

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

**“ESTUDO DA EFICIÊNCIA DA POLIIMIDA AROMÁTICA COMO  
MEIO FILTRANTE EM UM FILTRO DE MANGAS PARA PROCESSO  
DE SINTERIZAÇÃO DE UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA”**

Regina Machado Costa

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

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

São Carlos–SP

2020

## **BANCA EXAMINADORA**

Trabalho de Graduação apresentado no dia 14 de dezembro de 2020 perante a seguinte banca examinadora:

---

Profa. Dra. Mônica Lopes Aguiar – Orientadora  
DEQ/UFSCar

---

Profa. Dra. Vádila Giovana Guerra Béttega – Convidada  
DEQ/UFSCar

---

Prof. Dr. José Maria Correa Bueno – Professor da Disciplina  
DEQ/UFSCar

Dedico o presente trabalho aos meus pais,  
Carmem e Pedro Geraldo,  
por todo apoio e exemplo.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, Carmem Lucy Machado Costa e Pedro Geraldo Costa, por todo apoio, amor, confiança e dedicação com a minha formação como pessoa e profissional. Vocês são meus maiores exemplos!

Agradeço também aos meus avós, tios, primos e todos os demais familiares, que sempre acreditaram em mim, torceram pela minha felicidade e renovavam minhas energias nas visitas a Capitólio.

Agradeço aos meus amigos mais que especiais da EQ 014, por toda parceria, companhia nos mais diversos momentos e por todo aprendizado e crescimento, Beatriz Godoy, Bárbara Morrone, Luiza Bisinoti, Daniele Jaegger, Monica Faria, Paula Fukuda, Tainá de Carvalho, Bruna Mendes, Ana Luisa Rossi, Lucas Traldi, Alana Cristine, Leonardo Martins e João Victor Martins.

Agradeço às minhas amigas capitólinas, que mesmo de longe se fizeram presentes, com muito companheirismo e alto astral, Ana Clara Rodrigues, Ana Carolina Oliveira, Marina Soares e Thayná Elias.

Agradeço à Beatriz Tonato e à Gabriella Zane, por dividirem um lar comigo em São Carlos e por toda disposição em me ajudar no que fosse preciso.

Agradeço à Empresa Júnior de Engenharia Química e ao Enactus UFSCar, por toda caminhada, amizades construídas, aprendizados e conquistas realizadas.

Agradeço de forma especial a minha orientadora, Mônica Lopes Aguiar, pela oportunidade de desenvolver este estudo e por toda sabedoria compartilhada. Agradeço também à Camila Lacerda, por ter me apoiado neste processo, pela paciência e por me ensinar tanto. Finalizo agradecendo à toda equipe do laboratório de Controle Ambiental pela parceria!

## RESUMO

A contaminação do ar com substâncias nocivas à saúde ou ao meio ambiente, cresce desde a Revolução Industrial. Devido à ameaça à saúde humana, como doenças cardiorespiratórias e, nos piores casos, óbitos, surgiu a necessidade de controlar as emissões de poluentes atmosféricos. Atualmente, as legislações ambientais que definem os parâmetros máximos de emissão estão mais rigorosas e os órgãos públicos que fiscalizam empresas e indústrias estão mais ativos. Pesquisas são desenvolvidas em diversos lugares do mundo com o objetivo de otimizar e implementar tecnologias que promovam a diminuição dos poluentes atmosféricos e dos respectivos impactos negativos. Um dos equipamentos amplamente empregados na indústria é o filtro de mangas, com a função de separar partículas sólidas em suspensão dos gases a serem emitidos na atmosfera. O filtro de mangas, que é um filtro de tecido, possui alta eficiência de coleta para uma ampla faixa granulométrica e pode ser aplicado com diferentes materiais filtrantes. A escolha do tecido é feita com base nas características do material particulado e da corrente gasosa, uma vez que é necessário haver compatibilidade do meio filtrante com o efluente a ser tratado. A poliimida aromática (PI) é muito utilizada como meio filtrante em indústrias siderúrgicas, para o despoeiramento da sinterização. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar e analisar o desempenho do meio filtrante composto por fibras de poliimida aromática com tela de sustentação de teflon, utilizado na filtração de gás contendo pó proveniente do processo de sinterização primária. Para tal finalidade foi determinada a eficiência de coleta deste meio filtrante para micropartículas. Inicialmente, realizou-se a caracterização do material particulado e, em seguida, a do meio filtrante. Após as caracterizações, foram realizados trinta ciclos de filtração, em duplicata, até que fosse atingida a queda de pressão máxima de 100mmH<sub>2</sub>O, efetuando então uma limpeza com pulso de ar reverso de 5 bar por 60ms. O equipamento empregado tem como referência a norma VDI 3926, simulando um filtro de mangas industrial em escala laboratorial. A partir da análise dos resultados obtidos, observou-se que a poliimida aromática apresenta alta eficiência de coleta de partículas para filtração do material particulado derivado do processo de sinterização na indústria siderúrgica, com eficiência de 99,68% no 1º ciclo e de 99,83% no 30º ciclo. Porém, a limpeza do filtro não foi eficiente, com ocorrência da limpeza parcial e variação da queda de pressão residual.

## ABSTRACT

Air contamination with substances harmful to health or the environment, has grown since the Industrial Revolution. Due to the threat to human health, such as cardiorespiratory diseases and, in the worst cases, deaths, arose the need to control emissions of air pollutants. Currently, environmental laws which define the maximum emission parameters are more stringent and public agencies which inspect companies and industries are more active. Researches are carried out in different parts of the world with the aim of optimizing and implementing technologies that promote reduction of air pollutants and their respective negative impacts. One equipment widely used in industry is bag filter, with the function of separating solid particles in suspension from gases to be emitted into atmosphere. Bag filter, which is a fabric filter, has high collection efficiency for a wide particle size range and can be applied with different filter materials. The choice of the fabric is made based on characteristics of particulate material and gas stream, since it is necessary to have compatibility of the filter medium with the effluent to be treated. Aromatic polyimide (PI) is widely used as a filter medium in steel industries, for the dedusting of sintering. The present work focuses on the characterization and analysis of collection efficiency of the filter medium composed of aromatic polyimide fibers with a telphon support screen, for filtration of gas containing powder from the primary sintering process. Initially, characterization of particulate material was carried out and then characterization of the filtering medium. After this, thirty filtration cycles were performed, in duplicate, until the maximum pressure drop of 100mmH<sub>2</sub>O was reached, then cleaning with a reverse air pulse of 5 bar for 60ms. The equipment used is based on the VDI 3926 standard, simulating an industrial bag filter on a laboratory scale. From the analysis of the results obtained, it was observed that aromatic polyimide has high particle collection efficiency for filtering particulate material derived from the sintering process in steel industry, with 99.68% efficiency in the 1st cycle and 99, 83% in the 30th cycle. However, cleaning the filter was not efficient, with partial cleaning occurring and variation in residual pressure drop.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>vii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. A produção de aço .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Impactos Ambientais da Produção de Aço .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3. Legislação Ambiental .....</b>	<b>6</b>
<b>2.4. Equipamentos de Controle de Emissão.....</b>	<b>8</b>
<b>2.5. Filtro de Mangas.....</b>	<b>9</b>
<b>2.5.1. Funcionamento.....</b>	<b>9</b>
<b>2.5.2. Limpeza.....</b>	<b>10</b>
<b>2.5.2.1. Fluxo de Ar Reverso.....</b>	<b>11</b>
<b>2.5.2.2. Pulso de Ar Reverso.....</b>	<b>11</b>
<b>2.5.2.3. Vibração Mecânica.....</b>	<b>12</b>
<b>2.6. Meios Filtrantes.....</b>	<b>12</b>
<b>2.7. Mecanismo de Filtração.....</b>	<b>14</b>
<b>2.7.1. Etapas da Filtração.....</b>	<b>14</b>
<b>2.7.2. Mecanismo de Retenção de Partículas.....</b>	<b>17</b>
<b>2.7.3. Curvas de Filtração.....</b>	<b>18</b>
<b>2.7.4. Ciclos de Filtração.....</b>	<b>20</b>
<b>2.8. Parâmetros de Filtração.....</b>	<b>21</b>
<b>2.8.1. Velocidade de Filtração.....</b>	<b>21</b>
<b>2.8.2. Queda de Pressão.....</b>	<b>22</b>
<b>2.8.3. Permeabilidade.....</b>	<b>23</b>
<b>2.8.4. Porosidade.....</b>	<b>25</b>

<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
3.1.	Caracterização do Material Particulado .....	26
3.2.	Caracterização do Meio Filtrante Virgem .....	27
3.2.1.	Imagens da Superfície Superior das Mangas Filtrantes .....	28
3.2.2.	Permeabilidade e Porosidade .....	29
3.3.	Descrição dos Equipamentos de Filtração com base na norma VDI 3926.....	30
3.4.	Descrição dos Ciclos de Filtração.....	32
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>33</b>
4.1.	Ciclos de Filtração para o Meio Filtrante constituído de Poliimida Aromática.....	33
4.2.	Perda de Carga Residual.....	34
4.3.	Eficiência de Coleta.....	35
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>37</b>
5.1.	Conclusões.....	37
5.2.	Sugestões.....	37
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>38</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de Produção do Aço.....	4
Figura 2. Esquema simplificado de funcionamento de um filtro de mangas.....	10
Figura 3. Etapas da Filtração.....	15
Figura 4. Ponto de Colmatação .....	16
Figura 5. Mecanismos de Captura de Partículas .....	18
Figura 6. Curvas de Filtração .....	19
Figura 7. Ciclos de Filtração Ideal e Real .....	21
Figura 8. Distribuição Granulométrica em Volume do Material Particulado .....	26
Figura 9. Unidade experimental empregada na determinação da permeabilidade do meio filtrante .....	27
Figura 10. Imagem da Superfície Superior da Manga de Poliimida Aromática Sem Costura, com ampliações 35x e 200x.....	28
Figura 11. Distribuição das Fibras do Tecido Filtrante por Diâmetro .....	29
Figura 12. Unidade Experimental de Filtração .....	30
Figura 13. Unidade de Alimentação de Ar e Material Particulado .....	31
Figura 14. Queda de Pressão por Tempo de Filtração (Trinta Ciclos Completo).....	33
Figura 15. Queda de Pressão Residual no Meio Filtrante.....	34

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1. Limites e Recomendações de Emissão de Material Particulado .....	7
Quadro 2. Condições Experimentais adotadas nos Ciclos de Filtração .....	32
Quadro 3. Eficiência de Coleta de Partículas .....	35

## 1. INTRODUÇÃO

O ar limpo é uma condição para a boa qualidade de vida, sendo determinante na saúde e no bem-estar do ser humano. A poluição e contaminação do ar representam uma ameaça à saúde e à vida, todavia, continuam acontecendo no mundo todo. (WHO, 2005)

A poluição atmosférica causa anualmente 4,2 milhões de mortes prematuras no mundo, segundo dados da OMS. Destas, 91% são em países de média e baixa renda no Pacífico e Sudeste Asiático. No ano de 2016, a OMS estima que 58% das mortes prematura por doenças cerebrovasculares e doenças isquêmicas do coração foram devidas à poluição do ar ambiente. (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2020)

O panorama brasileiro também é preocupante. Em 10 anos, o número de mortes causadas pela poluição atmosférica aumentou 14%, passando de 38.782 mortes em 2006 para 44.228 mortes em 2016. Além do alto número de mortes, a poluição atmosférica é responsável por doenças e internações, gerando um gasto elevado em saúde pública. Em 2018, o custo de internações devidas à problemas respiratórios ultrapassou R\$1,3 bilhão. (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2020)

Com foco na melhoria do ar ambiente, são estabelecidos padrões de qualidade que visam regular as emissões atmosféricas. No Brasil, estes padrões são designados pela Resolução CONAMA n° 491/2018. A resolução define o padrão de qualidade do ar como um instrumento de gestão para que o meio ambiente e a saúde da população sejam preservados em relação aos riscos e danos causados pela poluição atmosférica. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) é o órgão responsável por determinar normas e resoluções ambientais no Brasil, porém, não é responsável pela fiscalização das mesmas, que ficam a cargo de órgãos estaduais. Em São Paulo, por exemplo, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) cumpre o papel de fiscalizar, monitorar e licenciar atividades que tenham impacto ambiental. (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2020)

A poluição atmosférica é causada por diversos fatores e atividades, como produção industrial, agropecuária, mineração, queima de combustível e outros resíduos a céu aberto e acúmulo de lixo orgânico em aterros sanitários. (WORLD ENVIROMENT DAY, 2020)

A indústria siderúrgica é um dos maiores responsáveis pela poluição atmosférica. As emissões atmosféricas ocorrem em diferentes fases da produção de ferro e aço, com liberação de gases do efeito estufa e material particulado, contaminando o ar ambiente. A sinterização é uma destas etapas, sendo responsável por uma quantidade significativa de

poluentes. O principal poluente emitido nesta fase é o material particulado, entretanto, a sinterização também é responsável pela maior parte das emissões de  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_x$ . (CAVALCANTI, 2012 ZHAO et al., 2016)

Com o intuito de reduzir a emissão de poluentes e se adequar à legislação ambiental, as indústrias investem em pesquisa e desenvolvimento, visando a descoberta, implantação e aprimoramento de tecnologias e equipamentos a serem empregados no processo industrial e controlar o nível de emissão de poluentes atmosféricos. Diversos equipamentos são utilizados na indústria para o controle ambiental das emissões, sendo a escolha feita com base nas características do processo e dos poluentes. Alguns exemplos de equipamentos empregados são filtro de mangas, ciclone, coletor gravitacional, coletor úmido e precipitador eletrostático.

