

Figura 4.2 – Eficiência de coleta variando a perda de carga limite do *precoating* para cal hidratada.



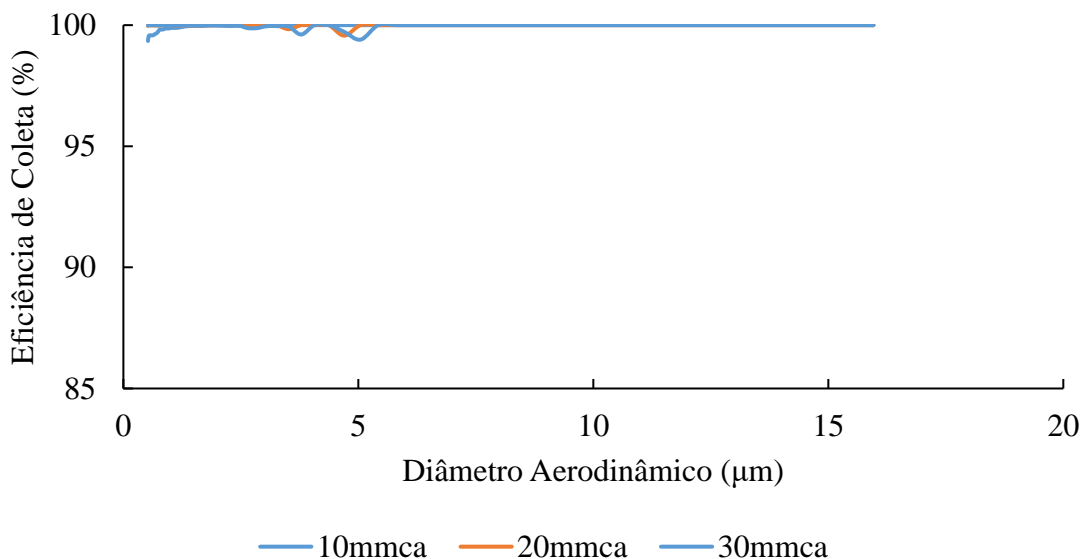
Fonte: Andrade (2019)

Figura 4.3 – Eficiência de coleta variando a perda de carga limite do *precoating* para calcário dolomítico.



Fonte: Andrade (2019)

Figura 4.4 – Eficiência de coleta variando a perda de carga limite do *precoating* para talco.



Fonte: Acervo pessoal

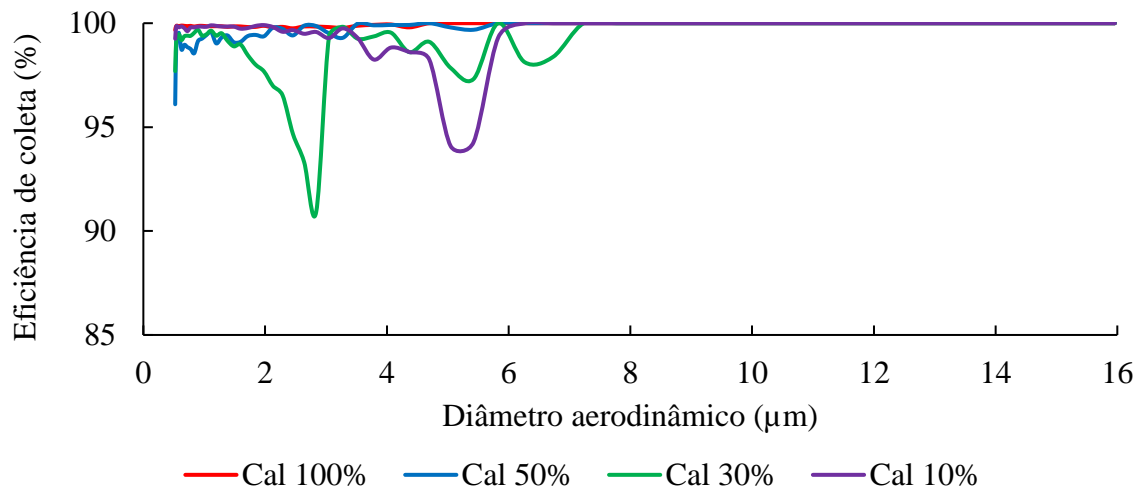
De acordo com Andrade (2019), a eficiência de coleta é muito próxima à 100%, a partir de 20 mmH₂O para o *precoating* de cal hidratada e calcário dolomítico independente

do diâmetro da partícula. Conforme é ilustrado na Figura 4.4, o *precoating* de talco, com apenas 10 mmH₂O atinge a eficiência de coleta semelhante aos *precoatings* de cal hidratada e calcário dolomítico. Isso demonstra que poderia adicionar menor quantidade de pó para atingir a colmatação do meio filtrante.

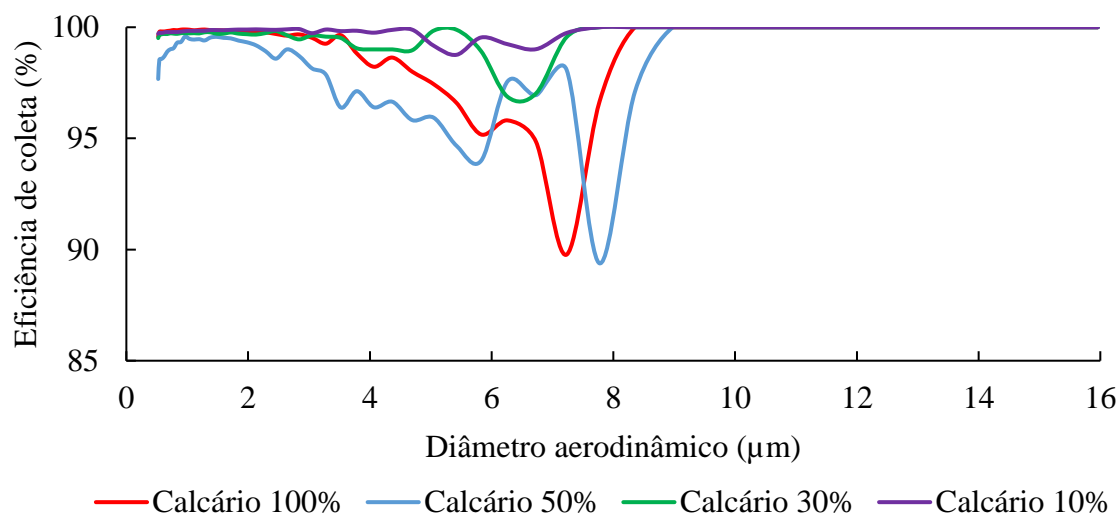
4.4 - Avaliação da mistura de pós de *precoating* na eficiência de filtração

Realizou-se o *precoating* até a queda de pressão sugerida por Andrade (2019) de 20 mmH₂O. Utilizou-se as proporções do material particulado de acordo com a Tabela 3.2 juntamente com os meios filtrantes virgens de PE 550. Desse modo, mensurou-se as eficiências de coleta a partir do diâmetro aerodinâmico. As Figuras 4.5 e 4.6 são apresentadas por Andrade (2019) cuja a eficiência de coleta para a cal hidratada é maior quanto maior a proporção desse material particulado, contudo, a eficiência de coleta para o calcário dolomítico é inversa em relação a cal hidratada.