O filtro de mangas é um equipamento amplamente empregado no controle de emissão de poluentes atmosféricos, por sua versatilidade, sendo utilizado em diferentes temperaturas, com fluidos corrosivos e em uma larga faixa granulométrica. Além disso, oferece consumo de energia relativamente baixo, alta eficiência de coleta de partículas subcrômicas e simples manuseio se comparado ao precipitador eletrostático.

As mangas utilizadas no filtro podem ser confeccionadas a partir de diversos materiais, sendo a escolha do tecido feita com base nas características do processo e das partículas a serem coletadas e na interação tecido-pó. Alguns materiais empregados na manga são poliimida, poliéster e acrílico. Além da escolha do tecido, a costura também é determinante na confecção do filtro e, conseqüentemente, na sua eficiência, visto que a costura pode causar vazamentos e elevar a emissão de poluentes.

A poliimida aromática (PI) é um material amplamente utilizado como manga filtrante na indústria siderúrgica, atuando no controle de emissão na etapa de sinterização. A P84 (nome comercial da poliimida aromática) possui diferentes qualidades que a tornam apta para uso, como significativa resistência mecânica e ao desgaste, alta estabilidade térmica e pequeno coeficiente de atrito.

Assim, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar o tecido poliimida aromática e analisar a eficiência da sua manga filtrante para material particulado proveniente do processo de sinterização da indústria siderúrgica. Para isto, foram feitas caracterizações do meio filtrante e do material particulado e foram realizados ciclos de filtração, em duplicata, em um filtro que tem como referência a norma VDI 3926, simulando um filtro de mangas industrial em escala laboratorial.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são apresentadas informações sobre o processo de produção do aço, os impactos ambientais gerados pelo processo e a legislação ambiental vigente no Brasil. Também serão apresentadas informações sobre o funcionamento e a operação de um filtro de mangas, sua limpeza e quais os parâmetros determinantes na sua eficiência.

### **2.1. A produção de aço**

A produção do aço se divide em dois momentos principais. Primeiro o minério de ferro é transformado em ferro gusa e este é então transformado em aço.

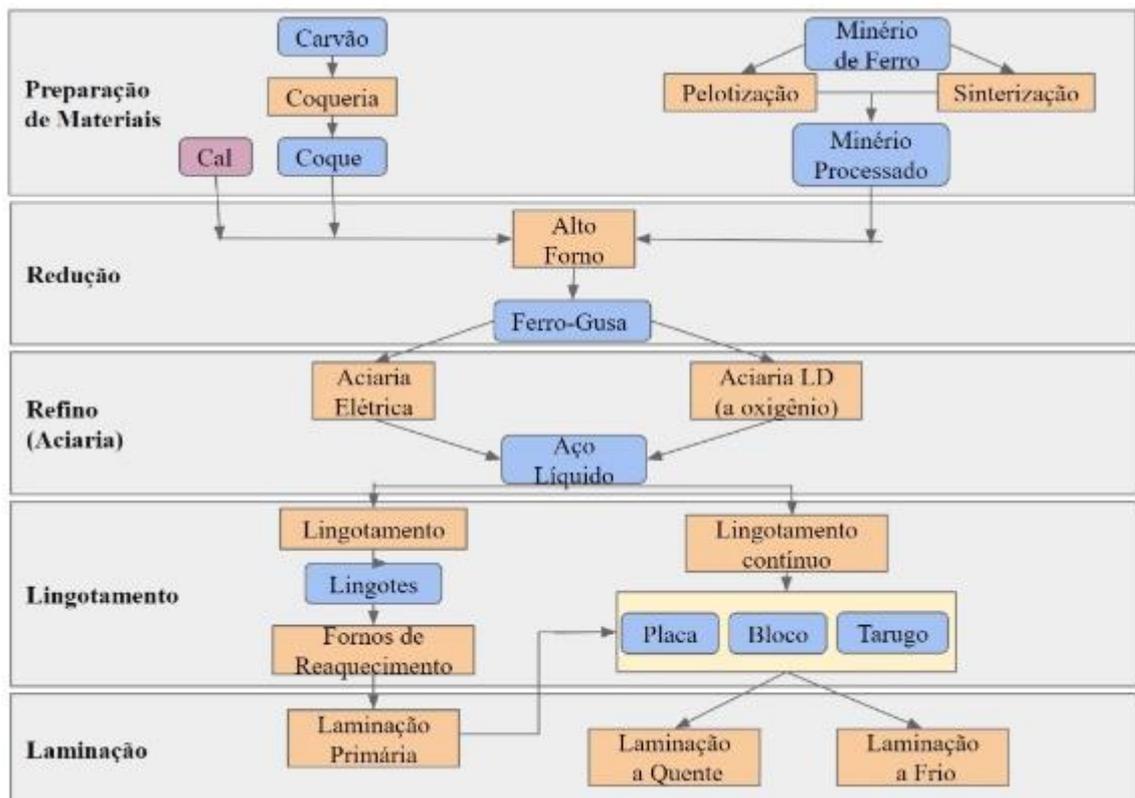
A fabricação do ferro gusa começa com um processo de aglomeração de partículas finas do minério, etapa conhecida como pelotização ou sinterização. Esta é feita para que o minério de ferro tenha uma conformação apropriada à carga metálica que abastece os altos fornos. Em paralelo, ocorre a etapa de coqueificação nas chamadas coquearias. Esta etapa consiste no aquecimento do carvão mineral a altas temperaturas na ausência de oxigênio, para que haja a conversão do carvão mineral em carvão coque. Após as etapas de pelotização e coqueificação, o minério aglomerado, também chamado de sinter, o coque e o fundente, referente ao calcário, são alimentados no alto forno. Há uma injeção de ar preaquecido (em torno de 1200°C) no forno e o gás oxigênio presente no ar reage com o coque. Nesta reação é liberado monóxido de carbono, que é o agente redutor necessário para a formação do ferro gusa. Em seguida, ocorrem dois efeitos simultâneos, a reação do sinter com o monóxido de carbono e a fusão do mesmo, devido ao calor do ar e ao calor liberado na combustão. Após esta perda de oxigênio na reação, está formado o ferro gusa. A produção do ferro gusa tem grande importância econômica, por representar grande parte do custo de fabricação de aço. (CAVALCANTI, 2012)

Após a produção do ferro gusa, este precisa ser refinado. A etapa de refinamento é feita nas aciarias, que podem ser a oxigênio ou elétricas. Nas aciarias a oxigênio, o ferro gusa é alimentado em um conversor LD e, nas aciarias elétricas, em um forno elétrico a arco (FEA). Em ambas, há a injeção de oxigênio, que reage com o ferro gusa. Nesta oxidação, são minimizadas as impurezas presentes, com liberação de gás carbônico, e o ferro gusa

transforma-se em aço. Posteriormente, o aço produzido, que está fundido, é alimentado em um forno panela. Neste, podem ser adicionados outros componentes de liga além do aço, sendo que os componentes a serem inseridos são determinados com base no produto final de interesse. (CAVALCANTI, 2012)

Finalmente, o aço passa por duas últimas etapas, o lingotamento e a laminação. O lingotamento consiste na solidificação do aço, já que ele estava na fase líquida na etapa anterior. O aço pode ser solidificado em diversas formas, como placa e barra, a depender da sua finalidade. A laminação é etapa final de conformidade, para alterar a estrutura física do aço. (CAVALCANTI, 2012) A Figura 1 apresenta as principais etapas da produção do aço.

**Figura 1.** Fluxograma de Produção do Aço



**Fonte:** Adaptado de EPE, 2009

## 2.2. Impactos Ambientais da Produção de Aço

O principal impacto ambiental referente à produção de aço é a poluição atmosférica. O processo siderúrgico é responsável pela emissão de diversos poluentes gasosos, como monóxido e dióxido de carbono (CO e CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), além de também emitir material particulado e uma série de hidrocarbonetos orgânicos, como o benzeno. (MILANEZ E PORTO, 2008)

As emissões de poluentes atmosféricos ocorrem em diversas fases do processo de produção de aço. As principais fontes são: o transporte e o armazenamento das matérias-primas (minério de ferro e carvão mineral), a coqueificação do carvão, a sinterização, a redução no alto forno, o lingotamento e a central termoeletrica. (CAVALCANTI, 2012)

A etapa de sinterização é uma fonte significativa de poluentes atmosféricos, que são emitidos durante o processo de sinterização em si (emissões primárias) e no pré e pós processo (emissões secundárias). As emissões primárias são obtidas na queima do minério de ferro e as emissões secundárias são provenientes do manuseio das matérias-primas, do descarregamento do produto e do resfriamento do minério aglomerado (sinter). O poluente predominante é a emissão de material particulado, porém, também são emitidos gases, como dioxinas, furanos e diferentes aromáticos. (CAVALCANTI, 2012)

O material particulado (MP) é formado por um grupo de poluentes, como fumaças, poeiras e diversas variedades de substâncias líquidas e sólidas, que ficam suspensas na atmosfera devido ao seu baixo peso e tamanho. O potencial de danos à saúde que estas partículas podem causar é inversamente relacionado ao tamanho das mesmas, ou seja, quanto menor forem as partículas, maior será o prejuízo para a saúde humana. Devido à importância de seu tamanho, as partículas presentes no MP são classificadas pelo seu diâmetro, nas classes de: partículas totais em suspensão, partículas inaláveis, partículas inaláveis finas e fumaça. (CETESB, 2020)

A primeira classificação, partículas totais em suspensão (PTS), é constituída pela maior faixa de tamanho, sendo formada por todas as partículas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 50 µm. Apesar de apenas uma fatia destas serem inaláveis, as partículas maiores ainda podem prejudicar a qualidade de vida da população e também danificar a visão estética do ambiente. (CETESB, 2020)

A segunda classificação, partículas inaláveis ( $MP_{10}$ ), apresenta diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10  $\mu m$ . Ao serem inaladas, podem ficar presas na parte superior do sistema respiratório ou adentrar o sistema de forma mais profunda, podendo até mesmo alcançar os alvéolos pulmonares, caso estejam na faixa mais estreita de diâmetro dentro da classificação. (CETESB, 2020)

A terceira classificação, partículas inaláveis finas ( $MP_{2,5}$ ), é composta por partículas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 2,5  $\mu m$ . Como são partículas extremamente pequenas, possuem a capacidade de penetrar o sistema respiratório de forma profunda, atingindo os alvéolos pulmonares em alguns casos e causando severos prejuízos à saúde. (CETESB, 2020)

Por fim, a classificação de fumaça (FMC) está ligada ao material particulado em suspensão na atmosfera liberado durante processos de combustão. Para determinar a quantidade de fumaça presente no ar é incidida uma luz na poeira e medida a refletância, sendo após a medida a poeira é coletada em um filtro. Logo, o nível de fumaça está diretamente relacionado ao nível de fuligem da atmosfera. (CETESB, 2020)

### **2.3. Legislação Ambiental**

A poluição atmosférica é um problema mundial, que se agravou mais a partir do século XIX. Por ter consequências desfavoráveis à saúde e à qualidade de vida da população, além de trazer prejuízos à fauna e à flora, foram criados órgãos responsáveis por determinar os limites de emissão dos rejeitos, sejam eles líquidos ou gasosos, visando reduzir os danos causados.

No Brasil, o órgão responsável por regulamentar os limites de emissão é o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). As normas vigentes foram redefinidas pela Resolução nº 491 de 2018, que tem como referência os limites citados no guia de qualidade do ar publicado pela Organização Mundial da Saúde. Lançado em 2005, o guia recomenda os limites de emissão para  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ . Com isso, o objetivo da Organização Mundial da Saúde é conservar a saúde e a qualidade de vida da população e do meio ambiente, estabelecendo padrões de qualidade para a atmosfera. (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2018)

Outra norma estabelecida pelo CONAMA foi a Resolução n° 436, de 2011, que fixa os limites de emissão de poluentes atmosféricos por fontes fixas instaladas. Estas são caracterizadas como equipamentos, instalações e/ou processos posicionados em um local fixo e que realizem emissões de matéria para a atmosfera, sejam emissões pontuais ou fugitivas. Emissões pontuais apresentam mecanismos de controle e partem de um ponto específico, com direcionamento do fluxo e sendo sua fonte facilmente localizável. Emissões fugitivas, segundo a resolução n° 382, de 2006, são lançamentos difusos na atmosfera, feito por uma fonte emissora que não apresenta dispositivo capaz de dirigir e/ou controlar seu fluxo. Assim, são emissões não intencionais, que partem de tubulações e vazamentos. Os limites de emissão estabelecidos pelo CONAMA apresentam valores diferentes conforme a tipologia da fonte e o poluente específico. Os limites para a indústria siderúrgica estão especificados no Anexo XIII da resolução. (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2018)

No Quadro 1 estão descritos os valores limite fixados pelo CONAMA (2018), e também os valores de referência recomendados pela OMS, para a indústria siderúrgica.