Figura 4.5 – Misturas mássicas de *precoating* de cal hidratada



Fonte: Andrade (2019)

Figura 4.6 - Misturas mássicas de *precoating* de calcário dolomítico

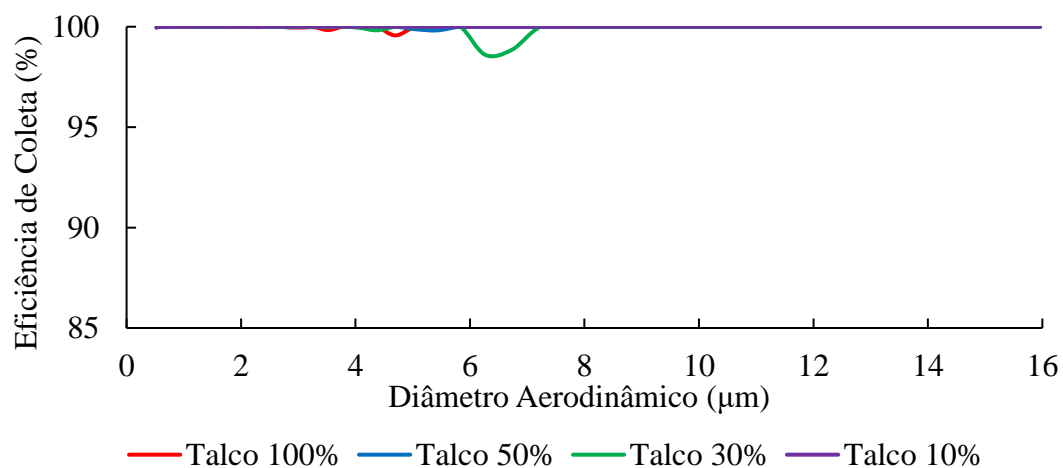
Fonte: Andrade (2019)

A Figura 4.7 apresenta a eficiência de coleta para o *precoating* com material particulado de talco. Observa-se que há variação na eficiência de coleta para o intervalo de diâmetro aerodinâmico de 2 a 8 µm. Entretanto, a mistura correspondente a 10% de talco não apresentou variações significativas na eficiência de coleta para todo o intervalo de diâmetro aerodinâmico, sendo sua eficiência de coleta muito próxima a 100%. Tal fato procede devido a sua menor variação da distribuição volumétrica, conforme a Tabela 4.1. E a densidade do talco por ser a mais elevada entre os *precoats*, ou seja, possui maior quantidade de massa por unidade de volume, assim facilitando a coleta de partículas. Além de sua composição ser majoritariamente de silício.

O comportamento do talco foi semelhante ao ilustrado pelo calcário dolomítico, no qual quanto menor a proporção do *precoating* maior a eficiência de coleta. Observa-se na Figura 4.1, em que a filtração ocorre somente com o material pulverulento da aciaria, a eficiência de coleta para partículas inferiores a 3 µm foi inferior a 90%, seja para os meios filtrantes PE e PE+PTFE, dessa forma adicionando o *precoating*, no filtro de poliéster (PE), eleva-se a eficiência de coleta acima de 98%, para 20 mmH₂O de queda de pressão, independente do *precoating* empregado. Contudo, o *precoating* com 10% de talco não apresenta variações significativas na eficiência de coleta no intervalo de diâmetro aerodinâmico de 1 a 20 µm. Sendo a melhor escolha quanto a eficiência de coleta e menos

onerosa em relação a quantidade de material a ser utilizado e em comparação ao PE+PTFE.

Figura 4.7 - Misturas mássicas de *precoating* de talco.



Fonte: Acervo pessoal.

Observa-se nas Figuras 4.2 a 4.7 a presença de um ponto de mínimo na eficiência de coleta para a faixa de diâmetro de 2 a 10 µm, tal fato deve-se aos diferentes mecanismos de coletas atuantes, como por exemplo, o mecanismo difusional, gravitacional, inercial e impactação direta. Pois cada mecanismo possui uma faixa de eficiência de coleta máxima e mínima, assim, nas regiões apresentadas nas figuras acima há um mínimo global desses mecanismos.

5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 – CONCLUSÕES

A porosidade do meio filtrante de poliéster com membrana de PTFE foi maior que o de poliéster sem a membrana, mesmo os filtros apresentando a mesma gramatura.

Para a eficiência de coleta de micropartículas, o meio filtrante com membrana de PTFE, com maior porosidade mostrou-se mais eficiente para partículas menores do que 3 μm .

Em relação ao *precoating*, os testes de queda de pressão máxima indicaram alta eficiência de coleta, acima de 98%, a partir da perda de carga de 20 mmH₂O estipulada para o pó do *precoating*, tanto para a cal hidratada quanto para o calcário dolomítico e o talco na faixa de diâmetro aerodinâmico de 1 a 16 μm . Sendo que para o talco o desempenho foi melhor independente da camada aplicada.

A porcentagem mássica de *precoating* de talco, com 10% obteve-se eficiência de coleta muito próxima a 100% com ausência de variações significativas para partículas entre 2 e 8 μm de diâmetro aerodinâmico.

Os meios filtrantes com o *precoating* obtiveram eficiência similar à membrana PTFE, mostrando ser uma ótima alternativa e mais econômica para aumentar a eficiência de coleta de filtração na faixa de 1 a 16 μm .