#### **Quadro1. Limites e Recomendações de Emissão de Material Particulado**

<b>Órgão</b>	<b>MP<sub>10</sub></b>	<b>MP<sub>2,5</sub></b>
CONAMA (anual)	40 – 100 mg/Nm <sup>3</sup>	40 – 100 mg/Nm <sup>3</sup>
OMS(24h)	50 µg/m <sup>3</sup>	25 µg/m <sup>3</sup>
OMS (anual)	20 µg/m <sup>3</sup>	10 µg/m <sup>3</sup>

**Fonte:** Ministério do Meio Ambiente, 2018

Para o processo de sinterização especificamente, o CONAMA (2018) estabelece o valor de 70 mg/Nm<sup>3</sup>, em ambas as categorias. (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2018)

Pelo Quadro1 é possível notar que, apesar do CONAMA ter como referência o guia da OMS, os valores estabelecidos são superiores aos da Organização Mundial da Saúde. Este fato ocorre devido à metodologia adotada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente, que estabelece padrões de qualidade do ar intermediários (PI), com valores temporários a serem efetuados por fases, e o padrão de qualidade final (PF), que apresenta os mesmos valores de

recomendação da OMS. Além disso, a resolução estabelece limites iguais para as emissões de  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ , o que não ocorre no guia do ar da Organização Mundial da Saúde. (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2018)

#### **2.4. Equipamentos de Controle de Emissão**

Diversos equipamentos podem ser empregados para separar misturas gás-sólido, sendo os principais: ciclone, coletor úmido, coletor gravitacional, precipitador eletrostático e filtro de mangas. A escolha do melhor equipamento a ser utilizado é feita com base nas características do processo, na composição química e física do gás e do material particulado, no tamanho das partículas, nos limites de emissão, na vida útil do equipamento, na sua resistência térmica e abrasiva, nos custos de instalação, manutenção e operação, etc. Todos os equipamentos citados operam com o mesmo objetivo, porém, com mecanismos diferentes entre si.

O ciclone possui mecanismo de operação que emprega a força centrífuga para separar as partículas sólidas do gás corrente, sendo um separador mecânico. A mistura gás-sólido é alimentada no ciclone por meio de uma entrada tangencial. O impacto da mudança na direção do fluxo faz com que a mistura gire, originando um vórtice externo descendente. Este movimento circular obriga as partículas sólidas a irem em direção da parede do ciclone. As partículas sólidas acumuladas na parede do ciclone se mantêm em movimento descendente, até que atinjam o orifício localizado na parte inferior e sejam coletadas. Para ciclone apresentar essa convergência, o fluxo de ar segue o caminho contrário e origina um vórtice interno ascendente, saindo pela parte superior do equipamento. (CARVALHO, 2008)

O coletor úmido coleta as partículas sólidas presentes no gás realizando o contato das mesmas com um líquido, usualmente água é empregada. Neste processo, o ar contendo o material particulado, ao entrar no equipamento, é aspergido por gotas, que colidem com as partículas sólidas em suspensão e agrupam-se, tornando a coleta das mesmas mais simples. (GAMA, 2008)

O coletor gravitacional, diferentemente do coletor úmido, separa as partículas sólidas presentes no gás por meio da ação da gravidade, aplicando o princípio da sedimentação livre. O fluxo de ar é alimentado no equipamento e as partículas se depositam na parte inferior, sendo posteriormente coletadas. (DUPONT, 2013)

O precipitador eletrostático possui mecanismo de funcionamento com base no suprimento de carga elétrica às partículas sólidas. O gás alimentado é ionizado e em seguida as partículas, já carregadas, são expostas a um campo elétrico, que produz um movimento de migração eletrostática nas mesmas, e este movimento faz com que as partículas sejam coletadas sobre uma placa aterrada. Na placa, as partículas sólidas dissipam suas cargas e são retiradas do equipamento para descarte. (MEIRA, 2009)

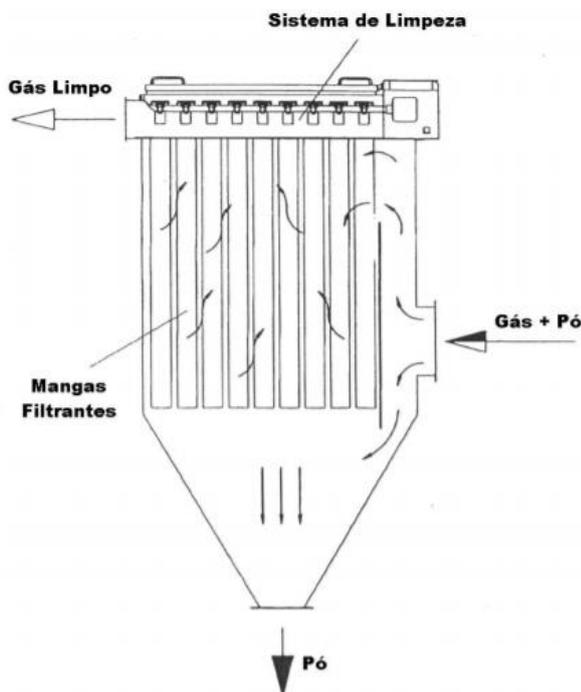
## **2.5. Filtro de Mangas**

O filtro de mangas é um equipamento aplicado em processos de separação de sólidos, como na filtração de líquidos e, principalmente, na filtração de gases. Ele é amplamente utilizado na indústria, por suas diversas vantagens operacionais. O filtro de mangas apresenta alta eficiência de coleta, ultrapassando 99%, um bom custo-benefício, por funcionar com baixo gasto de energia, e uma versatilidade operacional, podendo ser empregado para partículas de diferentes diâmetros, de 1 a 50  $\mu\text{m}$ , em um vasto intervalo de temperatura e para correntes corrosivas. Além disso, o filtro de mangas apresenta baixa sensibilidade às variações de vazão do gás, de carga das partículas e de temperatura.

### **2.5.1. Funcionamento**

No filtro de mangas (Figura 2), o ar sujo a ser filtrado é forçado a passar por um conjunto de mangas, que são meios filtrantes constituídos por materiais naturais ou sintéticos. O gás sujo escoava atravessando as mangas, enquanto as partículas sólidas ficam retidas nas mangas, o ar limpo é liberado na atmosfera. O acúmulo das partículas nas mangas exige que após determinado período de tempo ou ao atingir uma queda máxima de pressão, o filtro passe por uma limpeza das mangas. A torta de partículas ao ser removida cai na parte inferior do filtro, onde é retirada. (CARVALHO, 2008)

**Figura 2.** Esquema simplificado de funcionamento de um filtro de mangas



**Fonte:** Acervo Pessoal

### 2.5.2. Limpeza

Como brevemente exposto no tópico anterior, conforme a filtração ocorre, o material particulado em suspensão no gás de entrada fica retido nas mangas do filtro, formando uma camada de pó, denominada torta de filtração. Durante a formação desta torta, devido ao acúmulo do material particulado no meio filtrante, é causada uma queda de pressão, que aumenta à medida que a torta ganha espessura. Para garantir a eficiência da operação, é estabelecido um valor máximo de queda de pressão ou um tempo máximo de filtração e, após este valor ser atingido, é realizada a limpeza do equipamento. (SALEEM e KREMER, 2007; SALEEM et al., 2012)

Diversos métodos podem ser aplicados para executar a limpeza do filtro, como fluxo de ar reverso, pulso de ar reverso e vibração mecânica. A escolha do método mais apropriado é feita pela análise das propriedades do material particulado. A seguir, será brevemente descrito cada um destes métodos de limpeza. (SEVILLE, 1997)

### **2.5.2.1. Fluxo de Ar Reverso**

A limpeza por meio de um fluxo de ar reverso é feita com a passagem do ar limpo escoando na direção contrária à do fluxo de alimentação, com ar sujo. Este mecanismo exige que seja realizada uma pausa na operação. A duração da pausa é determinada com base no tempo necessário para que uma quantidade significativa de material particulado acumulado seja removida das mangas. Uma vantagem deste método é a longa vida útil do equipamento, já que o desgaste causado pelo escoamento de ar reverso é baixo. A simplicidade de sua montagem também é um benefício, porque o escoamento de ar na direção contrária ocorre por uma combinação de válvulas do sistema. (TOGNETTI, 2007)

### **2.5.2.2. Pulso de Ar Reverso**

O método de limpeza por pulso de ar reverso é feito com a passagem de um curto pulso de ar comprimido, na direção contrária do escoamento de ar sujo e com duração muito pequena, de, no máximo, 150ms. Como o pulso de ar é realizado com ar comprimido, há um recipiente de armazenamento, no qual o ar fica contido a uma pressão de 7 bar. O pulso é emitido por tubos posicionados acima das mangas filtrantes. Com a liberação do ar comprimido, as mangas são infladas e a torta acumulada é retirada das mesmas. Para que o método seja aplicado, o processo de filtração deve ser caracterizado pela formação da torta na superfície externa das mangas. (SEVILLE, 1997)

A limpeza por pulso de ar reverso utiliza uma faixa de operação de 3 a 7 bar de pulso de ar limpo por um período de 50 a 150 ms. A pressão e o tempo de pulso são determinados com base em outros parâmetros da operação, como diâmetro das partículas, permeabilidade do meio e a queda de pressão do sistema. (TURNER et al., 1998)

A principal vantagem deste método é que a limpeza é realizada em paralelo à operação, sem necessidade de parar o processo de filtração. Desta forma, é possível realizá-lo com maior frequência e garantir uma alta eficiência de remoção da torta. Entretanto, o prejuízo que este mecanismo pode trazer é o encurtamento da vida útil do meio filtrante, já que o pulso de ar é feito a alta pressão, o que pode danificar o tecido das mangas. (ANDRADE, 2019; BUONICORE E DAVIS, 1992; SCHMIDT, 1990; SEVILLE, 1997)

O cálculo da eficiência da limpeza por pulso de ar reverso é feito pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{\Delta P_m - \Delta P_r}{\Delta P_m - \Delta P_i} \times 100 \quad (1)$$

Em que  $\Delta P_m$  é a queda de pressão no meio filtrante,  $\Delta P_i$  é queda de pressão inicial e  $\Delta P_r$  é queda de pressão residual. (LEE et al., 2015)

### **2.5.2.3. Vibração Mecânica**

O método de limpeza por vibração mecânica foi a primeira técnica desenvolvida e apresenta diversas vantagens, como o menor custo de implantação e manutenção e montagem simplificada, sendo apropriado para sistemas de pequeno e médio porte. O processo de limpeza é feito por meio de um motor que promove a vibração do meio filtrante e sua consequente aceleração, já que esta é função da frequência e amplitude de vibração. A energia transmitida para o meio filtrante promove o rompimento das ligações adesivas entre o tecido e a torta formada. Entretanto, para realizar a limpeza, é obrigatória uma pausa no processo de filtração, que deve cessar por um intervalo de 2 a 5 minutos. Outro ponto negativo deste método é que, quando as mangas são expostas a estes movimentos bruscos, o equipamento se desgasta de forma mais acelerada, o que diminui a vida útil do sistema. (MOREIRA, 1998; TIENI, 2005; TOGNETTI, 2007)

## **2.6. Meios Filtrantes**

Há uma enorme variedade de materiais que podem ser empregados como meio filtrante, sendo estes classificados como naturais, artificiais ou sintéticos. Também há diferenciação quanto as fibras do tecido, que podem ser trançadas ou não. (RODRIGUES, 2006)

Os tecidos sintéticos são mais comumente empregados atualmente, devido a sua vida útil prolongada e ao menor custo de manutenção, já que possuem maior resistência química e mecânica e menor diâmetro de fibras, o que dificulta o preenchimento dos poros e facilita o processo de remoção da torta, com resistência à remoção menor. Porém, uma desvantagem

é que o preço de compra é maior que o preço dos tecidos naturais. (MARTINS, 2001; SITAPE, 2013)

Quanto à diferenciação da disposição das fibras no tecido, os feltros são os tecidos mais comumente utilizados e apresentam fibras não trançadas. A principal vantagem dos feltros é a facilidade de remoção da torta e limpeza do filtro, já que apresentam um espaçamento menor entre as fibras quando comparados a tecidos trançados, sendo também mais eficientes na coleta de partículas e apresentando menor permeabilidade. Além disso, os feltros são tecidos estáveis e com permeabilidade estável. (SUTHERLAND, 2008)

A permeabilidade do filtro é um parâmetro muito importante, por ser utilizado no cálculo de desempenho do filtro. Além deste, outros parâmetros como vida útil do meio filtrante, eficiência de coleta e nível de dificuldade para remoção da torta acumulada, também são empregados para analisar e determinar o desempenho do filtro. (TURNER et al., 2001)

A permeabilidade do meio filtrante é uma variável relacionada ao diâmetro médio, à porosidade do filtro e ao escoamento do ar na entrada. O aumento da permeabilidade não é uma característica positiva para o sistema, já que diminui a eficiência de coleta. Assim, meios que apresentam poros maiores, tem permeabilidade elevada e eficiência de coleta reduzida. Outro fator que impacta a permeabilidade do meio é o tamanho das partículas em suspensão no gás, já que partículas maiores conseguem penetrar menos no tecido e diminuem a permeabilidade. Entretanto, um ponto negativo neste caso é que a queda de pressão aumenta, pois há um acúmulo maior de partículas na torta. Além das características já citadas, a umidade relativa do ar também influencia na permeabilidade do meio filtrante. (MIGUEL, 2003; MÜLLER, 2008; SALVINI et al., 2000)

O meio filtrante pode ser submetido a diversos tratamentos visando o aumento do seu desempenho, sendo que estes tratamentos podem ser químicos, térmicos ou mecânicos. Os tratamentos aplicados têm como objetivo prolongar a vida útil do meio filtrante e diminuir os custos de operação do sistema. Após o tratamento, o tecido apresenta maior resistência a altas temperaturas, a abrasão e ataques químicos, e menor penetração de partículas, com isso, há uma redução na queda de pressão, uma maior facilidade na remoção da torta formada e uma redução no número de ciclos de filtração necessários. (DONOVAN, 1985; TURNER et al., 1998)

A escolha do meio filtrante mais apropriado ao processo é influenciada por diversas variáveis, como características físicas (tamanho, formato e espessura) e químicas do tecido

e características físicas e químicas do material particulado a ser filtrado, já que a interação entre o meio filtrante e o material particulado é um fator determinante. Além disso, características do processo também devem ser analisadas, como temperatura de operação, velocidade de filtração, tipo do gás e umidade relativa do ar. (BARNETT, 2000; KOCH, 2008)

Os tecidos mais comumente utilizados como meio filtrante em processos de sinterização são: acrílico, aramida (Nomex®), fibra de vidro, poliéster, poliimida (P84®), PPS (Ryton®) e PTFE (Teflon®). Para sistemas com limpeza por pulso de ar reverso, os tecidos mais comumente empregados como meio filtrante são poliéster, polipropileno, poliimida (P84®), PTFE (Teflon®) e vidro. (CARVALHO, 2008; CIRQUEIRA, 2013)

Neste presente trabalho, a manga filtrante empregada foi a membrana de poliimida.

## **2.7. Mecanismo de Filtração**

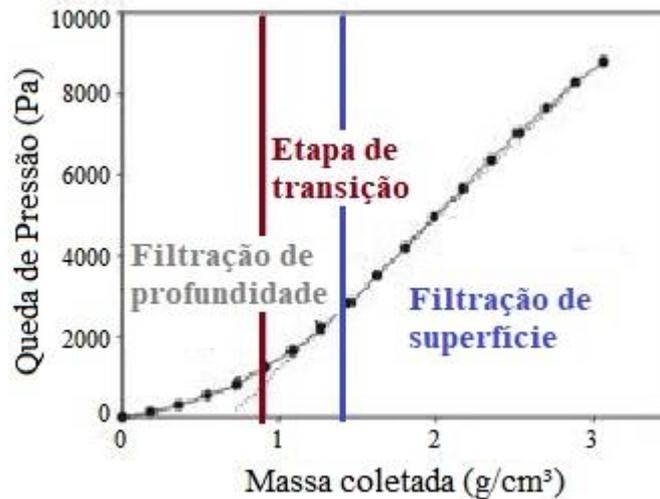
Neste item, serão abordados os mecanismos por trás do processo de filtração, caracterizando suas etapas e como funciona a captura das partículas. Além disso, também serão definidos conceitos sobre as curvas e os ciclos de filtração.

### **2.7.1. Etapas de Filtração**

O processo de filtração é desenvolvido em 3 etapas distintas, sendo elas: filtração em profundidade, transição e filtração de superfície. A eficiência da filtração varia entre as etapas, sendo menor no início do processo, quando a torta ainda não foi formada, aumentando durante a filtração e atingindo seu maior valor na etapa final, quando o acúmulo de material particulado já formou a torta. (HINDS, 1992)

A Figura 3 mostra as três etapas da filtração e a relação das mesmas com a queda de pressão sistema.

**Figura 3.** Etapas da Filtração



**Fonte:** Adaptado de Song, 2006

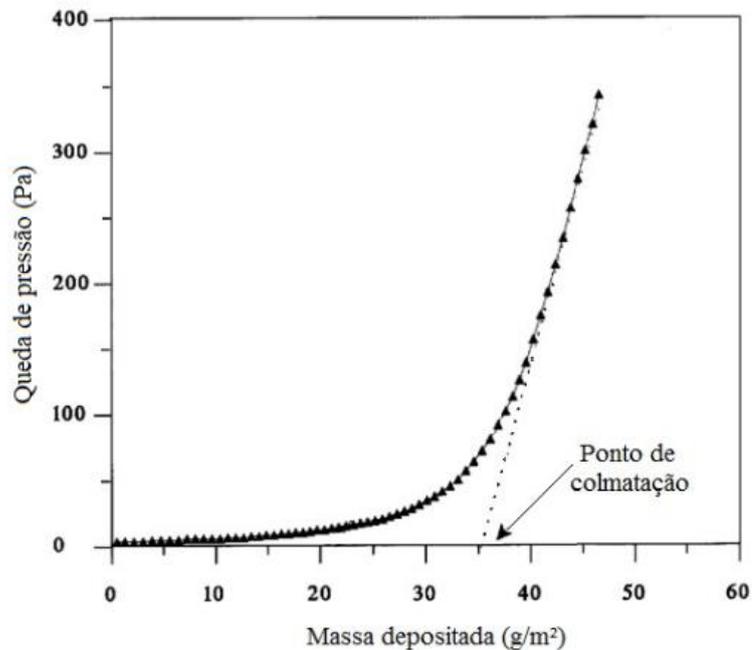
A etapa de filtração em profundidade, que também pode ser chamada de filtração interna, é a primeira etapa, na qual a retenção das partículas em suspensão no gás alimentado sucede na superfície das cerdas que constituem o meio filtrante, gerando acúmulo e a formação da torta de filtração. Esta etapa da filtração ocorre apenas no primeiro uso da manga filtrante ou após a execução de um ciclo de limpeza da mesma. Como nesta fase da filtração as partículas menores não enfrentam a resistência da torta, algumas conseguem penetrar o filtro, o que torna a eficiência de filtração baixa e a variação da queda de pressão pequena. (GRAEF et al., 2005; THEODORE e BUONICORE, 1998; WALSH, 1996)

Em seguida a etapa inicial, ocorre a chamada fase de transição, em que a retenção de partículas aumenta e há um acúmulo de material particulado nas fibras do meio filtrante e também nas partículas retidas anteriormente. Assim, o material particulado capturado previamente passa também a realizar a tarefa de um elemento coletor, elevando a eficiência de coleta do sistema, assim como sua perda de carga. Conforme a fase de transição acontece, cresce o número de partículas capturadas, e estas formam os dendritos, que são caracterizados como aglomerações de material particulado. Os dendritos aumentam até que preencham os poros do tecido e formem uma camada de material particulado na superfície do filtro, conhecida como torta de filtração. (REMBOR E KASPER, 1996; SEVILLE, 1997; WALSH, 1996)

A etapa final, denominada de filtração superficial ou de superfície, é iniciada após a formação da torta de filtração e nesta fase a elevação da queda de pressão mostra comportamento linear. Na etapa de filtração superficial, o tecido deixa de ser o principal elemento coletor, e a torta de filtração é que cumprirá esse papel, retendo até mesmo partículas de menor diâmetro presentes na corrente gasosa de alimentação. Com retenção e o acúmulo de partículas mais altas, há um aumento da espessura da torta e, conseqüentemente, da queda de pressão do sistema, que cresce até atingir o valor máximo estabelecido, quando é realizada a limpeza do filtro. (ROTHWELL, 1980; SEVILLE, 1997)

A determinação do exato momento em que a torta de filtração é formada é adversa, por isso, alguns pesquisadores utilizam como referência um valor experimental para estipular o ponto de formação da torta. Este ponto é caracterizado como ponto de colmatação, ou seja, o ponto em que há entupimento dos poros do filtro, impedindo a passagem das partículas. O ponto de colmatação corresponde à junção da assíntota da curva de queda de pressão com o eixo de carga mássica, como pode ser observado na Figura 4. (WALSH, 1996)

**Figura 4.** Ponto de Colmatação



**Fonte:** Adaptado de Walsh e Stenhouse, 1997

### **2.7.2. Mecanismo de retenção de partículas**

A deposição das partículas no meio filtrante pode ocorrer de 5 maneiras distintas, são elas: atração eletrostática, difusão, gravitacional, impactação inercial e interceptação direta. As formas de deposição são influenciadas pelo diâmetro das partículas impactadas, sendo os mecanismos por impactação inercial e interceptação direta são dominantes para partículas maiores, o mecanismo por atração eletrostática atua quando as partículas possuem diâmetros maiores que 5  $\mu\text{m}$  e o de difusão atua em partículas ainda menores, com diâmetros menores ou iguais a 1  $\mu\text{m}$ . (HINDS, 1992; SEVILLE, 1997)

O mecanismo de atração eletrostática consiste na ação de forças eletrostáticas que criam um campo elétrico externo, por meio das cargas elétricas presentes nas fibras do meio filtrante, atraindo e retendo as partículas. A força eletrostática é mais comumente predominante em precipitadores eletrostáticos. (HINDS, 1992)

O mecanismo de difusão promove a captura das partículas devido à sua rota distinta em relação ao escoamento original da corrente gasosa. Este mecanismo atua nas menores partículas, com diâmetro diminuto e que apresentam movimento aleatório, característica típica do movimento Browniano. (HINDS, 1992)

O mecanismo gravitacional atua pela ação da gravidade, ocasionando o desalinhamento da partícula de sua trajetória original. Portanto, este mecanismo é impactado pela direção da corrente gasosa e apresenta melhor desempenho na deposição de partículas quando o escoamento gasoso ocorre de cima para baixo. (HINDS, 1992)

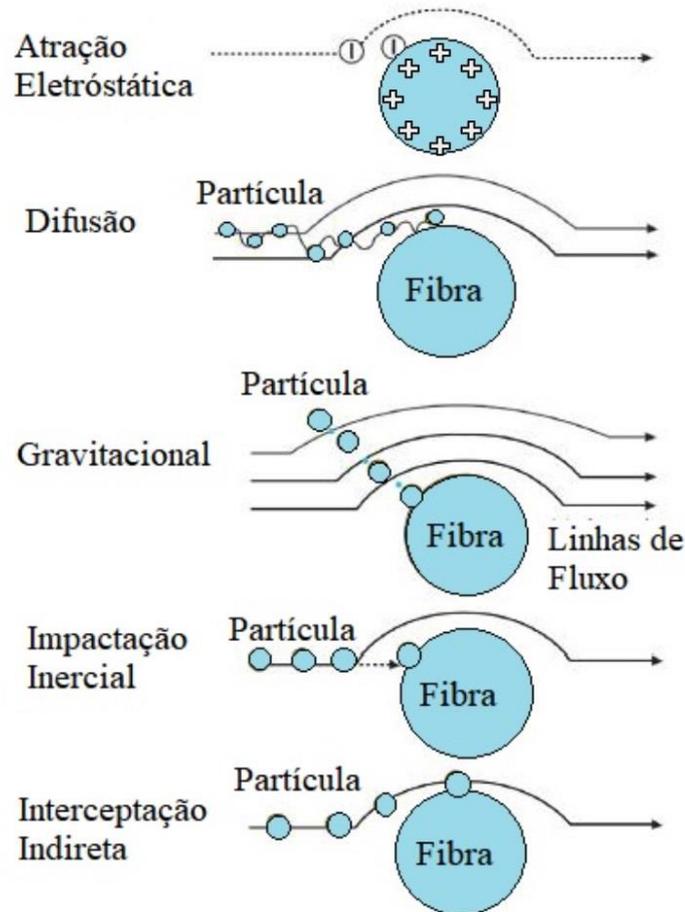
O mecanismo de impactação inercial tem sua atuação ligada à inércia das partículas em suspensão na corrente gasosa. Na impactação inercial, a ação inercial das partículas faz com que estas sejam projetadas de suas linhas de direção inicial e colidam-se com o elemento coletor. Porém, não há garantia da retenção das partículas, que podem se depositar ou não na superfície do meio filtrante após o choque. (CIRQUEIRA, 2013)

Por último, no mecanismo de interceptação direta a captura das partículas suspensas na corrente gasosa ocorre pela colisão das mesmas com o tecido filtrante, sendo que as partículas apresentam rota idêntica ao escoamento gasoso inicial. (HINDS, 1992)

Dentre os mecanismos citados, alguns têm sua ocorrência atrelada à interação meio filtrante-partícula e, por isso, ocorrem com maior frequência na etapa inicial da filtração. (PARK et al., 2012)

A Figura 5 mostra a representação dos 5 mecanismos de deposição de partículas caracterizados anteriormente.