5.2 – SUGESTÕES

Sugere-se para trabalhos futuros desenvolver 30 ciclos de filtração com perda de carga máxima de 100 mmH₂O com o *precoating* sendo o material particulado de talco na porcentagem mássica de 10%, a fim de avaliar sua eficiência no decorrer dos ciclos, determinar a profundidade das partículas por análise microscópica e o tempo de ciclo de filtração. Além disso, obter imagens por microscopia para visualizar o formato das partículas de talco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M.L. **Filtração de ar em filtros de tecido**. 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.

AGUIAR, M. L. **Filtração de ar em filtros de tecido: deposição e remoção da camada de pó formada**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, 1955.

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

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

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

BARROS, P. M. DE, **Avaliação do desempenho de meios filtrantes fibrosos na remoção de partículas manométricas**. São Carlos, Tese de Doutorado em Engenharia Química. UFSCar, São Carlos, 2014.

BORTOLASSI, A. C. C.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L., **Eficiência e permeabilidade de diferentes meios filtrantes na remoção de nanopartículas através da variação do tempo em soluções de NaCl e de sacarose**, Fev. 2015 vol. 1 num. 2 - XX COBEQ.

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

CAVALCANTI, P. P. S., **Gestão ambiental na indústria siderúrgica – aspectos relacionados às emissões atmosféricas**. Rio de Janeiro, 2012.

CHEREMISINOFF, P. N. & YOUNG, R. A. **Air pollution control and design handbook**, part I. New York, Marcel Dekker Inc. 1977.

CIRQUEIRA, S. S. R.; TANABE, E. H.; AGUIAR, M. L. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 105, p. 69–78, jan. 2017.

COURY, J. R. **Eletrostatic effects in granular bed filtration of gases**. [s.l.] University of Cambridge, 1983.

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

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

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Caracterização da energia no setor siderúrgico**. Ministério das Minas e energia, Brasil, 2009.

FERNANDES, J. S.; CARVALHO, A. M.; CAMPOS, J. F.; COSTA, L. O., FILHO, G. B. **Poluição atmosférica e efeitos respiratórios, cardiovasculares e reprodutivos na saúde humana.** Revista Médica de Minas Gerais 20(1): 92-101; 2010. Disponível em: <<http://rmmg.medicina.ufmg.br/index.php/rmmg/article/viewDownloadInterstitial/212/197>>.

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

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.; SEPULVEDA, P.; ORTEGA, F. Permeability. In: SCHEFFLE, M.; COLOMBO, P. (Eds.). **Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications.** Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005. p. 313–340

MAHER, B. A., et al. **Magnetite pollution nanoparticles in the human brain.** Proceedings of the National Academy of Sciences 113.39 (2016): 10797-10801.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. (Ed.). **Perry's chemical engineers handbook.** New York: McGraw-Hill, 1999.

PODGÓRSKY, A., BALAZY, A., GRADÓN, L. **Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters.** Published in Chemical Engineering Science – v. 61, pp. 6804-6815.

RAVERT, E. **Precoating new filters for better airflow, longer filter life.** UAS

ROCHA, S. M. S. et al. The Influence of the Velocity of Filtration in the Formation and Removal the Dust Cake. **Materials Science Forum**, v. 660–661, p. 46–51.

RODRIGUES, K. B. **Filtração de Gases: Estudo da Deposição de Diferentes Tortas de Filtração em Diferentes Meios Filtrantes**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2006.

SONG, C.; PARK, H.; LEE, L. “Experimental study of filter clogging with monodisperse psl particles” *Powder Technology*, v. 163, n. 3, p. 152-159, 2006

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

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]

WALSH, D. C. **Recent dvances in the understanding of fibrous filter behaviour under solid particle load.** *Filtration and Separation*, v33 n. 06, 1996.

APÊNDICE A – Dados do talco para 10 mmH₂O

| Sample # | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Date | 01/15/19 | 01/15/19 | 01/15/19 | 01/15/19 | 01/15/19 | 01/15/19 | |
| Start Time | 11:21:06 | 11:22:33 | 11:24:06 | 11:25:31 | 11:27:57 | 11:29:21 | |
| Aerodynamic | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | Eficiênci |
| Diameter | p | p | p | p | p | p | a |
| 0,523 | 10587,8 | 131,197 | 24059,7 | 130,237 | 27979,8 | 50,879 | 99,35 |
| 0,542 | 6552,77 | 55,8868 | 14925,6 | 56,3603 | 18921,9 | 18,0819 | 99,56 |
| 0,583 | 6683,83 | 55,2123 | 15245,5 | 53,6175 | 19479,4 | 14,4156 | 99,58 |
| 0,626 | 6522,43 | 58,445 | 14806,3 | 44,3539 | 19408,6 | 14,2817 | 99,58 |
| 0,673 | 6563,18 | 50,8336 | 14669,1 | 38,0484 | 19268,4 | 14,2758 | 99,63 |
| 0,723 | 6238,67 | 39,5373 | 13990,3 | 30,5873 | 18631,7 | 12,7951 | 99,69 |
| 0,777 | 6005,94 | 22,1845 | 13087,5 | 14,1308 | 17750,2 | 9,49569 | 99,82 |
| 0,835 | 5713,99 | 21,6015 | 12609,2 | 17,7048 | 16650,1 | 4,77733 | 99,82 |
| 0,898 | 5573,75 | 15,0549 | 12311,4 | 12,883 | 16575,6 | 6,97638 | 99,86 |
| 0,965 | 5282,1 | 15,2108 | 11693,8 | 12,3553 | 15772,1 | 2,84852 | 99,86 |
| 1,037 | 5178,41 | 11,2423 | 11139,8 | 10,3187 | 15071,9 | 3,53969 | 99,89 |
| 1,114 | 4649,06 | 12,4509 | 10286,1 | 7,41331 | 14150,2 | 1,01611 | 99,88 |
| 1,197 | 4356,59 | 10,4507 | 9629,37 | 4,19804 | 13159,3 | 0,394814 | 99,90 |
| 1,286 | 4024,69 | 6,50253 | 8895,43 | 1,83841 | 12423,3 | 0,885161 | 99,94 |
| 1,382 | 3629,72 | 3,09326 | 8073,91 | 2,42036 | 11243,9 | 0,271222 | 99,96 |
| 1,486 | 3280,75 | 2,09578 | 7423,63 | 2,34774 | 10396,9 | 0,368765 | 99,97 |
| 1,596 | 2834,37 | 2,05805 | 6645,68 | 1,6682 | 9447,67 | 0,3497 | 99,97 |
| 1,715 | 2385,3 | 1,54555 | 5701,97 | 1,05908 | 8168,25 | 0,674685 | 99,97 |
| 1,843 | 1974,76 | 0,255589 | 4908,67 | 0,511177 | 6967,82 | 0,255589 | 99,99 |
| 1,981 | 1576,86 | 0,474829 | 4025,38 | 0 | 5890,11 | 0 | 99,99 |
| 2,129 | 1232,62 | 0,171622 | 3210,55 | 0,514986 | 4731,55 | 0 | 99,99 |
| 2,288 | 894,16 | 0 | 2488,96 | 0,132807 | 3669,17 | 0 | 100,00 |
| 2,458 | 692,948 | 0,599278 | 1819,05 | 0 | 2637,17 | 0 | 99,97 |
| 2,642 | 498,346 | 0,054325 | 1325,23 | 0 | 1898,16 | 0 | 100,00 |
| 2,839 | 306,441 | 0,659781 | 910,478 | 0 | 1229,95 | 0 | 99,93 |
| 3,051 | 214,588 | 0 | 548,042 | 0 | 785,944 | 0,067607 | 100,00 |
| 3,278 | 141,861 | 0 | 352,041 | 0 | 461,871 | 0,592174 | 99,96 |
| 3,523 | 82,2479 | 0 | 210,304 | 0 | 284,044 | 0 | 100,00 |
| 3,786 | 56,2007 | 0 | 143,336 | 0 | 152,996 | 0 | 100,00 |
| 4,068 | 34,3353 | 0 | 74,9514 | 0 | 86,5498 | 0 | 100,00 |
| 4,371 | 22,05 | 0 | 36,4489 | 0 | 41,6462 | 0 | 100,00 |
| 4,698 | 14,7939 | 0 | 21,9286 | 0 | 18,3617 | 0 | 100,00 |
| 5,048 | 8,71852 | 0 | 13,6322 | 0 | 7,93975 | 0 | 100,00 |
| 5,425 | 5,72267 | 0 | 6,29901 | 0 | 3,28172 | 0 | 100,00 |
| 5,829 | 3,24643 | 0 | 2,2512 | 0 | 1,25598 | 0 | 100,00 |
| 6,264 | 2,19061 | 0 | 1,1371 | 0 | 1,66386 | 0 | 100,00 |

| | | | | | | | |
|-------|----------|---|----------|---|---------|---|--------|
| 6,732 | 2,58372 | 0 | 1,449 | 0 | 0,54696 | 0 | 100,00 |
| 7,234 | 1,38103 | 0 | 1,13898 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 7,774 | 0,932639 | 0 | 0,206699 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 8,354 | 0,170015 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 8,977 | 0 | 0 | 0,886657 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 9,647 | 0 | 0 | 0,086974 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 10,37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 11,14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 11,97 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 12,86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 13,82 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 14,86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 15,96 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |

APÊNDICE B – Dados do talco para 20 mmH₂O

| Sample # | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| Date | 01/15/19 | 01/15/19 | 01/15/19 | 01/15/19 | 01/15/19 | 01/15/19 | |
| Start Time | 11:55:46 | 11:57:18 | 11:59:26 | 12:00:45 | 12:02:08 | 12:03:56 | |
| Aerodynamic | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | Eficiência |
| Diameter | p | p | p | p | p | p | a |
| 0,523 | 15132,6 | 6,31987 | 20419,4 | 5,91988 | 16161,6 | 4,39991 | 99,97 |
| 0,542 | 9127,2 | 1,64106 | 12804,9 | 1,00972 | 9976,43 | 0,978362 | 99,99 |
| 0,583 | 9455,91 | 2,39666 | 13203,4 | 1,86506 | 10266,6 | 0,135127 | 99,99 |
| 0,626 | 9242,17 | 2,08545 | 12954,5 | 0,875794 | 10167 | 0,550638 | 99,99 |
| 0,673 | 9566,35 | 2,02663 | 13002 | 1,26174 | 10198,2 | 1,26174 | 99,99 |
| 0,723 | 9318,35 | 1,38932 | 12497,7 | 1,9495 | 9708,33 | 1,33553 | 99,99 |
| 0,777 | 8928,55 | 0,692017 | 11774,7 | 1,99801 | 9294,05 | 1,332 | 99,99 |
| 0,835 | 8778,99 | 0,030819 | 11390,3 | 0 | 8871,68 | 0,030819 | 100,00 |
| 0,898 | 8700,81 | 0,609168 | 11331,5 | 0 | 8727,12 | 0,609168 | 100,00 |
| 0,965 | 8318,04 | 0 | 10679,6 | 0 | 8318,4 | 0 | 100,00 |
| 1,037 | 8014,73 | 0 | 10400,5 | 0,263868 | 8085,3 | 0 | 100,00 |
| 1,114 | 7514,48 | 0,164583 | 9662,75 | 1,01611 | 7594,33 | 0,164583 | 100,00 |
| 1,197 | 6840,83 | 0,672811 | 9026,13 | 0,197407 | 6940,25 | 0,672811 | 99,99 |
| 1,286 | 6381,16 | 0,44258 | 8550,86 | 0,44258 | 6588,19 | 0,680894 | 99,99 |
| 1,382 | 5674,39 | 0 | 7760,41 | 0,813667 | 5983,78 | 0,401674 | 99,99 |
| 1,486 | 5078,43 | 0 | 7112,12 | 1,41666 | 5445,17 | 0 | 99,99 |
| 1,596 | 4415,69 | 0 | 6334 | 0,679325 | 4965,31 | 0 | 100,00 |
| 1,715 | 3715,67 | 0,384398 | 5457,37 | 0,674685 | 4313,13 | 0 | 99,99 |
| 1,843 | 3073,87 | 0,255589 | 4668,75 | 0,681344 | 3704,96 | 0 | 99,99 |
| 1,981 | 2502,03 | 0 | 3870,17 | 0,216396 | 3066,41 | 0 | 100,00 |
| 2,129 | 1999,39 | 0 | 3059,16 | 0,514986 | 2515,89 | 0 | 99,99 |
| 2,288 | 1538,23 | 0 | 2351,78 | 1,25135 | 1958,83 | 0 | 99,98 |
| 2,458 | 1135,53 | 0 | 1736 | 0,187549 | 1451,14 | 0 | 100,00 |
| 2,642 | 857,164 | 0 | 1278,43 | 0 | 1065,8 | 0 | 100,00 |
| 2,839 | 653,866 | 0 | 848,873 | 0,690891 | 721,83 | 0 | 99,97 |
| 3,051 | 432,366 | 0 | 528,344 | 0,62867 | 478,381 | 0 | 99,96 |
| 3,278 | 295,353 | 0 | 336,485 | 0,215466 | 316,401 | 0 | 99,98 |
| 3,523 | 196,586 | 0 | 220,942 | 1,1156 | 179,745 | 0 | 99,83 |
| 3,786 | 123,74 | 0 | 124,095 | 0 | 96,4993 | 0 | 100,00 |
| 4,068 | 81,031 | 0 | 60,6772 | 0 | 56,7071 | 0 | 100,00 |
| 4,371 | 55,6793 | 0 | 38,4525 | 0 | 31,1616 | 0 | 100,00 |
| 4,698 | 28,8535 | 0 | 24,2369 | 0,314719 | 21,1941 | 0 | 99,57 |
| 5,048 | 20,6449 | 0 | 13,6915 | 0,389384 | 11,4442 | 0 | 100,00 |
| 5,425 | 11,3775 | 0 | 5,98711 | 0 | 4,90902 | 0 | 100,00 |
| 5,829 | 4,43141 | 0 | 2,58295 | 0 | 3,50718 | 0 | 100,00 |
| 6,264 | 3,4113 | 0 | 1,66386 | 0 | 1,74744 | 0 | 100,00 |