**Figura 5.** Mecanismos de Captura de Partículas



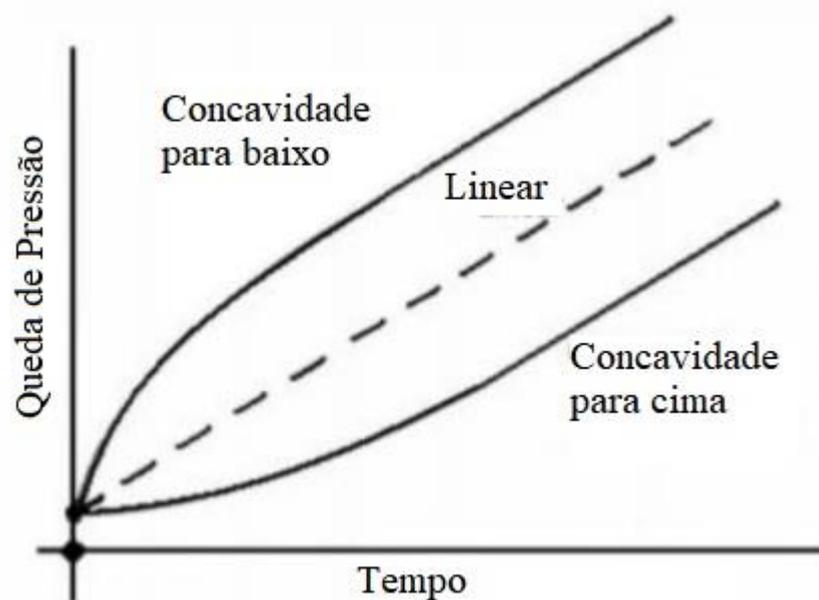
**Fonte:** Acervo Pessoal

### 2.7.3. Curvas de Filtração

A curva da queda de pressão do sistema de filtração gasosa pelo tempo de duração da filtração pode assumir três comportamentos diferentes: linear, côncava para baixo e côncava para cima. É importante ressaltar que os comportamentos citados apenas são considerados para o ciclo de filtração inicial. Após a limpeza da manga, do segundo ciclo em diante, a curva de queda de pressão do sistema pelo tempo pode assumir um comportamento significativamente distinto, sendo influenciada pela eficiência da limpeza e quantidade de pó que fica retida na manga. (TIENI, 2005)

Na Figura 6 estão representados os 3 comportamentos da curva de queda de pressão do sistema em função do tempo de filtração.

**Figura 6.** Curvas de Filtração



**Fonte:** Adaptado de Leith e Allen, 1986

A curva com comportamento côncavo para baixo representa um ciclo de filtração gasosa no qual o aumento da queda de pressão acontece em um curto período de tempo, já que a torta é formada rapidamente. Este comportamento é o mais comum dentre os três apresentados. A curva com comportamento linear representa um sistema no qual o material particulado em suspensão na corrente gasosa não infiltra nas fibras do tecido, e o acúmulo de pó ocorre apenas na superfície do meio filtrante. A última curva, com comportamento côncavo para cima, representa o ciclo no qual a torta de filtração já foi formada e a limpeza feita foi incompleta, ou seja, após parte do material particulado acumulado permanecer depositado no meio filtrante. Este fenômeno é conhecido como “*patchy cleaning*”, um termo em inglês que caracteriza uma limpeza em pedaços. (DENNIS et al., 1981; DONOVAN, 1985)

#### 2.7.4. Ciclos de filtração

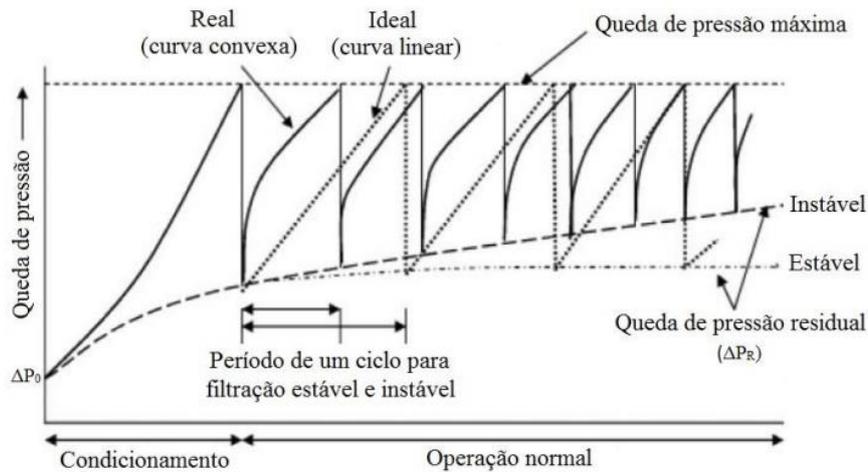
Um ciclo de filtração completo é caracterizado como um processo de filtração acompanhado de um processo de limpeza do filtro utilizado, no caso da filtração abordada neste trabalho, a limpeza é representada pela remoção da torta de filtração formada. (NORMA VDI 3926, 2003)

O comportamento assumido como ideal em um processo de filtração de um filtro de mangas é aquele que apresenta curva de queda de pressão em função do tempo linear e ciclos de filtração com a mesma duração, independente da ordem de ocorrência. A limpeza do filtro e remoção da torta formada é uniforme e total em um comportamento ideal, com concentrações de pó no meio e vazão de volume constantes. Assim, a pressão residual apresenta o mesmo valor em todos os ciclos de filtração. (MUKHOPADHYAY, 2009; NORMA VDI 3926, 2003)

O funcionamento ideal de um filtro de mangas não é observado na prática. O funcionamento real de um filtro de mangas não apresenta curva de queda de pressão em função do tempo com comportamento linear e a duração de um ciclo completo de filtração é significativamente menor em relação ao comportamento ideal. Isto ocorre devido ao desempenho da limpeza, ou seja, depende da quantidade de poeira que permanece retida no meio filtrante após a limpeza, e do efeito da compressão sobre a torta formada durante os ciclos de filtração. Normalmente, a regeneração do meio filtrante não é completa devido ao fenômeno conhecido como “*patchy cleaning*” ou limpeza por blocos, o que faz a queda de pressão residual variar de valor entre os ciclos. (MUKHOPADHYAY, 2009; NORMA VDI 3926, 2003)

A Figura 7 traz a representação de ciclos de filtração com comportamento ideal e ciclos de filtração com comportamento real, ressaltando as diferenças entre estes.

**Figura 7. Ciclos de Filtração Ideal e Real**



**Fonte:** Adaptado de Mukhopadhyay, 2009

## 2.8. Parâmetros de Filtração

Diversos parâmetros são medidos e/ou calculados para analisar o desempenho da filtração e otimizar o funcionamento do sistema. A seguir, serão descritos os principais parâmetros e suas aplicações.

### 2.8.1. Velocidade de Filtração

A velocidade de filtração é a velocidade que a corrente gasosa assume na interface com a manga filtrante. A velocidade corresponde ao valor da vazão de gás alimentado pela área de filtração do meio filtrante. Este parâmetro tem forte influência nos custos iniciais do sistema e também nos custos de manutenção e operação do mesmo, por ser utilizado na determinação da área total de tecido necessária para filtrar todo gás que escoar no sistema. O valor de velocidade usualmente empregado no cálculo de área filtrante é entre 0,3, 3, 3,7 m/min e o valor a ser adotado está relacionado ao tecido utilizado como meio filtrante, à temperatura da corrente gasosa, às características do material particulado, à concentração de alimentação, à distribuição de diâmetro das partículas em suspensão e ao mecanismo de limpeza empregado no filtro. (SEVILLE, 1997; TIENI, 2005)

Além da importância já citada da velocidade de filtração para dimensionar a área filtrante do filtro, em conjunto com o mecanismo de limpeza adotado, a velocidade de filtração exerce influência em diversas outras variáveis do sistema de filtração. Outros parâmetros relacionados à velocidade de filtração são: profundidade do meio filtrante que as partículas em suspensão atingem, desgaste da manga filtrante, duração necessária para o ciclo de filtração, porosidade e compactação da torta de filtração, queda de pressão total no filtro e queda de pressão residual. (AZEVEDO, 2009; TOGNETTI, 2007)

A adoção de velocidades de filtração elevadas no sistema reduz o valor de investimento inicial necessário, por exigir uma área mais enxuta dos filtros de mangas, e também diminui o tempo de filtração. Entretanto, altos valores de velocidade de filtração também trazem prejuízos, como o encurtamento da vida útil da manga filtrante e um sacrifício maior para a limpeza do filtro e remoção da torta de filtração, gerando um aumento da queda de pressão durante a filtração e também da queda de pressão residual. (TOGNETTI, 2007)

Em contrapartida, a adoção de baixas velocidades de filtração beneficia a limpeza do meio filtrante, facilitando a remoção da torta de filtração, já que a adesão entre o tecido e as partículas é reduzida. Todavia, há o tempo de filtração exigido passa a ser maior, o que eleva o gasto de energia e os custos de operação. (DONOVAN, 1985)

### **2.8.2 Queda de Pressão**

A queda de pressão do sistema é caracterizada como o empecilho que a corrente gasosa encontra ao penetrar o meio filtrante, característica conhecida como resistência do meio filtrante. A queda de pressão é calculada através da variação de pressão entre a entrada e a saída do filtro. O parâmetro usualmente é determinado em milímetros de coluna d'água (mmca) ou em pascal (Pa). (SEVILLE, 1997)

A queda de pressão no sistema eleva-se conforme o processo de filtração transcorre, já que há um acúmulo de partículas e a consequente formação de uma torta de filtração. A elevação da queda de pressão influencia na periodicidade necessária para remoção da torta de filtração e, portanto, também está ligada ao tempo de vida útil da manga filtrante. (JEON e JUNG, 2004; TOGNETTI, 2007)

O valor de queda de pressão no início de um novo ciclo é significativamente menor ao valor da queda de pressão logo antes da remoção da torta de filtração, porém, em comparação

com o valor da queda de pressão no início do primeiro ciclo, onde o filtro está totalmente limpo, há um pequeno aumento. Esta diferença entre a queda de pressão no filtro virgem e no filtro imediatamente após a limpeza é chamada de queda de pressão residual e seu valor tende a elevar-se a cada novo ciclo iniciado, já que o acúmulo de partículas entre as fibras do tecido vai aumentando, o que reduz a porosidade na superfície do meio filtrante. (ANDRADE, 2019; FARGNOLLI, 2010; MAUSCHITZ et al., 2007)

A queda de pressão total ( $\Delta P_T$ ) do sistema pode ser obtida através da soma dos valores de queda de pressão no meio filtrante ( $\Delta P_M$ ) e queda de pressão na torta de filtração formada ( $\Delta P_C$ ), conforme pode ser visto na equação: (MATTESON e ORR, 1987)

$$\Delta P_T = \Delta P_M + \Delta P_C \quad (2)$$

A faixa de queda de pressão em que grande parte dos filtros de manga operam está entre 50 e 250 milímetros de coluna de água, já que os testes e experimentos feitos indicaram que esta faixa de atuação apresentava os melhores resultados econômicos. A adoção de quedas de pressão acima da recomendada exige mais dos equipamentos, além da necessidade de motores com maior potência, o que eleva o gasto energético e, conseqüentemente, aumenta os custos do sistema. (CAVASSENO, 1980)

### **2.8.3. Permeabilidade**

A permeabilidade é uma variável relacionada à interação dinâmica entre a corrente gasosa e o meio filtrante, além de apontar a resistência que o gás enfrenta ao penetrar por um canal poroso. Um fluido, ao penetrar um meio poroso, transforma a energia do sistema como um todo. Esta transformação de energia do sistema está ligada à redução da pressão que a corrente exerce no meio. (INNOCENTINI et al., 1999)

A permeabilidade é um parâmetro fortemente atrelado à porosidade, à distância entre os poros e ao arranjo do material. As partículas em suspensão na corrente gasosa de alimentação do filtro de mangas se acumulam no meio filtrante durante a filtração, o que reduz o diâmetro dos poros do tecido e, portanto, altera o valor da permeabilidade do meio filtrante em relação ao mesmo virgem. Para mitigar a variação da permeabilidade ao longo da filtração e manter o parâmetro estável com o seu valor original, os fabricantes devem

produzir tecidos capazes de barrar a penetração das partículas em suspensão no gás nas fibras dos mesmos. (BUONICORE e DAVIS, 1992; MEDEIROS, 2015)

A permeabilidade do tecido é um parâmetro muito importante na escolha do meio filtrante a ser utilizado. Uma baixa permeabilidade indica uma coleta reduzida de partículas no sistema, o que diminui as vantagens econômicas do processo de filtração. (TOGNETTI, 2007)

Com o objetivo de analisar o escoamento de um fluido em um meio poroso, diversas equações podem ser aplicadas. As duas equações mais amplamente utilizadas são as equações de Darcy (Equação 3) e a equação de Forchheimer (Equação 4), que serão descritas a seguir.

A equação de Darcy, descrita na Equação 3, é empregada para escoamentos com fluidos incompressíveis e velocidades reduzidas de escoamento, ou seja, considera apenas os efeitos puramente viscosos. Esta equação desconsidera a influência da densidade do fluido em escoamento na queda de pressão observada e, portanto, a curva obtida só é válida dentro do intervalo das medidas experimentais, sem extrapolação da mesma ou aplicação para outros fluidos e/ou condições. (OLIVEIRA, 2015)

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} V_S \quad (3)$$

Na equação 3,  $\Delta P$  representa a queda de pressão no sistema,  $L$  é a espessura do meio filtrante,  $\mu$  é a viscosidade do fluido em escoamento,  $k_1$  é a constante de permeabilidade Darciana e  $V_S$  representa a velocidade superficial de escoamento da corrente gasosa.

A equação de Forchheimer, diferentemente da equação de Darcy, apresenta a possibilidade de cálculo de parâmetros de permeabilidade válidos para situações diversas. A equação de Forchheimer é descrita pela equação:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} V_S + \frac{\rho g}{k_2} V_S^2 \quad (4)$$

Sendo que  $\Delta P$  representa a queda de pressão no sistema,  $L$  é a espessura do meio filtrante,  $\mu$  é a viscosidade do fluido em escoamento,  $k_1$  e  $k_2$  são constantes de permeabilidade do meio poroso,  $V_S$  representa a velocidade superficial de escoamento da corrente gasosa e

$p_g$  a densidade do gás em escoamento. O primeiro termo da equação se refere aos efeitos puramente viscosos, enquanto o segundo termo representa os efeitos cinéticos e/ou inerciais. (ANDRADE, 2019; TANABE et al., 2011)

Como a permeabilidade é um parâmetro muito relevante na escolha do meio filtrante, esta deve ser informada pelo fabricante do tecido. Usualmente, a permeabilidade é informada por meio do valor necessário de vazão volumétrica que percorre uma área útil do tecido para resultar em uma queda de pressão no filtro especificada. Exemplos de unidades empregadas por fabricantes para descrever a permeabilidade de um meio filtrante são:  $(\text{m}^3/\text{min})/\text{m}^2$  para 125 Pa ou  $(\text{L}/\text{min})/\text{m}^2$  para 20 mmca. (CARVALHO, 2008)

#### 2.8.4. Porosidade

A porosidade do meio filtrante é uma variável de extrema importância no processo de filtração, pois mede a quantidade de espaços vazios na manga filtrante e exerce um papel fundamental na escolha de qual tecido empregar na operação. A porosidade do meio filtrante está diretamente relacionada à quantidade de partículas que conseguem se depositar no seu interior. Durante a filtração, conforme as partículas se depositam nos poros do tecido, há uma redução da sua porosidade e uma consequente elevação da queda de pressão no meio filtrante. (CARVALHO, 2018; OLIVEIRA, 2015)

A porosidade do meio filtrante pode ser aferida por meio de equações que caracterizam a resistência de um meio poroso ao escoamento de um fluido. Este método é descrito como método indireto e um exemplo é a Equação de Ergun:

$$\frac{\Delta P}{L_T} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu V_f}{d_p^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g V_f^2}{d_p} \quad (5)$$

Em que  $\Delta P$  representa a queda de pressão no sistema,  $L_T$  é a espessura total da torta de filtração,  $\varepsilon$  é a porosidade do meio,  $\mu$  é a viscosidade do fluido em escoamento,  $V_f$  é a velocidade de filtração,  $d_p$  representa o diâmetro médio de Sauter das partículas em suspensão na corrente gasosa e  $p_g$  a densidade do gás em escoamento. (TOGNETTI, 2007)

Apesar da porosidade ser estimada por meio de Equações como a de Ergun, é recomendado que os fabricantes forneçam esta informação, devido à importância do parâmetro para a operação de filtração. (TOGNETTI, 2007)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais e métodos empregados na realização deste estudo. Inicialmente, foi realizada a caracterização do material particulado proveniente de uma etapa de sinterização da indústria siderúrgica e, em seguida, foram executados os ciclos de filtração com a poliimida aromática (PI) como meio filtrante.

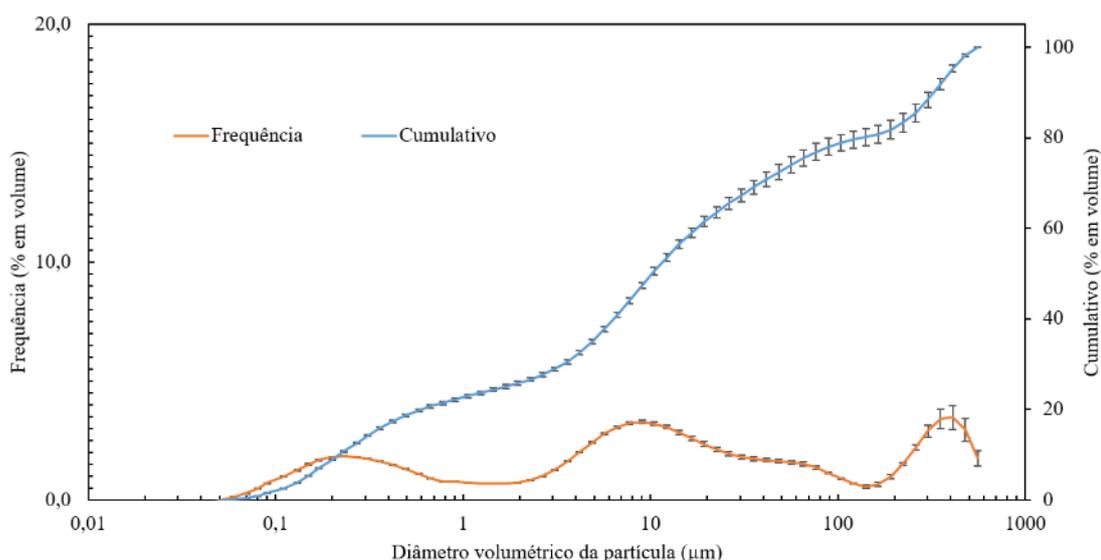
#### 3.1. Caracterização do Material Particulado

O material particulado empregado nos experimentos de filtração deste estudo foi concedido por uma indústria siderúrgica e é oriundo da etapa de sinterização primária. O pó foi coletado no silo localizado à jusante do filtro de mangas.

Três subamostras foram retiradas da amostra original e, para cada subamostra, foi realizada a distribuição granulométrica por volume, utilizando o equipamento Malvern Mastersizer Microplus. Posteriormente, foi feita a média das distribuições granulométricas de cada subamostra e gerado um gráfico de frequência das distribuições e também uma curva da distribuição cumulativa.

Na Figura 8, estão representadas as distribuições granulométricas cumulativa e por frequência para o material particulado.

**Figura 8.** Distribuição Granulométrica em Volume do Material Particulado



Fonte: Acervo Pessoal

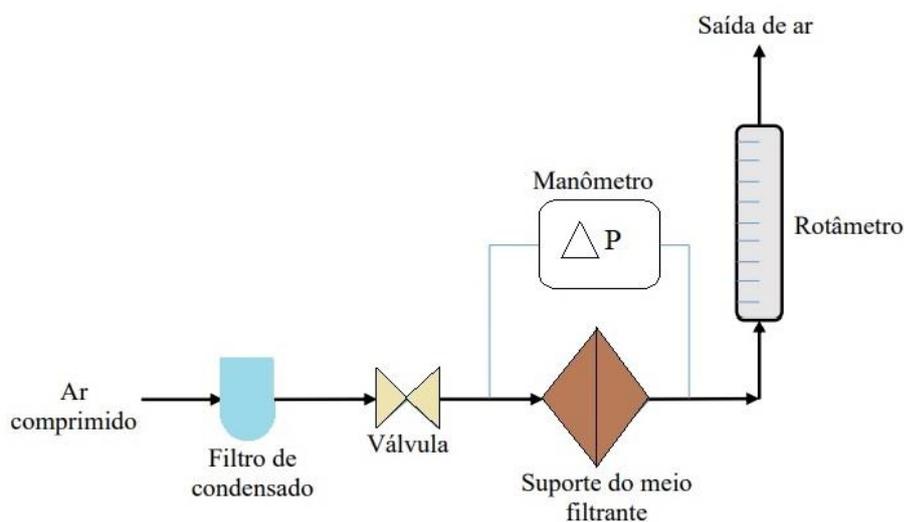
O diâmetro volumétrico médio do material particulado, obtido através da análise descrita, foi de  $D [4,3] = 17,1 \mu\text{m}$ .

A massa específica da amostra de material particulado também foi determinada. O equipamento utilizado para obter a densidade foi o AccuPyc 1330 Micrometrics, presente no laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. A massa específica obtida para o material particulado foi de  $2,38 \text{ g/cm}^3$ .

### 3.2. Caracterização do Meio Filtrante Virgem

As mangas filtrantes utilizadas no presente estudo foram produzidas a partir de fibras de poliimida aromática (PI), comercialmente denominada como P84. A caracterização do meio filtrante utilizado na fabricação das mangas foi feita através de imagens da superfície superior da manga obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura e também foi determinada a permeabilidade utilizando o aparato experimental apresentado na Figura 9.

**Figura 9.** Unidade experimental empregada na determinação da permeabilidade do meio filtrante



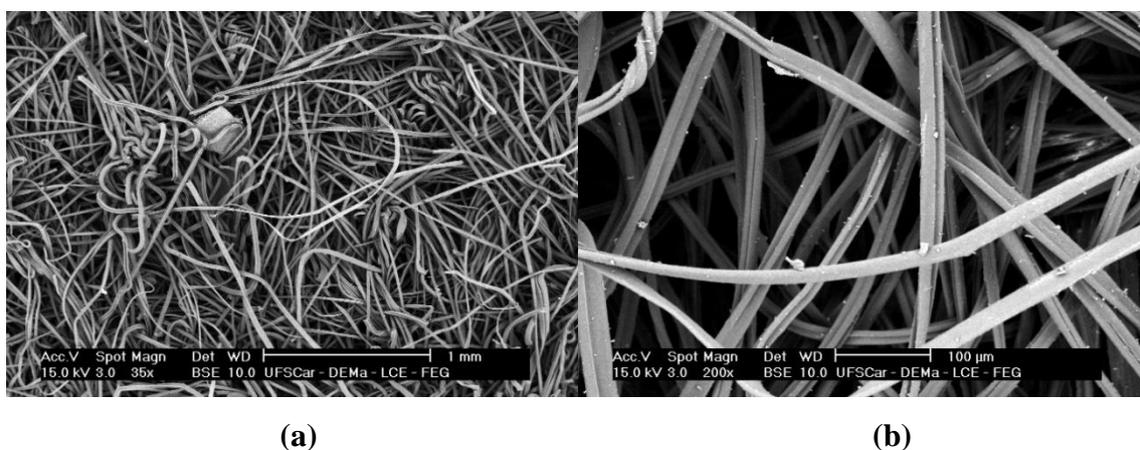
**Fonte:** Adaptado de Carvalho, 2018

### 3.2.1. Imagens da Superfície Superior das Mangas Filtrantes

As imagens das superfícies superiores dos meios filtrantes foram obtidas com o auxílio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), que está presente no Laboratório de Caracterização Estrutural do Departamento de Materiais da UFSCar (LCE/DEMa - UFSCar). As mangas utilizadas não apresentam costura.

A Figura 10 traz as imagens do meio filtrante obtidas.

**Figura 10.** Imagem da Superfície Superior da Manga de Poliimida Aromática Sem Costura, com ampliações 35x (a) e 200x (b)



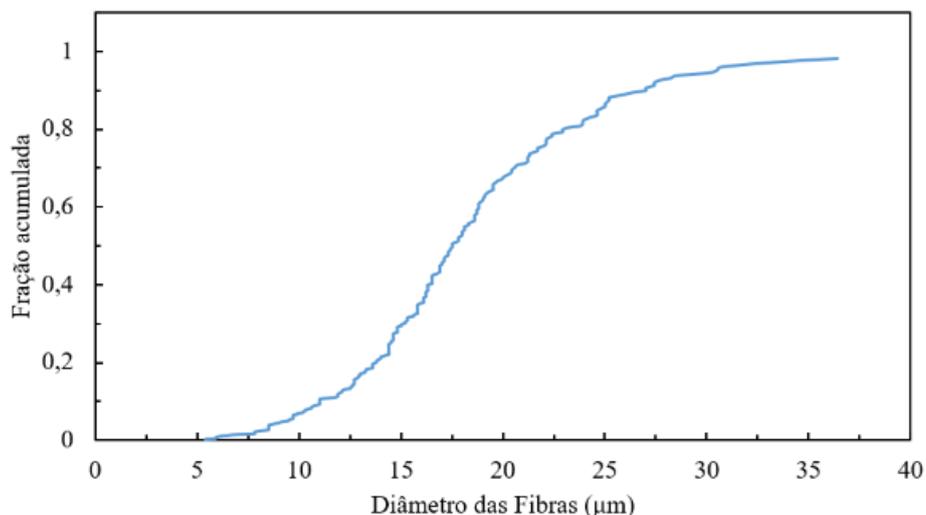
**Fonte:** Acervo Pessoal

A análise das imagens do meio filtrante ampliadas obtidas pelo MEV revela que as fibras que constituem o tecido possuem diâmetros variados e são fibras do tipo fita.

A partir das imagens do meio filtrante obtidas no MEV e do método descrito por Bortolassi, Guerra e Aguiar (2017), foi possível calcular o diâmetro médio das fibras do tecido. O valor resultante como diâmetro médio foi de  $16,3 \pm 5,9 \mu\text{m}$ .

A Figura 11 mostra a curva cumulativa de distribuição das fibras do meio filtrante por diâmetro.

**Figura 11.** Distribuição das Fibras do Tecido Filtrante por Diâmetro



**Fonte:** Acervo Pessoal

### 3.2.2. Permeabilidade e Porosidade

A permeabilidade do meio filtrante constituído de poliimida aromática foi calculada através de valores obtidos por meio de experimentos laboratoriais. O experimento realizado consistiu na passagem de ar limpo por meio de uma amostra do meio filtrante. Esta amostra foi fixada em um suporte de filtração na unidade experimental e a vazão de ar limpo foi variada, sendo medida a queda de pressão no filtro por meio de um manômetro digital para cada vazão aferida. Os experimentos foram realizados até a vazão máxima de 65 L/min. Além disso, também foi determinado o valor de vazão correspondente a uma perda de carga de 196 Pa.

A permeabilidade do meio filtrante foi calculada através da Equação de Forchheimer (Equação 4), descrita anteriormente.

Para uma perda de carga de 196 Pa, o valor de permeabilidade obtido para o meio filtrante por meio da Equação 4 foi de 12 (m<sup>3</sup>/min)/m<sup>2</sup>.

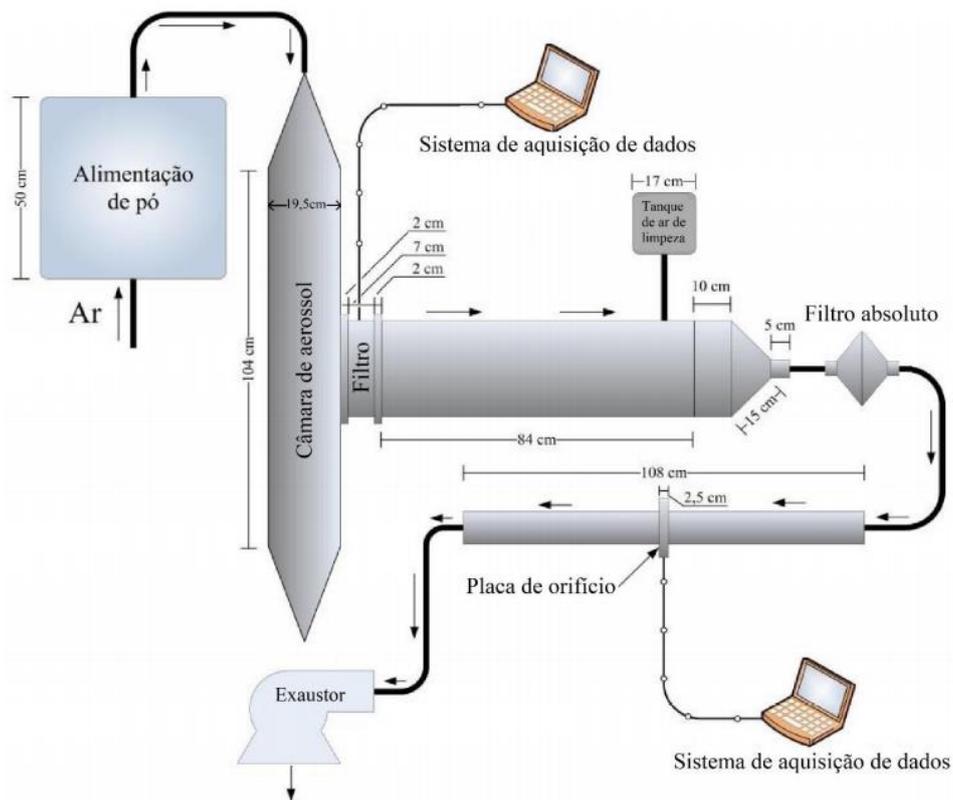
A porosidade do meio filtrante também foi calculada, através da Equação de Ergun (Equação 5), descrita anteriormente. O valor obtido para a porosidade do tecido de poliimida aromática foi de 0,83.

### 3.3. Descrição dos Equipamentos de Filtração com base na norma VDI 3926

Os ciclos de filtração para o desenvolvimento deste estudo foram realizados no laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. A unidade experimental em que os experimentos foram realizados foi construído utilizando a norma VDI 3926 como referência. Este equipamento simula em escala laboratorial um filtro de mangas industrial.

A Figura 12 apresenta um esquema do sistema de filtração com os equipamentos empregados durante os experimentos e suas localizações na unidade experimental.

**Figura 12.** Unidade Experimental de Filtração



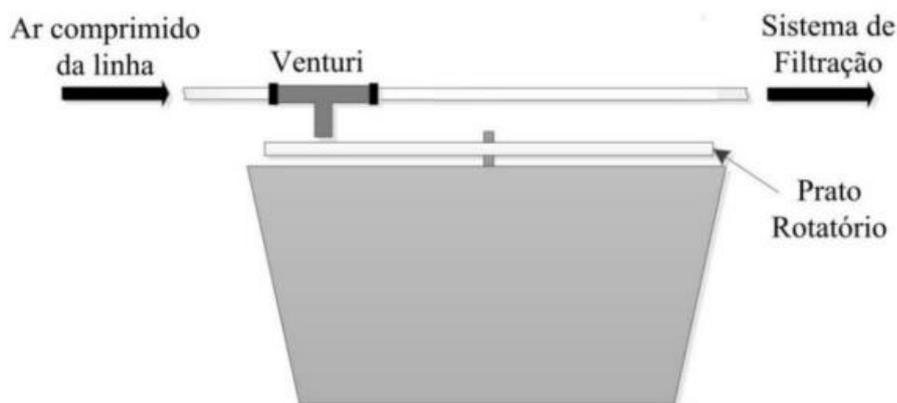
**Fonte:** Adaptado de Cirqueira, Tanabe e Aguiar, 2014

O ar de alimentação do sistema é oriundo da linha de ar comprido do laboratório de Controle Ambiental e, para que este seja alimentado sem umidade, o ar passa por uma coluna de sílica, que tem como função a retirada da umidade presente no ar. Em seguida, o ar comprido passa pela caixa contendo o material particulado, arrastando o pó posicionado

sobre o prato giratório através de um tubo de Venturi. Então, o aerossol formado pela mistura de ar e material particulado é disperso em uma câmara onde o meio filtrante está localizado.

A Figura 13 representa os equipamentos utilizados para produzir o aerossol de ar e material particulado.

**Figura 13.** Unidade de Alimentação de Ar e Material Particulado



**Fonte:** Adaptado de Cirqueira, 2017

O exaustor localizado no final da unidade experimental é responsável pela sucção do ar e do material particulado em suspensão contidos na câmara. Antes de atingir o exaustor, o gás passa pelo filtro com área útil de 201,06 cm<sup>2</sup>, que retém o material particulado em suspensão no ar. As partículas que conseguem atravessar o filtro são retidas em um filtro absoluto, ou seja, um filtro que apresenta eficiência acima de 99,9%. Este fica posicionado à jusante. Ambos os filtros possuem um suporte de sustentação. (CARVALHO, 2018)

A eficiência de coleta do meio filtrante é calculada por meio de gravimetria. O filtro de poliimida aromática, objeto do estudo, e o filtro absoluto foram pesados previamente e posteriormente a cada ciclo de filtração. O cálculo da eficiência do meio filtrante foi feito a partir da equação:

$$E = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (6)$$

Em que E é a eficiência do filtro, C<sub>i</sub> é a massa inicial de material particulado e C<sub>f</sub> é a massa de particulado ao fim da filtração. (CARVALHO, 2018)

### 3.4. Descrição dos Ciclos de Filtração

Os ciclos de filtração foram realizados utilizando mangas filtrantes constituídas de poliimida aromática e que não apresentavam costuras. O material particulado a ser filtrado foi fornecido por uma indústria siderúrgica e era proveniente da etapa de sinterização.

O processo de filtração foi executado até que a queda de pressão no meio filtrante atingisse 100 mmH<sub>2</sub>O. Quando era atingido o valor máximo estabelecido para a queda de pressão, era realizada uma limpeza no filtro com pulso de ar reverso com pressão de 5 bar e duração de 60 ms. Após a limpeza, o ciclo de filtração estava finalizado e iniciava-se outro ciclo.

Todos os ciclos de filtração foram realizados no equipamento presente no laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química da UFSCar, conforme representado na Figura 12. A unidade experimental e as condições de operação seguem a norma VDI 3926. As condições de operação adotadas neste estudo estão apresentadas no Quadro 2.

**Quadro 2.** Condições Experimentais adotadas nos Ciclos de Filtração

Dado	Valor
Concentração de pó no meio filtrante	5000 mg/m <sup>3</sup>
Diâmetro útil do meio filtrante	147 mm
Vazão mássica de pó alimentada	2267 mg/min
Vazão volumétrica de ar	34 L/min
Velocidade de filtração	2 m/min
Temperatura	Ambiente

**Fonte:** Acervo Pessoal

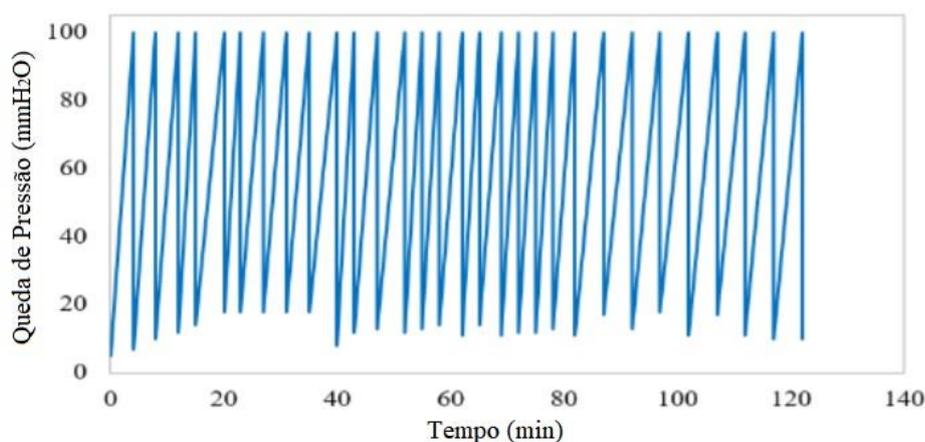
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos neste presente estudo com base nos experimentos realizados, descritos no item previamente apresentado. Além disso, este capítulo também contém as discussões de análise sobre os resultados obtidos.

### 4.1. Ciclos de Filtração para o Meio Filtrante constituído de Poliimida Aromática

A Figura 14 apresenta os resultados obtidos para os trinta ciclos de filtração efetuados até a queda de pressão atingisse o valor máximo de 100 mmH<sub>2</sub>O, com posterior limpeza do filtro. O tecido empregado como meio filtrante foi a poliimida aromática sem costura e o material particulado utilizado na alimentação do sistema foi fornecido por uma indústria siderúrgica, proveniente do processo de sinterização de uma aciaria.

**Figura 14.** Perda de Carga por Tempo de Filtração (Trinta Ciclos Completos)



**Fonte:** Acervo Pessoal

É possível observar, analisando-se a Figura 14, que o primeiro ciclo de filtração apresenta uma curva praticamente linear. Este comportamento é característico de um meio filtrante que contém porosidade superficial menor e filtração de superfície. O aumento da queda de pressão residual logo nos primeiros ciclos de filtração demonstra que ocorreu *patchy cleaning*, como é denominada a limpeza em pedaços ou limpeza parcial do filtro.

## 4.2. Queda de Pressão Residual

A Figura 15 apresenta a queda de pressão residual no meio filtrante para os trinta ciclos de filtração.

**Figura 15.** Queda de Pressão Residual no Meio Filtrante



**Fonte:** Acervo Pessoal

A análise da Figura 15 mostra que o tecido de poliimida aromática apresentou variação na queda de pressão residual de 7 mmH<sub>2</sub>O a 18 mmH<sub>2</sub>O, com um breve momento de estabilidade quando a queda de pressão atingiu um valor de 18 mmH<sub>2</sub>O, nos ciclos de filtração de 5 a 9. Esta baixa estabilidade da queda de pressão residual, variando significativamente entre os ciclos, pode ser um indicativo de que a limpeza do filtro não foi eficiente, com a presença do fenômeno conhecido como *patchy cleaning*.

Uma das possíveis causas da limpeza do filtro ser apenas parcial é alta compactação de partículas na superfície da manga filtrante. Isto pode ser verificado pelo acentuado aumento da queda de pressão nos primeiros ciclos de filtração. Após o décimo ciclo, como a torta estava bem compactada na superfície da manga, no momento em que ocorreu o pulso para limpeza da manga houve uma ruptura desta torta, fazendo com que a limpeza ocorresse

com o desprendimento de blocos maiores. Após este ciclo, a filtração continuou com uma superfície filtrante mais limpa, sendo que a compactação da torta não foi mais tão acentuada como a observada nos primeiros ciclos (de 1 a 5).

### 4.3. Eficiência de Coleta

A eficiência de coleta de partículas foi determinada para os seguintes ciclos: 1º, 15º e 30º, representando assim a eficiência de coleta no início da filtração, no meio do processo e ao final da filtração. A eficiência de coleta foi calculada utilizando a Equação 6, apresentada no capítulo anterior. O Quadro 3 mostra os resultados obtidos.

**Quadro 3.** Eficiência de Coleta de Partículas

Ciclo	Eficiência de Coleta (% em massa)
1º	99,68
15º	99,81
30º	99,83

**Fonte:** Acervo Pessoal

A eficiência do 1º ciclo de filtração foi um pouco menor que as eficiências obtidas para o 15º e 30º ciclo. Isto ocorre porque nos primeiros ciclos de filtração o tecido ainda não está completamente saturado. No 15º ciclo a eficiência de filtração foi apenas 0,13% maior que o 1º ciclo, sendo a variação do 15º ciclo para o 30º bem menor, com um aumento de coleta de apenas 0,02%.

A evolução da eficiência de coleta, para a grande maioria dos meios filtrantes utilizados pelas indústrias, apresenta um aumento significativo da eficiência à medida que os ciclos vão sendo executados. Isto ocorre porque, à medida que as partículas vão se depositando e acumulando nas fibras da manga filtrante durante a filtração, as partículas retidas nas fibras vão modificando a estrutura e a superfície do meio filtrante, de tal forma que elas passam a ser os principais elementos coletores. No entanto, este aumento da eficiência não foi tão significativo, até mesmo para os primeiros ciclos de filtração, sendo ainda mais insignificante para os demais ciclos. Isto evidencia que a manga filtrante

escolhida para ser utilizada pela indústria siderúrgica é uma manga com poros mais fechados, resultando na filtração de superfície, como foi observado para o primeiro ciclo de filtração na Figura 14. Portanto, é uma manga eficiente na coleta das micropartículas.

Por outro lado, a variação da queda de pressão residual ao longo dos ciclos indica que a limpeza realizada entre os ciclos não é eficiente, apesar da saturação dos poros do meio filtrante ter tido influência sobre a eficiência de coleta. Nos casos ideais em que a limpeza do filtro é eficiente, com a remoção das partículas presentes nas fibras do tecido e sem a ocorrência do fenômeno conhecido como *patchy cleaning*, a queda de pressão residual varia tanto como variou ao longo dos ciclos de filtração. Isto demonstra que apesar da eficiência da manga utilizada, a sua limpeza não foi satisfatória, o que pode levar a troca das mangas em um tempo menor do que usualmente esperado, entre 2 ou 3 anos. Esta substituição das mangas antecipada eleva o custo de operação e manutenção dos filtros de mangas.

Desta forma, ainda serão necessários mais estudos para investigar melhor a performance destas mangas e se elas são realmente viáveis para serem utilizadas no filtro de mangas para o processo de sinterização da indústria siderúrgica.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo, serão apresentadas as principais conclusões sobre a poliimida aromática e seu uso como manga filtrante em um processo de filtração com material particulado proveniente da etapa de sinterização de uma indústria siderúrgica. Além disso, serão propostas sugestões para desenvolvimento nos próximos trabalhos e estudos sobre o tema.

### 5.1. Conclusões

A caracterização do tecido de poliimida aromática sem costura resultou em um diâmetro médio das fibras de  $16,3 \pm 5,9 \mu\text{m}$ , uma porosidade de 0,83 e uma permeabilidade de  $12 (\text{m}^3/\text{min})/\text{m}^2$ .

O tecido de poliimida aromática sem costura apresentou alta eficiência de coleta como manga filtrante em um processo de tratamento do material particulado proveniente da etapa de sinterização de uma indústria siderúrgica. Já no primeiro ciclo de filtração o meio filtrante se mostrou eficiente, com uma eficiência mássica de coleta de partículas igual a 99,68%. A eficiência de coleta teve um leve aumento ao longo dos trinta ciclos de filtração, chegando a um valor máximo de 99,83% no 30º ciclo.

A limpeza do meio filtrante não foi muito eficaz, com a ocorrência do fenômeno conhecido como *patchy cleaning*, resultando na variação da queda de pressão residual ao longo dos 30 ciclos de filtração.

### 5.2. Sugestões

Como sugestão para continuar o estudo do tema, sugere-se realizar a caracterização e análise de eficiência de coleta de outros tecidos que podem ser aplicados como meio filtrante para o material particulado proveniente da etapa de sinterização da indústria siderúrgica. Após o desenvolvimento destas análises, será possível comparar o desempenho da poliimida aromática com outros diferentes meios filtrantes, com o objetivo de definir qual destes é o mais apropriado para a aplicação como manga filtrante no processo de sinterização da indústria siderúrgica.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, B. K. S. A. **Avaliação do precoating e dos meios filtrantes para filtro de mangas do processo de despoeiramento secundário de aciaria.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade de São Carlos. São Carlos. 2019.
- AZEVEDO, S. G. R. **Estudo da influência do formato das partículas na operação de filtração de gases.** [S.l.]. 2009.
- BARNETT, T. **Improving the performance of fabric filter dry dust collection equipment,** p. 28-32, 2000.
- BORTOLASSI, A. C. C.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L. **Characterization and evaluate the efficiency of different filter media in removing nanoparticles.** Separation and Purification Technology, v. 175, p. 79-86, 2017.
- BRASIL. **Resolução CONAMA nº 436.** [S.l.]. 2011.
- BRASIL. **Resolução CONAMA nº 491.** [S.l.]. 2018.
- BUONICORE, A. J.; DAVIS, W. T. Air Pollution Engineering Manual. **Air & Waste Management Association.** Van Nostrand Reinhold, New York, p. 118-131, 1992.
- CALLÉ, S. et al. **Evolutions of efficiency and pressure drop of filter media during clogging and cleaning cycles.** Powder Technology, v. 128, p. 213-217, 2002.
- CARVALHO, A. T. **Otimização de ciclone para a pré-separação de areia na produção de petróleo.** Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2008.
- CARVALHO, M. V. A. **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 (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2018.
- CAVALCANTI, P. P. S. **Gestão ambiental na indústria siderúrgica - aspectos relacionados às emissões atmosféricas.** Dissertação (Bacharel em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2012.
- CAVASSENO, V. **Industrial air pollution engineering.** [S.l.]. 1980.
- CETESB,** 2020. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>>. Acesso em: 16 setembro 2020.

CIRQUEIRA, S. S. R. **Avaliação do desempenho dos ciclos de filtração e regeneração dos meios filtrantes com limpeza por pulso de ar reverso.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - 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.** Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2017.

CRUZ, F. S. **Estudo de escoamento de gás no interior de ciclones através da técnica de fluidodinâmica computacional.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade de São Paulo. São Paulo. 2013.

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.* [S.l.]. 1985.

DUPONT, F. **Análise e dimensionamento de câmaras de aspiração em máquinas de limpeza de cereais.** Dissertação (Especialista em Engenharia Industrial) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Panambi. 2013.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Caracterização da energia no setor siderúrgico.** Brasil. 2009.

EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR. Disponível em: <[https://www.inf.ufes.br/~neyval/Rec\\_Atm\(moduloVI\).pdf](https://www.inf.ufes.br/~neyval/Rec_Atm(moduloVI).pdf)>. Acesso em: 31 agosto 2018.

FARGNOLLI, A. G. **Estudo da compressibilidade de tortas de filtração de gases em filtros de tecido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2010.

GAMA, M. S. C. **Estudo de um sistema de limpeza de gases usando um lavador venturi de seção circular.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2008.

GRAEF, A.; STENHOUSE, J. T. I.; WALSH, D. C. **The effect of solid aerosol on prefilter material performance.** *Journal of Aerosol Science*, v. 26, p. S741-S742, 1995.

HINDS, W. C. **Aerosol technology: properties, behavior and measurement of airborne particles.** New York. 1982.

HINDS, W. C. **Aerosol technology: properties, behavior and measurement of airborne particles**, v. 2, p. 192-195, 1998.

**INFOMET**, 1998. Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=234>>. Acesso em: 05 outubro 2020.

INNOCENTINI, M. D. M. et al. **How accurate is Darcy's law**. American Ceramic Society Bulletin, p. 64-68, 1999.

JEON, K.; JUNG, Y. A. **Simulation study on the compression behavior of dust cakes**. Powder Technology, v. 141, p. 1-11, 2004.

KOCH, M. **Cake filtration modeling - Analytical cake filtration model and filter medium characterization**. Trondheim. 2008.

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.

MARTINS, J. C. **Estudo da deposição de material particulado no meio filtrante durante a filtração gás-sólido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2001.

MATTESON, M. J.; ORR, C. **Filtration principles and practices**. 2ª. ed. New York: Dekker, 1987.

MAUSCHITZ, G.; RUD, H.; HOEFLINGER, W. **Particle deposition in the depth of nonwoven dust filter media and its effect on filter clogging**. FILTECH, Alemanha, v. II, n. Alemanha, p. II-34 a II-41, 2007.

MEDEIROS, W. B. B. **Estudo da permeabilidade de meios porosos com solução polimérica**. Dissertação (Bacharel em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2015.

MEIRA, C. R. **Desempenho de um precipitador eletrostático operando na remoção de nanopartículas de aerossóis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2009.

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.

MILANEZ, B.; PORTO, M. F. S. **A ferro e fogo: impactos da siderurgia para o ambiente e a sociedade após a reestruturação dos anos 1990**. Brasília. 2008.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Mortes devido à poluição aumentam 14% em dez anos no Brasil**, 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/noticias/mortes-devido-a-poluicao-aumentam-14-em-dez-anos-no-brasil>>. Acesso em: 17 setembro 2020.

MOREIRA, F. L. **Estudo da vibração mecânica na remoção de tortas de filtração em filtros de manga.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 1998.

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, p. 195-315, 2009.

MÜLLER, D. **Desenvolvimentos de filtros cerâmicos fibrosos para gases a altas temperaturas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2008.

**NORMA VDI 3926.** Part 1: testing of filter media for cleanable filters Standard test for the evaluation of cleanable filter media. Düsseldorf. 2003.

OLIVEIRA, F. M. **Estudo do efeito eletrostático na filtração de partículas de cimento em filtros de mangas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2015.

PARK, B. H. et al. **Filtration characteristics of fine particulate matters in PTFE/Glass composite bag filter.** *Aerosol and air quality research*, v. 12, p. 1030-1036, 2012.

PORTAL VIRTUHAB, 2020. Disponível em: <<https://portalvirtuhab.paginas.ufsc.br/aco/>>. Acesso em: 21 setembro 2020.

QUEIROZ, P. G. M.; JACOMINO, V. M. F.; MENEZES, M. A. B. C. **Composição elementar do material particulado presente o aerosol atmosférico do município de Sete Lagoas, Minas Gerais.** *Quim. Nova*, v. 30, n. 5, p. 1233-1239, 2007.

REMBOR, H. J.; KASPER, G. **Fibrous Filters - Measurements of spatial distribution of deposited particle mass, pressure drop and filtration efficiency.** [S.l.]. 1996.

RODRIGUES, K. B. **Filtração de gases: estudo da deposição de diferentes tortas de filtração em diferentes meios filtrantes.** Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2006.

ROTHWELL, E. **Fabric dust filtration: principles and practice.** *Filtration & Separation*, p. 471-475, 1980.

SALEEM, M. et al. **Influence of operating parameters on cake formation in pilot scale pulsejet bag filter.** *Powder Technology*, v. 224, p. 28-35, 2012.

SALEEM, M.; KRAMMER, G. **Optical in-situ measurement of filter cake height during bag filter plant operation.** *Powder technology*, v. 173, p. 93-106, 2007.

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.

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

SERVIÇO NACIONAL DE SAÚDE, 2018. Disponível em: <[SEVILLE, J. P. K. \*\*Gas cleaning in demanding applications\*\*. \[S.l.\]: Blackie Academia and Professional. School of Chemical Engineering; The University of Birmingham, 1997.](https://www.sns.gov.pt/noticias/2018/05/02/oms-poluicao-atmosferica/#:~:text=Segundo%20a%20OMS%2C%20em%202016,4%2C2%20milh%C3%B5es%20de%20pessoas.&text=Os%20pa%C3%ADses%20mais%20pobres%2C%20na,superiores%20ao%20estabelecido%20pela%20OMS.>. Acesso em: 21 setembro 2020.</p></div><div data-bbox=)

SILVA NETO, O. G. **Estudo da porosidade de tortas em filtros de manga operando na filtração de gases**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2002.

SUTHERLAND, K. **Filters and filtration handbook**. 5<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Oxford: ButterworthHeinemann, 2008.

TANABE, E. H. **Desempenho de meios filtrantes na filtração de gases a altas pressões**. [S.l.]: [s.n.], 2011. p. 150.

TANABE, E. H. et al. **Experimental investigation of deposition and removal of particles during gas filtration with various fabric filters**. *Separation and Purification Technology*, v. 80, p. 187-195, 2011.

THEODORE, L.; BUONICORE, A. J. **Air pollution control equipment - particulates**. CRC Press, v. 1, 1998.

TIENI, E. F. **Filtração de gases: estudo do fenômeno da limpeza por blocos**. 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 (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2007.

TURNER, J. H. E. A. **Particulate Matter Controls**, 1998. Disponível em: <<https://www.3.epa.gov/ttnecat1/dir1/cs6ch1.pdf>>. Acesso em: 9 agosto 2020.

WALSH, D. C. **Recent advances in the understanding of fibrous filter behaviour under solid particle load**. *Filtration and Separation*, v. 33, 1996.

WALSH, D. C. et al. **The effect of solid and liquid aerosol particle loading on fibrous filter material performance.** Journal of Aerosol Science, v. 27, p. 617-618, 1996.

WED - WORLD ENVIRONMENT DAY, 2019. Disponível em: <<https://www.worldenvironmentday.global/>>. Acesso em: 3 outubro 2020.

WHO. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, e dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, 2005. Disponível em: <[https://www.who.int/ceh/capacity/v1\\_poluicao\\_externa.pdf?ua=1](https://www.who.int/ceh/capacity/v1_poluicao_externa.pdf?ua=1)>. Acesso em: 9 setembro 2020.

WHO. The International Pharmacopoeia, 2019. Ninth Edition. Disponível em: <<https://apps.who.int/phint/en/p/docf/>>. Acesso em: 15 outubro 2020.

ZHOU, G. et al. **3D simulation of sintering flue gas desulfurization and denitration in a bubbling gas absorbing tower.** [S.l.]. 2016.