| | | | | | | | |
|-------|----------|----------|----------|---|----------|---|--------|
| 6,732 | 1,4082 | 0 | 1,13472 | 0 | 1,449 | 0 | 100,00 |
| 7,234 | 1,55182 | 0,654886 | 0,896933 | 0 | 1,79387 | 0 | 100,00 |
| 7,774 | 0,413397 | 0,206699 | 0,206699 | 0 | 0,413397 | 0 | 100,00 |
| 8,354 | 0 | 0 | 1,60847 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 8,977 | 0,886657 | 0 | 0,257769 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 9,647 | 0,086974 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 10,37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 11,14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 11,97 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 12,86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 13,82 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 14,86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 15,96 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |

APÊNDICE C – Dados do talco para 30 mmH₂O

| Sample # | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Date | 01/15/19 | 01/15/19 | 01/15/19 | 01/15/19 | 01/15/19 | 01/15/19 | |
| Start Time | 13:24:22 | 13:25:42 | 13:27:10 | 13:29:38 | 13:31:00 | 13:32:18 | |
| Aerodynamic | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | Eficiênci |
| Diameter | p | p | p | p | p | p | a |
| 0,523 | 25104,4 | 3,03994 | 42098 | 4,07992 | 20226 | 3,03994 | 99,99 |
| 0,542 | 13693,3 | 0 | 24102 | 0 | 11721,6 | 0,50486 | 100,00 |
| 0,583 | 14068,3 | 0,531602 | 24593,9 | 0,531602 | 12006,3 | 0,135127 | 100,00 |
| 0,626 | 13779,3 | 0,659023 | 24123,6 | 0,659023 | 11822,7 | 0 | 100,00 |
| 0,673 | 13798,3 | 0,089349 | 23850,5 | 1,26174 | 11772,2 | 1,17239 | 99,99 |
| 0,723 | 13226,7 | 1,22794 | 22727,9 | 1,9495 | 11258 | 0,721558 | 99,99 |
| 0,777 | 12590,2 | 1,332 | 21554,2 | 0,718032 | 10647,9 | 1,95192 | 99,99 |
| 0,835 | 12188,9 | 0 | 20567,5 | 0,030819 | 10103 | 0,726502 | 100,00 |
| 0,898 | 12110,9 | 0,068882 | 20409,8 | 0,609168 | 10108,5 | 1,82751 | 99,99 |
| 0,965 | 11262,7 | 0,571105 | 18878,5 | 0 | 9407,79 | 0 | 100,00 |
| 1,037 | 11171,4 | 0,131934 | 18309,1 | 0,263868 | 9038,67 | 0,131934 | 100,00 |
| 1,114 | 10415 | 0,508053 | 17073,1 | 1,01611 | 8471,51 | 0,508053 | 99,99 |
| 1,197 | 9617,8 | 0 | 15948,9 | 0 | 7948,85 | 0,197407 | 100,00 |
| 1,286 | 9094,18 | 0,238313 | 14765,5 | 0 | 7382,96 | 0,680894 | 100,00 |
| 1,382 | 8363,79 | 0,672896 | 13384,2 | 0 | 6747,7 | 0,944119 | 99,99 |
| 1,486 | 7498,51 | 0,368765 | 12264,4 | 0 | 6220,53 | 1,35825 | 99,99 |
| 1,596 | 6600,79 | 0 | 11019,1 | 0 | 5539,49 | 1,00895 | 99,99 |
| 1,715 | 5755,69 | 0,768797 | 9587,18 | 0 | 4916,79 | 0,290287 | 99,99 |
| 1,843 | 4956,03 | 0,936933 | 8227,83 | 0 | 4308,31 | 0,425755 | 99,99 |
| 1,981 | 4046,67 | 0,216396 | 6893,73 | 0 | 3614,3 | 1,16605 | 99,99 |
| 2,129 | 3186,86 | 0,514986 | 5491,44 | 0 | 2875,32 | 1,37322 | 99,98 |
| 2,288 | 2445,03 | 0,692081 | 4193,83 | 0 | 2321,83 | 1,94343 | 99,96 |
| 2,458 | 1806,96 | 0,093774 | 3132,53 | 0 | 1775,01 | 0,880601 | 99,98 |
| 2,642 | 1285,11 | 0 | 2308,92 | 0 | 1257,9 | 4,59572 | 99,88 |
| 2,839 | 794,482 | 0,031111 | 1485,94 | 0 | 906,805 | 3,37597 | 99,87 |
| 3,051 | 522,665 | 0,62867 | 979,989 | 0,067607 | 603,548 | 0 | 99,96 |
| 3,278 | 338,367 | 0 | 604,538 | 0,592174 | 362,918 | 0 | 99,97 |
| 3,523 | 199,971 | 0,297294 | 361,123 | 0,148647 | 229,53 | 0 | 99,94 |
| 3,786 | 114,604 | 1,04692 | 210,551 | 0,523459 | 140,036 | 0 | 99,61 |
| 4,068 | 64,3764 | 0 | 123,038 | 0 | 72,965 | 0 | 100,00 |
| 4,371 | 36,9048 | 0 | 61,2285 | 0 | 48,0199 | 0 | 100,00 |
| 4,698 | 21,2991 | 0 | 37,7725 | 0,314719 | 28,1193 | 0 | 99,72 |
| 5,048 | 13,2131 | 0 | 21,6944 | 0,389384 | 12,223 | 0 | 99,40 |
| 5,425 | 9,09932 | 0 | 15,6628 | 0 | 4,90902 | 0 | 100,00 |
| 5,829 | 5,62801 | 0 | 8,60208 | 0 | 3,9693 | 0 | 100,00 |
| 6,264 | 2,57937 | 0 | 8,31928 | 0 | 2,05261 | 0 | 100,00 |

| | | | | | | | |
|-------|----------|---|----------|---|----------|---|--------|
| 6,732 | 1,13472 | 0 | 5,08584 | 0 | 0,27348 | 0 | 100,00 |
| 7,234 | 1,55182 | 0 | 2,27796 | 0 | 1,30977 | 0 | 100,00 |
| 7,774 | 0,413397 | 0 | 2,59122 | 0 | 0,413397 | 0 | 100,00 |
| 8,354 | 0 | 0 | 0,510044 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 8,977 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 9,647 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 10,37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 11,14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 11,97 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 12,86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 13,82 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 14,86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 15,96 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |

APÊNDICE D - Dados do *precoating* com 10% de talco

| Sample # | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Date | 01/16/19 | 01/16/19 | 01/16/19 | 01/16/19 | 01/16/19 | 01/16/19 | |
| Start Time | 12:45:56 | 12:47:13 | 12:48:29 | 12:49:54 | 12:51:39 | 12:52:59 | |
| Aerodynamic | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | Eficiênci |
| Diameter | p | p | p | p | p | p | a |
| 0,523 | 31351,8 | 17,6796 | 27419,8 | 12,7997 | 48837,9 | 9,51981 | 99,96 |
| 0,542 | 19847,6 | 2,46158 | 17806,1 | 2,96644 | 32107 | 2,14592 | 99,99 |
| 0,583 | 20735,8 | 1,46859 | 18292,2 | 3,19852 | 33298,6 | 0,936983 | 99,99 |
| 0,626 | 20685,8 | 2,41932 | 18136,4 | 2,74448 | 33315,4 | 1,7603 | 99,99 |
| 0,673 | 20629,7 | 3,87456 | 18308,8 | 2,11598 | 33519,7 | 1,44044 | 99,99 |
| 0,723 | 19849,7 | 2,16467 | 17534,4 | 2,61727 | 32372,8 | 2,56347 | 99,99 |
| 0,777 | 18875,2 | 0,735856 | 16480,6 | 1,38403 | 30827,4 | 2,02402 | 99,99 |
| 0,835 | 17845,7 | 1,93296 | 16087,4 | 0,061638 | 29312,8 | 0 | 100,00 |
| 0,898 | 17982,3 | 0,678051 | 15905,1 | 1,21834 | 29241,4 | 0,068882 | 100,00 |
| 0,965 | 16805,4 | 0,665122 | 14592 | 0,188034 | 26908,5 | 0,665122 | 100,00 |
| 1,037 | 16058,5 | 0,54597 | 14038 | 1,09194 | 25944,1 | 0,54597 | 100,00 |
| 1,114 | 14873,5 | 0 | 13055,4 | 0,164583 | 23901,2 | 0 | 100,00 |
| 1,197 | 13676,7 | 0 | 11926,8 | 0,475404 | 21951,9 | 0 | 100,00 |
| 1,286 | 12816,2 | 0 | 10966,4 | 0 | 20297,7 | 0 | 100,00 |
| 1,382 | 11453,5 | 0 | 9944,5 | 0 | 18106,6 | 0 | 100,00 |
| 1,486 | 10474,2 | 0 | 9083,68 | 0 | 16424,7 | 0 | 100,00 |
| 1,596 | 9296,54 | 0 | 8114,36 | 0,3497 | 14591,5 | 0 | 100,00 |
| 1,715 | 7947,41 | 0,768797 | 7017 | 0,290287 | 12613,6 | 0,384398 | 99,99 |
| 1,843 | 6802,34 | 0,511177 | 6076,17 | 0 | 10776,5 | 0,255589 | 100,00 |
| 1,981 | 5668,45 | 0 | 5070,62 | 0 | 8873,82 | 0 | 100,00 |
| 2,129 | 4406,09 | 0 | 4092,15 | 0 | 7096,21 | 0,514986 | 100,00 |
| 2,288 | 3325,88 | 0 | 3244,61 | 1,11855 | 5485,49 | 0,132807 | 99,99 |
| 2,458 | 2453,2 | 0 | 2493,76 | 0,187549 | 4128,98 | 0 | 100,00 |
| 2,642 | 1729,96 | 0 | 1796,48 | 0 | 2960,91 | 0 | 100,00 |
| 2,839 | 1094,41 | 0 | 1259,26 | 0 | 1978,41 | 0 | 100,00 |
| 3,051 | 710,402 | 0 | 898,687 | 0 | 1320,96 | 0 | 100,00 |
| 3,278 | 429,784 | 0 | 544,781 | 0 | 865,327 | 0 | 100,00 |
| 3,523 | 261,214 | 0 | 350,819 | 0 | 529,523 | 0 | 100,00 |
| 3,786 | 139,011 | 0 | 228,24 | 0 | 328,396 | 0 | 100,00 |
| 4,068 | 91,0835 | 0 | 134,917 | 0 | 209,629 | 0 | 100,00 |
| 4,371 | 57,5 | 0 | 82,1022 | 0 | 111,53 | 0 | 100,00 |
| 4,698 | 32,2109 | 0 | 51,8306 | 0 | 67,2551 | 0 | 100,00 |
| 5,048 | 21,8427 | 0 | 36,3723 | 0 | 39,9992 | 0 | 100,00 |
| 5,425 | 12,2387 | 0 | 18,7275 | 0 | 29,2846 | 0 | 100,00 |
| 5,829 | 5,42664 | 0 | 11,7775 | 0 | 20,0595 | 0 | 100,00 |
| 6,264 | 3,4113 | 0 | 10,0667 | 0 | 11,0658 | 0 | 100,00 |

| | | | | | | | |
|-------|----------|---|----------|---|----------|---|--------|
| 6,732 | 1,99596 | 0 | 5,94708 | 0 | 6,84911 | 0 | 100,00 |
| 7,234 | 1,79387 | 0 | 1,21023 | 0 | 4,96876 | 0 | 100,00 |
| 7,774 | 2,59122 | 0 | 1,45188 | 0 | 2,48537 | 0 | 100,00 |
| 8,354 | 1,31428 | 0 | 0,340029 | 0 | 1,14427 | 0 | 100,00 |
| 8,977 | 1,01554 | 0 | 1,77331 | 0 | 0,128884 | 0 | 100,00 |
| 9,647 | 0,086974 | 0 | 0,173948 | 0 | 0,976314 | 0 | 100,00 |
| 10,37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,041516 | 0 | 100,00 |
| 11,14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 11,97 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 12,86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 13,82 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 14,86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 15,96 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |

APÊNDICE E - Dados do *precoating* com 30% de talco

| Sample # | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Date | 01/16/19 | 01/16/19 | 01/16/19 | 01/16/19 | 01/16/19 | 01/16/19 | |
| Start Time | 13:14:26 | 13:15:45 | 13:17:07 | 13:18:31 | 13:20:09 | 13:21:26 | |
| Aerodynamic | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | Eficiênci |
| Diameter | p | p | p | p | p | p | a |
| 0,523 | 28654,5 | 22,3996 | 47002 | 12,3198 | 55014,3 | 12,2398 | 99,96 |
| 0,542 | 18205,4 | 3,28211 | 30388,9 | 1,83025 | 35569,6 | 1,64106 | 99,99 |
| 0,583 | 18856,3 | 2,13531 | 31441,8 | 2,00019 | 36939,5 | 1,86506 | 99,99 |
| 0,626 | 18789,4 | 3,62898 | 31136,7 | 0,875794 | 37141,7 | 1,42643 | 99,99 |
| 0,673 | 18557,8 | 1,70848 | 31364,3 | 1,84793 | 37568,5 | 1,93728 | 99,99 |
| 0,723 | 17825,9 | 3,17745 | 30040,5 | 2,00329 | 35928,8 | 3,23124 | 99,99 |
| 0,777 | 16795,2 | 2,06192 | 28440,5 | 2,00395 | 34298 | 3,33001 | 99,99 |
| 0,835 | 16108,1 | 1,29891 | 26994 | 0,664865 | 32820,3 | 0,030819 | 100,00 |
| 0,898 | 16129 | 0,609168 | 26821,4 | 0,746933 | 32809,7 | 0,746933 | 100,00 |
| 0,965 | 14963,1 | 0,188034 | 24595,2 | 1,23623 | 30423,1 | 1,14221 | 100,00 |
| 1,037 | 14356 | 1,22387 | 23485,6 | 0,54597 | 29037,3 | 0,131934 | 100,00 |
| 1,114 | 13358,1 | 0,672637 | 21700,6 | 0 | 26871,3 | 0,508053 | 100,00 |
| 1,197 | 12327,8 | 0,475404 | 19953,8 | 0,197407 | 24740,9 | 0 | 100,00 |
| 1,286 | 11400,4 | 0,238313 | 18117,5 | 0,44258 | 23053,1 | 0,476626 | 100,00 |
| 1,382 | 10203,9 | 1,21534 | 16191,9 | 0,271222 | 20482,9 | 1,07457 | 99,99 |
| 1,486 | 9365,89 | 1,10629 | 14727,7 | 0,679127 | 18447,9 | 0,368765 | 99,99 |
| 1,596 | 8324,94 | 1,0491 | 12988,3 | 0,329625 | 16329,6 | 0,3497 | 99,99 |
| 1,715 | 7179,73 | 0,870861 | 11020,5 | 0 | 14080,6 | 0,290287 | 100,00 |
| 1,843 | 6232,2 | 0 | 9257,72 | 0 | 12076,8 | 0,425755 | 100,00 |
| 1,981 | 5265,68 | 0 | 7658,41 | 0 | 10108 | 0,691225 | 100,00 |
| 2,129 | 4277,19 | 0 | 5996,43 | 0 | 8034,62 | 0,686609 | 100,00 |
| 2,288 | 3367,82 | 0 | 4751,62 | 0,559274 | 6298,18 | 1,25135 | 99,99 |
| 2,458 | 2542,92 | 0 | 3574,75 | 0,093774 | 4649,18 | 0,187549 | 100,00 |
| 2,642 | 1886,52 | 0 | 2539,06 | 0,648771 | 3425,12 | 0 | 99,99 |
| 2,839 | 1311,85 | 0 | 1732,28 | 0,67079 | 2343,94 | 0,031111 | 99,99 |
| 3,051 | 826,011 | 0 | 1176,34 | 0 | 1610,73 | 0,62867 | 99,99 |
| 3,278 | 553,018 | 0 | 791,031 | 0 | 1085,09 | 0,107733 | 100,00 |
| 3,523 | 345,879 | 0 | 487,206 | 0 | 669,179 | 0,557798 | 99,97 |
| 3,786 | 206,276 | 0 | 322,103 | 0 | 439,75 | 0 | 100,00 |
| 4,068 | 147,979 | 0,229832 | 209,419 | 0 | 287,263 | 0 | 99,95 |
| 4,371 | 85,9209 | 0,455855 | 134,031 | 0 | 176,957 | 0 | 99,82 |
| 4,698 | 62,9524 | 0 | 90,0228 | 0 | 111,426 | 0 | 100,00 |
| 5,048 | 40,9856 | 0 | 58,4264 | 0 | 74,4838 | 0 | 100,00 |
| 5,425 | 23,1077 | 0 | 35,5633 | 0 | 51,3616 | 0 | 100,00 |
| 5,829 | 14,7632 | 0 | 17,8083 | 0 | 35,1544 | 0 | 100,00 |
| 6,264 | 6,37942 | 0 | 12,5625 | 0,526756 | 18,4988 | 0 | 98,60 |

| | | | | | | | |
|-------|----------|---|----------|---------|----------|---|--------|
| 6,732 | 4,03272 | 0 | 7,94303 | 0,27348 | 11,4288 | 0 | 98,85 |
| 7,234 | 3,17489 | 0 | 5,62364 | 0 | 6,83388 | 0 | 100,00 |
| 7,774 | 2,07198 | 0 | 4,14395 | 0 | 3,41801 | 0 | 100,00 |
| 8,354 | 0,340029 | 0 | 2,28853 | 0 | 2,92275 | 0 | 100,00 |
| 8,977 | 0,886657 | 0 | 2,03108 | 0 | 1,27331 | 0 | 100,00 |
| 9,647 | 0,086974 | 0 | 1,15026 | 0 | 0,086974 | 0 | 100,00 |
| 10,37 | 1,06665 | 0 | 0,041516 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 11,14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 11,97 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 12,86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,165408 | 0 | 100,00 |
| 13,82 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,27407 | 0 | 100,00 |
| 14,86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 15,96 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |

APÊNDICE F - Dados do *precoating* com 50% de talco

| Sample # | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Date | 01/16/19 | 01/16/19 | 01/16/19 | 01/16/19 | 01/16/19 | 01/16/19 | |
| Start Time | 13:42:33 | 13:43:58 | 13:45:12 | 13:46:30 | 13:48:11 | 13:49:29 | |
| Aerodynamic | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | dN/dlogD | Eficiênci |
| Diameter | p | p | p | p | p | p | a |
| 0,523 | 21399,4 | 10,0798 | 27473,9 | 12,1598 | 59776,7 | 9,8398 | 99,96 |
| 0,542 | 13255,8 | 0,473502 | 16806,1 | 2,11456 | 38030,4 | 0,820528 | 99,99 |
| 0,583 | 13765,2 | 0 | 17219,3 | 1,86506 | 39333,3 | 1,72993 | 99,99 |
| 0,626 | 13627,9 | 0,550638 | 17223,4 | 1,42643 | 39072,4 | 2,52771 | 99,99 |
| 0,673 | 13857,6 | 1,84793 | 17120,9 | 2,52348 | 39316,9 | 0,943591 | 99,99 |
| 0,723 | 13339,9 | 0,77535 | 16323,9 | 2,67106 | 37876,3 | 2,50968 | 99,99 |
| 0,777 | 12959,8 | 0,683826 | 15357 | 0,749988 | 35656,1 | 1,38403 | 100,00 |
| 0,835 | 12440,4 | 1,93296 | 14594,7 | 0,634046 | 34039,1 | 0,030819 | 99,99 |
| 0,898 | 12471,1 | 0,746933 | 14699,9 | 0,068882 | 33810,5 | 0,609168 | 100,00 |
| 0,965 | 11840,8 | 1,14221 | 13499,8 | 0,571105 | 30978,3 | 0 | 100,00 |
| 1,037 | 11499,8 | 0,131934 | 12846,1 | 0 | 29520,2 | 0,131934 | 100,00 |
| 1,114 | 10770,5 | 0,672637 | 11867,7 | 0 | 27081,5 | 0,508053 | 100,00 |
| 1,197 | 10120,4 | 0,475404 | 10763,9 | 0 | 24816,2 | 0 | 100,00 |
| 1,286 | 9488,97 | 0,476626 | 9873,94 | 0 | 22734,1 | 0 | 100,00 |
| 1,382 | 8730,37 | 0,803348 | 8798,49 | 0 | 19987,2 | 0,271222 | 100,00 |
| 1,486 | 8072,88 | 0 | 7860,26 | 0 | 17867,5 | 0,679127 | 100,00 |
| 1,596 | 7200,37 | 0,3497 | 6933,93 | 0,3497 | 15537,3 | 1,02903 | 99,99 |
| 1,715 | 6316,56 | 0,290287 | 5895,55 | 0,290287 | 13267,8 | 0,580574 | 100,00 |
| 1,843 | 5627,64 | 0 | 4983,63 | 0 | 11185,2 | 0 | 100,00 |
| 1,981 | 4886,95 | 0,474829 | 4156,68 | 0 | 9041,67 | 0 | 100,00 |
| 2,129 | 4009,07 | 0,171622 | 3311,31 | 0 | 6976,38 | 0 | 100,00 |
| 2,288 | 3306,91 | 0,559274 | 2527,32 | 0 | 5310,91 | 0 | 99,99 |
| 2,458 | 2600,18 | 0,093774 | 1861,34 | 0,599278 | 3880,77 | 0 | 99,99 |
| 2,642 | 2034,62 | 0 | 1359,2 | 0,054325 | 2828,9 | 0 | 100,00 |
| 2,839 | 1613,82 | 0 | 900,008 | 0,659781 | 1890,91 | 0 | 99,98 |
| 3,051 | 1166,47 | 0 | 598,695 | 0 | 1304,95 | 0 | 100,00 |
| 3,278 | 893,707 | 0 | 414,871 | 0 | 808,26 | 0 | 100,00 |
| 3,523 | 638,537 | 0 | 270,764 | 0 | 498,067 | 0 | 100,00 |
| 3,786 | 456,11 | 0 | 181,176 | 0 | 304,226 | 0 | 100,00 |
| 4,068 | 336,77 | 0 | 115,168 | 0 | 207,161 | 0 | 100,00 |
| 4,371 | 216,13 | 0 | 81,0021 | 0 | 127,483 | 0 | 100,00 |
| 4,698 | 146,785 | 0 | 53,9297 | 0 | 79,4247 | 0 | 100,00 |
| 5,048 | 97,2239 | 0,35972 | 31,8183 | 0 | 56,0566 | 0 | 99,88 |
| 5,425 | 66,2311 | 0,359362 | 18,9174 | 0 | 40,6079 | 0 | 99,82 |
| 5,829 | 45,747 | 0 | 13,1045 | 0 | 27,2868 | 0 | 100,00 |
| 6,264 | 26,2913 | 0 | 8,48645 | 0 | 13,7832 | 0 | 100,00 |

| | | | | | | | |
|-------|----------|---|----------|---|----------|---|--------|
| 6,732 | 17,4167 | 0 | 6,88991 | 0 | 7,94303 | 0 | 100,00 |
| 7,234 | 10,9057 | 0 | 3,90103 | 0 | 4,96876 | 0 | 100,00 |
| 7,774 | 9,32639 | 0 | 0,620096 | 0 | 3,93725 | 0 | 100,00 |
| 8,354 | 3,30862 | 0 | 1,60847 | 0 | 1,4843 | 0 | 100,00 |
| 8,977 | 0,257769 | 0 | 0,257769 | 0 | 0,128884 | 0 | 100,00 |
| 9,647 | 0,976314 | 0 | 0 | 0 | 0,976314 | 0 | 100,00 |
| 10,37 | 0,04748 | 0 | 0 | 0 | 0,041516 | 0 | 100,00 |
| 11,14 | 1,13644 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 11,97 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 12,86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 13,82 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,23406 | 0 | 100,00 |
| 14,86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,3425 | 0 | 100,00 |
| 15,96 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |