

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

MAX VINÍCIUS APARECIDO DE CARVALHO

**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**

São Carlos -SP
2018

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

MAX VINÍCIUS APARECIDO DE CARVALHO

**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**

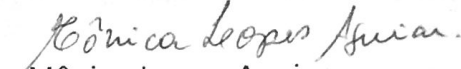
Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em 1º de março de 2018, para obtenção do título de mestre em Engenharia Química.

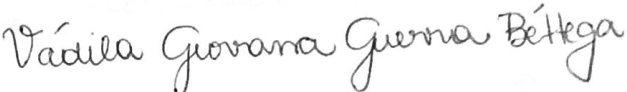
Orientação: Prof^a. Dr^a. Mônica Lopes Aguiar

São Carlos -SP
2018

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MAX VINÍCIUS APARECIDO DE CARVALHO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 01 DE MARÇO DE 2018.

BANCA EXAMINADORA:


Mônica Lopes Aguiar
Orientadora, UFSCar


Vádila Giovana Guerra Béttega
UFSCar


Rafael Sartim
UFES

RESUMO

Atualmente, para os processos de filtração de gases, algumas indústrias buscam equipamentos para o controle de emissão de material particulado mais eficientes, que se adequem aos limites de emissão e que minimizem os custos operacionais. Para isso, é preciso que um filtro de mangas tenha vida útil prolongada, além de operar com baixa queda de pressão e alta eficiência de coleta para partículas finas. Portanto, deve-se empregar um meio filtrante cujo material suporte as características do gás como vazão, temperatura e corrosividade, e também do material particulado, como higroscopia, abrasividade e tamanho. Sendo assim, este trabalho visa avaliar meios filtrantes de poliéster com e sem membrana de PTFE (Teflon®) de dois fornecedores, e que podem ser empregados no processo de filtração de gases em filtro de mangas na etapa de despoeiramento secundário da aciaria de uma indústria siderúrgica. Para tal finalidade, foram realizadas caracterizações dos meios filtrantes e do material particulado coletado no filtro de mangas do processo em estudo, ensaios de filtração baseados na norma de filtração VDI 3926, avaliação da penetração de partículas nos meios filtrantes para o 1º ciclo de filtração sem limpeza, e avaliação da eficiência de coleta de partículas finas (PM2.5), ultrafinas (PM1.0) e nanométricas (10 a 300 nm). Verificou-se que o meio filtrante de poliéster do fabricante B sem PTFE obteve maior tempo de filtração e maior massa retida no 1º ciclo de filtração sem limpeza, porém maior penetração de partículas, e foi mais eficiente na coleta de nanopartículas que o sem PTFE do fabricante A. Por sua vez, o poliéster sem PTFE do fabricante A levou um tempo 16% maior para completar 20 ciclos de filtração, sendo mais eficiente que o sem PTFE do fabricante B na coleta de PM2.5 e PM1.0 antes e após os 20 ciclos. Já os meios filtrantes com PTFE apresentaram eficiências de coleta próximas a 100% tanto para nano quanto para micropartículas.

Palavras-chave: Filtração de gases. Filtro de mangas. Jato de ar pulsante. Meio filtrante. Aciaria.

ABSTRACT

Nowadays, in addition to complying with the emission limits determined by the authorities, some companies seek to minimize their operating costs. In order to achieve this, they must choose a proper material for the filter media, taking into account characteristics of the gas (mass flow, temperature and corrosivity) and the particulate matter (hygroscopy, abrasiveness and size). It is also necessary that the filter has extended span life and operate with low pressure drop and high collection efficiency for fine particles. So, this study aims to evaluate PTFE coated and non-coated polyester filter media of two manufacturers that can be employed in the secondary dedusting system of the LD process of a steel mill, a pulse jet fabric filter. In this way, first the particulate matter collected in the industrial baghouse and the filter medias were characterized. Then filtration experiments were conducted in a VDI 3926 based test rig which simulates a real pulse jet fabric filter. The penetration of particles in the media was calculated for the first filtration cycle, and the collection efficiency of PM_{2.5} and PM_{1.0} was determined before and after the cycles. Also, the collection efficiency of NaCl nanoparticles was calculated for the virgin filter medias in the 10 to 300 nm range. Experimental results of the first filtration cycle show that fabrics from manufacturer B had lower total filtration time and higher weight gain than the competitor, but its non PTFE coated version was the one that particles penetrated the most. On the other hand, the non PTFE coated polyester media of manufacturer A took more time than the one of manufacturer B to complete 20 cycles, and was more efficient in collecting particles before and after the cycles. And the PTFE coated media showed near 100% collection efficiency for PM_{2.5}, PM_{1.0} and nanoparticles for both manufacturers.

Keywords: Gas Filtration. Dedusting. Pulse jet fabric filter. Filter media. Steel mill.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Funcionamento básico de um filtro de mangas.....	5
Figura 2 – Gaiolas para sustentação das mangas.....	6
Figura 3 – Limpeza por fluxo de ar reverso.	7
Figura 4 – Limpeza por agitação mecânica.	7
Figura 5 – Fotografia de um filtro de mangas com sistema de limpeza por jato de ar pulsante.....	8
Figura 6 – Estrutura básica do filtro de mangas com sistema de limpeza por jato de ar pulsante.....	9
Figura 7 – Aplicação de não-tecidos por usuários finais no Oeste Europeu em 2015 .	12
Figura 8 - Tipos de fibras.....	13
Figura 9 - Tipos de entrelaçamento de fibras	14
Figura 10 – Efeito da calandragem na superfície da fibra	15
Figura 11 – Meio filtrante recoberto com membrana de PTFE (Teflon®)	16
Figura 12 – Meio filtrante submetido a precoating	16
Figura 13 - Determinação do ponto de colmatação	18
Figura 14 - Mecanismos de captura de partículas por uma fibra.....	19
Figura 15 - Ciclos de filtração de sistemas estáveis e instáveis.....	20
Figura 16 – Exemplo de distribuição de tamanho das partículas de uma amostra.	30
Figura 17 – Caracterização de partícula segundo a forma.....	32
Figura 18 – Artigos relacionados a filtro de mangas entre 1950 e 2017	35
Figura 19 – Distribuição granulométrica em volume do material particulado	39
Figura 20 – Distribuição granulométrica aerodinâmica (em massa) do material particulado	39
Figura 21 – Imagens obtidas pelo MEV do material particulado	41
Figura 22 – Imagens obtidas por MEV da superfície dos meios filtrantes. Fibras de poliéster dos fabricantes (a) A e (b) B; fibras de PTFE dos fabricantes (c) A e (d) B; Detalhe da membrana de PTFE aplicada sobre as fibras de poliéster do fabricante (e) A e (f) B.	43
Figura 23 – Determinação do diâmetro médio das fibras dos meios filtrantes	44
Figura 24 – Distribuição de diâmetros das fibras do meio filtrante de poliéster.....	45
Figura 25 – Distribuição de diâmetros das fibras do meio filtrante de poliéster com membrana de PTFE	45

Figura 26 – Unidade experimental para determinar a permeabilidade do meio filtrante	46
Figura 27 – Equipamento de filtração com contador de partículas	48
Figura 28 – Distribuição granulométrica cumulativa em volume dos materiais particulados.....	50
Figura 29 – Distribuição granulométrica em volume dos materiais particulados	51
Figura 30 – Distribuição granulométrica cumulativa em massa dos materiais particulados utilizados na filtração com contador de partículas APS	51
Figura 31 – Unidade experimental de determinação de eficiência de coleta de nanopartículas.....	53
Figura 32 – Equipamento de filtração	54
Figura 33 – Sistema de alimentação de material particulado	54
Figura 34 – Suporte do meio filtrante. (a) frente onde o pó é depositado e (b) verso. .	55
Figura 35 – Painel de controle do equipamento de filtração	56
Figura 36 – Ensaio de filtração com relação ar pano de 1,27 m/min e concentração de pó de 989 mg/m ³	58
Figura 37 – Equipamento de aplicação de cola no meio filtrante.....	60
Figura 38 – Amostra de um meio filtrante embutida em resina	61
Figura 39 –Interface torta/filtro obtida por MEV	62
Figura 40 – Partículas retidas no interior de um meio filtrante: (a) normal e (b) binarizada.....	63
Figura 41 – Ensaio de filtração com o pó da aciaria para o meio filtrante de poliéster do fabricante A	64
Figura 42 – Ensaio de filtração com o pó da aciaria para o meio filtrante de poliéster do fabricante B.....	65
Figura 43 – Ensaio de filtração com o pó de aciaria para o meio filtrante de poliéster com membrana de PTFE do fabricante A.	65
Figura 44 – Ensaio de filtração com o pó de aciaria para o meio filtrante de poliéster com membrana de PTFE do fabricante B.....	65
Figura 45 – Ensaios de filtração com contador de partículas para os meios filtrantes virgens	66
Figura 46 – Eficiência de coleta dos meios filtrantes do fabricante B utilizando pó de aciaria e rocha fosfática	67

Figura 47 – Eficiência de coleta de nanopartículas de NaCl para os meios filtrantes dos fabricantes A e B	67
Figura 48 – Ensaio de filtração de 100 mmH ₂ O de queda de pressão realizado em triplicata para os meios filtrantes de poliéster dos fabricantes A e B.....	69
Figura 49 – Ensaio de filtração de 100 mmH ₂ O de queda de pressão realizado em triplicata para os meios filtrantes de poliéster com membrana de PTFE dos fabricantes A e B.	69
Figura 50 – Imagens obtidas no MEV da seção transversal dos meios filtrantes submetidos aos ensaios de filtração de 100 mmH ₂ O de queda de pressão. Poliéster do fabricante A em (a) e do B em (b); poliéster com membrana de PTFE do fabricante A em (c) e do B em (d). Aumento de 200x e escala de 400 µm.	71
Figura 51 – Penetração de partículas ao longo da espessura do meio filtrante para o ensaio de 100 mmH ₂ O.....	72
Figura 52 – 20 ciclos de filtração com o meio filtrante de poliéster do fabricante A...	73
Figura 53 – 20 ciclos de filtração com o meio filtrante de poliéster do fabricante B...	73
Figura 54 – Queda de pressão residual dos meios filtrantes sujeitos a 20 ciclos de filtração.....	74
Figura 55 – Eficiência de coleta de partículas após 20 ciclos de filtração	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os métodos de limpeza.	9
Tabela 2 – Comparação entre os tipos de filamento.....	13
Tabela 3 – Comparação entre os tipos de entrelaçamento.....	14
Tabela 4 – Tipos de fibras e suas propriedades	17
Tabela 5 – Relação ar pano recomendada para filtro de mangas com limpeza por jato de ar pulsante.....	22
Tabela 6 – Exemplos de diâmetro equivalente	31
Tabela 7 – Distribuição granulométrica das amostras de material particulado por câmara do filtro de mangas da indústria siderúrgica.....	38
Tabela 8 – Composição química do material particulado.....	40
Tabela 9 – Especificações técnicas dos meios filtrantes fornecidas pelos fabricantes.....	42
Tabela 10 – Diâmetro médio das fibras dos meios filtrantes virgens.....	44
Tabela 11 – Constantes de permeabilidade K_1 e K_2 e porosidade dos meios filtrantes virgens	47
Tabela 12 – Permeabilidade dos meios filtrantes	48
Tabela 13 - Propriedades dos materiais particulados nos ensaios com contador de partículas.....	50
Tabela 14 – Condições experimentais dos ensaios de filtração.....	59
Tabela 15 – Resultados dos ensaios de filtração de 100 mmH ₂ O de queda de pressão.....	70
Tabela 16 – Tempo de filtração para 20 ciclos	74
Tabela A1 – Dados do filtro de mangas da indústria siderúrgica.....	87
Tabela A2 – Características do material particulado segundo documentação da indústria siderúrgica.....	88
Tabela B1 – Limites de emissão para material particulado.....	89

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	vi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação do trabalho.....	1
1.2 Objetivo.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Equipamentos para filtração de gases	4
2.2 Filtro de mangas.....	5
2.2.1 Princípio de funcionamento	5
2.2.2 Sistemas de limpeza	6
2.2.3 Classificação dos filtros de mangas	10
2.3 Meios filtrantes.....	11
2.3.1 Tecidos e Não-tecidos	11
2.3.2 Disposição das fibras	12
2.3.3 Acabamento	14
2.4 Teoria da Filtração	18
2.4.1 Etapas de filtração	18
2.4.2 Mecanismos de captura de partículas.....	19
2.4.3 Ciclos de filtração	20
2.5 Parâmetros da filtração.....	21
2.5.1 Velocidade de filtração (relação ar-pano).....	21
2.5.2 Queda de pressão	22
2.5.3 Permeabilidade.....	24
2.5.4 Porosidade.....	25

2.5.5	Solidez.....	28
2.5.6	Eficiência de limpeza	28
2.5.7	Eficiência de coleta	29
2.5.8	Tamanho, forma e densidade das partículas	29
2.5.9	Carga de material particulado	32
2.5.10	Forças de adesão e coesão.....	33
2.5.11	Temperatura	34
2.6	Estado da arte.....	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1	Descrição geral	36
3.2	Caracterização do material particulado	37
3.3	Caracterização dos meios filtrantes virgens	42
3.4	Determinação da eficiência de coleta de partículas PM10, PM2.5 e PM1.0	48
3.5	Ensaio para a determinação da eficiência de coleta de nanopartículas...52	
3.6	Equipamento de filtração baseado na norma VDI 3926	53
3.7	Ensaio de filtração com queda de pressão máxima de 100 mmH₂O	59
3.8	Preparação de amostras para serem submetidas ao MEV	60
3.9	Determinação da penetração das partículas nos meios filtrantes	62
3.10	Ensaio com ciclos de filtração e limpeza.....	63
4	RESULTADOS.....	64
4.1	Determinação da eficiência de coleta de partículas PM10, PM2.5 e PM1.0	64
4.2	Determinação da eficiência de coleta de nanopartículas.....	67
4.3	Ensaio de filtração com queda de pressão máxima de 100 mmH₂O	68
4.4	Determinação da penetração das partículas nos meios filtrantes	70
4.5	Ensaio com ciclos de filtração e limpeza	73

5 CONCLUSÕES	76
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
REFERÊNCIAS	79
APÊNDICE A - Depoeiramento secundário da aciaria de uma indústria siderúrgica	86
APÊNDICE B - Legislação ambiental	89

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação do trabalho

Nas últimas décadas, a crescente industrialização e o desenvolvimento dos centros urbanos resultaram no aumento da emissão de partículas sólidas no ar atmosférico, causando doenças cardiorrespiratórias como alergias, asma, arritmia cardíaca, além de outros incômodos à população. De acordo com o tamanho, tais partículas podem ser inaláveis (PM10) ou até penetrar profundamente no sistema respiratório e na corrente sanguínea (PM2.5), sendo estas últimas classificadas pela Organização Mundial da Saúde como agente primário causador de câncer. Ainda, estudos mostram que as partículas nanométricas podem causar danos ao ser humano e ao meio ambiente, como por exemplo, partículas menores que 35 nm podem penetrar em algumas regiões do cérebro através da barreira hematoencefálica, que é uma membrana que protege o sistema nervoso central (OBERDÖRSTER et al., 2004).

Em 2015, a poluição em geral foi responsável por cerca de 9,3 milhões de mortes prematuras em humanos (16% do total), um valor três vezes maior que a soma da aids, tuberculose e malária. Deste valor, 6,5 milhões são devidas à poluição do ar, das quais 4,2 milhões tem como responsável o material particulado presente no ar ambiente, sendo esta a sexta maior causa de mortes prematuras, ficando a frente de colesterol alto e de uso de álcool e drogas (LANDRIGAN et al., 2017). Investir no controle da emissão de material particulado não só melhora a saúde da população, mas também gera retorno financeiro, já que para cada dólar investido neste segmento desde 1990 nos Estados Unidos, 30 dólares retornaram para a economia norte americana (EPA, 2011).

Tendo isso em vista, os estados brasileiros de São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo emitiram decretos em 2013 baseados em uma recomendação da Organização Mundial da Saúde que definiu novos limites de emissão de materiais particulados incluindo partículas finas (PM2.5) (WHO, 2005). Tais decretos preveem a implementação gradual dos novos limites, partindo de metas intermediárias até ser implementada uma meta final. Futuramente podem ser estabelecidos limites para partículas nanométricas que, com o avanço da tecnologia, estão cada vez mais presentes no dia-a-dia da população, seja em tintas, têxteis, cosméticos, eletrônicos, dentre outros.

Então faz-se necessário o controle da emissão de material particulado no ar atmosférico, que pode ser realizada por diversos tipos de equipamentos dependendo do processo e dos

interesses econômicos e ambientais. Os mais aplicados são o precipitador eletrostático, o lavador de gás, o ciclone e o filtro de mangas.

O filtro de mangas, cuja eficiência é maior que 99% para uma ampla faixa granulométrica (TURNER et al., 1998), é amplamente utilizado na filtração de gases. O mercado de filtro de mangas movimentou 9,13 bilhões de dólares em 2015 e estima-se que em 2020 valerá 12,12 bilhões de dólares (MARKETSANDMARKETS, 2016). Esforços dos governos em reduzir as emissões estão fomentando este setor.

As mangas são meios filtrantes que podem ser constituídos de diferentes materiais e receberem diversos tratamentos. Um dos materiais mais utilizados nos filtros de mangas industriais é o poliéster, uma vez que suporta temperaturas relativamente altas (130°C) e possui baixo custo relativo frente aos demais materiais. Ele pode ser revestido com PTFE (Teflon®) para diminuir a emissão de material particulado, proteger o meio filtrante contra a penetração de partículas, diminuir a adesão entre a torta e as fibras facilitando a limpeza e, conseqüentemente, minimizar a ocorrência da limpeza por blocos (*patchy cleaning*). Dado que os fabricantes podem possuir distintos processos de produção e controle de qualidade, os meios filtrantes podem apresentar diferenças quanto a eficiência de coleta, a queda de pressão, a vida útil, dentre outras características.

Sendo assim, é de suma importância a escolha adequada de um meio filtrante para cada processo industrial. Ele deve conciliar alta vida útil, baixa queda de pressão, alta eficiência de coleta de partículas. Deve ser constituído de um material que suporte as propriedades do gás (temperatura e corrosividade) e do material particulado (higroscopia, abrasividade e tamanho) (TURNER et al., 1998). Visto que um filtro de mangas pode ter milhares de metros quadrados de área útil de filtração e uma indústria pode contar com dezenas desses equipamentos, a aplicação de um meio filtrante equivocado pode resultar na troca precoce das mangas, gasto excessivo de energia no sistema de ventilação, emissão de partículas acima dos limites legais e prejuízo à saúde da população, resultando, portanto, em um significativo prejuízo financeiro para a indústria.

Dessa forma, neste trabalho foram avaliados meios filtrantes de poliéster com e sem membrana de PTFE (Teflon®) de dois fabricantes. Foram realizadas caracterizações do material particulado coletado no filtro de mangas do processo em estudo e dos meios filtrantes, avaliação da eficiência de coleta de partículas finas (PM_{2.5}), ultrafinas (PM_{1.0}) e nanométricas (10 a 300 nm) e ensaios de filtração baseados na norma VDI 3926.

1.2 Objetivo

Diante disso, o objetivo deste trabalho é avaliar os meios filtrantes que podem ser empregados em filtros de mangas no processo de despoejamento secundário da aciaria de uma indústria siderúrgica.

Os objetivos específicos são:

- Comparar os meios filtrantes virgens de poliéster com e sem membrana de PTFE dos fabricantes A e B;
- Determinar experimentalmente as permeabilidades dos meios filtrantes virgens e compará-las com os dados fornecidos pelos fabricantes;
- Determinar a porcentagem de partículas PM10, PM2.5 e PM1.0 no material particulado do processo de despoejamento secundário da indústria siderúrgica em estudo;
- Avaliar a influência da membrana de PTFE (Teflon®) na eficiência de coleta de PM1.0 e PM2.5;
- Calcular a eficiência de coleta dos meios filtrantes para partículas nanométricas;
- Avaliar o desempenho dos meios filtrantes através de ensaios de filtração baseados na norma VDI 3926 para o 1º ciclo sem realização de limpeza e também para 20 ciclos de filtração.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os fatores envolvidos na filtração por filtro de mangas, como a velocidade de filtração, queda de pressão, porosidade, eficiência de coleta e de limpeza, forças de adesão e coesão, entre outros, bem como os estudos disponíveis na literatura que os investigam, além do estado da arte.

2.1 Equipamentos para filtração de gases

Na filtração de gases industriais, diversos tipos de equipamentos podem ser empregados dependendo do processo e dos interesses econômicos e ambientais de cada empresa. Os mais aplicados são o precipitador eletrostático, o lavador de gás, o ciclone e o filtro de mangas.

O lavador de gás tem a desvantagem de gerar um resíduo pastoso denominado lama, a qual necessita de um tratamento antes da disposição final, aumentando a complexidade e os custos do processo.

O ciclone é um equipamento de menor custo comparado aos demais, de fácil construção, pode operar a alta temperatura e pressão e, por não possuir partes móveis, seu custo de manutenção é baixo. Como possui alta eficiência de coleta para partículas maiores que 10 μm , é geralmente utilizado como um pré-filtro de um precipitador eletrostático ou de um filtro de mangas (COURY; PISANI JR.; HUNG, 2004).

O precipitador eletrostático possui eficiência de coleta superior 99,9% em base mássica (YUAN; SHEN, 2004) porém em número de partículas a eficiência é geralmente menor que 50%, uma vez que o equipamento apresenta dificuldade em reter partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 0,1 μm (ZUKERAN et al., 1999). Recentemente algumas indústrias estão transformando os precipitadores em filtro de mangas (MANZANO-AGUGLIARO; CARRILLO-VALLE, 2016) ou os combinando com filtros de mangas, resultando em filtros híbridos (ARAGON et al., 2015; FENG; LONG; YU, 2016).

O filtro de mangas, por ser o objeto de estudo deste trabalho, será abordado na próxima seção.

2.2 Filtro de mangas

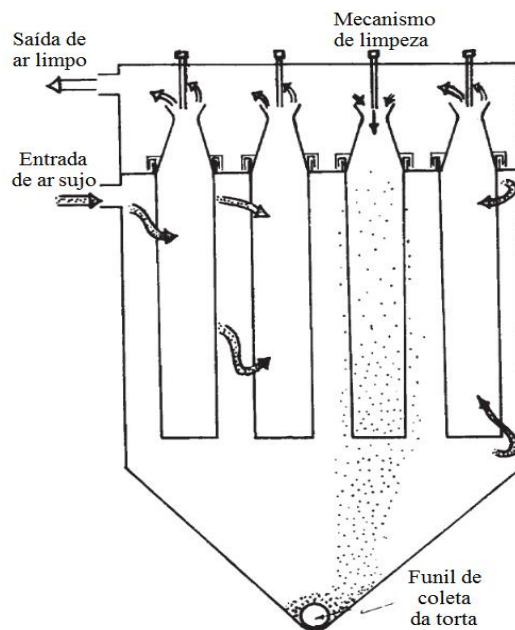
O filtro de mangas, cuja eficiência é maior que 99% para uma ampla faixa granulométrica (TURNER et al., 1998), é amplamente utilizado na filtração de gases. Sua operação é simples, com baixo consumo de energia e seu custo de implementação é mediano. Pode ser aplicado para fluidos corrosivos e para uma ampla faixa de temperatura, desde que construído com o material adequado. Além disso, ao contrário do precipitador eletrostático, o filtro de mangas é pouco sensível a flutuações dos parâmetros operacionais, como temperatura, volume do gás e carga de partículas (MUKHOPADHYAY, 2009).

Porém, se projetado e operado de maneira incorreta, podem ocorrer rasgos e furos que diminuem sua vida útil e aumentam o custo de manutenção. Deve-se respeitar a temperatura máxima que a fibra suporta, alocar as mangas a uma distância adequada para não haver atrito entre elas, evitar formação de tortas pegajosas através do controle da umidade do gás, dentre outros cuidados (TURNER et al., 1998).

2.2.1 Princípio de funcionamento

No filtro de mangas (ou *baghouse*), ilustrado na Figura 1, o ar sujo que entra é filtrado por um conjunto de meios filtrantes constituídos de materiais naturais ou sintéticos, denominados mangas.

Figura 1 - Funcionamento básico de um filtro de mangas

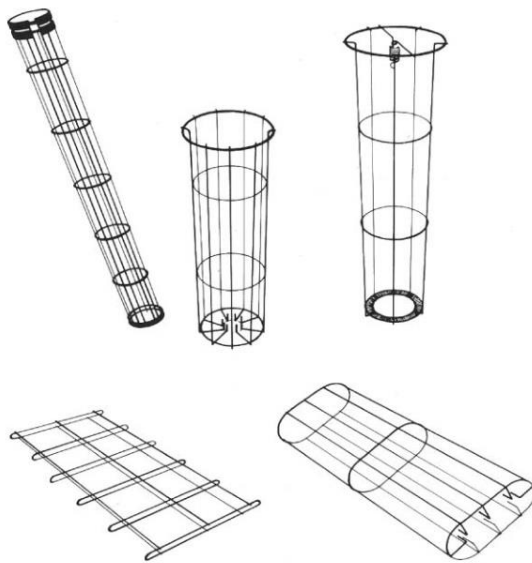


Fonte: Adaptado de Wang, Williford e Chen (2004)

As partículas ficam retidas no meio filtrante e o ar sai limpo para a atmosfera. Em certo período de tempo ou quando uma queda de pressão máxima no filtro é atingida, ocorre a limpeza das mangas e a torta removida acumula-se na parte inferior da estrutura, onde é recolhida.

As gaiolas, como se observa na Figura 2, sustentam as mangas de forma a deixarem-nas esticadas e impedir a colisão entre elas.

Figura 2 – Gaiolas para sustentação das mangas



Fonte: Mukhopadhyay (2009)

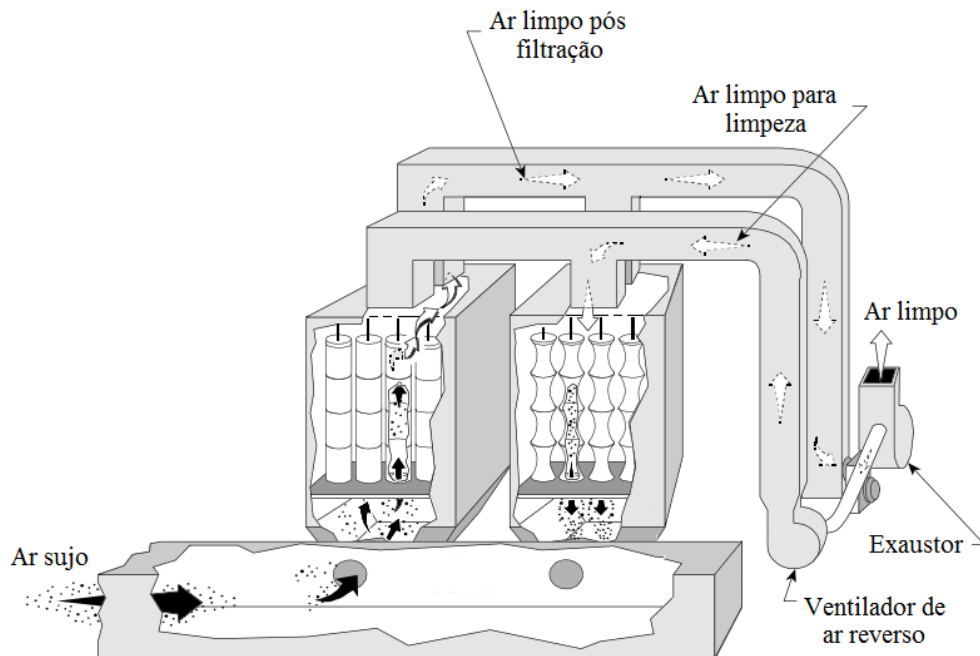
2.2.2 Sistemas de limpeza

Ao longo da filtração, o material particulado acumula-se no meio filtrante formando a torta. Conseqüentemente, ocorre um aumento na queda de pressão do sistema, tornando-se necessário sua limpeza. O sistema de limpeza pode ser por agitação mecânica, fluxo de ar reverso ou jato de ar pulsante. Independentemente do método, deve-se fornecer energia suficiente para superar a força de adesão entre o material particulado e o meio filtrante, promovendo o destacamento da torta (DENNIS; WILDER; HARMON, 1981).

Do ponto de vista da manga, a filtração pode ocorrer de fora para dentro ou de dentro para fora. O primeiro caso se aplica na limpeza por jato de ar pulsante e a torta é formada no exterior do filtro. Para os demais mecanismos de limpeza, o sentido do gás é de dentro para fora da manga, e as partículas ficam retidas no seu interior.

Na limpeza por fluxo de ar reverso, conforme mostrado na Figura 3, ar limpo percorre o caminho contrário da filtração, removendo o pó acumulado nos filtros.

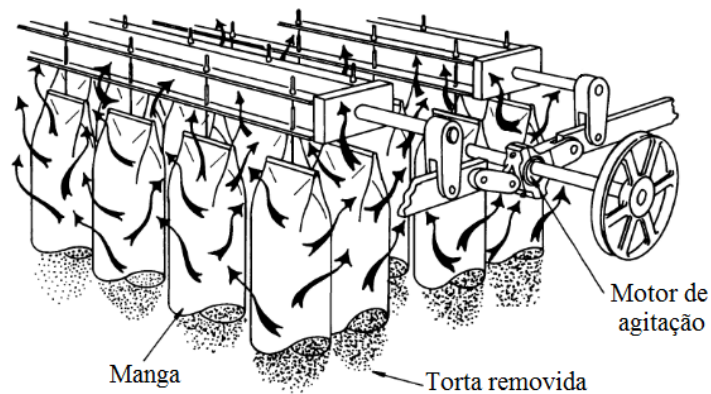
Figura 3 – Limpeza por fluxo de ar reverso.



Fonte: Adaptado de Turner et al. (1998)

No processo por agitação mecânica, representado na Figura 4, o gás percorre a manga de dentro para fora, sendo a torta formada no interior da mesma. O filtro é suspenso por um gancho, que oscila durante a limpeza, promovendo a remoção da torta. Porém a desvantagem deste método é o stress a que o meio filtrante é constantemente submetido devido à abrasão de uma fibra com a outra, reduzindo a sua vida útil (WANG; WILLIFORD; CHEN, 2004).

Figura 4 – Limpeza por agitação mecânica.



Fonte: Adaptado de Morris e Allen (1997)

Entretanto, estes dois métodos exigem a interrupção da filtração para promover a limpeza, que neste caso é denominada *off-line*, o que é uma desvantagem para um processo industrial contínuo.

Sendo assim foi desenvolvida a limpeza por jato de ar pulsante, que é o método mais utilizado nos últimos anos, sendo responsável por 90% do mercado (MARKETSANDMARKETS, 2016).

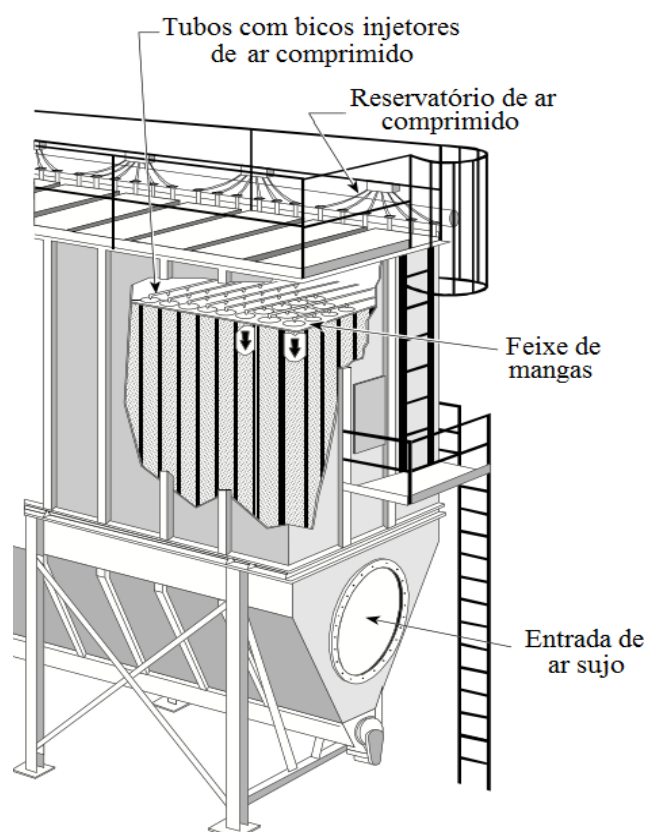
Como já mencionado, a filtração neste caso se dá de fora para dentro das mangas. As partículas são depositadas na parte exterior da mesma, enquanto o ar limpo atravessa o meio filtrante, ascende axialmente por ele e é eliminado para a atmosfera. A queda de pressão aumenta rapidamente com o tempo, conforme a torta é formada, e ao atingir um valor máximo pré-estabelecido, um bico injetor posicionado na abertura superior da manga dispara um jato de ar comprimido, geralmente com pressão entre 3 a 7 bar por um período de 50 a 150 milissegundos (TURNER et al., 1998). O pulso causa um choque mecânico no tecido, fornecendo energia suficiente para a torta separar do filtro e ser depositada no funil de coleta. Como o tempo do pulso é muito curto, a filtração não precisa ser paralisada e a limpeza é dita *online*. A Figura 5 é uma fotografia de um filtro de mangas industrial que opera com limpeza por jato pulsante de ar, e a Figura 6 ilustra a estrutura básica deste equipamento.

Figura 5 – Fotografia de um filtro de mangas com sistema de limpeza por jato de ar pulsante.



Fonte: HAMON (2016).

Figura 6 – Estrutura básica do filtro de mangas com sistema de limpeza por jato de ar pulsante.



Fonte: Adaptado de Turner et al. (1998)

A Tabela 1 compara os três métodos de limpeza supracitados. Nota-se clara vantagem do jato de ar pulsante, que concilia alta velocidade de filtração, alta carga de partículas, curto tempo de limpeza e alta eficiência de coleta.

Tabela 1 - Comparação entre os métodos de limpeza.

Parâmetro	Agitação mecânica	Ar reverso	Jato de ar pulsante
Intermitência	<i>Off-line</i>	<i>Off-line</i>	<i>Online</i>
Tempo de limpeza	Alto	Alto	Baixo
Uniformidade de limpeza	Médio	Boa	Boa
Atrito entre mangas	Médio	Baixo	Baixo
Velocidade de filtração	Média	Média	Alta
Custo de energia	Baixo	Baixo/médio	Médio
Carga de partículas	Média	Média	Alta
Eficiência de coleta	Alta	Alta	Alta

Fonte: Wang, Williford e Chen (2004)

Além disso, o mecanismo por jato de ar pulsante requer menos espaço que os demais e apresenta menos partes móveis (MUKHOPADHYAY, 2009).

Os pulsos de ar para limpeza podem ser classificados como (MUKHOPADHYAY, 2009):

- alta pressão e baixo volume – 600 kPa;
- média pressão e médio volume – 200 a 250 kPa; e
- baixa pressão e alto volume – 100 kPa.

Bustard, Cushing e Chang (1992) compararam estes três tipos de pulso no processo de filtração de cinzas volantes de uma termoelétrica, e concluíram que o pulso de baixa pressão requer consideravelmente menos energia que os demais para uma eficiência de limpeza similar.

2.2.3 Classificação dos filtros de mangas

Os filtros de mangas geralmente são classificados conforme o mecanismo de limpeza, especificados na subseção 2.2.2. Entretanto, Wang, Williford e Chen (2004) propuseram cinco formas de categorizá-los.

A primeira categoria remete aos filtros de alta ou de baixa energia, isto é, alta ou baixa queda de pressão admitidas. Os de alta energia são os de limpeza por jato de ar pulsante, enquanto os de baixa são por fluxo de ar reverso ou por agitação mecânica.

Outra distinção é pela natureza das fibras utilizadas, podendo ser tecidos (*woven*) ou não-tecidos (*nonwoven*). Este assunto será explorado na seção 2.3.

Também podem ser divididos entre contínuos (jato pulsante) ou intermitentes (ar reverso e agitação mecânica). No primeiro caso, a filtração não é interrompida durante a limpeza, que se realiza em milissegundos (*online*). Para os intermitentes, a limpeza dura alguns minutos, período em que não há filtração (*off-line*).

A quarta categoria é baseada conforme o serviço, onde o mais comum é a remoção de particulados existentes na corrente de gás. Entretanto, os meios filtrantes podem, por exemplo, serem tratados com amônia para reagir com óxidos de enxofre, formando partículas sólidas que são retidas.

A quinta forma de classificação é conforme a aplicação, dependendo da temperatura de operação, concentração de material particulado, umidade do gás e eficiência do filtro. Para cada aplicação existe um tipo de material mais adequado para o meio filtrante.

2.3 Meios filtrantes

A filtração consiste na separação física de fases de um sistema através da passagem do fluido por uma barreira que é permeável a um ou mais componentes da mistura, solução ou suspensão, e impermeável aos demais. Esta barreira é o meio filtrante, e o filtro é qualquer estrutura mecânica que o suporta (PURCHAS, 2002). Porém é impossível efetuar uma filtração com 100% de eficiência (SPARKS; CHASE, 2016).

Um meio filtrante ideal deve possuir as seguintes características (HARDMAN, 1994):

- resistência ao desgaste mecânico e químico;
- resistência ao entupimento (*blinding*): partículas ficam retidas de modo irreversível, o que aumenta a queda de pressão;
- alta eficiência de limpeza; e
- alta permeabilidade.

2.3.1 Tecidos e Não-tecidos

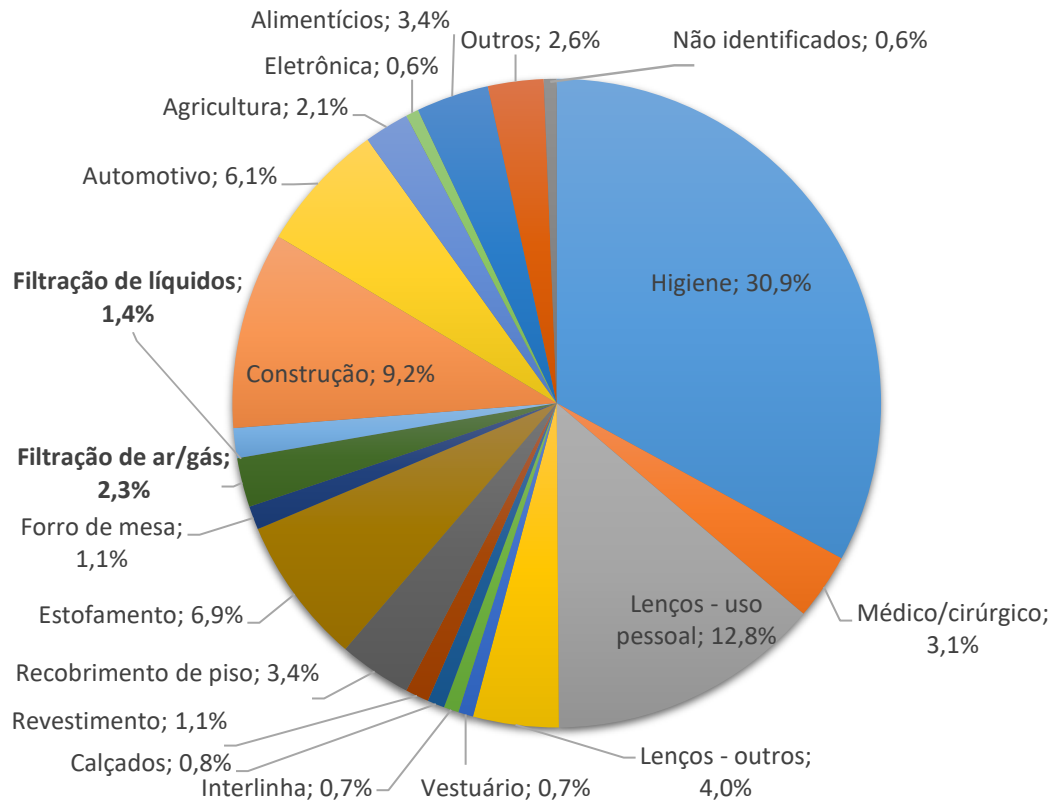
A fim de se ter um filtro de mangas de vida útil prolongada que opere com baixa queda de pressão, alta eficiência e baixa emissão, deve-se empregar ao processo um meio filtrante de material apropriado. Meios filtrantes são constituídos de fibras cujas propriedades térmicas limitam sua aplicação (MORRIS; ALLEN, 1997). São diferenciados, como mencionado anteriormente, em tecidos (*woven*) e não-tecidos (*nonwoven*).

Tecnicamente, tecido é “uma estrutura produzida pelo entrelaçamento de um conjunto de fios de urdume e outro conjunto de fios de trama, formando ângulo de (ou próximo a) 90°”, podendo ser naturais (algodão, seda) ou sintéticos (fibra de vidro, polímero). E não-tecido é definido como “uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída de véu ou manta de fibras ou filamentos, orientados direcionalmente ou ao acaso, consolidados por processo mecânico (fricção) e/ou químico (adesão) e/ou térmico (coesão) e combinações destes” (ABINT, 1999).

Ao contrário dos tecidos, os não-tecidos atingem alta eficiência de coleta antes da formação da torta, além de permitirem alta permeabilidade em altos níveis de eficiência, sendo portanto mais utilizados na filtração de ar (MUKHOPADHYAY, 2009).

A Figura 7 descreve a aplicação dos não-tecidos de acordo com o usuário final no oeste europeu em 2015, com destaque para a utilização nas áreas de filtração de ar/gás e líquido.

Figura 7 – Aplicação de não-tecidos por usuários finais no Oeste Europeu em 2015



Fonte: EDANA (2017)

2.3.2 Disposição das fibras

A Figura 8 apresenta os tipos de fibra, de acordo com a disposição dos filamentos. O monofilamento consiste em um único filamento contínuo produzido por uma extrusora (*spinneret*). Já o multifilamento é produzido da mesma maneira, mas consiste em fios mais finos, com diâmetros menores que 0,03 milímetros. Estes são retorcidos juntos, formando um único fio mais resistente. As estiradas (*staple*) são compostas por fibras naturais que, após a limpeza e o corte, são cardadas por espigões e entrelaçadas, apresentando um aspecto felpado.

Como observa-se na Tabela 2, este tipo de filamento, por possuir uma maior área de coleta, promove uma filtração mais eficiente, porém resulta em maior queda de pressão e difícil remoção da torta (PURCHAS, 2002).

Figura 8 - Tipos de fibras



Fonte: Adaptado de Purchas (2002).

Tabela 2 – Comparação entre os tipos de filamento

Característica desejável	Ordem de Preferência (1 = melhor)		
	1	2	3
Baixa queda de pressão	Monofilamento	Multifilamento	Estirado
Fácil remoção da torta	Monofilamento	Multifilamento	Estirado
Máxima vida útil	Estirado	Multifilamento	Monofilamento
Tendência mínima de entupimento (<i>blinding</i>)	Monofilamento	Multifilamento	Estirado

Fonte: Purchas (2002)

Os modelos de entrelaçamento dos filamentos mais comuns são o plano, a sarja e o cetim, ilustrados na Figura 9 e comparados na Tabela 3.

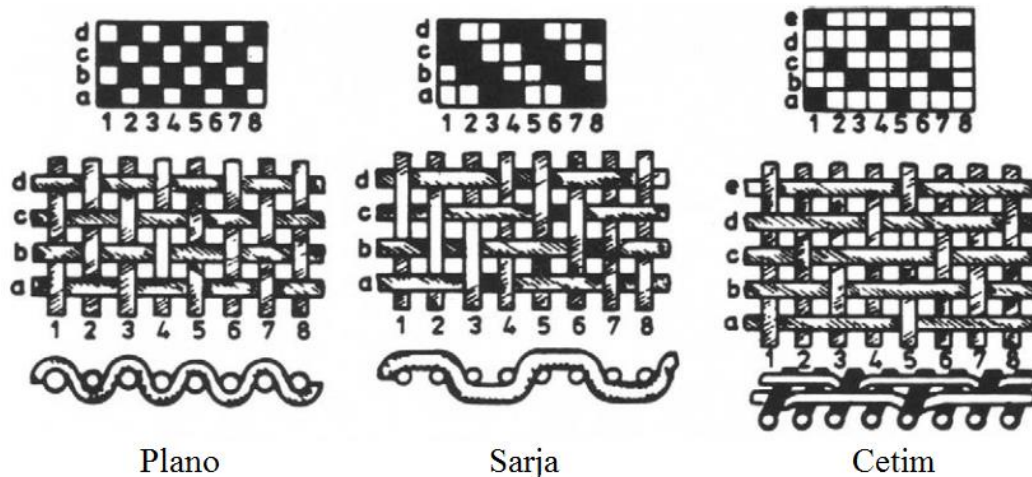
O tipo plano é o mais rígido e justo, e oferece a maior eficiência de coleta. Já o de sarja é o mais flexível e que propicia a maior vida útil. Os de cetim possuem mais espaços entre os entrelaçamentos diminuindo a probabilidade das partículas se fixarem nas fibras, resultando em uma maior facilidade de limpeza. Porém possuem eficiência reduzida e estão mais sujeitos a desgaste por abrasão (PURCHAS, 2002).

Tabela 3 – Comparação entre os tipos de entrelaçamento

Característica desejável	Ordem de Preferência (1 = melhor)		
	1	2	3
Baixa queda de pressão	Cetim	Sarja	Plano
Fácil remoção da torta	Cetim	Sarja	Plano
Máxima vida útil	Sarja	Plano	Cetim
Tendência mínima de entupimento (<i>blinding</i>)	Cetim	Sarja	Plano

Fonte: Purchas (2002)

Figura 9 - Tipos de entrelaçamento de fibras



Fonte: Adaptado de Purchas (2002).

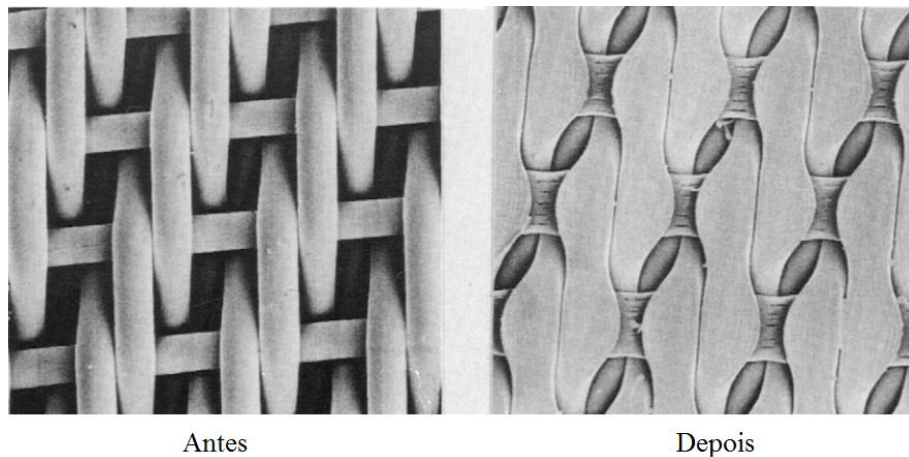
2.3.3 Acabamento

São três razões para realizar acabamento nas mangas: assegurar estabilidade para evitar relaxamento, alterar as características superficiais e regular a permeabilidade (HARDMAN, 1994). Os principais tratamentos superficiais são a termofixação (calandragem), a chamuscagem e o recobrimento com membrana (DONOVAN, 1985).

Cirqueira, Tanabe e Aguiar (2017) estudaram a influência de alguns tratamentos superficiais nos parâmetros de operação de um filtro manga com limpeza por jato pulsante, e concluíram que os filtros que recebem algum tipo de tratamento apresentam maior eficiência de coleta e menor desgaste após 50 ciclos de filtração.

A termofixação (*termal bonding*) consiste em fundir um material termoplástico de baixo ponto de fusão de forma a consolidar e garantir resistência a um conjunto de fibras. Tal material pode ser as próprias fibras ou uma resina polimérica (HUTTEN, 2016). A técnica mais usual de termofixação é a calandragem (*calendering*), na qual o meio é submetido a uma determinada pressão e temperatura por rolos compressores (calandra), o que aumenta a lisura de sua superfície e conseqüentemente facilita a remoção da torta, regula a permeabilidade e aumenta a eficiência de coleta, porém eleva sua queda de pressão (DONOVAN, 1985). A Figura 10 ilustra o efeito deste tratamento.

Figura 10 – Efeito da calandragem na superfície da fibra



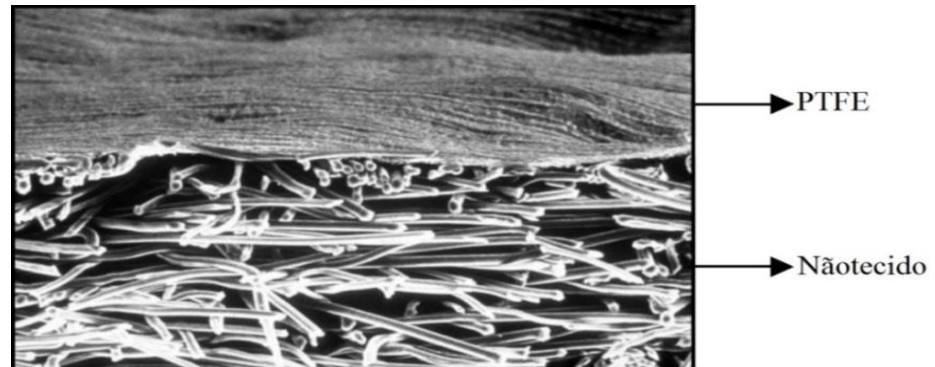
Fonte: Adaptado de Hardman (1994)

A chamuscagem (*singeing*) remove as felpas presentes no tecido através da passagem do meio por uma chama, com o propósito de diminuir a adesão da torta com o filtro.

Um acabamento bem comum é o recobrimento das fibras com uma fina membrana de politetrafluoretileno (PTFE), como mostrado na Figura 11, que é comercialmente conhecido como Teflon®. Tem como objetivo dificultar a penetração de partículas finas no meio filtrante e diminuir a adesão entre a torta e as fibras, facilitando a limpeza. Partículas altamente adesivas e/ou hidrocólicas prejudicam a eficiência de coleta e a limpeza das mangas, sendo necessário revestir o meio filtrante com uma membrana de PTFE (ALEKSANDROV, BARANOVA e VALDBERG, 2010). Porém este material não é indicado para partículas muito abrasivas, como o cimento, o quartzo e o pó de alumínio, as quais podem danificá-lo.

Sherman, Leith e Symons (1990) avaliaram através de 24 condições experimentais a penetração de partículas em diferentes meios filtrantes, utilizando um filtro manga com limpeza por jato pulsante em escala piloto e pó de calcário e cinzas volantes. Observaram menor emissão de partículas para mangas tratadas com PTFE em todas as condições experimentais.

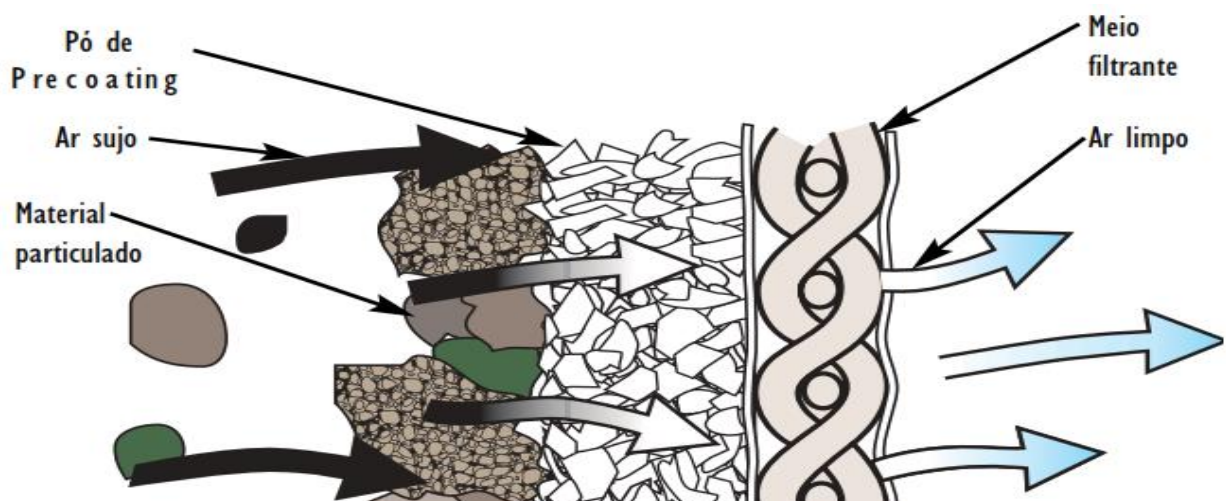
Figura 11 – Meio filtrante recoberto com membrana de PTFE (Teflon®)



Fonte: Adaptado de Sakhpara (2003)

Um pré-tratamento utilizado para os meios filtrantes virgens é o *precoating*, que consiste em recobrir o interior e a superfície de não-tecidos com pó a base de óxido de cálcio ou diatomito, conforme ilustrado na Figura 12. Esta camada aplicada de pó atua como um filtro adicional, protegendo o meio filtrante contra a penetração de partículas. É recomendado quando a corrente gasosa contém quantidade significativa em massa de partículas submicrométricas, as quais podem atravessar o filtro principalmente durante o primeiro ciclo de filtração. Porém é importante que as partículas do pó de *precoating* possuam tamanho adequado para não causarem o entupimento da manga, e garantam baixa queda de pressão e alta permeabilidade. Este pré-tratamento não é necessário para meios filtrantes com membrana de PTFE, os quais já possuem alta eficiência de coleta de partículas ultrafinas (RAVERT, 2005).

Figura 12 – Meio filtrante submetido a precoating



Fonte: Adaptado de Ravert (2005)

Schiller e Schmid (2014) realizaram ensaios de filtração com o objetivo de determinar a melhor combinação entre 3 materiais de *precoating* e 11 tipos de meios filtrantes na captura de partículas ultrafinas (<370 nm) presentes nos gases de um queimador de *pellets* de madeira. Foram estudados 3 materiais de *precoating*: calcário, calcário hidratado e iFIL *coating* N[®] (SiO₂). Para 1 mm de camada de *precoating*, os autores observaram que a aplicação do pó iFIL *coating* N[®] resultou em menor queda de pressão em relação aos outros materiais. Isso ocorreu por ele ser menos poroso e ter menor densidade aparente. Ainda, concluíram que a aplicação de 0,5 mm de *precoating* não garantiu a estabilidade da queda de pressão residual ao longo dos ciclos, e que essa espessura deve ser no mínimo de 1 mm.

Como observa-se na Tabela 4, cada material possui suas limitações. O PTFE é indicado para altas temperaturas e possui alta estabilidade química, porém seu custo relativo é alto. Para temperaturas superiores às informadas na Tabela 4, recomenda-se materiais cerâmicos e metálicos.

Tabela 4 – Tipos de fibras e suas propriedades

Fibra	Temperatura Máx (°C)		Resistência a Abrasão ¹	Estabilidade Química					Custo relativo ¹
	Operação	Pico		Hidrólise	Ácido	Base	Solvente	Óxido	
Polipropileno	77	107	E	E	E	E	R	B	1
Acrílico	125	150	B	E	B	NR	E	B	2
Poliéster	132	140	E	NR	B	NR	E	B	1
Aramida (Nomex®)	204	240	E	R	NR	B	E	R	4
PPS (Ryton®)	240	250	B	B	E	E	E	NR	5
Poliimida (P84®)	250	260	R	R	B	R	B	B	6
Fibra de vidro ¹	260	-	R	E	NR	R	-	E	3
PTFE (Teflon®)	260	290	B	E	E	E	E	E	7

E – excelente, B – bom, R – regular, NR – não recomendado.

¹ – Dados retirados de Air Filter Sales & Service (2017)

Fonte: Adaptado de CASFIL (2016).

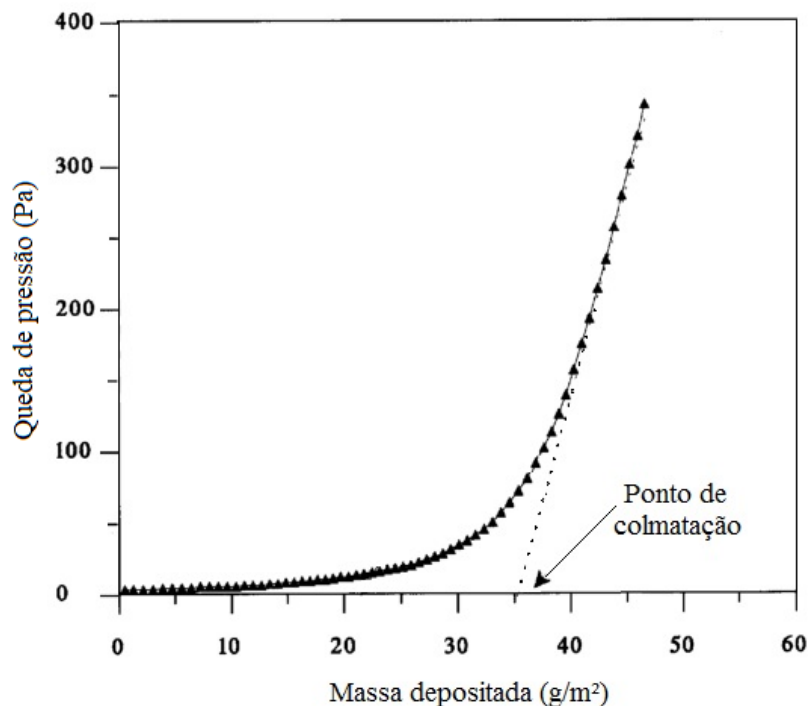
2.4 Teoria da Filtração

2.4.1 Etapas de filtração

No início da filtração, a eficiência de coleta de partículas é baixa, porém aumenta ao longo do tempo. Isto é devido à filtração ocorrer em três etapas: filtração em profundidade (*deep filtration*), transição e filtração de superfície (*cake filtration*) (HINDS, 1982).

Com o filtro ainda virgem, as partículas enfrentam pouca resistência e adentram o meio filtrante, sendo coletadas pelas fibras através de mecanismos descritos adiante. O meio satura e novas partículas acumulam-se em sua superfície, formando dendritos. Ao passar do tempo, esses dendritos se unem formando uma torta cuja espessura aumenta com o tempo. O momento em que a torta é formada é denominado ponto de colmatação (*clogging point*). Após esse ponto, inicia-se a filtração de superfície com consequente elevação da queda de pressão. O resultado é a compressão da torta e diminuição de sua porosidade com consequente aumento da eficiência de coleta, uma vez que as partículas, mesmo que pequenas, encontram alta resistência para atravessá-la. A duração de cada etapa depende da concentração de material particulado no gás. Quanto maior a concentração, menor é o tempo que ocorre a filtração de profundidade, e mais rapidamente a torta é formada (TARDOS, 1998).

Figura 13 - Determinação do ponto de colmatação



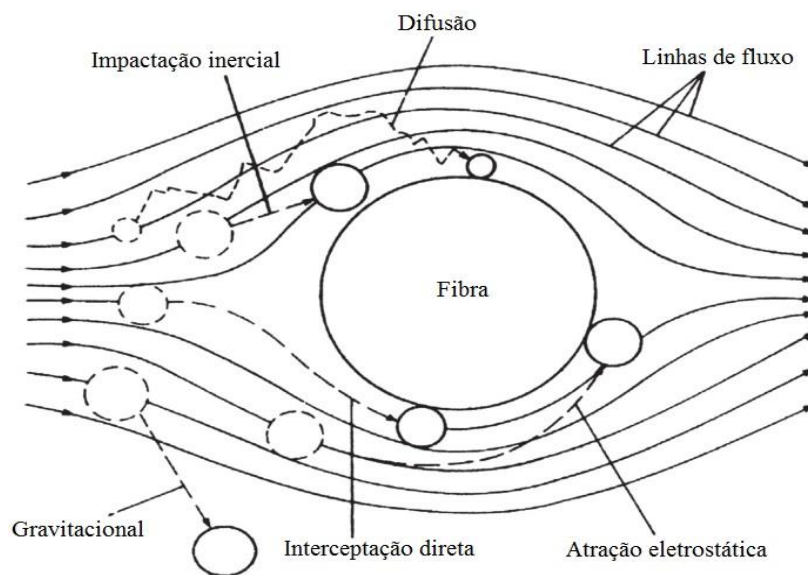
Fonte: Adaptado de Walsh e Stenhouse (1997)

O ponto de colmatação não pode ser determinado visualmente com precisão, porém Walsh e Stenhouse (1997) criaram uma técnica gráfica para defini-lo. A partir do gráfico de queda de pressão por massa depositada, traça-se uma reta prolongando a parte linear da curva até o eixo das abscissas, conforme ilustrado na Figura 13.

2.4.2 Mecanismos de captura de partículas

As partículas presentes em uma corrente gasosa podem ser retidas por uma fibra através de diferentes mecanismos, os quais dependem de fatores como a velocidade, tamanho, carga e massa das partículas e propriedades da própria fibra.

Figura 14 - Mecanismos de captura de partículas por uma fibra.



Fonte: Adaptado de Donovan (1985).

Tais mecanismos, ilustrados na Figura 14, são (HINDS, 1982):

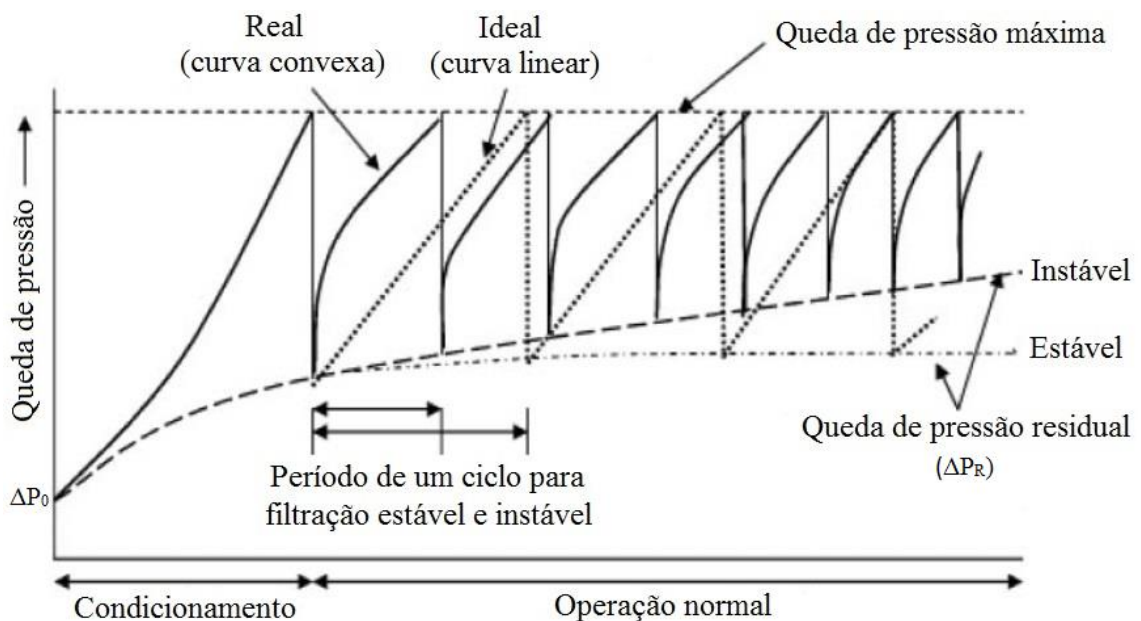
- Impactação inercial: ocorre quando o momento da partícula é suficientemente alto para se separar das linhas de fluxo e colidir com a fibra;
- Interceptação direta: a partícula não apresenta momento alto para se separar das linhas de fluxo, mas está suficientemente próxima da fibra, na qual colide e é coletada;

- Difusão: baseada no movimento Browniano, sendo aplicada para partículas pequenas com diâmetro menor que $0,5 \mu\text{m}$. Seu movimento aleatório causa a separação da linha de fluxo e possível coleta pela fibra. Quanto menor a partícula, mais intenso é o movimento Browniano e mais provável é sua captura;
- Atração eletrostática: causada por cargas eletrostáticas na partícula e na fibra, com conseqüente atração e captura;
- Gravitacional: devido à força da gravidade, a partícula alterna de linha de fluxo e é capturada pela fibra. Geralmente é desprezível, exceto no caso de uma partícula grande escoar por um fluido lento.

2.4.3 Ciclos de filtração

Como citado na subseção 2.4.1, a espessura da torta aumenta conforme prossegue a filtração, e a torta é comprimida de forma a diminuir sua porosidade, o que provoca um aumento da queda de pressão. Em um filtro de mangas, a limpeza ocorre quando se atinge uma queda de pressão máxima pré-estabelecida ou certo tempo. Então um novo ciclo de filtração é iniciado. Como a limpeza por jato de ar pulsante é praticamente instantânea, os ciclos são contínuos e um gráfico de queda de pressão por tempo pode ser construído, conforme ilustrado na Figura 15..

Figura 15 - Ciclos de filtração de sistemas estáveis e instáveis.



Fonte: Adaptado de Mukhopadhyay (2009)

O filtro virgem possui uma queda de pressão (ΔP_0) e após a limpeza algumas partículas continuam aderidas às fibras, resultando em uma queda de pressão residual (ΔP_R). Esta última cresce ciclo após ciclo, etapa denominada de condicionamento, e normalmente se estabiliza após o ponto de colmatação e início da filtração de superfície. Ao final da vida útil de uma manga, devido a furos, rasgos ou formação de torta que não é removida na limpeza, a queda de pressão residual retorna a crescer, até que a vazão de gás não pode ser mais mantida pelo sistema de exaustão/ventilação, momento em que torna-se necessário a troca das mangas (KOCH; SEVILLE; CLIFT, 1996).

Como observa-se na Figura 15, na filtração ideal a torta é removida completamente pela limpeza, logo a queda de pressão total cresce linearmente e ΔP_R permanece constante (sistema estável). Mas na prática é comum ocorrer o fenômeno chamado limpeza por blocos (*patchy cleaning*), no qual parte da torta é removida e parte continua aderida à manga. Dessa forma, a queda de pressão residual não se estabiliza, e a curva da queda de pressão total adquire um formato convexo. Ainda nesta figura, nota-se que o primeiro ciclo de filtração exibe uma curva côncava da queda de pressão, característica da filtração de profundidade (*deep filtration*) (MUKHOPADHYAY, 2009).

2.5 Parâmetros da filtração

2.5.1 Velocidade de filtração (relação ar-pano)

A velocidade de filtração, V_f , ou relação ar-pano (*air-to-cloth ratio*), corresponde à razão entre a vazão volumétrica do gás e a área de filtração, conforme a equação:

$$V_f = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

A Equação 1 pode ser expressa em $(\text{m}^3/\text{min})/\text{m}^2$, m/min ou cm/s . Seu valor depende do material particulado a ser filtrado, podendo variar de 1,5 a 4 $(\text{m}^3/\text{min})/\text{m}^2$, conforme informado na Tabela 5.

A influência da velocidade de filtração nas características da torta foi estudada por Silva et al. (1999) e Chen e Hsiau (2009). Ambos trabalhos concluíram que um aumento em seu valor

causa a compactação da torta, resultando no aumento da resistência específica e redução da porosidade.

Rocha et al. (2010) realizaram 10 ciclos de filtração com limpeza por fluxo de ar reverso e demonstraram que o aumento da relação ar-pano acentuou a penetração de partículas no meio filtrante, elevando as quedas de pressão residual e total. A consequência deste fenômeno é uma maior frequência de limpezas, o que reduz a vida útil do filtro. Resultado similar foi obtido por Saleem et al. (2012).

Tabela 5 – Relação ar pano recomendada para filtro de mangas com limpeza por jato de ar pulsante

Material Particulado	Relação ar-pano recomendada (m ³ /min)/m ²
Fuligem	1,5
Cinzas volantes	1,5
Óxido de ferro	2,1
Calcário	2,4
Cimento	2,4
Serragem	3,6
Açúcar	4,0

Fonte: Adaptado de Turner et al. (1998).

2.5.2 Queda de pressão

Na operação de um filtro de mangas, a queda de pressão tem um peso importante nos custos. Quanto maior seu valor, mais energia será gasta no sistema de exaustão ou de ventilação para manter a vazão de ar constante (MUKHOPADHYAY, 2009). O consumo de energia de um sistema de ventilação é descrito por (HYGIENISTS, 1998) :

$$W = \frac{Q \cdot \Delta P}{\eta} \quad (2)$$

Na Equação 2, W é o consumo de energia em watt, Q é a vazão do fluido em m^3/s , ΔP é a queda de pressão total em Pa e η é a eficiência do sistema de ventilação.

A queda de pressão total pode ser descrita como a soma da queda de pressão do meio filtrante virgem mais a da torta, como indicado pela equação:

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_{torta} \quad (3)$$

A Equação 3 é válida na hipótese de fluxo laminar pelo meio filtrante e pela torta, e que ambos são rígidos e porosos. Conforme filtração prossegue, a torta aumenta de tamanho e atua como um novo meio filtrante.

As perdas de carga do filtro limpo e da torta são definidas, respectivamente, pelas equações:

$$\Delta P_0 = K_M V_f \quad (4)$$

$$\Delta P_{torta} = \frac{K_T V_f M}{A} \quad (5)$$

Na Equação 4, V_f é a velocidade de filtração, M é a massa depositada no meio filtrante, A é a área superficial de filtração e na Equação 5, K_M e K_T são, respectivamente, as resistências específicas do filtro virgem e da torta.

Substituindo as Equações 4 e 5 na Equação 3, tem-se a equação:

$$\Delta P = K_M V_f + \frac{K_T V_f M}{A} \quad (6)$$

K_M na Equação 6 é uma propriedade intrínseca do meio filtrante, e é determinada através da construção da curva de queda de pressão por velocidade de filtração, cujo coeficiente angular corresponde a K_M .

K_T também é obtido experimentalmente, medindo a massa acumulada na torta durante certo intervalo de tempo e conseqüente queda de pressão, conforme realizado por Chen e Hsiau (2009).

2.5.3 Permeabilidade

A permeabilidade é uma medida macroscópica que mede a facilidade com que um fluido submetido a uma diferença de pressão atravessa um meio poroso. É importante para estimar a queda de pressão necessária para manter uma determinada vazão de fluido.

Considerando que a filtração ocorre em regime laminar, o coeficiente de permeabilidade de um meio poroso pode ser descrito pela Equação de Darcy (BEJAN, 2004):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{V_f \mu}{K_1} \quad (7)$$

Sendo que na Equação 7, ΔP é a queda de pressão, L é a espessura do meio, V_f é a velocidade de filtração ou razão ar-pano, μ é a viscosidade cinemática do gás e K_1 é o coeficiente de permeabilidade de Darcy.

Para velocidades de filtração maiores, recomenda-se o uso da Equação de Forchheimer, na qual a dependência da queda de pressão com a velocidade é não-linear. Ela adiciona, para fluidos compressíveis, a constante não-darciana K_2 , dada pela equação (BEJAN, 2004):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{V_f \mu}{K_1} + \frac{V_f^2 \rho}{K_2} \quad (8)$$

Na Equação 8, ρ é a massa específica em kg/m^3 e μ a viscosidade dinâmica em Pa.s, ambas calculadas nas condições do fluido, respectivamente, pela equação do gás ideal e pela equação de Sutherland:

$$\rho = \frac{P M}{R T} \quad (9)$$

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5} \frac{(273 + C_n)}{(T + C_n)} \quad (10)$$

Sendo que na Equação 9, P é a pressão de referência em Pascal, M é a massa molar do fluido em kg/mol , R é a constante universal dos gases ideais ($8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$), T é a

temperatura do fluido em K, e na Equação 10, μ_0 é a viscosidade dinâmica de referência ($1,73 \times 10^{-5}$ Pa.s para o ar) e C_n é a constante de Sutherland (125 para o ar).

A Equação 8 de Forchheimer considera que o fluido e o meio poroso exercem influência distinta sobre a queda de pressão. O primeiro termo representa a resistência do fluido devido ao atrito entre suas camadas e entre ele e a superfície do poro. O segundo retrata a contribuição da inércia e da turbulência, e pode ser desconsiderado caso o número de Forchheimer (F_o) seja muito menor que a unidade (BEJAN, 2004):

$$F_o = V_f \frac{\rho K_1}{\mu K_2} \quad (11)$$

Comercialmente, a permeabilidade é normalmente informada como sendo a vazão volumétrica que atravessa uma área útil do meio filtrante e que resulta em determinada queda de pressão nesse filtro. Como por exemplo, pode ter as seguintes unidades: $(\text{m}^3/\text{min})/\text{m}^2@125\text{Pa}$, $(\text{L}/\text{min})/\text{dm}^2@20\text{mmH}_2\text{O}$ ou $\text{cfm}/\text{ft}^2@1/2''\text{H}_2\text{O}$.

2.5.4 Porosidade

A porosidade de um meio é definida como a razão entre o volume de espaços vazios pelo volume total. Ao longo da filtração, partículas ficam retidas no meio, diminuindo sua porosidade e conseqüentemente elevando a queda de pressão. Pode-se determiná-la diretamente ou indiretamente.

Pelo método indireto, utiliza-se a forma modificada da equação de Ergun, desde que sejam conhecidas a vazão mássica de partículas e dados de queda de pressão por tempo. Já o método direto consiste em técnicas de medição da porosidade, descritas mais adiante.

A equação de Ergun (1952) calcula a queda de pressão em um meio poroso de uma determinada espessura:

$$\frac{\Delta P}{L_T} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu V_f}{d_p^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_g V_f^2}{d_p} \quad (12)$$

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

A princípio, a aplicação da Equação 12 se restringe para partículas esféricas de diâmetro na faixa de 10^2 a 10^4 μm , porosidade constante entre 0,1 e 0,75 e número de Reynolds maiores que a unidade. Porém Aguiar e Coury (1996) concluíram que ela pode ser aplicada com confiabilidade para partículas com diâmetros menores, número de Reynolds mais baixos e tortas compressíveis com porosidade variável.

Assumindo a torta incompressível com porosidade constante e alta eficiência de coleta, Coury (1983) desenvolveu um método indireto para o cálculo da porosidade, no qual insere na equação de Ergun a vazão mássica de partículas dada pela equação:

$$M = Q t = L_T A \rho_p (1 - \varepsilon) \quad (13)$$

Onde 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.

Isolando L_T da Equação 13 e substituindo na Equação 12, tem-se a equação de Ergun modificada:

$$\frac{\Delta P}{t} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{Q \mu V_f}{A \rho_p d_p^2} + 1,75 \cdot \frac{1}{\varepsilon^3} \cdot \frac{Q \rho_g V_f^2}{A \rho_p d_p} \quad (14)$$

Como a filtração em filtros manga geralmente ocorre a baixas velocidades, o termo inercial é insignificante se comparado ao termo viscoso, e a Equação 14 simplifica-se na equação:

$$\frac{\Delta P}{t} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{Q \mu V_f}{A \rho_p d_p^2} \quad (15)$$

Portanto, a porosidade pode ser calculada pela Equação 15, em que se denomina “método indireto”, através de dados experimentais de queda de pressão por tempo obtidos em um ensaio de filtração.

Já os métodos diretos para determinar a porosidade foram desenvolvidos por Aguiar e Coury (1996) e Cheng e Tsai (1998).

Aguiar e Coury (1996) adaptaram a técnica desenvolvida por Schmidt e Löffler (1990), a qual consiste na preparação de um meio filtrante recoberto de torta para ser analisado em microscópio. Neste procedimento, a torta é fixada ao meio filtrante através da passagem de uma corrente de ar contendo o adesivo Loctite-416, e o conjunto é embutido com a seção transversal voltada para cima com a resina Loctite PMS-10E. Após sua secagem, a amostra é lixada e polida, e então pode-se registrar imagens de sua seção transversal através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Em seguida as imagens são analisadas em um software, no qual a espessura da torta e a porosidade são medidas. Os autores concluíram que este método oferece resultados próximos aos calculados pela Equação 14 (Ergun modificada).

Já Cheng e Tsai (1998) utilizaram um sensor a laser para medir a espessura da torta e então calcular a porosidade pela equação:

$$\varepsilon = 1 - \frac{W}{\rho_p L_T} \quad (16)$$

em que W na Equação 16 é dado pela equação:

$$W = \frac{M_2 - M_1}{A} \quad (17)$$

Sendo que na Equação 17, A corresponde à área do filtro, e M_2 e M_1 às massas do filtro antes e após a filtração, respectivamente.

Também desenvolveram a seguinte equação, a qual relaciona a velocidade de filtração com a porosidade.

$$\varepsilon = 1 - a V_f^b \quad (18)$$

Onde a e b são as constantes empíricas que dependem do tipo do material particulado. Observa-se na Equação 18 que tortas menos porosas são formadas para velocidades de filtração mais elevadas, o que foi comprovado no trabalho de Ito e Aguiar (2009). Esses autores variaram a velocidade de filtração de 5 a 15 cm/s e avaliaram a formação da torta para três tipos de material particulado (polvilho doce, farinha de milho e concentrado fosfático) em um meio

filtrante de poliéster. Imagens das tortas foram obtidas por microscópio eletrônico e binarizadas por um *software*, sendo então possível calcular a relação entre os espaços preenchidos e vazios e, portanto, determinar a porosidade. Relataram também que quanto mais arredondada for as partículas que compõem a torta, menor a porosidade da mesma, uma vez que partículas esféricas tendem a preencher com maior eficiência os espaços intersticiais, causando maior empacotamento.

2.5.5 Solidez

Sendo o oposto da porosidade, a solidez de um meio poroso corresponde à razão entre o volume ocupado dos espaços não vazios pelo volume total, e é definida pela equação:

$$\varepsilon_s = 1 - \varepsilon \quad (19)$$

2.5.6 Eficiência de limpeza

A eficiência de limpeza η_c , conforme proposto por Lee, Sohn e Park (2015), é calculada pela equação:

$$\eta_c = \frac{(\Delta P_M - \Delta P_R)}{(\Delta P_M - \Delta P_0)} \times 100\% \quad (20)$$

Em que na Equação 20, ΔP_M , ΔP_R e ΔP_0 são, respectivamente, as quedas de pressão máxima, residual e inicial.

Qian et al. (2015) estudaram o efeito do tratamento superficial na eficiência de limpeza dos jatos pulsantes em filtros de manga. Concluíram em seus experimentos que o meio filtrante coberto com uma membrana de PTFE (Teflon®) obteve uma maior eficiência de limpeza do que o filtro sem este tratamento. Também foi investigado o mecanismo de limpeza que atua no topo e no fundo das mangas. Utilizando acelerômetros, concluíram que no topo a limpeza tem como agente principal a aceleração brusca da manga quando o pulso de ar é injetado em seu interior, fornecendo dessa maneira a força necessária para o destacamento da torta. E a partir de transdutores de pressão, observaram que a rápida passagem de um grande volume de ar causou pressão negativa no interior da manga de forma mais acentuada em sua parte inferior, sendo esta a causa principal do destacamento da torta nesta região.

2.5.7 Eficiência de coleta

A eficiência de coleta (E) corresponde à fração das partículas que são retidas pelo meio filtrante. Pode ser determinada através de espectrômetro conforme realizado por Cirqueira, Tanabe e Aguiar (2017), sendo calculada como:

$$E = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100\% \quad (21)$$

Na Equação 21, C_i e C_f são, respectivamente, a concentração de partículas antes e após o filtro medidas pelo equipamento. Por esta metodologia, é calculado um valor de eficiência para cada faixa de diâmetro aerodinâmico. A concentração é dada em número de partículas por centímetro cúbico (N/cm^3), mas normalmente é apresentada na forma normalizada ($dN/d\log D_p$), uma vez que cada espectrômetro pode trabalhar com determinada resolução e tamanho de canal (TSI INCORPORATED, 2012).

No caso de um filtro absoluto estar presente a jusante do filtro de teste como realizado por Sánchez et al. (1997), a eficiência de coleta é calculada pela equação:

$$E = \frac{\Delta M_{FT}}{\Delta M_{FT} + \Delta M_{FA}} \times 100\% \quad (22)$$

Sendo que na Equação 22, ΔM_{FT} e ΔM_{FA} são, respectivamente, massas retidas no filtro de teste e no filtro absoluto, ambos pesados antes e após a filtração.

A eficiência de coleta aumenta conforme prossegue a filtração devido à formação da torta, que age como um novo meio filtrante. À medida que a torta cresce em espessura, a área de filtração aumenta, elevando as chances das novas partículas serem coletadas. Além disto, tortas menos porosas resultam em maiores eficiências de coleta, porém em maiores queda de pressão (AL-OTOOM, 2005).

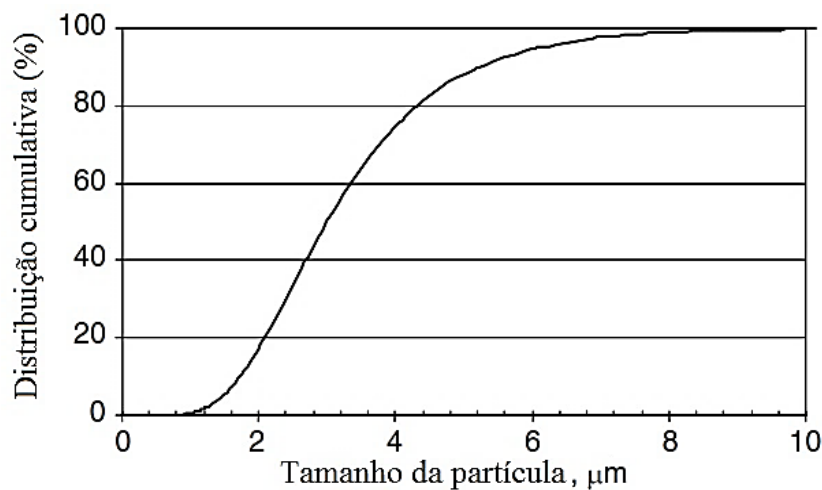
2.5.8 Tamanho, forma e densidade das partículas

As partículas podem ser caracterizadas de acordo com o tamanho, forma e densidade, sendo a propriedade mais importante o tamanho (HINDS, 1982). Ele influi nas propriedades do aerossol e também nos mecanismos de captura descritos previamente (Figura 14). Sua unidade

padrão é o micrômetro (μm) para valor maior que $0,1 \mu\text{m}$ e nanômetro (nm) para menor. As partículas maiores formam tortas de filtração mais espessas, enquanto as menores penetram mais no meio filtrante e tendem a formar uma torta com maior queda de pressão (AL-OTOOM, 2005).

Em uma amostra de um mesmo material existem partículas de vários tamanhos, e um modo de representá-las é pelo gráfico de distribuição granulométrica, exemplificado na Figura 16. O eixo das ordenadas pode estar expresso em volume, massa ou número de partículas. Alguns conceitos de representatividade podem ser extraídos da Figura 16, como o D_{50} que é o diâmetro mediano das partículas, que no caso é $3 \mu\text{m}$. Significa que 50% delas são menores ou maiores que $3 \mu\text{m}$. O diâmetro médio, D_m , representa a média aritmética (ou geométrica) da população analisada, sendo $3,29 \mu\text{m}$ neste caso. O mediano apresenta a vantagem de estar menos suscetível a erros estatísticos e variações pela presença de poucas partículas de tamanhos fora do padrão. Um material particulado é classificado monodisperso se no mínimo 90% das partículas que o compõe estão na faixa de $\pm 5\%$ do diâmetro mediano. Caso contrário, o conjunto é denominado polidisperso (JILLAVENKATESA, DAPKUNAS e LUM, 2001).

Figura 16 – Exemplo de distribuição de tamanho das partículas de uma amostra.



Fonte: Adaptado de Merkus (2009)

Para partículas com formatos regulares, como esferas e cubos, o tamanho é dado pela medida característica, ou seja, diâmetro ou comprimento da aresta. Para as irregulares são possíveis várias definições, que podem estar relacionadas às propriedades visuais como comprimento ou largura, ou baseados no conceito de diâmetro equivalente. Tal conceito simplifica as deformidades de uma partícula irregular, caracterizando-a em um único

parâmetro: o diâmetro. Ele pode ser medido por diversas técnicas, e a escolha de qual utilizar depende da aplicação, conforme apresentado na Tabela 6. Órgãos reguladores baseiam-se no conceito de diâmetro aerodinâmico para definir os limites de emissão para PM_{2.5} e PM₁₀. Estes representam a concentração mássica de partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 e 10 μm , respectivamente.

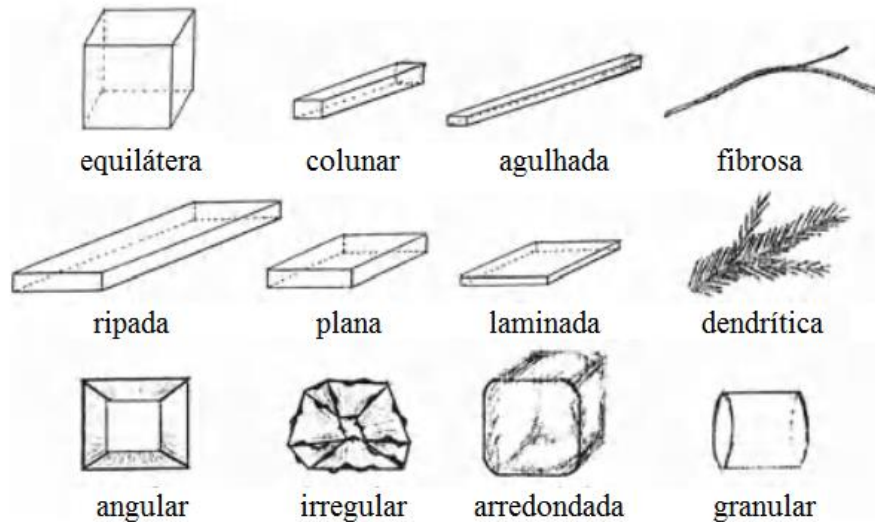
Tabela 6 – Exemplos de diâmetro equivalente

Diâmetro equivalente	Significado	Técnica
Área projetada	Diâmetro de um círculo que possui a mesma área que a projeção da partícula.	Microscopia
Área superficial	Diâmetro de uma esfera que possui a mesma área superficial e densidade que a partícula.	(0,1 a 1000 μm) ou
Volumétrico	Diâmetro de uma esfera que possui o mesmo volume e densidade que a partícula.	Difração a laser (0,04 a 8000 μm)
Sauter ($D_{3,2}$)	Diâmetro de uma esfera que possui a mesma razão volume/área superficial e densidade que a partícula.	
Aerodinâmico	Diâmetro de uma esfera de densidade de 1000 kg/m^3 tendo as mesmas propriedades aerodinâmicas que a partícula.	Espectrômetro (0,5 a 20 μm)
De peneira	Diâmetro de partículas que passam por uma peneira de mesh definido.	Peneiramento (20 μm a 125 mm)
De Stokes	Diâmetro de uma esfera que possui a mesma velocidade terminal e densidade que a partícula nas condições da lei de Stokes.	Sedimentação gravitacional por raio-x (0,1 a 300 μm)
Hidráulico	Diâmetro de uma esfera que possui a mesma velocidade terminal que a partícula nas condições da lei de Stokes, com densidade de 2650 kg/m^3 (quartzo).	Sedimentação gravitacional por raio-x (0,1 a 300 μm)

Fonte: Adaptado de Jillavenkatesa, Dapkunas e Lum (2001)

Já o formato da partícula é uma propriedade fundamental que influencia o empacotamento da torta, bem como sua porosidade, permeabilidade e coesão (ALLEN, 1997). Existem formas variadas e as mais comuns são apresentadas na Figura 17. Geralmente são caracterizadas por microscopia óptica ou eletrônica, dependendo do tamanho.

Figura 17 – Caracterização de partícula segundo a forma.



Fonte: Adaptado de Merkus (2009).

As partículas pontiagudas e/ou com alta dureza são abrasivas e podem causar danos aos filtros de manga se a velocidade de filtração estiver alta o suficiente. Como alta velocidade resulta em uma maior penetração, as partículas abrasivas ficam retidas e podem cortar as fibras quando as mangas são flexionadas durante o processo de limpeza (MUKHOPADHYAY, 2009).

Por fim, a densidade de uma partícula não porosa é definida como a razão entre sua massa e o volume ocupado por ela. No caso de partícula porosa, o poro pode ser acessível (aberto) ou não (fechado). Na técnica de picnometria a hélio, este fluido preenche os poros abertos, mas não os fechados, e a densidade determinada é chamada aparente (*bulk density*). A densidade verdadeira (*true density*) é calculada excluindo os poros abertos e fechados. Essas diferenças não são significativas para os materiais particulados, exceto se forem altamente porosos (ALLEN, 1997).

2.5.9 Carga de material particulado

A carga de material particulado corresponde à concentração de partículas a montante do meio filtrante, e geralmente é dada em g/m^3 ou mg/m^3 .

Saleem et al. (2012) observaram que mantendo a velocidade de filtração constante, cargas baixas resultam em tortas mais densas e compactas, com coeficientes de resistência maiores, enquanto que valores elevados de carga promovem um aumento mais rápido da queda de pressão, resultando em ciclos de filtração mais curtos. Ainda, Mukhopadhyay, Pandit e Dhawan (2016) concluíram que a filtração com alta carga de partículas possui maior eficiência de coleta, apesar da emissão também aumentar, uma vez que um maior número de partículas passa direto pelo filtro sem serem coletadas.

2.5.10 Forças de adesão e coesão

As forças de adesão e coesão das partículas são fatores primários nas falhas em um filtro manga. A primeira consiste na força que mantém as partículas retidas em uma superfície, enquanto a segunda é a tendência de uma partícula em se unir a outra, formando dendritos. Quanto mais acentuadas forem estas propriedades, maior a energia necessária na etapa de limpeza, podendo resultar em danos aos filtros. Na prática, as forças de adesão e coesão da torta e o stress que a manga é submetida durante a limpeza não são uniformes ao longo da manga, o que resulta na limpeza por blocos (*patchy cleaning*) (MORRIS e ALLEN, 1996).

A umidade do gás é o parâmetro mais influente na adesão e compressibilidade da torta em filtros manga (HÖFLINGER, 1998). Na presença de umidade, as partículas são unidas pelas forças resultantes de pontes líquidas formando aglomerados e quanto mais pontes líquidas houver, maiores são as forças de adesão e coesão. À baixa umidade relativa, a força dentro do aglomerado é fraca e ele pode ser fragmentado em grupos menores. Para uma mesma umidade, partículas menores são mais coesas e se aderem mais facilmente às fibras. Park, Yoo e Seung (2007) avaliaram a influência da umidade do gás na força de adesão entre as fibras de poliéster e as partículas de cinzas volantes. Concluíram que a força de adesão atinge o mínimo para a umidade relativa do gás em torno de 50% na temperatura ambiente.

Já o efeito da umidade presente no material particulado na performance de filtração e limpeza de filtros foi estudada por Li, Li e Zhou (2016). A partir de amostras de pó de carvão com a umidade variando de 0 a 12% em massa, concluíram que com o aumento da umidade na faixa de 0 a 4%, a resistência específica da torta e o coeficiente de compressibilidade da mesma aumentaram enquanto a sua porosidade diminuiu, acarretando no aumento da queda de pressão no filtro. Efeito contrário foi observado na faixa de 4 a 12%. Desta forma, para a umidade de 4% foi observado um valor máximo de queda de pressão no meio filtrante e um valor mínimo

de porosidade da torta. Ainda, a adesão entre o filtro e a torta aumentou conforme a umidade no material particulado variou de 0 a 12% em massa.

Outros fatores que influenciam a adesão de partículas ao meio filtrante são a velocidade de filtração e a carga de material particulado. Quanto maiores estes parâmetros, mais acentuado é o empacotamento das partículas, o que reduz a distância entre elas e aumenta o efeito das forças de adesão. Este fenômeno foi observado por Silva et al. (1999) e Salazar-Banda et al. (2012).

2.5.11 Temperatura

Como descrito na Tabela 4 da subseção 2.3.3, a temperatura de filtração exerce grande influência na definição do material adequado para certo processo.

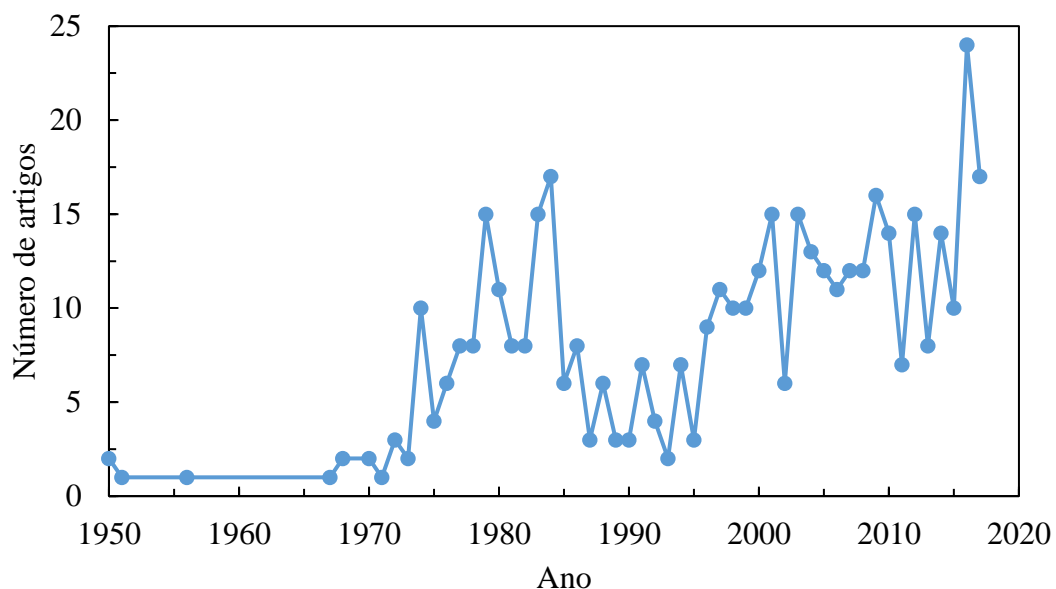
Além disso, a temperatura afeta outros parâmetros de filtração, como a queda de pressão, a emissão e a resistência específica da torta. Mukhopadhyay, Pandit e Dhawan (2016) estudaram o efeito da temperatura para meios filtrantes distintos utilizando como material particulado cinzas volantes. Observaram que a emissão de partículas diminuiu conforme aumentaram a temperatura de condição ambiente até 220°C. Este fato é devido ao aumento da viscosidade do gás e da sinterização parcial de alguns componentes do material particulado com o aumento da temperatura, resultando em uma maior adesão da torta com o meio, maior coesão entre as partículas, maior compactação da torta e consequente diminuição na eficiência de limpeza. Com mais partículas aderidas ao meio filtrante, o fenômeno de filtração de torta é mais acentuado, portanto a eficiência de coleta aumenta e a emissão foi reduzida. Ainda se constatou que quanto maior a temperatura de filtração, mais partículas ficaram retidas no meio filtrante após a limpeza, acarretando um maior valor de queda de pressão residual. Esta era uma consequência esperada já que a torta se tornou mais compacta para temperaturas mais elevadas.

2.6 Estado da arte

Em 1970, nos Estados Unidos, foi criada a Lei do Ar Limpo, estabelecendo limites de emissões industriais e veiculares que deveriam ser atendidos a partir de 1977, além da criação da agência reguladora *United States Environmental Protection Agency* (EPA). Consequentemente houve aumento-se consideravelmente o número de pesquisas relacionadas aos filtros de mangas, como ilustrado na Figura 18. Nessa Figura, observa-se um segundo

crescimento dessa linha de pesquisa a partir da década de 90, quando foi criada uma emenda na Lei do Ar Limpo americana reforçando os limites de emissão e a fiscalização.

Figura 18 – Artigos relacionados a filtro de mangas entre 1950 e 2017



Fonte: Web of Science (2018)

Porém, nota-se pelas subseções anteriores que a maioria dos trabalhos disponíveis na literatura relacionados ao filtro de mangas objetivam estudar a fenomenologia desse processo de filtração. É necessário então realizar estudos mais aplicáveis ao cotidiano das indústrias, buscando soluções econômicas que atendam às legislações ambientais que estão cada vez mais rigorosas (Apêndice B).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo visa apresentar e descrever os materiais e os métodos empregados para a obtenção dos resultados e cumprimento dos objetivos propostos.

3.1 Descrição geral

Primeiramente executou-se a caracterização do material particulado coletado no filtro de mangas do processo de despoejamento secundário da aciaria de uma indústria siderúrgica. Também foram caracterizados meios filtrantes de poliéster com e sem membrana de PTFE (Teflon®) de dois fabricantes, A e B.

Em seguida, os meios filtrantes virgens foram submetidos a ensaios de filtração em uma unidade experimental com um contador de partículas instalado, com o objetivo de calcular a eficiência de coleta de partículas finas (PM_{2.5}) e ultrafinas (PM_{1.0}). Também avaliou-se a eficiência de coleta de nanopartículas na faixa de 10 a 300 nm para esses meios filtrantes.

Em uma outra etapa foram realizados testes no equipamento de filtração baseado na norma VDI 3926, o qual simula em pequena escala a operação de um filtro de mangas industrial. O objetivo foi avaliar suas limitações técnicas, de forma a verificar a viabilidade de realizar experimentos nas condições operacionais do processo real em estudo. Nesta fase também foram realizadas a calibração do alimentador de pó e da placa de orifício para controlar a vazão de ar.

Então iniciou-se a etapa de ensaios de filtração no referido equipamento, onde foi utilizado o material particulado do processo em estudo e as condições operacionais da norma VDI 3926: relação ar-pano de 2 m/min, concentração de partículas na região do filtro de 5000 mg/m³ e temperatura ambiente. Ao longo da filtração registrou-se a queda de pressão no meio filtrante testado até ela atingir 100 mmH₂O, momento em que a filtração foi interrompida e a limpeza não foi efetuada. O meio filtrante foi pesado antes e depois da filtração, assim como um filtro absoluto instalado à jusante do mesmo, pode-se calcular a eficiência de coleta de partículas por gravimetria. A performance dos meios filtrantes nestes ensaios foi comparada em termos de eficiência de coleta, tempo de filtração e massa retida. Em seguida os meios filtrantes avaliados foram embutidos, lixados e polidos de acordo com a técnica de preparação de amostras apresentada por Aguiar e Coury (1996). Dessa maneira, pode-se registrar imagens de sua seção transversal pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), o que possibilitou

avaliar a penetração das partículas ao longo da espessura dos meios filtrantes através de um *software* de imagens.

A seguir foram realizados ensaios de filtração no equipamento baseado na norma VDI 3926 com ciclos de filtração e limpeza para os meios filtrantes de poliéster sem a membrana de PTFE. O objetivo foi avaliar a performance dos filtros segundo o tempo total de filtração e a evolução da queda de pressão residual. Após o último ciclo, determinou-se as eficiências de coleta de PM_{2.5} e de PM_{1.0} dos meios filtrantes testados e comparou-se com as obtidas para os mesmos ainda virgens.

As seções a seguir contêm o detalhamento das atividades supracitadas.

3.2 Caracterização do material particulado

O material particulado utilizado neste trabalho foi cedido por uma indústria siderúrgica e foi coletado nas 12 câmaras do filtro de mangas do despoejamento secundário da aciaria, totalizando, portanto, 12 amostras. Em cada amostra foram retiradas 3 subamostras, e para cada subamostra foi obtida em triplicata a distribuição granulométrica por volume através do equipamento Malvern Mastersizer Microplus, que opera pela técnica de difração a laser. As médias dos diâmetros volumétricos obtidos estão disponibilizados na Tabela 7.

Também foi obtida a distribuição granulométrica do material particulado coletado no desfagulhador localizado a montante do filtro:

- $D(v, 0,1) = 46,08 \pm 1,40 \mu\text{m}$;
- $D(v, 0,5) = 127,24 \pm 1,98 \mu\text{m}$;
- $D(v, 0,9) = 345,98 \pm 12,73 \mu\text{m}$.

Nota-se que as maiores partículas do processo ficam retidas no desfagulhador e não seguem para o filtro de mangas.

Com o intuito de obter uma amostra que represente o material particulado que entra no filtro de mangas, foram coletados 1700g de cada uma das 12 amostras, as quais foram misturadas formando uma amostra única de 20400g, a qual foi utilizada nos testes de filtração.

Sua massa específica é de $3,4179 \pm 0,0043 \text{ g/cm}^3$ e foi determinada por picnometria a hélio através do equipamento AccuPyc 1330 Micrometrics disponível no Laboratório de Controle Ambiental do DEQ/UFSCar.

Esta amostra única possui a seguinte distribuição granulométrica:

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

Tabela 7 – Distribuição granulométrica das amostras de material particulado por câmara do filtro de mangas da indústria siderúrgica

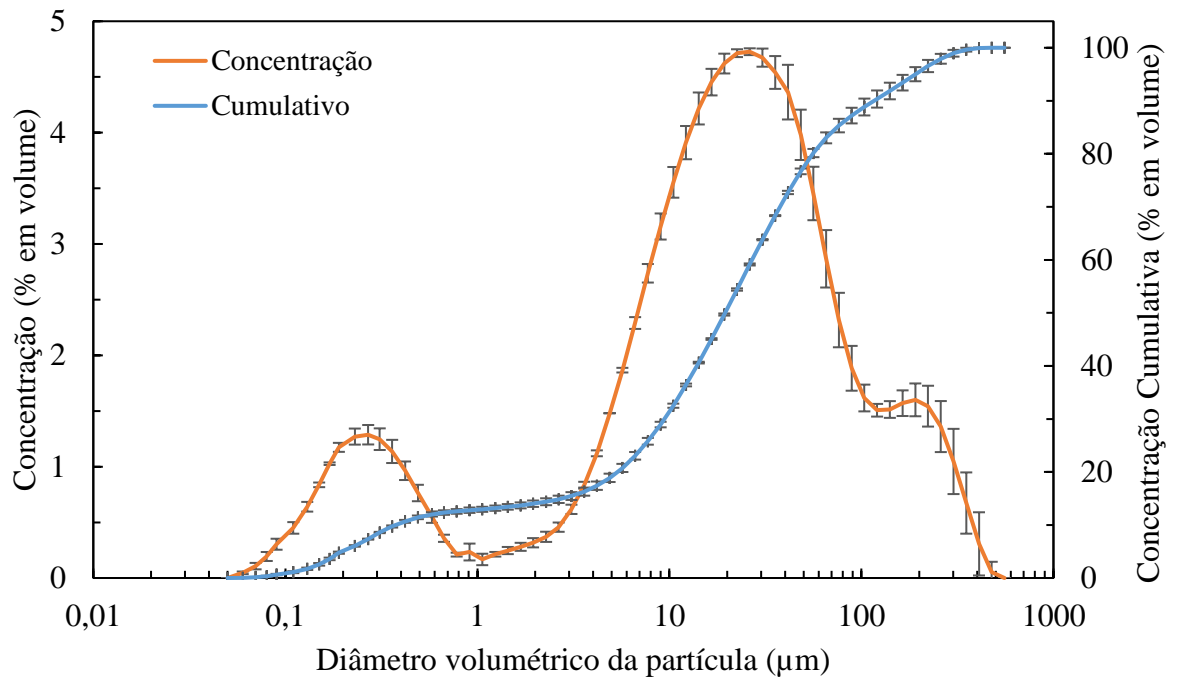
Câmara	Diâmetro Volumétrico [μm]					
	D(v, 0,1)	Erro	D(v, 0,5)	Erro	D(v, 0,9)	Erro
1	0,24	0,01	11,90	0,84	68,99	5,16
2	0,23	0,01	12,83	1,23	115,87	21,84
3	0,25	0,01	10,18	0,53	63,26	8,45
4	0,23	0,01	11,48	0,95	90,97	19,16
5	0,28	0,02	16,30	1,41	93,99	8,89
6	0,26	0,02	12,71	0,89	90,90	12,26
7	0,25	0,01	11,61	1,01	73,19	7,63
8	0,26	0,01	13,87	1,50	90,34	7,59
9	0,23	0,01	11,06	1,30	76,77	8,26
10	0,28	0,02	17,26	1,86	103,81	13,96
11	0,94	0,83	29,57	2,74	216,75	24,17
12	0,27	0,02	20,12	1,59	138,28	29,86

Fonte: Arquivo pessoal

A distribuição granulométrica por concentração simples e cumulativa (em volume) da amostra única é apresentada na Figura 19, onde verifica-se que o material particulado é polidisperso.

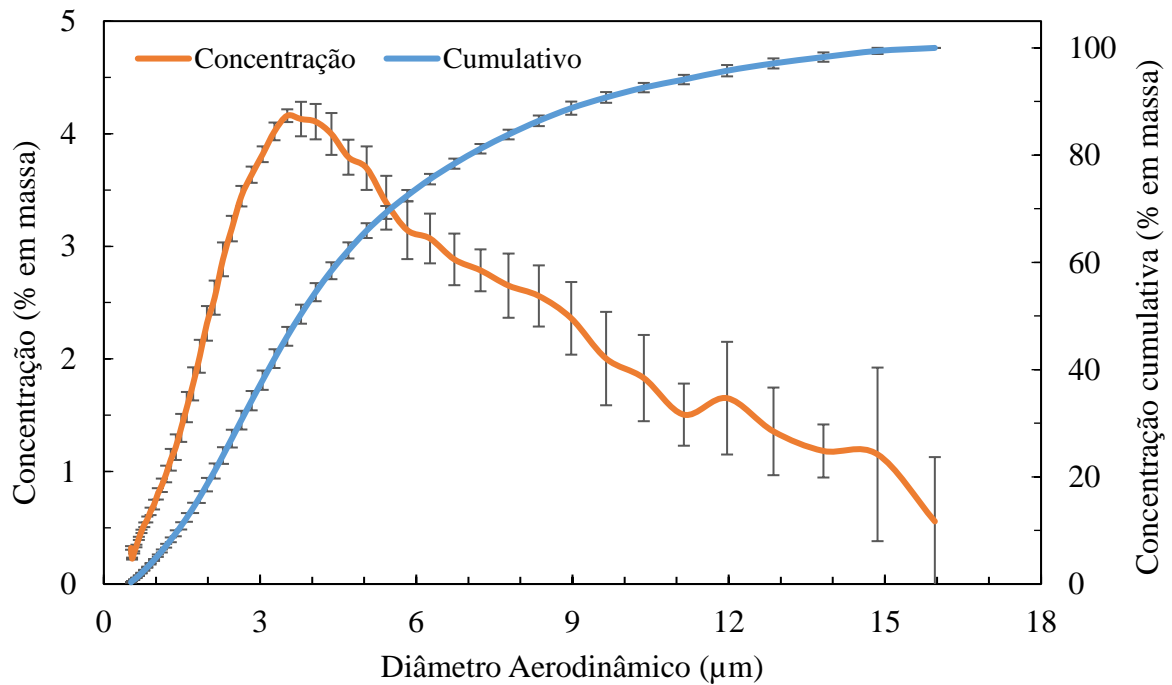
Também foi obtida a distribuição granulométrica aerodinâmica ilustrada na Figura 20, uma vez que a definição de PM_{2.5} e PM₁₀ baseia-se neste conceito. Os equipamentos utilizados foram um gerador de aerossol, modelo 3433 da TSI, um diluidor de aerossol, modelo 3302A da TSI, e o espectrômetro Aerodynamic Particle Sizer® 3320 (APS), também da TSI.

Figura 19 – Distribuição granulométrica em volume do material particulado



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 20 – Distribuição granulométrica aerodinâmica (em massa) do material particulado



Fonte: Arquivo pessoal

Pela curva de concentração cumulativa em massa da Figura 20 tem-se que o diâmetro aerodinâmico mediano é $3,92 \pm 0,12 \mu\text{m}$, ou seja, 50% das partículas em massa são menores que esse valor. Ainda, 90,8% das partículas em massa são menores que $10 \mu\text{m}$, 27,1% são menores que $2,5 \mu\text{m}$ e 4,5% são menores que $1,0 \mu\text{m}$.

Imagens obtidas através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) disponível no LCE/DEMa da UFSCar mostram que o material particulado é composto por partículas de diferentes formas e tamanhos - Figuras 21 (a) e (b). Estas podem ter formato arredondado como ilustrado na Figura 21 (c) ou possuírem formato irregular, como na Figura 21 (e). A partir da técnica de espectrometria de raios-x (EDX) implementada no MEV foi possível determinar a composição química destas partículas, sendo a arredondada Fe_2O_3 e a de formato irregular CaO - Figura 21 (F). Há também a presença significativa de partículas nanométricas na superfície das partículas maiores, como nota-se nas Figuras 21 (c), (d) e (e), e também na curva de concentração da Figura 19.

A composição química da amostra apresentada na Tabela 8 foi determinada por fluorescência de raio-x (XRF) no LCE/DEMa da UFSCar. Porém esta técnica não prevê o carbono, o qual foi calculado através de combustão direta no CCDM/DEMa da UFSCar. A amostra analisada possui consideravelmente menos carbono e mais óxido de cálcio em relação aos valores informados pela indústria (Tabela A2 do Apêndice A).

Tabela 8 – Composição química do material particulado

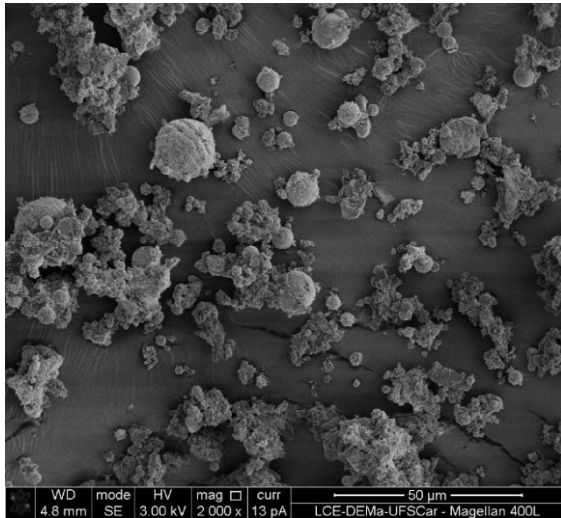
Composto químico	% em massa
$\text{CaO}^{(A)}$	51,20
$\text{Fe}_2\text{O}_3^{(A)}$	43,23
$\text{C}^{(B)}$	2,84
$\text{Al}_2\text{O}_3^{(A)}$	1,94
$\text{SiO}_2^{(A)}$	0,79

(A) Fluorescência de Raio-x

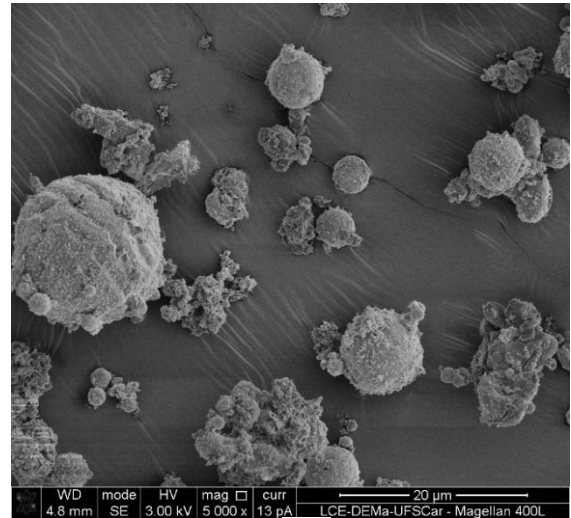
(B) Combustão direta

Fonte: Arquivo pessoal

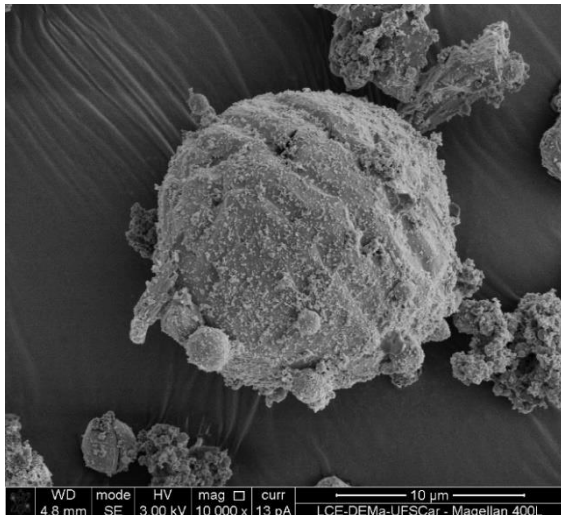
Figura 21 – Imagens obtidas pelo MEV do material particulado



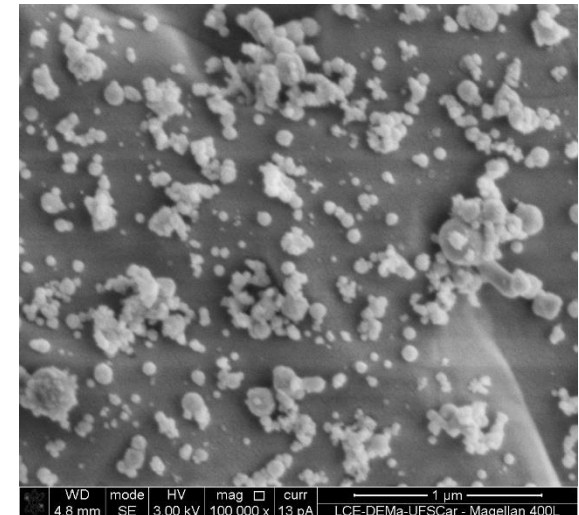
(a)



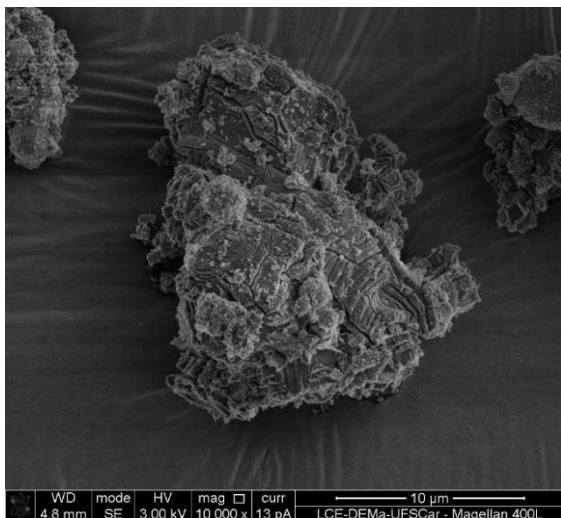
(b)



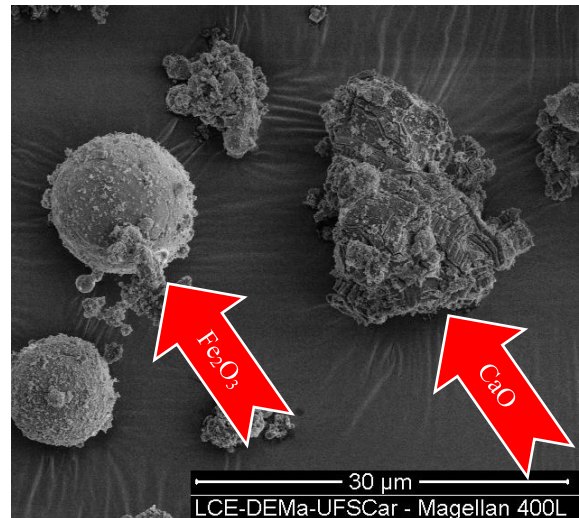
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Arquivo pessoal

3.3 Caracterização dos meios filtrantes virgens

Os meios filtrantes utilizados foram o poliéster com e sem membrana de PTFE (Teflon®) de dois fabricantes, A e B. O poliéster foi escolhido por ser um material consolidado na filtração industrial, por suportar as condições operacionais do processo e por ter uma relação de custo-benefício favorável se comparado com outros materiais.

As especificações técnicas fornecidas pelos fabricantes para cada meio filtrante estão disponíveis na Tabela 9.

Tabela 9 – Especificações técnicas dos meios filtrantes fornecidas pelos fabricantes

Meio filtrante	Fabricante	Gramatura (g/m ²)	Permeabilidade (m ³ /min)/m ²	
			$\Delta P=125\text{Pa}$	$\Delta P=196\text{Pa}$
Poliéster ¹	A	550	NI	15
	B	550	7,6 – 10,7	NI
Poliéster ¹ +PTFE	A	550	NI	4,5
	B	550	0,92 – 3,0	NI

¹Para os dois fabricantes, o poliéster é chamuscado, termofixado e calandrado.

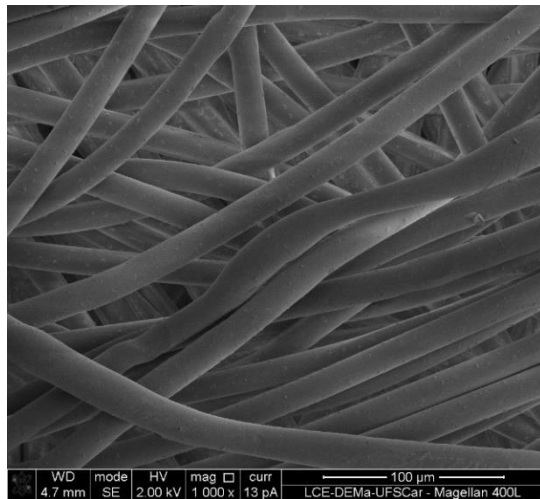
NI – Não informado

Fonte: Arquivo pessoal

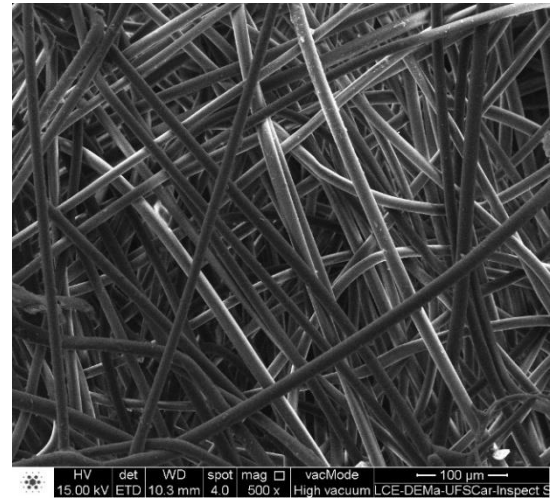
De posse das amostras dos meios filtrantes, foram realizadas imagens da superfície pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), disponível no LCE/DEMa da UFSCar, ilustradas na Figura 22. Nota-se que as fibras de poliéster do fabricante A - Figura 22 (b) - apresentam diâmetros menores que as do fabricante B - Figura 22 (a). Observa-se também pelas Figuras 22 (c) e (d) que as fibras da membrana de PTFE possuem diâmetro consideravelmente menor que as de poliéster. O recobrimento do meio filtrante de poliéster com esta membrana de PTFE está representado pelas Figuras 22 (e) e (f).

A partir destas imagens foi possível calcular o diâmetro médio das fibras conforme realizado por Bortolassi, Guerra e Aguiar (2017). Para cada meio filtrante foram selecionadas 3 imagens de sua superfície, e cada imagem foi seccionada em 12 seções verticais igualmente espaçadas. Utilizando o *software Image Pro Plus 7.0*, cada fibra presente na imagem teve seu diâmetro determinado em cada seção, como representado na Figura 23, sendo realizadas aproximadamente 80 medições por imagem.

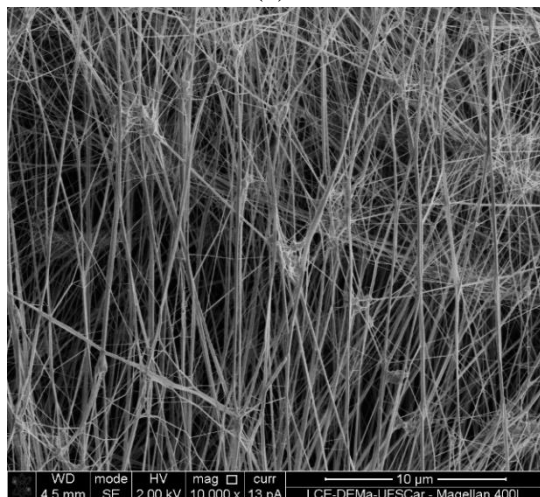
Figura 22 – Imagens obtidas por MEV da superfície dos meios filtrantes. Fibras de poliéster dos fabricantes (a) A e (b) B; fibras de PTFE dos fabricantes (c) A e (d) B; Detalhe da membrana de PTFE aplicada sobre as fibras de poliéster do fabricante (e) A e (f) B.



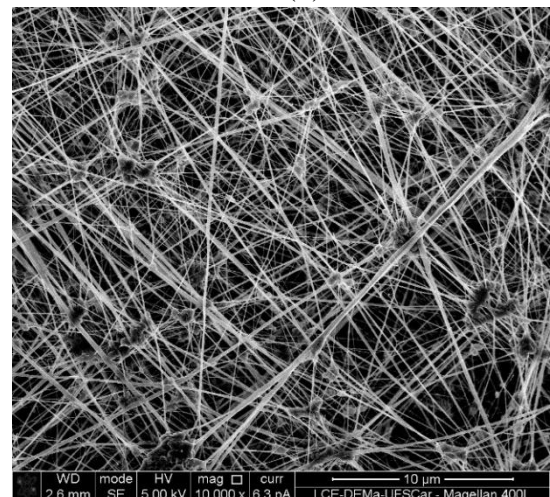
(a)



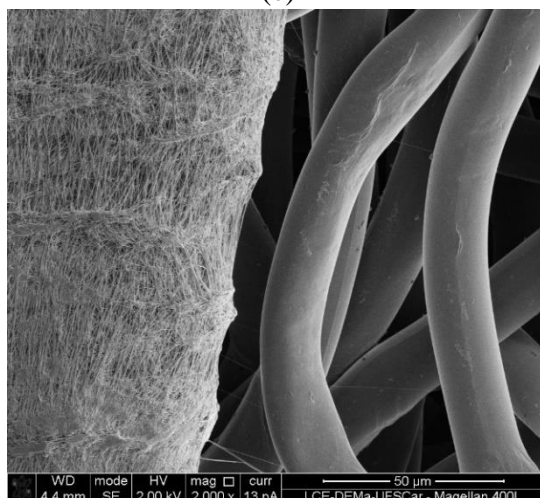
(b)



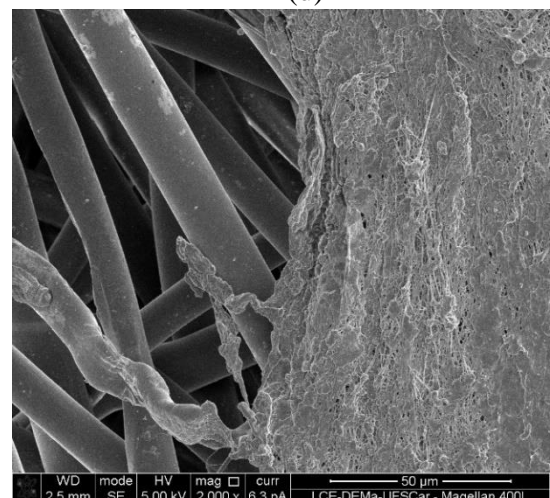
(c)



(d)



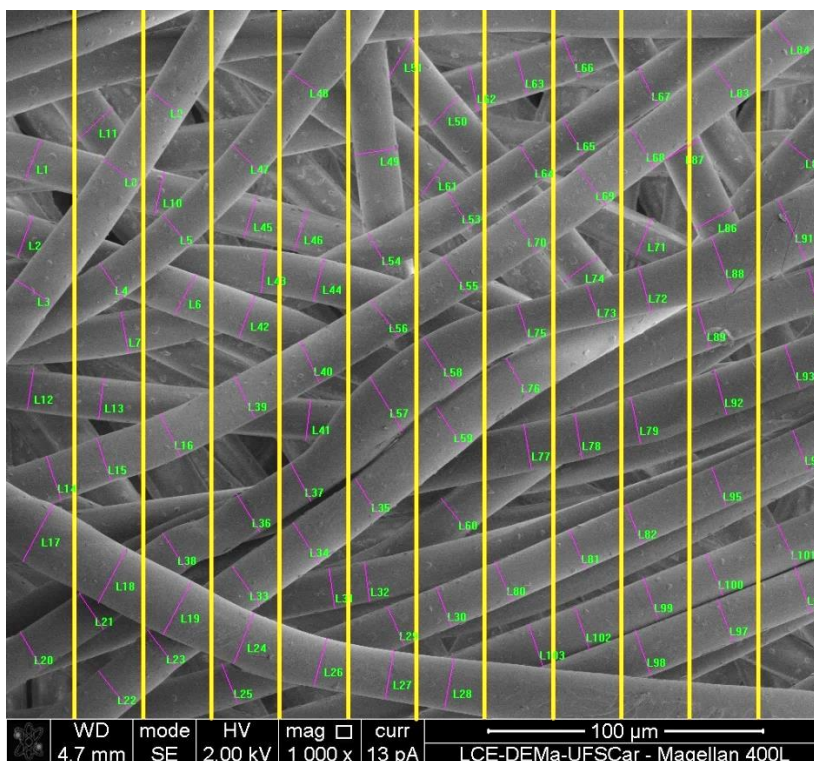
(e)



(f)

Fonte: Arquivo pessoal

Figura 23 – Determinação do diâmetro médio das fibras dos meios filtrantes



Fonte: Arquivo pessoal

O diâmetro médio das fibras foi obtido pela média aritmética das medidas, e os resultados estão representados na Tabela 10.

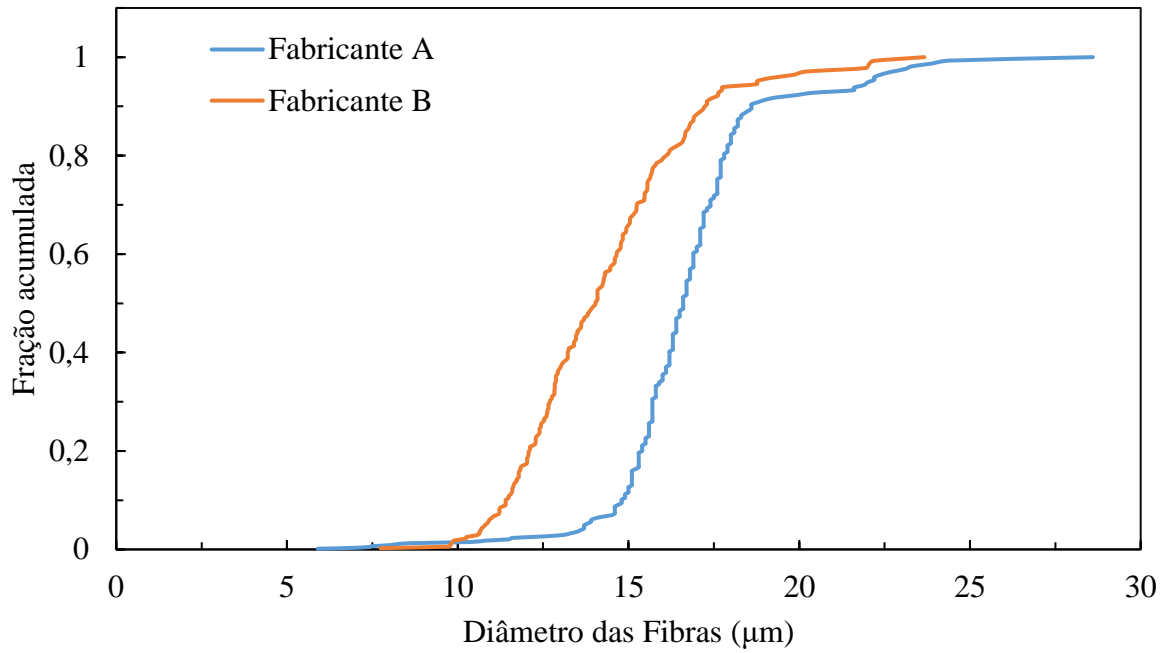
Tabela 10 – Diâmetro médio das fibras dos meios filtrantes virgens

Meio filtrante	Fabricante	Diâmetro médio (μm)
Poliéster	A	$16,4 \pm 2,6$ ($\pm 15,9\%$)
	B	$13,9 \pm 2,4$ ($\pm 17,3\%$)
Poliéster + PTFE	A	$0,107 \pm 0,105$ ($\pm 98,1\%$)
	B	$0,085 \pm 0,038$ ($\pm 44,7\%$)

Fonte: Arquivo pessoal

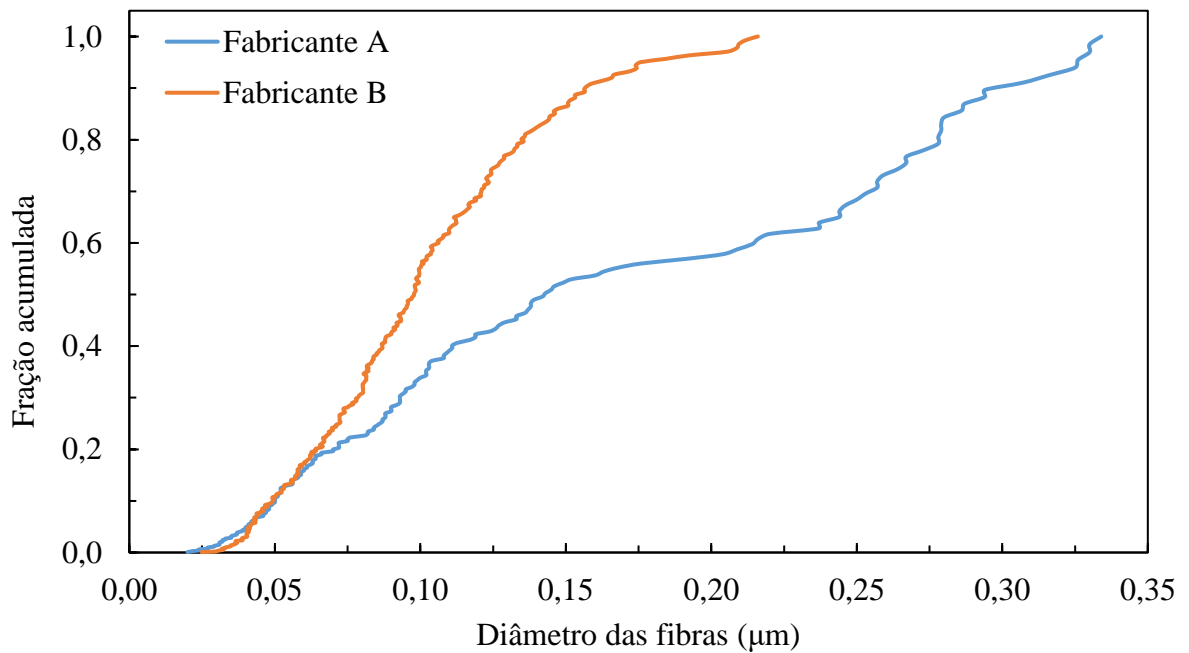
Como verifica-se na Tabela 10, o erro associado ao diâmetro das fibras do meio filtrante de poliéster com PTFE é alto, o que caracteriza uma composição heterogênea de tamanhos. Sendo assim, uma maneira mais adequada de representar estes meios filtrantes é através da distribuição de diâmetros das fibras em um gráfico de fração acumulada, como retratado nas Figuras 24 e 25.

Figura 24 – Distribuição de diâmetros das fibras do meio filtrante de poliéster



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 25 – Distribuição de diâmetros das fibras do meio filtrante de poliéster com membrana de PTFE



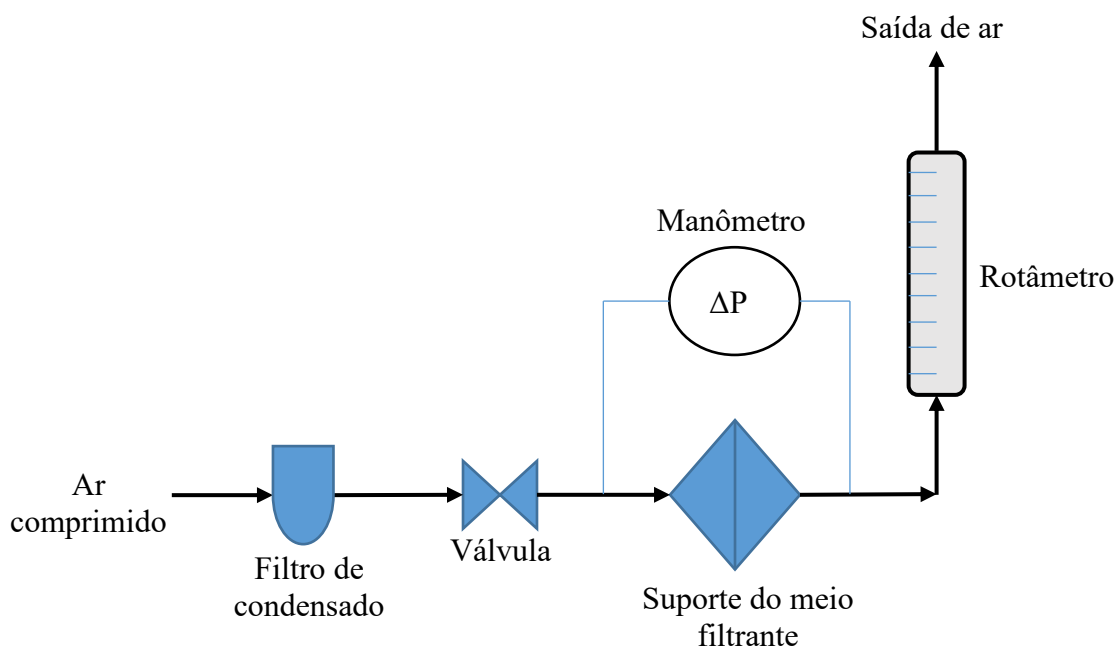
Fonte: Arquivo pessoal

Nota-se na Figura 24 que o diâmetro médio das fibras de poliéster do fabricante B é menor que o do fabricante A, assim como observado nas Figuras 22 (a) e (b) das imagens obtidas pelo MEV. Verifica-se também na Figura 24 uma inclinação menor da curva do fabricante A, indicando que estas fibras apresentam distribuição de diâmetro mais homogêneas. Tal fato também é observado na Tabela 10, onde o erro associado ao poliéster do fabricante A ($\pm 15,9\%$) é menor que o do fabricante B ($\pm 17,3\%$).

Já distribuição de tamanho das fibras de PTFE, representada pela Figura 25, indica que a membrana de Teflon® do fabricante B é mais homogênea que a do fabricante A.

Em seguida utilizou-se a unidade experimental ilustrada na Figura 26 para a obtenção de dados para o cálculo da permeabilidade e da porosidade dos meios filtrantes virgens. O ensaio consistiu em ajustar a entrada de ar através da válvula, registrando a queda de pressão na amostra de meio filtrante de $40,15 \text{ cm}^2$ de área útil em função da vazão volumétrica indicada pelo rotâmetro.

Figura 26 – Unidade experimental para determinar a permeabilidade do meio filtrante



Fonte: Arquivo pessoal

Na literatura, o mais comum é caracterizar o meio filtrante em termos do coeficiente de permeabilidade darciana (K_1) e da constante não-darciana (K_2) presentes na Equação 8 de Forchheimer descrita na subseção 2.5.3. Para isso, variou-se a vazão de ar até 65 L/min e

registrou-se a queda de pressão no meio filtrante. Desta forma, construiu-se uma curva parabólica do tipo $y=ax+bx^2$ de acordo com a Equação 8, onde $K_1 = \mu/a$ e $K_2 = \rho/b$.

E com esses dados obtidos de queda de pressão no filtro em função da velocidade de filtração, juntamente com os diâmetros medianos das fibras calculados e apresentados na Tabela 10, foi possível a partir da Equação 14 (modificada de Ergun) calcular a porosidade do meio filtrante.

Os valores de K_1 e K_2 obtidos experimentalmente e as porosidades calculadas estão expostos na Tabela 11. Vale ressaltar que os valores de porosidade obtidos para o poliéster com revestimento de PTFE são de todo o conjunto, uma vez que não foi possível separar os dois materiais. Observa-se nessa tabela que os valores de porosidade dos meios filtrantes de poliéster revestidos de PTFE foram maiores que os de poliéster sem a membrana. Isto já era esperado, uma vez que as fibras de PTFE possuem diâmetro cerca de 100 vezes menor que as de poliéster, como indicado pela Tabela 10, formando, portanto, um meio filtrante com maior volume de espaços vazios, isto é, maior porosidade.

Tabela 11 – Constantes de permeabilidade K_1 e K_2 e porosidade dos meios filtrantes virgens

Meio filtrante	Fabricante	Espessura ^A (mm)	$K_1 \times 10^{-12}$ (m ²)	$K_2 \times 10^{-7}$ (m)	Porosidade (Ergun)
Poliéster	A	2,10 ± 0,08	47,779 ± 5,424	106,265 ± 38,788	0,8470 ± 0,0052
	B	2,26 ± 0,05	51,143 ± 1,247	169,944 ± 76,591	0,8705 ± 0,0024
Poliéster + PTFE	A	2,14 ± 0,06	7,858 ± 0,819	2,615 ± 0,646	0,9962 ± 0,0003
	B	2,21 ± 0,05	8,246 ± 0,737	7,749 ± 2,118	0,9975 ± 0,0003

^AObtida através de um paquímetro digital série 727 da Starrett®.

Obs: $\rho = 1,0768 \text{ kg/m}^3$ e $\mu = 1,856 \times 10^{-05} \text{ Pa.s}$, calculados respectivamente pelas Equações (9) e (10), sendo $T = 298 \text{ K}$ e $P = 91992 \text{ Pa}$ (pressão atmosférica de São Carlos-SP, situado a 856 metros do nível do mar).

Fonte: Arquivo pessoal

Os resultados obtidos na Tabela 11 estão de acordo com a caracterização realizada no trabalho de Barros, Tanabe e Aguiar (2016). Nele, o poliéster com diâmetro médio de fibra de 19,4 μm apresentou porosidade de 0,80 e constante de permeabilidade K_1 de $50,7 \times 10^{-12} \text{ m}^2$. Já um filtro HEPA, que assim como o PTFE apresentou distribuição heterogênea das fibras, obteve K_1 de $1,77 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ e porosidade de 0,996 para fibras de 0,100 μm de diâmetro médio.

No entanto, normalmente a permeabilidade é informada pelos fabricantes nas unidades de $(\text{m}^3/\text{min})/\text{m}^2$ ou $(\text{L}/\text{min})/\text{dm}^2$ resultando em 125 ou 196 Pa de queda de pressão no filtro. Então, através da unidade experimental ilustrada na Figura 26, ajustou-se a entrada de ar através da válvula até a queda de pressão no meio filtrante atingir 125 e 196 Pa, realizando-se a leitura

da vazão volumétrica no rotâmetro. Calculou-se a permeabilidade para 3 amostras de cada meio filtrante e os resultados estão representados na Tabela 12, juntamente com as informações fornecidas pelos fabricantes. Nota-se que as permeabilidades obtidas experimentalmente não apresentaram diferenças significativas de um fabricante para o outro. Porém o fabricante A informou valores superiores aos obtidos experimentalmente, enquanto as permeabilidades calculadas para o fabricante B ficaram dentro da faixa informada pelo mesmo.

Tabela 12 – Permeabilidade dos meios filtrantes

Meio filtrante	Fabricante	Permeabilidade (m ³ /min)/m ²			
		$\Delta P=125\text{Pa}$		$\Delta P=196\text{Pa}$	
		Fabricante	Experimental	Fabricante	Experimental
Poliéster	A	NI	$8,8 \pm 0,8$	15,0	$13,5 \pm 1,1$
	B	7,6 – 10,7	$8,9 \pm 0,3$	NI	$13,8 \pm 0,5$
Poliéster + PTFE	A	NI	$1,4 \pm 0,1$	4,5	$2,2 \pm 0,2$
	B	0,92 – 3,0	$1,5 \pm 0,1$	NI	$2,3 \pm 0,2$

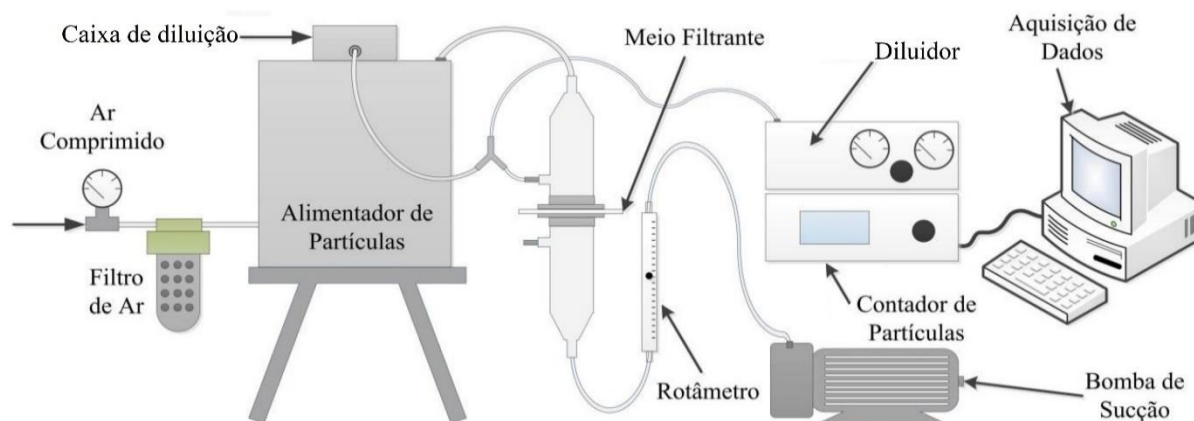
NI – Não informado

Fonte: Arquivo pessoal

3.4 Determinação da eficiência de coleta de partículas PM₁₀, PM_{2.5} e PM_{1.0}

Para os meios filtrantes de poliéster - com e sem a membrana de PTFE dos dois fornecedores - foram realizados ensaios de filtração na unidade experimental ilustrada na Figura 27, disponível no Laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. Esta unidade é composta por um gerador de aerossol modelo 3433 da TSI, um diluidor de aerossol 3302A da TSI, um espectrômetro *Aerodynamic Particle Sizer*® 3320 (APS), também da TSI e uma bomba de vácuo.

Figura 27 – Equipamento de filtração com contador de partículas



Fonte: Adaptado de Cirqueira (2017)

Na unidade experimental representada na Figura 27, ar comprimido arrasta o material particulado disponibilizado em um prato rotativo no alimentador de partículas e segue para o sistema de filtração. O ar atravessa o meio filtrante, passa por um rotâmetro e é eliminado do equipamento por uma bomba de sucção. Amostras isocinéticas são coletadas antes e após o meio filtrante, seguindo para um diluidor e em sequência para um contador de partículas, o qual caracteriza a amostra em função do diâmetro aerodinâmico. O diluidor possui uma bomba de sucção interna que opera a uma vazão superior do que a necessária para considerar a amostragem isocinética. Logo foi necessário adicionar uma caixa de diluição em paralelo com a coleta da amostra. A caixa de diluição foi construída de acrílico e continha um filtro HEPA para filtrar o ar ambiente succionado. Para calibrar o fluxo de ar coletado, colocou-se um rotâmetro no ponto da coleta da amostra e estrangulou-se a mangueira da caixa de diluição até obter a vazão desejada no rotâmetro. Esta vazão é calculada como sendo a área da seção transversal interna da sonda isocinética multiplicada pela velocidade do ar na sonda, que é a mesma que a velocidade máxima do ar na seção circular do filtro. A área útil de filtração do meio filtrante foi de 17,57 cm² (diâmetro de 4,73 cm), e a relação ar-pano empregada foi de 2 m/min, a mesma da norma VDI 3926.

Com a unidade experimental montada e calibrada, foram realizados ensaios de filtração com os quatro meios filtrantes disponíveis. Tais ensaios consistiram em coletar amostras antes e depois do meio filtrante ao longo da filtração, conforme a queda de pressão no filtro aumentava: ΔP_0 (inicial), $\Delta P_0 + 10$ mmH₂O, $\Delta P_0 + 20$ mmH₂O, $\Delta P_0 + 30$ mmH₂O, $\Delta P_0 + 40$ mmH₂O, $\Delta P_0 + 50$ mmH₂O e $\Delta P_0 + 100$ mmH₂O. Dessa forma, através do contador de partículas foi possível calcular a eficiência de coleta de partículas para cada momento de acordo com a Equação 21. Para cada queda de pressão construiu-se gráficos de eficiência de coleta por diâmetro aerodinâmico da partícula. Por fim foi possível comparar os meios filtrantes segundo a eficiência de coleta de partículas inaláveis (PM10), finas (PM2.5) e ultrafinas (PM1.0), até o limite de detecção do APS modelo 3320 da TSI, que é de 0,523 μ m de diâmetro aerodinâmico.

Em seguida foi realizado o mesmo experimento com um material particulado de granulometria mais fina, ou seja, um pior caso, já que pós mais finos tendem a penetrar mais e promover maior emissão. Utilizou-se a rocha fosfática moída em um moinho de bolas disponível no laboratório. As propriedades de cada material particulado estão listadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Propriedades dos materiais particulados nos ensaios com contador de partículas

Propriedades	Pó da aciaria	Rocha fosfática
Massa específica (g/cm ³) ^A	3,4179 ± 0,0043	3,1829 ± 0,0018
D (v , 0,1) (μm) ^B	0,38 ± 0,01	0,19 ± 0,01
D (v , 0,5) (μm) ^B	19,50 ± 0,13	4,78 ± 0,73
D (v , 0,9) (μm) ^B	117,52 ± 18,93	40,27 ± 5,85
Diâmetro aerodinâmico mediano em massa (μm) ^C	3,92 ± 0,12	3,07 ± 0,16

^APicnometria a hélio através do equipamento AccuPyc 1330 Micrometrics.

^BDifração a laser pelo equipamento Malvern Mastersizer Microplus.

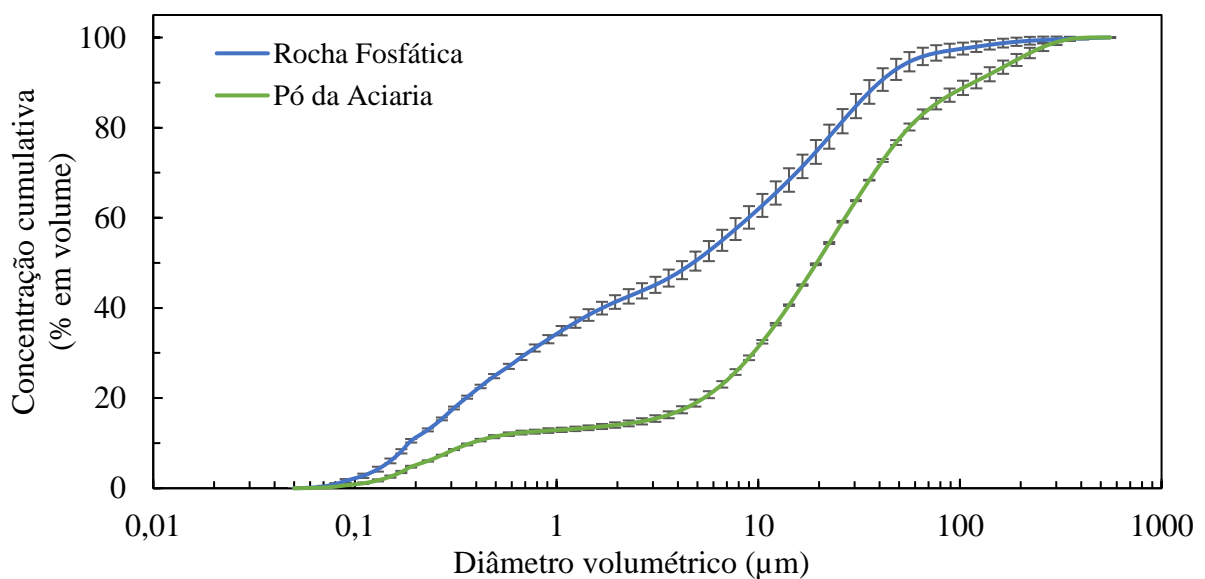
^CEspectrometria pelo equipamento Aerodynamic Particle Sizer® 3320 da TSI.

Fonte: Arquivo pessoal

As Figuras 28 e 29 apresentam as concentrações em função do diâmetro volumétrico para a rocha fosfática e o pó da aciaria. No primeiro gráfico observa-se que o diâmetro volumétrico mediano D (v, 0,5) da rocha fosfática é consideravelmente inferior que a do pó de aciaria, como consta na Tabela 13. Já na Figura 29 constata-se que a rocha fosfática possui uma distribuição granulométrica mais heterogênea que o outro material particulado, além de conter uma maior concentração de partículas de menor diâmetro.

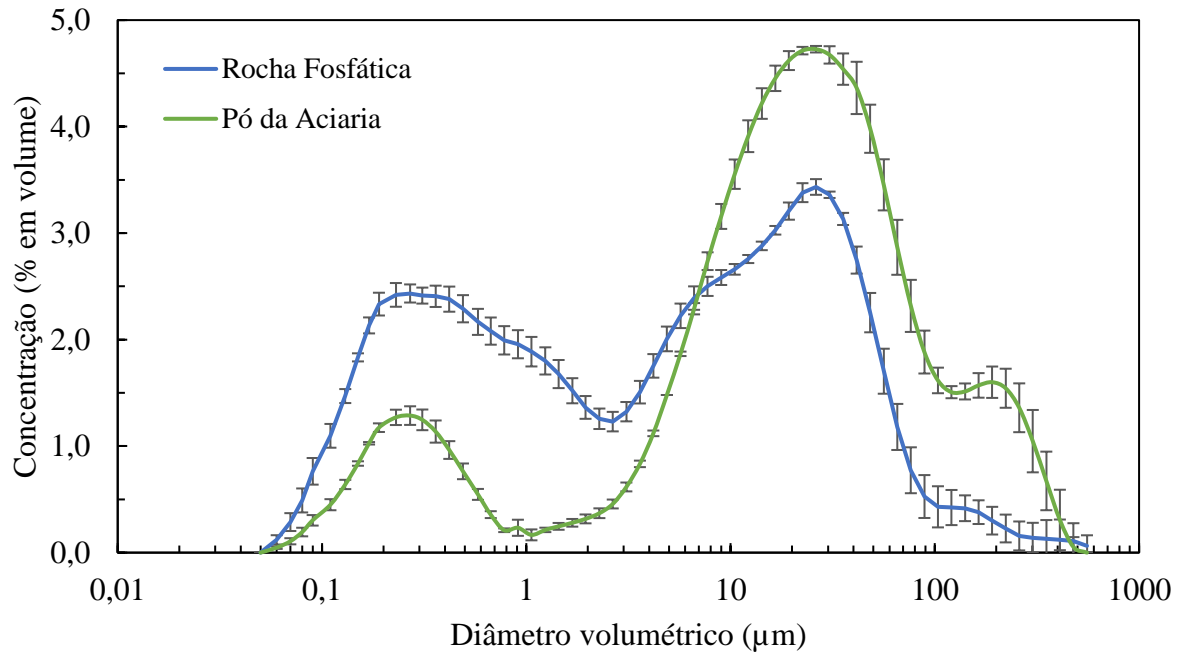
A Figura 30 ilustra a distribuição granulométrica cumulativa em massa da rocha fosfática e do pó em estudo. Verifica-se que a rocha fosfática possui maior quantidade em massa de partículas PM1.0 e PM2.5 que o pó da aciaria.

Figura 28 – Distribuição granulométrica cumulativa em volume dos materiais particulados.



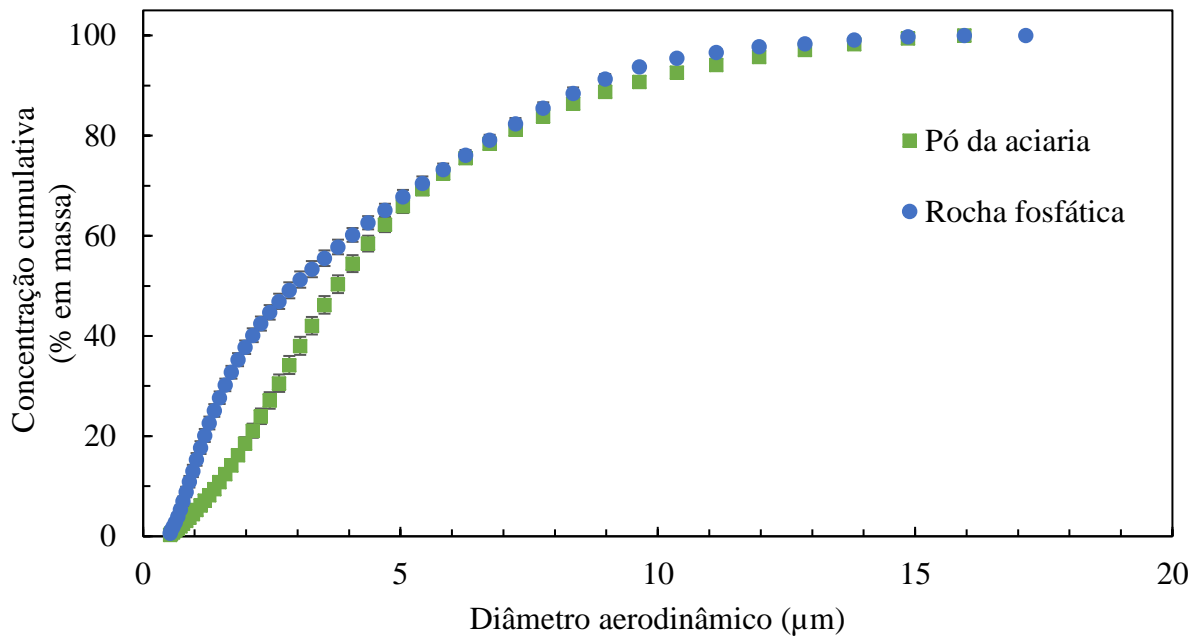
Fonte: Acervo pessoal

Figura 29 – Distribuição granulométrica em volume dos materiais particulados



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 30 – Distribuição granulométrica cumulativa em massa dos materiais particulados utilizados na filtração com contador de partículas APS



Fonte: Arquivo pessoal

3.5 Ensaio para a determinação da eficiência de coleta de nanopartículas

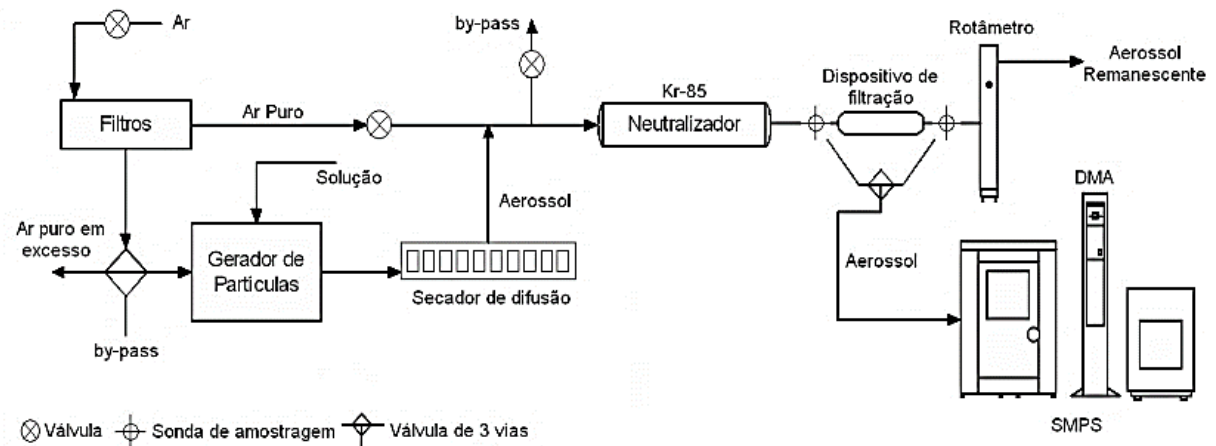
Nos ensaios realizados na seção 3.4 foram calculadas eficiências de coletas para partículas maiores que 0,523 μm de diâmetro aerodinâmico, que é o limite de detecção do contador de partículas APS modelo 3320 da TSI. Sendo assim, uma vez que as partículas nanométricas podem causar danos à saúde humana e ao meio ambiente (SAJID et al., 2015), os meios filtrantes virgens foram submetidos a ensaios de filtração na unidade experimental ilustrada na Figura 41. Dessa forma foi possível determinar a eficiência de coleta de nanopartículas na faixa de 10 a 300 nm de diâmetro aerodinâmico.

Conforme representado na Figura 31, uma solução com concentração de 1g/L de NaCl foi adicionada em um gerador de partículas modelo 3079 da TSI, o qual produziu aerossol na vazão de 200 ml/h. O aerossol passou por um secador de difusão modelo 3062 da TSI para remoção da umidade e foi injetado em uma corrente de ar previamente filtrada. A seguir o ar com partículas de NaCl atravessou um neutralizador contendo Criptônio 85 (Kr-85) para remover eventuais cargas eletrostáticas, evitando possível deposição de partículas na superfície da tubulação. O ar então seguiu para o dispositivo de filtração, o qual consiste em um suporte para alocar uma amostra de meio filtrante de 40,15 cm^2 de área útil, onde amostragens isocinéticas foram coletadas a montante e jusante do mesmo e enviadas para um espectrômetro. Este último é um analisador de partículas por mobilidade elétrica (SMPS) modelo 3936 da TSI que registra a concentração de partículas manométricas por faixas de diâmetro aerodinâmico. Ele é composto por um classificador eletrostático modelo 3080 e de um contador de partículas ultrafinas modelo 3776.

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

Dessa forma, através do software 390062 da TSI registrou-se o número de partículas por faixa de diâmetro antes e após o meio filtrante e, através da Equação 21, calculou-se a eficiência de coleta para partículas entre 10 a 300 nm de diâmetro aerodinâmico.

Figura 31 – Unidade experimental de determinação de eficiência de coleta de nanopartículas



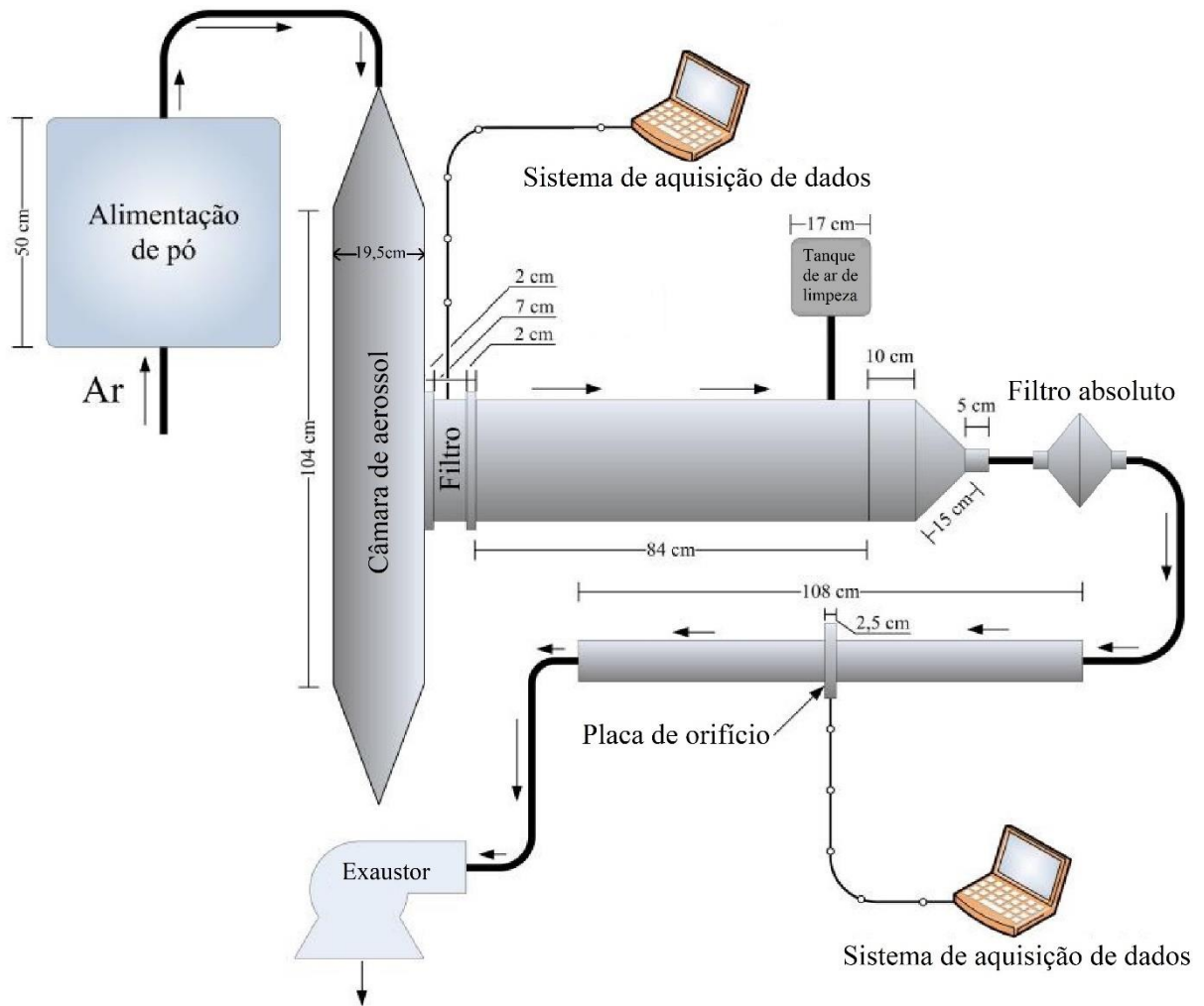
Fonte: Feitosa (2009)

3.6 Equipamento de filtração baseado na norma VDI 3926

Os experimentos foram realizados no laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. O equipamento de filtração utilizado está representado na Figura 32 e é baseado na norma VDI 3926, e tem como função simular em escala laboratorial um filtro de mangas industrial.

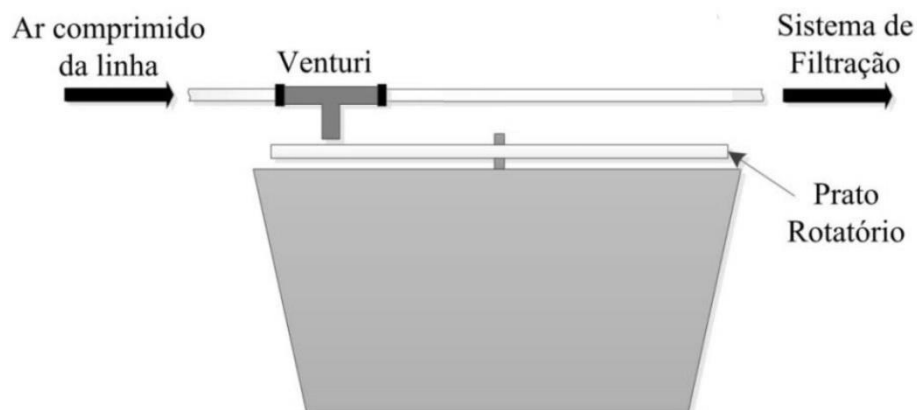
O ar alimentado no sistema tem origem na linha de ar comprimido do laboratório, e antes de entrar na caixa de alimentação de pó ele passa em uma coluna de sílica para remoção de umidade. Ao entrar na caixa, o ar comprimido arrasta o material particulado que está sobre o prato rotatório por meio de um tubo Venturi, como ilustrado na Figura 33, e o aerossol formado é disperso em uma câmara que antecede o meio filtrante. Um exaustor instalado no final do equipamento promove a sucção do ar presente na câmara, e conseqüentemente o pó fica retido em um filtro de 201,06 cm² de área útil (160 mm de diâmetro), que por sua vez fica acomodado em um suporte como mostra a Figura 34. As partículas que conseguirem passar por este meio filtrante ficam retidas em um filtro absoluto localizado a jusante, e assim a eficiência de coleta pode ser calculada por gravimetria.

Figura 32 – Equipamento de filtração



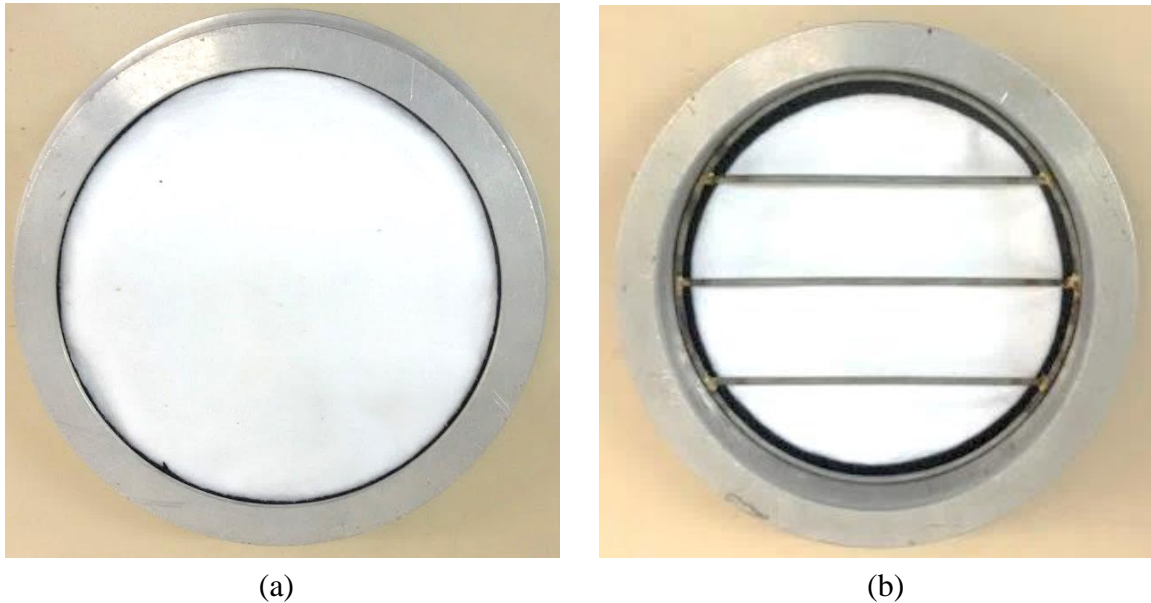
Fonte: Adaptado de Cirqueira, Tanabe e Aguiar (2014)

Figura 33 – Sistema de alimentação de material particulado



Fonte: Adaptado de Cirqueira (2017)

Figura 34 – Suporte do meio filtrante. (a) frente onde o pó é depositado e (b) verso.



Fonte: Arquivo pessoal

O acúmulo de pó no meio filtrante causa aumento da resistência ao fluxo de ar, promovendo o aumento da queda de pressão neste filtro, que é registrada por um sistema de aquisição de dados. Quando esta queda de pressão atinge um valor máximo pré-estabelecido, ar pressurizado armazenado em um tanque é liberado em uma fração de segundo no sentido oposto do fluxo gasoso, dessa forma um pulso de ar choca-se contra a face limpa do meio filtrante causando um choque mecânico e promovendo a limpeza do mesmo.

Ainda, conforme a queda de pressão no sistema aumenta, é necessário corrigir a vazão de ar do sistema aumentando a rotação do exaustor. Isto é realizado automaticamente através de um software no computador conectado a um dispositivo de aquisição de dados modelo USB-6009 da *National Instruments*, que por sua vez recebe sinais elétricos de transdutores de pressão. Um transdutor realiza a leitura da queda de pressão em uma placa de orifício de 8 mm calibrada, e o sistema de aquisição de dados atua sobre o inversor de frequência modelo CFW-08 da WEG, o qual corrige a vazão de ar aspirada pelo exaustor. A correção da vazão pode ser feita de forma manual - através da alteração da rotação do soprador diretamente no inversor de frequência ao mesmo tempo em que se faz a leitura da queda de pressão na placa de orifício. O painel de controle do equipamento de filtração está representado pela Figura 35.

Figura 35 – Painel de controle do equipamento de filtração



Fonte: Arquivo pessoal

A norma VDI 3926, na qual o equipamento em questão é baseado, define o filtro absoluto como sendo um meio filtrante que possui um grau de separação de pelo menos 99,95% em massa. Um filtro HEPA (*High Efficiency Particulate Air Filter*) foi testado, porém devido à dificuldade de obtê-lo na forma de folhas (não enquadrado), optou-se por utilizar um meio filtrante de poliéster com membrana de PTFE (Teflon®), que através de testes apresentou eficiência de coleta superior ao da norma.

Para calibrar a placa de orifício utilizou-se o rotâmetro modelo GF-2500 da Gilmont® com escala até 80 L/min, que foi posicionado no tubo de descarga do exaustor, e manualmente a vazão volumétrica desejada foi ajustada através do inversor de frequência. Em seguida aferiu-se a queda de pressão na placa de orifício correspondente a essa vazão.

Para a calibração da alimentação de pó, o sulco presente no prato rotatório ilustrado na Figura 33 foi preenchido com material particulado, sendo este removido em seguida e pesado. Dessa forma, certificou-se que uma volta do prato corresponde a 2921 ± 45 mg de pó. Sendo

assim, foi possível ajustar a vazão mássica de pó alimentada no sistema ajustando o tempo de uma volta completa do prato, como descrito pela equação:

$$M_{pó} = \frac{2921}{t} \quad (23)$$

sendo que na Equação 24, $M_{pó}$ é a vazão mássica de alimentação de pó em mg/min e t o tempo de uma volta do prato em minutos.

Em muitos casos, a vazão mássica de alimentação é ajustada para corresponder a certa concentração na região próxima ao meio filtrante na câmara de aerossol do equipamento, e isso pode ser feito instalando um medidor de concentração de partículas no local, como por exemplo um fotômetro. Como tal equipamento não estava disponível, foi adotado outro procedimento para ajustar a concentração de partículas. Após realizar 24 testes de filtração, constatou-se que $30,25\% \pm 2,69\%$ do total de material particulado alimentado ficava retido no meio filtrante, sendo que o restante se depositava no fundo ou nas paredes do equipamento. Dessa forma, pode-se relacionar a vazão de pó alimentada $M_{pó}$ com a concentração na região do meio filtrante segundo a equação:

$$C_{pó} = (0,3025 \cdot M_{pó}) Q \quad (24)$$

em que $C_{pó}$ na Equação 25 é a concentração de pó na região do filtro em mg/m^3 e Q é a vazão volumétrica de ar que entra no meio filtrante em m^3/min . Por fim, pode-se relacionar o tempo necessário para uma volta do prato de alimentação com a concentração de pó na região do meio filtrante substituindo a Equação 24 na 25, obtendo assim:

$$t = \frac{883,6}{C_{pó} Q} \quad (25)$$

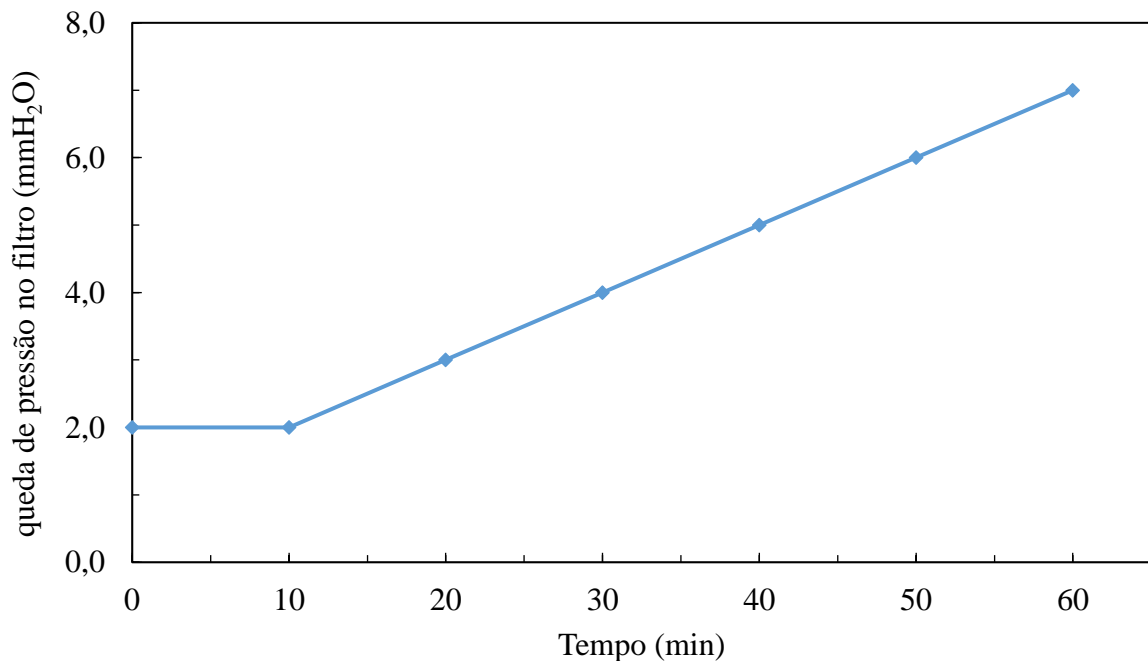
A norma VDI 3926, por exemplo, recomenda a concentração de pó de $5000 \text{ mg}/\text{m}^3$ e a velocidade de filtração de $2 \text{ m}/\text{min}$. Uma vez que o meio filtrante deste equipamento possui uma área útil de filtração de $2,01 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, a vazão de ar é de $40,21 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$. Dessa forma, para este equipamento atender à referida norma, o prato de alimentação deve dar uma volta em 4,4 minutos, ou 4 minutos e 24 segundos, conforme calculado pela Equação 26.

Com o objetivo de verificar as limitações técnicas do equipamento, foi realizado um ensaio de filtração durante 60 minutos. Empregou-se a mesma relação ar-pano do processo de despoeiramento secundário da aciaria da indústria siderúrgica de $1,27 (\text{Nm}^3/\text{min})/\text{m}^2$, o que

corresponde a uma vazão de ar de 25,5 L/min. Porém, o tempo de volta máximo do prato de alimentação era de 35 minutos, o que corresponde a uma concentração na região do meio filtrante de 989 mg/m³, segundo a Equação 26, o que é 22% maior que a concentração de 811 mg/m³ praticada no processo real. Dessa forma, para o tempo de 60 minutos, obteve-se a curva de queda de pressão em função do tempo conforme ilustrado na Figura 36.

No filtro de mangas da indústria siderúrgica, a limpeza é realizada quando a queda de pressão atinge 200 mmH₂O. Visto que no equipamento utilizado neste trabalho a reposição do pó no sulco do prato de alimentação é realizada a cada volta e de forma manual pelo operador, fica inviável a realização de ciclos de filtração nas condições da Figura 36. Portanto, para a realização desse experimento com a queda de pressão máxima de 200 mmH₂O, é necessário automatizar a alimentação de pó com uma balança de alimentação integrada com um medidor de concentração instalado na região do meio filtrante.

Figura 36 – Ensaio de filtração com relação ar pano de 1,27 m/min e concentração de pó de 989 mg/m³



Fonte: Arquivo pessoal

Assim, os ensaios de filtração foram realizados em uma concentração de pó e velocidade de filtração maiores que o processo industrial em estudo, sendo baseados na norma VDI 3926. As condições experimentais utilizadas neste trabalho estão consolidadas na Tabela 14, enquanto

as condições operacionais do filtro de mangas industrial estão apresentadas na Tabela A1 do Apêndice A.

Tabela 14 – Condições experimentais dos ensaios de filtração

Dado	Valor
Velocidade de filtração ¹	2 m/min
Diâmetro útil do meio filtrante ¹	160 mm
Vazão volumétrica de ar	40 L/min
Concentração de pó no filtro ¹	5000mg/m ³
Vazão mássica de pó alimentado	665 mg/min
Tempo de uma volta do prato de alimentação	4min24seg
Temperatura de filtração ¹	Ambiente
Queda de pressão máxima ¹	100 mmH ₂ O

¹Valor baseado na norma de filtração VDI 3926

Fonte: Arquivo pessoal

3.7 Ensaio de filtração com queda de pressão máxima de 100 mmH₂O

Nesta etapa, os meios filtrantes foram submetidos a ensaios de filtração com vazões de ar e de pó constantes até que a queda de pressão nos mesmos atingisse 100 mmH₂O. O equipamento de filtração utilizado era baseado na norma VDI 3926 e está descrito na seção 3.6, juntamente com as condições experimentais que estão listadas na Tabela 14. O meio filtrante e o filtro absoluto foram pesados antes e depois do experimento para o cálculo da eficiência de coleta pela Equação 22. Também, a queda de pressão no meio filtrante ao longo do tempo foi registrada.

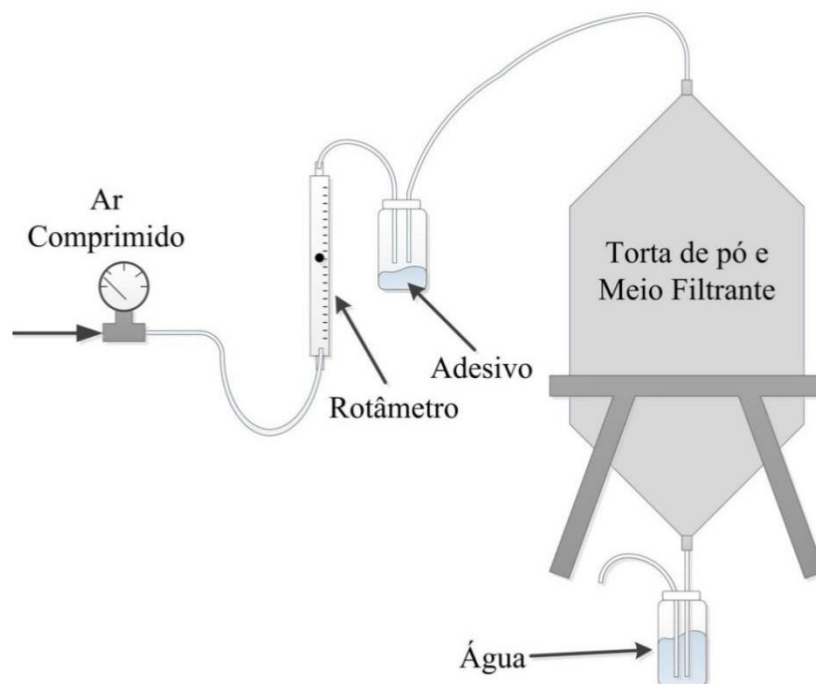
O objetivo destes experimentos foi comparar a performance dos meios filtrantes no que diz respeito ao tempo de filtração, massa retida no meio filtrante e eficiência de coleta de partículas. Também foi analisada a penetração das partículas no filtro de acordo com o procedimento descrito na seção 3.9.

3.8 Preparação de amostras para serem submetidas ao MEV

Após os ensaios de filtração, amostras dos meios filtrantes foram preparadas para serem analisadas no MEV, conforme a técnica desenvolvida por Aguiar e Coury (1996). O objetivo é registrar imagens da interface torta/filtro na seção transversal do meio filtrante e comparar a penetração de partículas nos diferentes filtros.

Primeiramente, logo após a filtração, o conjunto meio filtrante e torta foi colocado no sistema representado pela Figura 37 para que a torta fosse recoberta por uma fina camada de adesivo, oferecendo certa estabilidade à mesma. O processo consistiu em passar uma corrente de ar contendo o adesivo Loctite 416 pelo meio filtrante durante 24 horas a uma vazão de 1,25 L/min, aplicando-se 2 gotas de adesivo por hora no recipiente. Um frasco com água foi inserido no final da linha para sinalizar a passagem da corrente de ar através de bolhas, além de reter o excesso do adesivo.

Figura 37 – Equipamento de aplicação de cola no meio filtrante



Fonte: Cirqueira (2017)

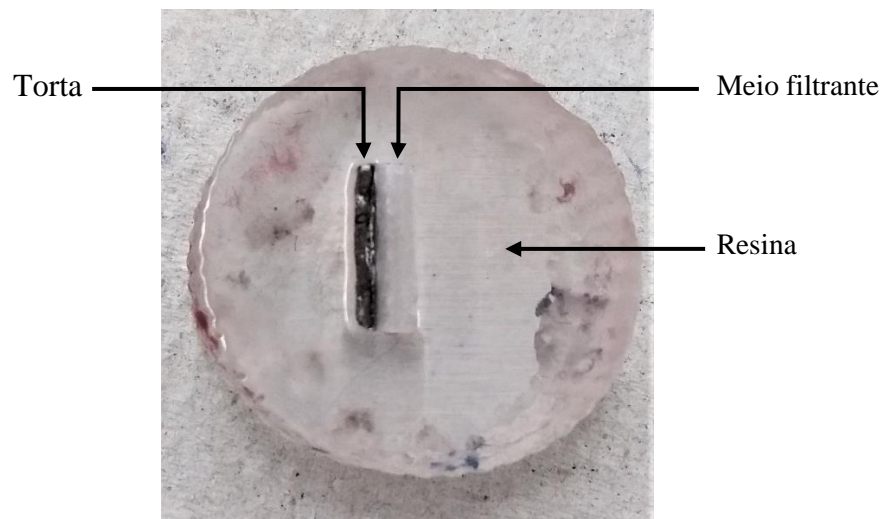
Em seguida, posicionou-se o meio filtrante dentro de um recipiente sobre uma fina camada de esponja, a qual foi embebida previamente com o líquido selante Loctite® PMS-10E

e 10 gotas de um catalisador. O filtro, encharcado pela resina por difusão, foi fixado sobre uma placa de vidro por presilhas e colocado em uma estufa da Nova Ética modelo 400/ND a 60°C por 48 horas, para a cura. O resultado foi o enrijecimento do conjunto torta-filtro, de modo a ser possível a retirada de amostras bem preservadas de aproximadamente 1 cm² do mesmo através de uma serra circular de bancada.

Estas amostras foram então posicionadas com a face transversal voltada para cima no interior de moldes circulares de PVC, com a base presa com silicone sobre um suporte de vidro. Os moldes foram previamente untados na face interna com vaselina para facilitar a posterior remoção dos mesmos. Eles então foram preenchidos com resina de poliéster incolor da marca Du Látex misturada com catalisador na proporção de 100/1,5 em massa. Após 24 horas, ou quando a resina estivesse completamente seca, os moldes foram removidos e as amostras embutidas foram lixadas e polidas em uma das faces, até atingir uma aparência espelhada, livre de riscos, que pode ser observada em um microscópio ótico.

A seguir as amostras, retratadas na Figura 38, foram levadas ao Laboratório de Caracterização Estrutural do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar onde foram recobertas com uma fina camada de ouro para então serem submetidas ao MEV.

Figura 38 – Amostra de um meio filtrante embutida em resina



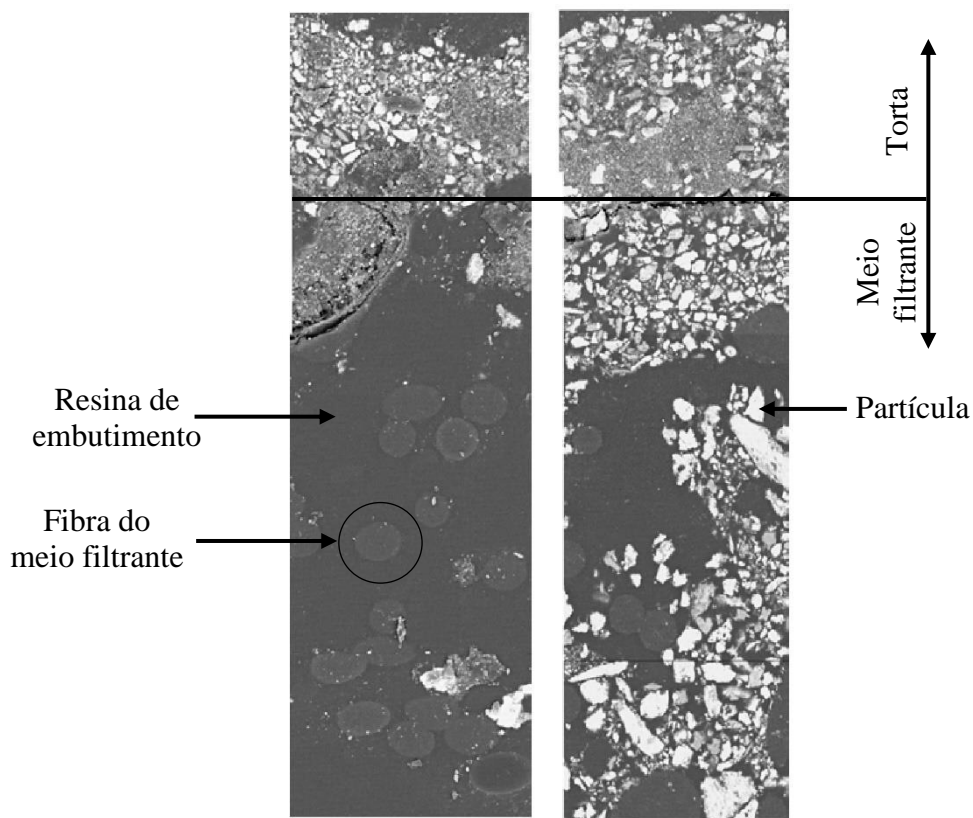
Fonte: Arquivo pessoal

3.9 Determinação da penetração das partículas nos meios filtrantes

Imagens foram obtidas para cada meio filtrante conforme a técnica descrita na seção 3.8, e foram posicionadas de forma a mostrar toda a seção transversal, conforme exemplificado na Figura 39. Observa-se nesta Figura a interface torta/meio filtrante, a resina de embutimento representada pela cor mais escura, as partículas que são os pontos mais claros e as fibras do meio filtrante que são as seções circulares mais claras que a resina.

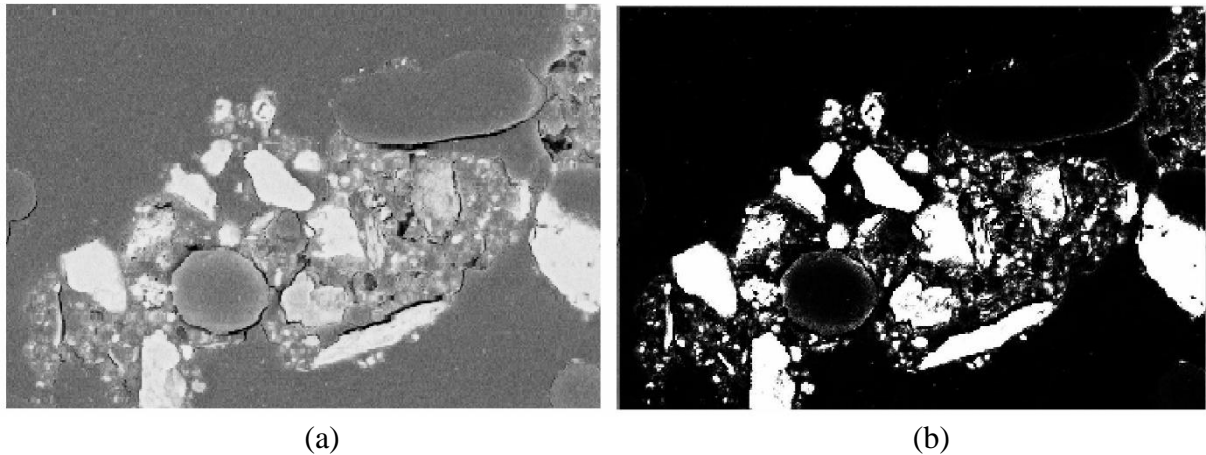
Em seguida, as imagens foram binarizadas pelo *software Image Pro Plus 7.0*, como mostrado na Figura 40, com o objetivo de dar destaque às partículas, permitindo então a contagem das mesmas ao longo da seção transversal do meio filtrante.

Figura 39 –Interface torta/filtro obtida por MEV



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2006)

Figura 40 – Partículas retidas no interior de um meio filtrante: (a) normal e (b) binarizada



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2006)

3.10 Ensaios com ciclos de filtração e limpeza

No equipamento baseado na norma VDI 3926 descrito na seção 3.6 foram realizados ciclos de filtração e limpeza com os filtros de poliéster sem membrana de PTFE dos dois fornecedores. As condições experimentais foram as mesmas dos ensaios descritos na seção 3.7, e informadas na Tabela 14, e a pressão e o tempo do pulso de limpeza foram baseados na norma supracitada.

Durante o experimento registrou-se a queda de pressão no meio filtrante ao longo do tempo até que a mesma atingisse 100 mmH₂O, momento em que um jato de ar de 5 bar com 60 milissegundos de duração promoveu a limpeza do filtro, finalizando desta forma um ciclo.

Após 20 ciclos, o meio filtrante foi instalado na unidade experimental representada pela Figura 27 para avaliar a eficiência de coleta de partículas PM₁₀, PM_{2.5} e PM_{1.0}, de acordo com o procedimento e as condições descritas na seção 3.4.

O objetivo desta fase foi comparar os meios filtrantes baseando-se na evolução da queda de pressão residual e na eficiência de retenção de PM₁₀, PM_{2.5} e PM_{1.0} após 20 ciclos de filtração.

4 RESULTADOS

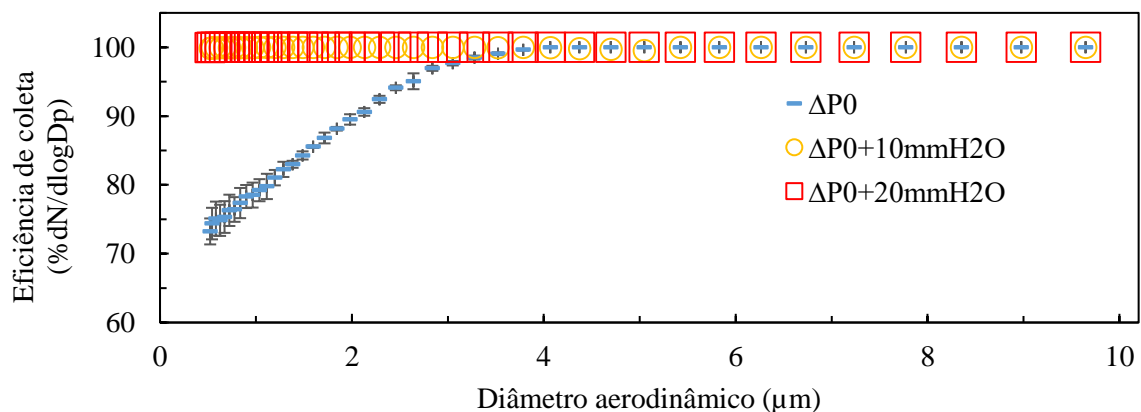
Este Capítulo apresenta os resultados obtidos das atividades explicitadas no Capítulo 3. Os resultados das caracterizações do material particulado e dos meios filtrantes virgens encontram-se, respectivamente, nas subseções 3.2 e 3.3.

4.1 Determinação da eficiência de coleta de partículas PM10, PM2.5 e PM1.0

Conforme descrito na subseção 3.4, foram realizados ensaios de filtração na unidade experimental apresentada na Figura 27, a qual contém um contador de micropartículas. A faixa de diâmetro aerodinâmico analisada foi do limite mínimo do equipamento de 0,523 μm a 10 μm .

Primeiramente retirou-se amostragens isocinéticas antes e após o meio filtrante em intervalos de 10 em 10 mmH_2O de queda de pressão no filtro, com o objetivo de calcular a eficiência de coleta. A partir de testes iniciais, verificou-se que para a queda de pressão maior que $\Delta P_0 + 10 \text{ mmH}_2\text{O}$, a eficiência ficou próxima de 100% para toda a faixa de diâmetro monitorada. Dessa forma, realizou-se os ensaios utilizando o pó da aciaria até o ponto $\Delta P_0 + 20 \text{ mmH}_2\text{O}$, e os resultados estão representados nas Figuras 41 a 44.

Figura 41 – Ensaio de filtração com o pó da aciaria para o meio filtrante de poliéster do fabricante A



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 42 – Ensaio de filtração com o pó da aciaria para o meio filtrante de poliéster do fabricante B

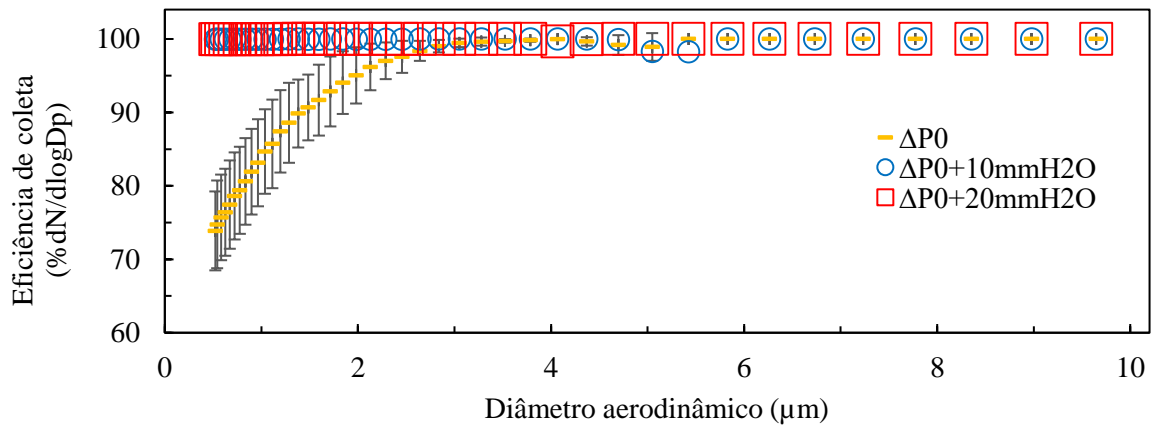


Figura 43 – Ensaio de filtração com o pó de aciaria para o meio filtrante de poliéster com membrana de PTFE do fabricante A.

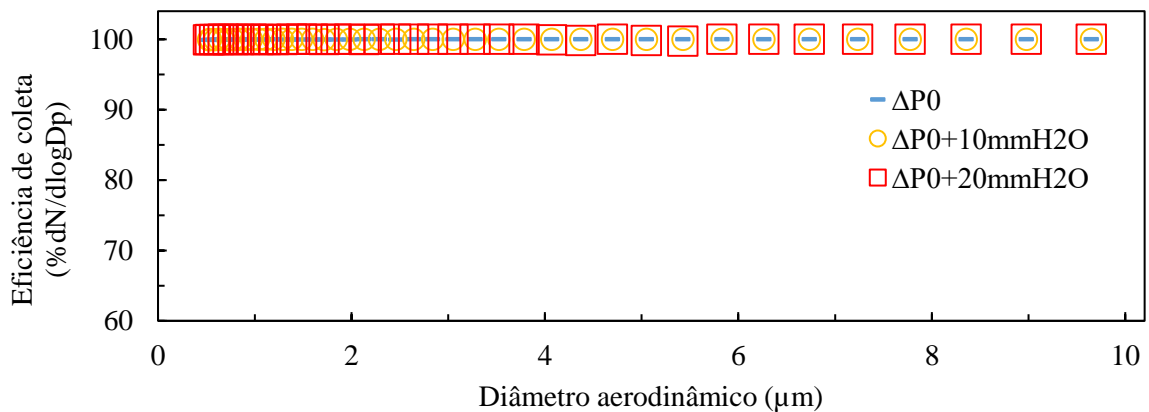
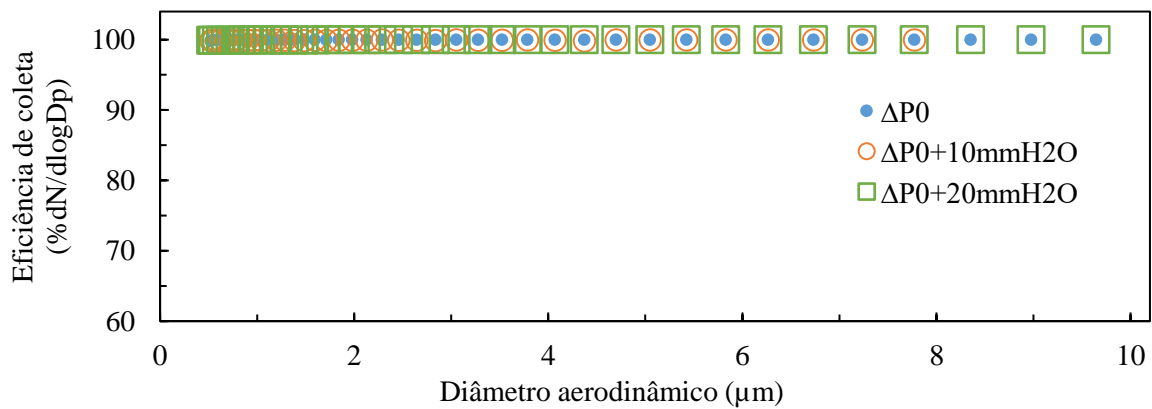


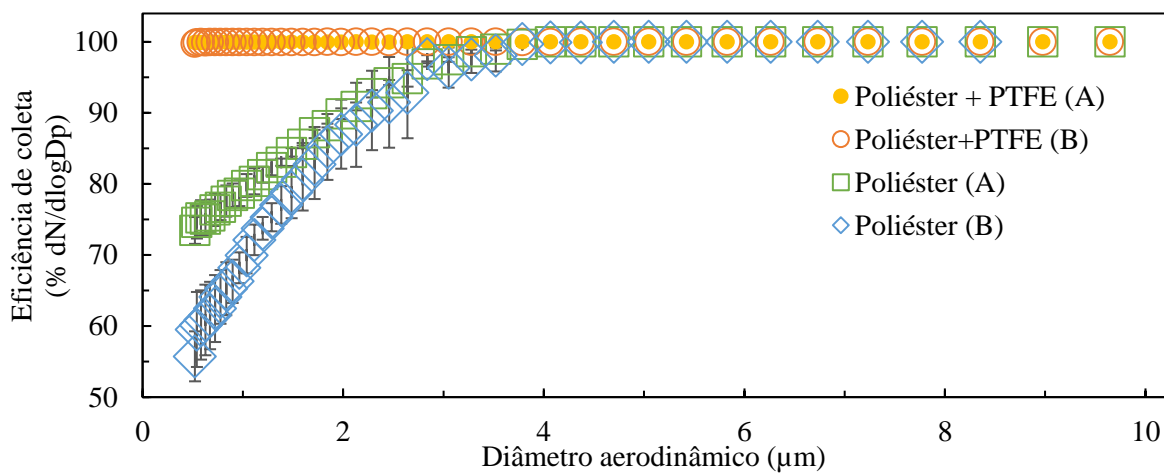
Figura 44 – Ensaio de filtração com o pó de aciaria para o meio filtrante de poliéster com membrana de PTFE do fabricante B.



Para avaliar a eficiência de coleta nos momentos iniciais da filtração, utilizou-se o pó da aciaria e obteve-se o resultado ilustrado na Figura 45. Verifica-se nesta curva que o meio filtrante de poliéster sem PTFE do fabricante A obteve maiores eficiências em praticamente toda faixa de diâmetro analisada, sendo de 100% para PM10, 94% para PM2.5 e 79% para PM1.0, enquanto o fabricante B apresentou 100% para PM10, 95% para PM2.5 e 66% para PM1.0. Já os meios filtrantes com membrana de PTFE demonstraram eficiência maior que 99% para toda a faixa de diâmetro analisada, sem diferença significativa quanto ao fabricante.

Sendo assim, com o intuito de diminuir as emissões de partículas finas e ultrafinas que ocorrem nos estágios iniciais da filtração, os meios filtrantes de poliéster podem receber ainda virgens o tratamento de *precoating*, que consiste em recobrir o meio filtrante com um pó a base de óxido de cálcio ou diatomito. Tal procedimento evitaria a fase de filtração de profundidade, garantindo alta eficiência de coleta desde os estágios iniciais da filtração. O *precoating* não é necessário para os filtros de poliéster recobertos por PTFE, uma vez que os mesmos apresentam alta eficiência de coleta para todos os diâmetros de partículas em todos os estágios da filtração (RAVERT, 2005).

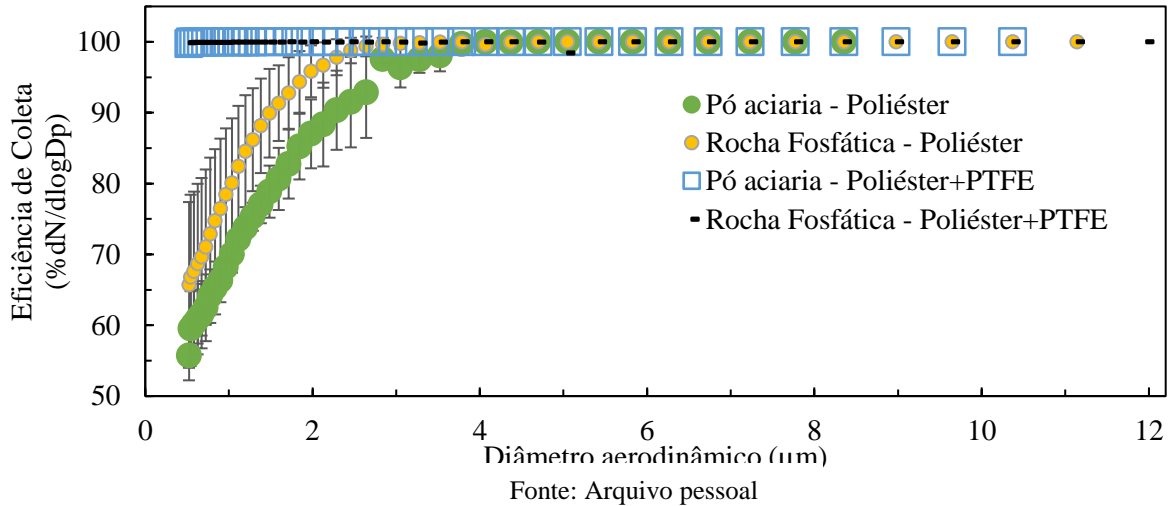
Figura 45 – Ensaio de filtração com contador de partículas para os meios filtrantes virgens



Em seguida, a fim de verificar a influência de um pó com granulometria mais fina na eficiência de coleta, os meios filtrantes do fabricante B foram submetidos a ensaios de filtração utilizando rocha fosfática. Como o objetivo foi apenas avaliar o comportamento da eficiência para um pior caso, e não comparar fabricantes, escolheu-se arbitrariamente os filtros do fabricante B para essa etapa. Pela Figura 46, verifica-se para o meio filtrante de poliéster sem PTFE que a eficiência de coleta de partículas PM2.5 e PM1.0 foi maior para a rocha fosfática.

Isso ocorreu já que a rocha é mais coesa que o pó da aciaria, além de ter um material mais polidisperso, conforme demonstrado pela Figura 29. Dessa forma tende a formar dendritos mais facilmente, promovendo uma filtração superficial mais eficiente.

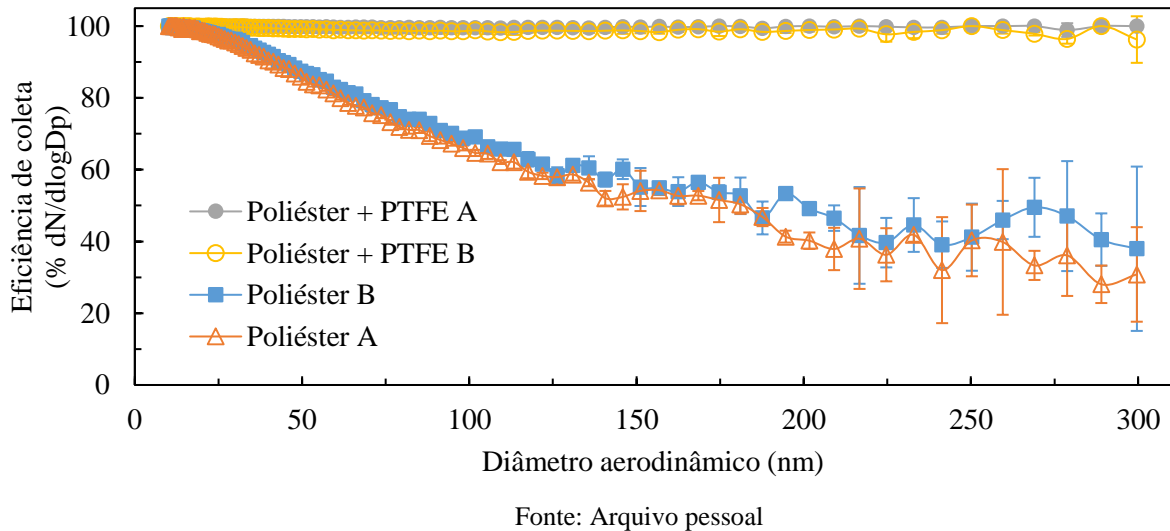
Figura 46 – Eficiência de coleta dos meios filtrantes do fabricante B utilizando pó de aciaria e rocha fosfática



4.2 Determinação da eficiência de coleta de nanopartículas

Conforme descrito na subseção 3.5, os meios filtrantes virgens foram submetidos a ensaios de filtração para determinação da eficiência de coleta de nanopartículas de NaCl na faixa de 10 a 300 nm de diâmetro aerodinâmico. Os resultados estão apresentados na Figura 47.

Figura 47 – Eficiência de coleta de nanopartículas de NaCl para os meios filtrantes dos fabricantes A e B



Conforme observa-se na Figura 47, o meio filtrante de poliéster sem a membrana de PTFE do fabricante B apresentou maior eficiência de coleta de nanopartículas que o do fabricante A para toda a faixa de diâmetros. Observa-se também que a eficiência de coleta diminui quanto maior é a partícula nesta faixa de diâmetro, o que foi observado outros trabalhos, como em Feitosa (2009) e Barros, Tanabe e Aguiar (2016). Tal comportamento se deve ao fato de que partículas entre 4 e 400 nm de diâmetro são grandes o suficiente para estarem sujeitas a efeitos difusionais significativos, e são muito pequenas para apresentarem efeitos inerciais. Assim, esta é a faixa de tamanho de partículas mais difícil de ser capturada por um meio filtrante, e é denominada Tamanho de Partícula de Maior Penetração (*most penetrating particle size* - MPPS) (HUTTEN, 2016).

Já a membrana de PTFE garantiu eficiência de coleta próxima a 100% para os filtros dos dois fabricantes, não havendo diferença significativa de performance entre eles.

4.3 Ensaios de filtração com queda de pressão máxima de 100 mmH₂O

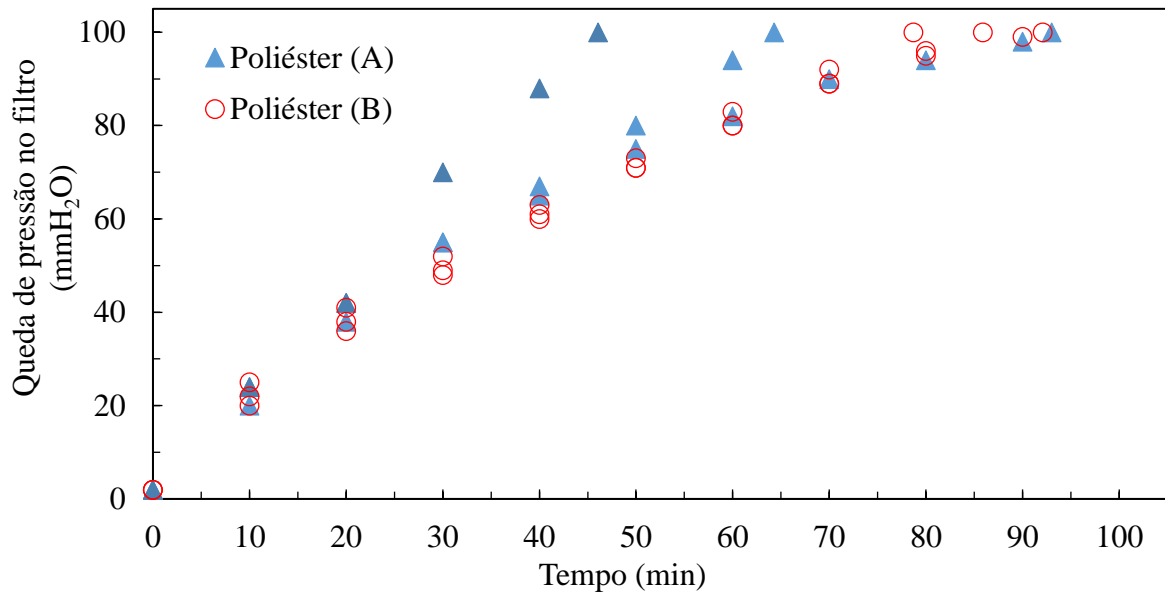
Conforme descrito na seção 3.7, os filtros de poliéster com e sem membrana de PTFE dos dois fabricantes foram submetidos a ensaios de filtração no equipamento baseado na norma VDI 3926. O material particulado utilizado foi o pó coletado do filtro de mangas do despoejamento secundário da aciaria, caracterizado na seção 3.2. A filtração foi interrompida no momento em que a queda de pressão no meio filtrante atingiu 100 mmH₂O, e a seguir o conjunto meio filtrante/torta e o filtro absoluto foram pesados.

A Figura 48 apresenta as três curvas de queda de pressão medidas no filtro em função do tempo de filtração, para os meios filtrantes de poliéster dos fabricantes A e B. Verifica-se nessa figura, para os ensaios realizados em triplicata, que o filtro de poliéster do fabricante B apresentou menores desvios em relação ao tempo de filtração (8%) que o do fabricante A (38%).

No entanto, como apresenta a Figura 49, tal reprodutibilidade não foi observada para o meio filtrante de poliéster com membrana de PTFE do fabricante B, que apresentou desvio de 18% em relação ao tempo de filtração, mas ainda assim o desvio foi menor que o observado para o filtro do fabricante A, de 21%.

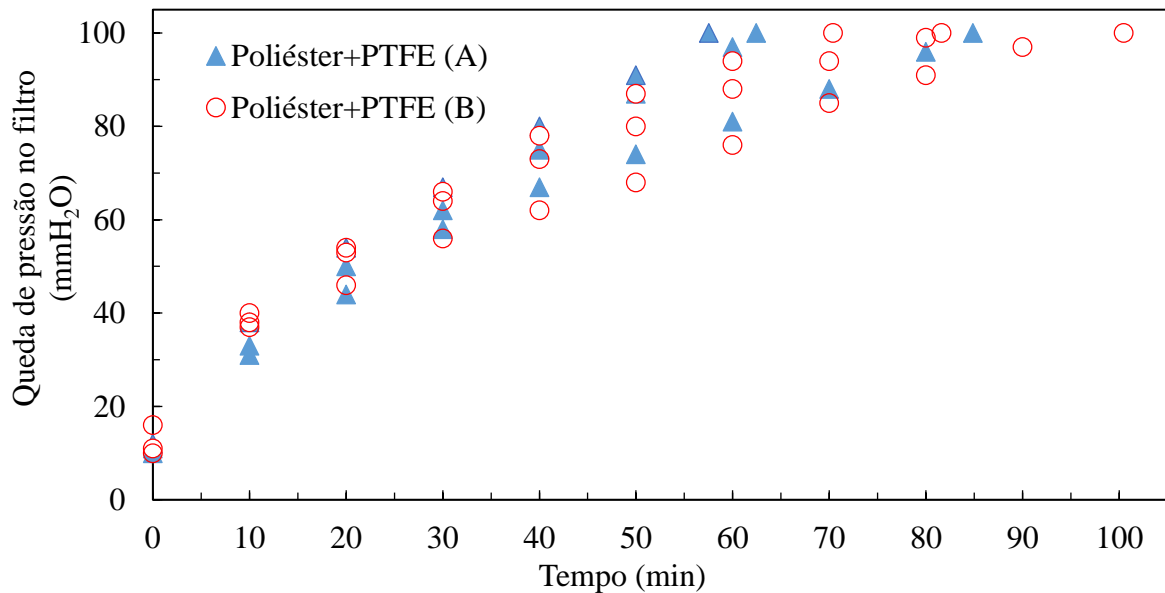
Observa-se pelas Figuras 48 e 49 que a queda de pressão inicial dos meios filtrantes revestidos com PTFE é maior em relação aos que não possuem essa membrana. Tal fato ocorre uma vez que o revestimento de Teflon® atua como um meio filtrante adicional, causando o aumento da queda de pressão total.

Figura 48 – Ensaio de filtração de 100 mmH₂O de queda de pressão realizado em triplicata para os meios filtrantes de poliéster dos fabricantes A e B.



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 49 – Ensaio de filtração de 100 mmH₂O de queda de pressão realizado em triplicata para os meios filtrantes de poliéster com membrana de PTFE dos fabricantes A e B.



Fonte: Arquivo pessoal

As diferenças entre os meios filtrantes ficam mais evidenciadas quando se observa os resultados dos experimentos expostos na Tabela 15. Constata-se nesta tabela que os meios filtrantes do fabricante B coletaram mais partículas em um tempo maior de filtração que os

filtros do fabricante A. Observa-se também que os desvios apresentados para o fabricante B foram de 11% em relação à massa coletada e de 8% em relação ao tempo de filtração, sendo menores que os do fabricante A (31% para a massa e 35% para o tempo de filtração).

Tabela 15 – Resultados dos ensaios de filtração de 100 mmH₂O de queda de pressão

Dados	Poliéster		Poliéster com PTFE	
	Fabricante A	Fabricante B	Fabricante A	Fabricante B
Eficiência de coleta (% em massa)	99,95 ± 0,02	99,96 ± 0,03	99,98 ± 0,01	99,97 ± 0,02
Tempo (min)	68 ± 35%	86 ± 8%	68 ± 21%	84 ± 18%
Massa retida no filtro (g)	15,0 ± 31%	16,8 ± 11%	15,8 ± 14%	18,2 ± 9%

Fonte: Arquivo pessoal

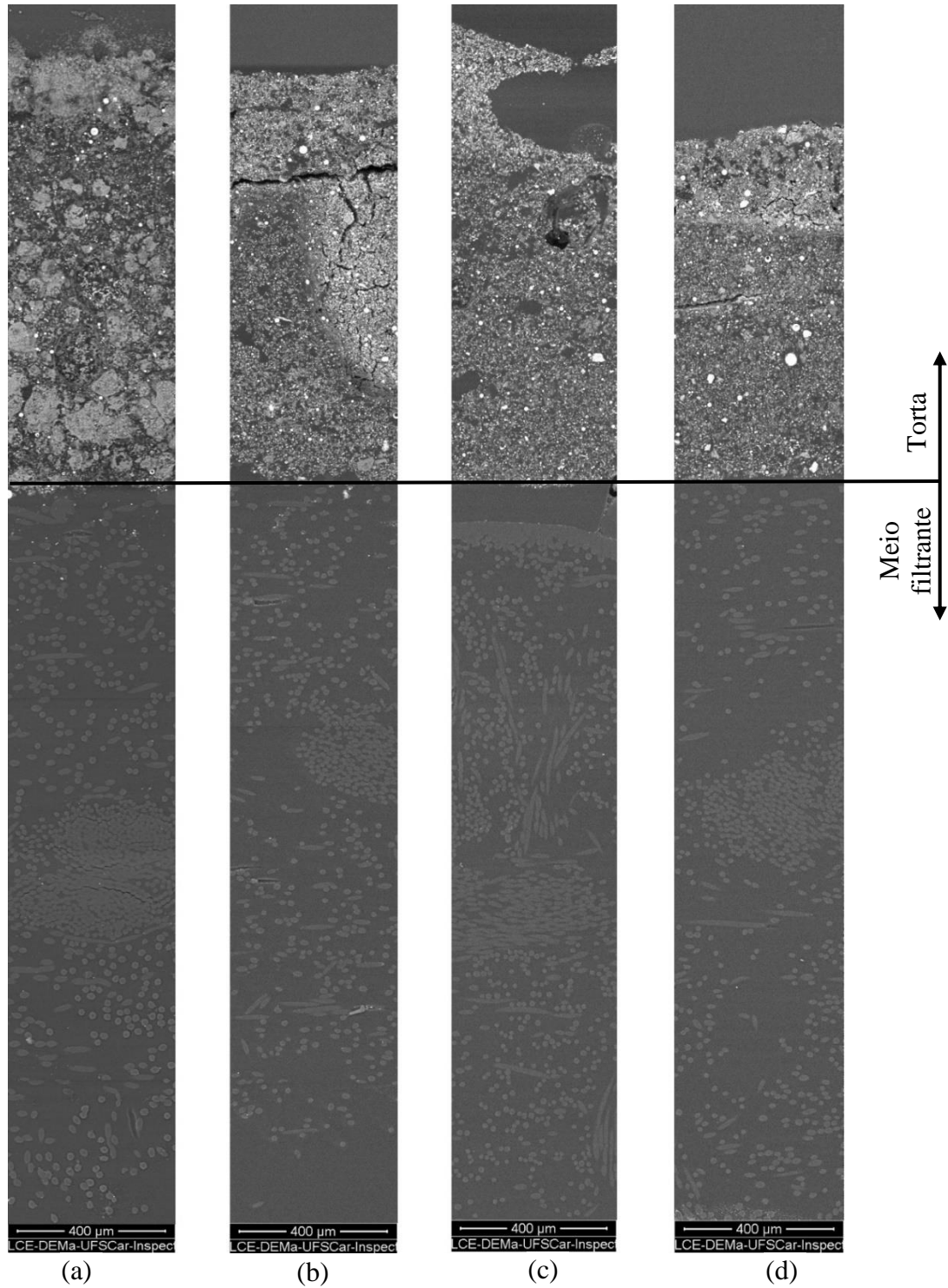
Com relação à eficiência de coleta, os valores obtidos foram similares para todos os meios filtrantes analisados, independente do fornecedor e da presença da membrana de PTFE, variando de 99,95% a 99,98% com desvios de 0,01 a 0,03%. Essa alta eficiência observada pode estar relacionada com o tempo de colmatação que foi menor para estes meios filtrantes, formando em pouco tempo uma camada de pó que passa a atuar como uma nova barreira para as partículas.

Um maior tempo de filtração para atingir a queda de pressão máxima, durante a filtração de gases, é uma característica desejável para os meios filtrante utilizados em filtros de mangas com limpeza por jato pulsante, uma vez que dessa forma ocorre uma menor frequência de pulsos de ar para limpeza, resultando em um menor desgaste para as mangas. Sendo assim, prolonga-se a vida útil dos meios filtrantes e reduz-se o gasto energético com o sistema limpeza das mangas. Portanto, os meios filtrantes do Fabricante B obtiveram melhores resultados durante o primeiro ciclo de filtração, uma vez que apresentaram uma quantidade maior de massa retida em um tempo maior de filtração.

4.4 Determinação da penetração das partículas nos meios filtrantes

As amostras dos meios filtrantes submetidos aos ensaios de filtração descritos na seção 4.3 foram embutidas, lixadas e polidas conforme a técnica descrita na seção 3.8. Em seguida foram levadas ao Laboratório de Caracterização Estrutural do DEMa/UFSCar, onde imagens das seções transversais do conjunto meio filtrante/torta foram obtidas pelo MEV, como ilustrado na Figura 50.

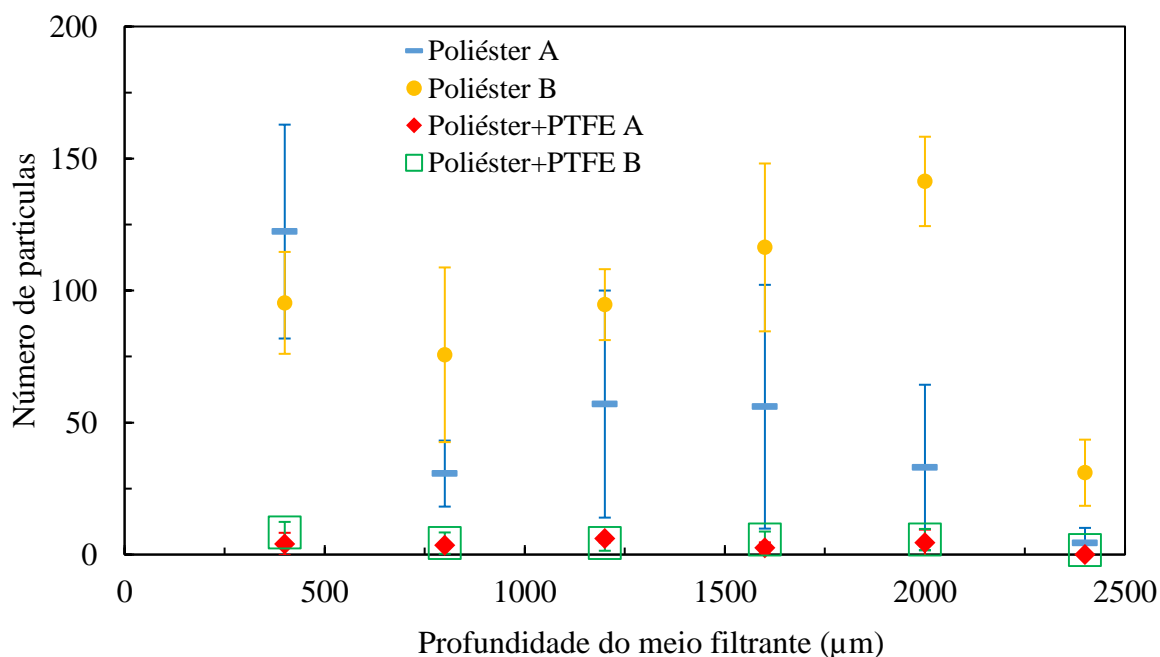
Figura 50 – Imagens obtidas no MEV da seção transversal dos meios filtrantes submetidos aos ensaios de filtração de 100 mmH₂O de queda de pressão. Poliéster do fabricante A em (a) e do B em (b); poliéster com membrana de PTFE do fabricante A em (c) e do B em (d). Aumento de 200x e escala de 400 μm.



Fonte: Arquivo pessoal

Para cada meio filtrante foram obtidas 3 imagens como as mostradas na Figura 50. Para cada imagem, a região do meio filtrante abaixo da torta foi dividida em 6 faixas de mesmo tamanho ao longo da espessura. Assim, através do *software Image Pro Plus 7.0*, binarizou-se as imagens e contabilizou-se o número de partículas por faixa de profundidade, e obteve-se então o gráfico da Figura 51.

Figura 51 – Penetração de partículas ao longo da espessura do meio filtrante para o ensaio de 100 mmH₂O



Fonte: Arquivo pessoal

Observa-se pela Figura 51 que as fibras de poliéster com recobrimento de PTFE obtiveram baixa penetração de partículas, não havendo diferença significativa entre os dois fabricantes. Tal fato já era esperado, uma vez que a membrana de PTFE atua como um meio filtrante de alta eficiência.

Já o poliéster sem o recobrimento de PTFE do fabricante B apresentou maior penetração de partículas que o do fabricante A. Isso pode ser devido à sua maior porosidade (Tabela 11) e maior tempo de filtração para o ensaio de filtração com queda de pressão máxima de 100 mmH₂O apresentado na seção 4.3 (Tabela 15).

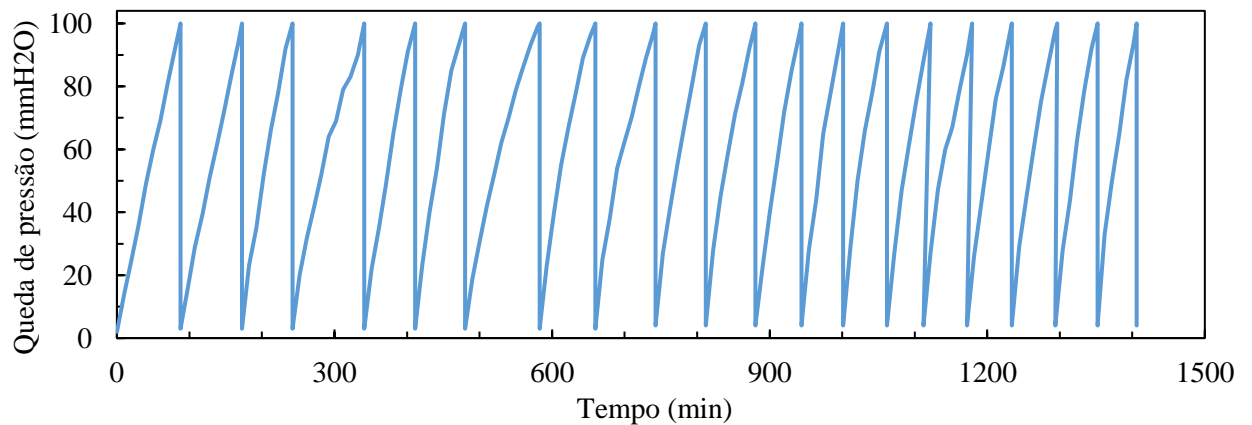
4.5 Ensaios com ciclos de filtração e limpeza

Conforme descrito na seção 3.10, foram realizados 20 ciclos de filtração e limpeza no equipamento baseado na norma VDI 3926 apresentado na seção 3.6, utilizando os meios filtrantes de poliéster sem membrana de PTFE dos fornecedores A e B.

A queda de pressão no meio filtrante foi registrada ao longo do tempo de filtração, e os resultados são apresentados nas Figuras 52 e 53, e na Tabela 16.

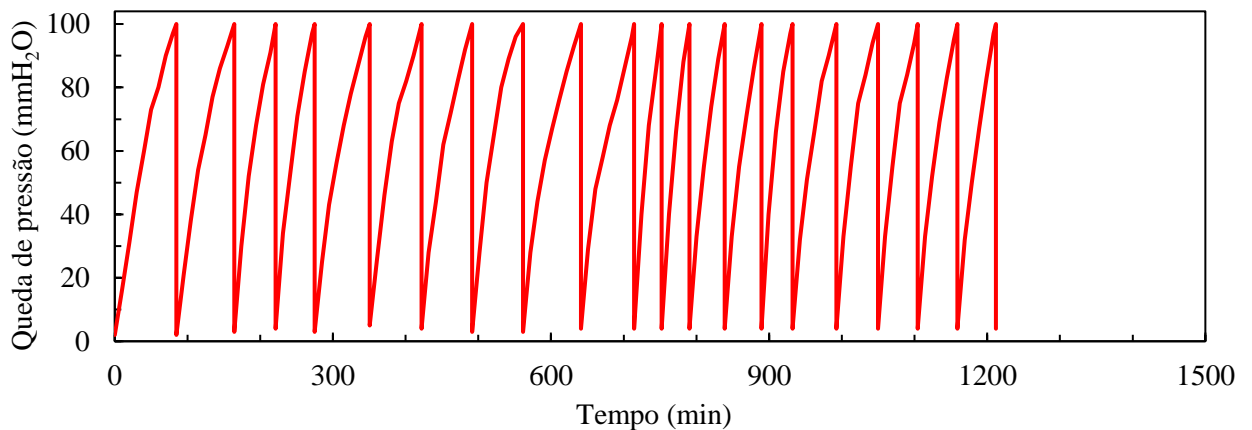
Pelas Figuras 52 e 53, observa-se que a duração de cada ciclo de filtração variou ao longo dos experimentos. Para o poliéster do fabricante A, a duração dos ciclos apresentou uma relativa estabilização a partir do 10º ciclo, variando em 5% até o 20º. Já para o poliéster do fabricante B, a estabilização ocorreu a partir do 16º ciclo, variando 8% até o final.

Figura 52 – 20 ciclos de filtração com o meio filtrante de poliéster do fabricante A



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 53 – 20 ciclos de filtração com o meio filtrante de poliéster do fabricante B



Fonte: Arquivo pessoal

Tabela 16 – Tempo de filtração para 20 ciclos

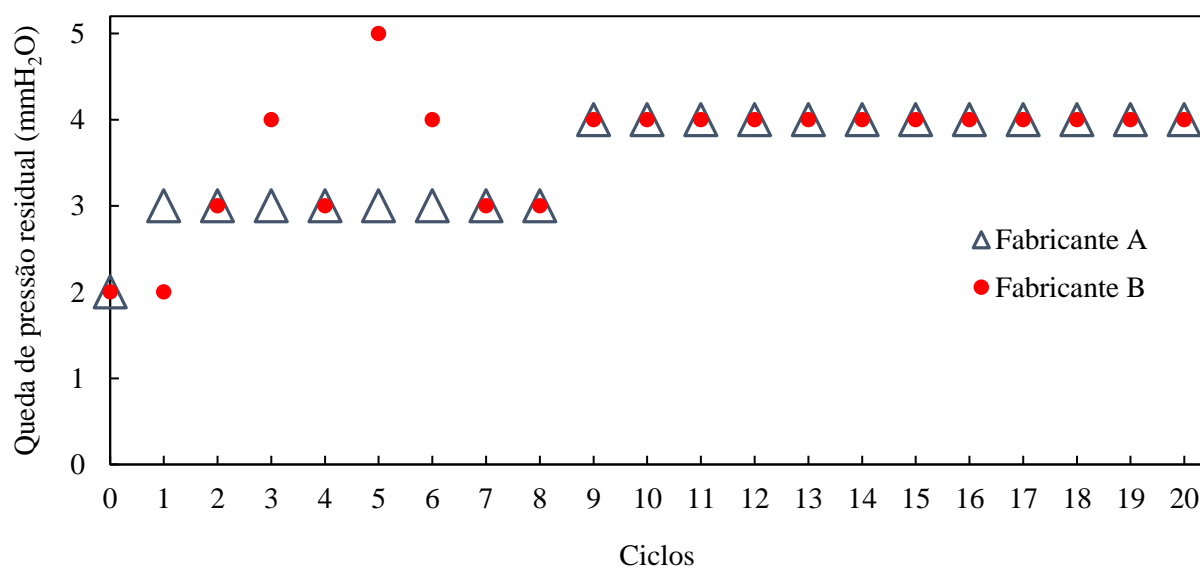
Meio Filtrante	Tempo total (min)	Tempo médio/ciclo (min)	± (min)
Poliéster (A)	1406	71	14
Poliéster (B)	1212	61	14

Fonte: Arquivo pessoal

Ainda, como apresentado na Tabela 16, o tempo total de 20 ciclos de filtração foi 16% maior para o poliéster do fabricante A em relação ao fabricante B. Isso pode indicar uma menor frequência de ciclos para este meio filtrante, o qual estará sujeito a menos desgastes causados pelo jato de ar pulsante e poderá ter uma maior vida útil.

Já em termos de queda de pressão residual, verifica-se pela Figura 54 que a mesma se manteve em 4 mmH₂O a partir do 9º ciclo para ambos meios filtrantes. Sendo assim, torna-se necessário realizar uma maior quantidade de ciclos para avaliar a evolução desta curva e tirar conclusões acerca da vida útil destes filtros.

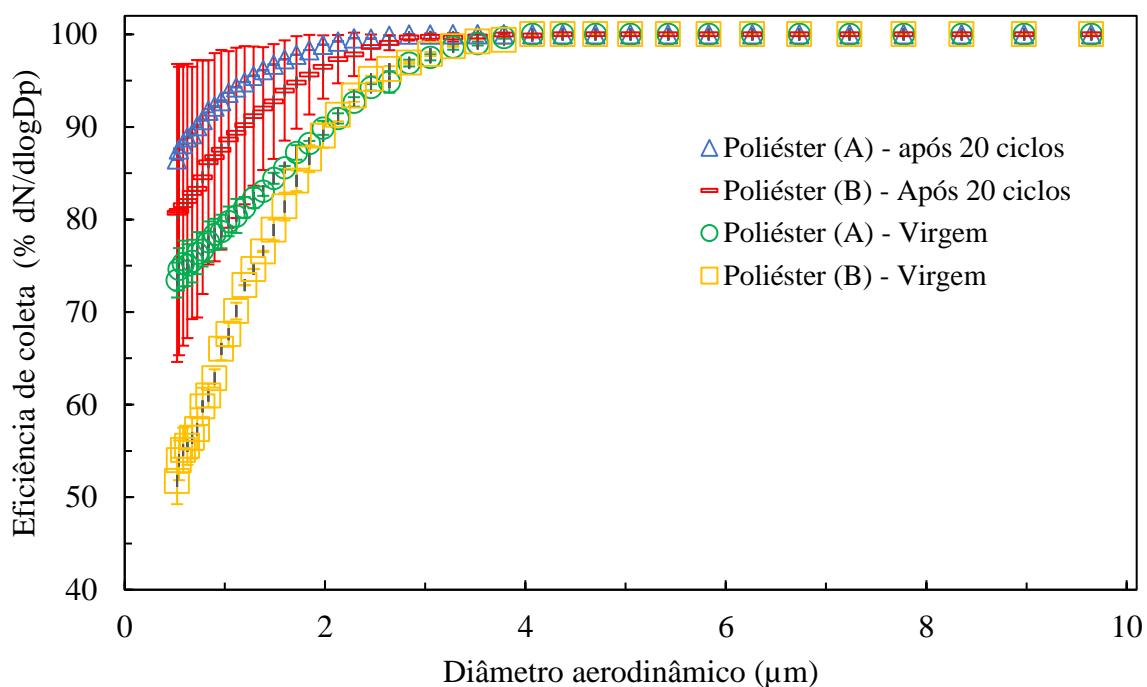
Figura 54 – Queda de pressão residual dos meios filtrantes sujeitos a 20 ciclos de filtração



Fonte: Arquivo pessoal

Ao fim dos 20 ciclos, os meios filtrantes foram submetidos a ensaios de filtração conforme procedimento descrito na seção 3.4, com o objetivo de avaliar a eficiência de coleta de partículas inaláveis (PM₁₀), finas (PM_{2.5}) e ultrafinas (PM_{1.0}). Os resultados estão representados na Figura 55.

Figura 55 – Eficiência de coleta de partículas após 20 ciclos de filtração



Fonte: Arquivo pessoal

Conforme ilustrado na Figura 55 e previamente relatado na seção 4.1, o meio filtrante de poliéster virgem do fabricante A apresentou eficiências de coleta superiores ao do fabricante B para PM_{2.5} e PM_{1.0}. Após 20 ciclos de filtração, a eficiência de coleta de ambos os filtros aumentou em relação a quando eram virgens, sendo que a do fabricante A continuou maior em média que a do fabricante B. Tal fato pode ser devido à menor porosidade do poliéster do fabricante A, o qual demonstrou menor penetração de partículas no 1º ciclo como mostrado na seção 4.4.

Portanto, o meio filtrante de poliéster do fabricante A obteve melhor performance que o do fabricante B nesta etapa do trabalho, levando mais tempo para completar os 20 ciclos de filtração e apresentando maior eficiência de coleta para PM_{2.5} e PM_{1.0} ao término dos ensaios.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram avaliados meios filtrantes de poliéster com e sem revestimento de PTFE (Teflon®) de dois fabricantes (A e B). A partir dos resultados apresentados no Capítulo 4, foi possível obter conclusões de acordo com os objetivos propostos.

Quanto ao material particulado coletado no filtro de mangas do despoeiramento secundário da aciaria, o mesmo é composto basicamente de CaO e Fe₂O₃. Possui um diâmetro mediano aerodinâmico de $3,92 \pm 0,12 \mu\text{m}$, e 90,8% das partículas em massa são menores que 10 μm , 27,1% são menores que 2,5 μm e 4,5% são menores que 1,0 μm .

Em relação aos meios filtrantes, as fibras de poliéster e de PTFE do fabricante B são em média, respectivamente, 15 e 20% menores que as do fabricante A, além de apresentarem uma distribuição de diâmetros mais homogênea (Figura 25). Consequentemente, a porosidade obtida experimentalmente para o poliéster do fabricante B foi maior que a do A. Já as permeabilidades calculadas não apresentaram diferenças significativas de um fabricante para o outro. Porém o fabricante A informou valores superiores aos obtidos experimentalmente, enquanto as permeabilidades calculadas para o fabricante B ficaram dentro da faixa informada pelo mesmo.

Ainda, a membrana de PTFE garantiu eficiências de coleta próximas a 100% para todas as faixas de diâmetro aerodinâmico analisadas (entre 10 a 300 nm e entre 0,523 a 10 μm), e promoveu baixa penetração de partículas no 1º ciclo de filtração, não havendo diferença significativa entre os dois fabricantes.

Já os meios filtrantes de poliéster sem a membrana de PTFE apresentaram eficiência de coleta variando de 99% a 30% para partículas entre 10 a 300 nm de diâmetro aerodinâmico, sendo o filtro do fabricante B o mais eficiente. Já entre 0,523 a 10 μm , o poliéster do fabricante A obteve maiores eficiências na maior parte da faixa de diâmetros, sendo de 100% para PM10, 94% para PM2.5 e 79% para PM1.0, enquanto o B apresentou 100% para PM10, 95% para PM2.5 e 66% para PM1.0 (Figura 45).

Em relação aos ensaios de filtração realizados no equipamento baseado na norma VDI 3926, os meios filtrantes do fabricante B obtiveram um tempo médio maior no 1º ciclo sem limpeza, retendo mais massa (Tabela 15). Porém o poliéster sem PTFE deste fabricante apresentou maior penetração de partículas que o do fabricante A (Figura 51). Ao final do 20º ciclo, o tempo total de filtração foi 16% maior para o poliéster sem PTFE do fabricante A em

relação B. Isso pode indicar uma menor frequência de ciclos para este meio filtrante, o qual estará sujeito a menos desgastes causados pelo jato de ar pulsante e terá uma maior vida útil.

Após o 20º ciclo, verificou-se para ambos os meios filtrantes sem PTFE que a eficiência de coleta de PM_{2.5} e PM_{1.0} aumentou em relação aos filtros virgens, sendo que a do fabricante A continuou maior em média que a do fabricante B. Já em relação à queda de pressão residual, ambos os filtros estabilizaram em 4 mmH₂O, sendo necessária a realização de mais ciclos de filtração para observar a evolução desta variável e avaliar sua influência na vida útil do meio.

Nos ensaios de filtração para avaliação da eficiência de coleta de PM₁₀, PM_{2.5} e PM_{1.0}, a eficiência dos filtros sem PTFE foi baixa para partículas menores que 2,5 µm de diâmetro aerodinâmico. Mas quando a queda de pressão no meio filtrante superou em 10 mmH₂O a queda de pressão inicial, a eficiência de coleta foi maior que 99% para todas as faixas de diâmetro. Uma possível explicação é que o ponto de colmatação foi atingido rapidamente, formando uma camada de torta que atuou como um pré-filtro.

Em resumo, o poliéster do fabricante B obteve maior tempo de filtração e maior massa retida no 1º ciclo de filtração, porém maior penetração de partículas. Também sua versão sem PTFE foi mais eficiente na coleta de nanopartículas que o sem PTFE do A. Já o poliéster sem PTFE do fabricante A levou um tempo 16% maior para completar 20 ciclos de filtração, e foi mais eficiente na coleta de partículas PM_{2.5} e PM_{1.0} antes e após os 20 ciclos. Já os meios filtrantes com PTFE apresentaram eficiência de coleta próxima a 100% tanto para nano quanto para micropartículas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, enfim, realizar um estudo que avalie diferentes materiais de *precoating* para este processo, de modo a determinar a queda de pressão final em sua aplicação deste material que garanta altas eficiências de coleta de partículas tanto no estágio inicial de filtração quanto a longo prazo.

Recomenda-se também a realização de maior quantidade de ciclos de filtração no equipamento baseado na norma VDI 3926 para avaliar a evolução da queda de pressão residual. Porém, atualmente a reposição do pó no sulco do prato de alimentação é realizada a cada volta e de forma manual pelo operador, o que inviabiliza a realização de muitos ciclos. Portanto é necessário automatizar a alimentação de pó através da instalação de uma balança de alimentação integrada com um medidor de concentração instalado na região do meio filtrante.

Ainda sobre o equipamento de filtração baseado na norma VDI 3926, indica-se a instalação de um contador de partículas após o meio filtrante a ser testado, sendo então possível a obtenção online da eficiência de coleta por diâmetro de partículas.

Outra sugestão é a realização de ciclos de filtração com a pressão do pulso de limpeza menor que a utilizada neste estudo, que foi de 5 bar como determina a norma VDI 3926. O objetivo seria verificar se a eficiência de limpeza é similar para pressões de pulso menores, assim como observado no trabalho de Bustard, Cushing e Chang (1992). Dessa forma seria possível determinar uma pressão ótima do jato pulsante que garanta alta eficiência de limpeza, economizando assim energia para o sistema de limpeza do filtro de mangas.

REFERÊNCIAS

ABINT. **Classificação, Identificação e Aplicações de Não tecidos**. Disponível em: <http://www.abint.org.br/pdf/Manual_ntecidos.pdf>. Acesso em: 20 out. 2016.

AGUIAR, M. L.; COURRY, J. R. Cake Formation in Fabric Filtration of Gases. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 35, n. 10, p. 3673–3679, 1996.

AIR FILTER SALES & SERVICE. **Filter Fabric Selection Guide**. Disponível em: <<http://afss.ca/filter-fabric-selection-guide/>>. Acesso em: 29 out. 2017.

AL-OTOOM, A. Y. Prediction of the collection efficiency, the porosity, and the pressure drop across filter cakes in particulate air filtration. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 1, p. 51–57, jan. 2005.

ALEKSANDROV, V. P.; BARANOVA, R. B.; VALDBERG, A. Y. Filter materials for bag filters with pulsed regeneration. v. 46, n. 1, p. 35–40, 2010.

ALLEN, T. **Particle Size Measurement**. 5. ed. London, UK: Chapman & Hall, 1997. v. 1

ARAGON, G. et al. Enhanced Control of Fine Particle Emissions from Waste Biomass Combustion Using a Hybrid Filter. **Energy & Fuels**, v. 29, n. 4, p. 2358–2371, 16 abr. 2015.

BARROS, P. M.; TANABE, E. H.; AGUIAR, M. L. Performance of fibrous filters during nanoparticle cake formation. **Separation Science and Technology**, v. 51, n. 6, p. 1042–1052, 12 abr. 2016.

BEJAN, A. **Convection Heat Transfer**. 3th. ed. Durham: Wiley, 2004.

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, mar. 2017.

BRASIL. **Resolução CONAMA N° 003/1990 - Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR** Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente, 1990. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res90/res0390.html>>. Acesso em: 8 set. 2017

BRASIL. **Resolução CONAMA n° 382/2006 - Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=520>>. Acesso em: 8 nov. 2017.

BUSTARD, C. J.; CUSHING, K. M.; CHANG, R. L. The Potential of Pulse-Jet

Baghouses for Utility Boilers. Part 2: Performance of Pulse-Jet Fabric Filter Pilot Plants. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 42, n. 9, p. 1240–1249, 1992.

CALLÉ, S. et al. Evolutions of efficiency and pressure drop of filter media during clogging and cleaning cycles. **Powder Technology**, v. 128, n. 2–3, p. 213–217, 2002.

CASFIL. **Tecidos Técnicos e Feltros Agulhados - Filtração Industrial**. Disponível em: <http://www.casfil.com.br/images/Folder_Casfil.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2016.

CHEN, Y. S.; HSIAU, S. S. Cake formation and growth in cake filtration. **Powder Technology**, v. 192, n. 2, p. 217–224, 2009.

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

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

CIRQUEIRA, S. S. R.; TANABE, E. H.; AGUIAR, M. L. **Avaliação da regeneração dos meios filtrantes após duzentos ciclos de filtração por pulso de ar reverso**. In: **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014, Florianópolis**. Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. **Anais...**São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2014

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

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

COURY, J. R.; PISANI JR., R.; HUNG, Y.-T. Cyclones. In: **Handbook of Environmental Engineering Volume 1: Air Pollution Control Engineering**. New Jersey: Humana Press, 2004. v. 1p. 97–151.

DENNIS, R.; WILDER, J. E.; HARMON, D. L. Predicting Pressure Loss for Pulse Jet Filters. **Journal of the Air Pollution Control Association**, v. 31, n. 9, p. 987–992, 1981.

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

EDANA. **Nonwoven deliveries in Western Europe by end-uses (in thousand tonnes in 2015)**. Disponível em: <<https://www.edana.org/discover-nonwovens/facts-and-figures>>. Acesso em: 4 out. 2017.

EPA. **The Benefits and Costs of the Clean Air Act from 1990 to 2020, Final Report, Revision A, April 2011.** Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/fullreport_rev_a.pdf>. Acesso em: 28 set. 2017.

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

FEITOSA, N. DOS R. **Desempenho de meios filtrantes na remoção de partículas nanométricas de aerossóis.** [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2009.

FENG, Z.; LONG, Z.; YU, T. Filtration characteristics of fibrous filter following an electrostatic precipitator. **Journal of Electrostatics**, v. 83, p. 52–62, out. 2016.

GHOSH, A. **Secondary steelmaking: principles and applications.** Boca Raton, FL: CRC Press, 2001.

HAMON. **Dust removal-systems.** Disponível em: <<http://www.hamon.com.br/en/activity-poles/air-quality-systems/dust-removal-systems>>. Acesso em: 18 out. 2016.

HARDMAN, E. Some aspects of the design of filter fabrics for use in solid/liquid separation processes. **Filtration & Separation**, v. 31, n. 8, p. 813–806, dez. 1994.

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

HÖFLINGER, W. Fundamentals of the Compression Behavior of Dust Filter Cakes, Chapter 18. In: SPURNY, K. R. (Ed.). **Advances in Aerosol Filtration.** 1. ed. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1998. p. 349–360.

HUTTEN, I. M. **Handbook of Nonwoven Filter Media.** Kidlington: Elsevier Science & Technology Books, 2016.

HYGIENISTS, A. C. OF G. I. Chapter 6: Fans. In: **Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice.** 23. ed. Cincinnati: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Inc., 1998. v. 552p. 514.

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.

ITO, L. X.; AGUIAR, M. L. A study of the porosity of gas filtration cakes. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 26, n. 2, p. 307–315, 2009.

JILLAVENKATESA, A.; DAPKUNAS, S. J.; LUM, L.-S. H. **Particle Size Characterization - Special Publication 960-1**. Washington, US: NIST - National Institute of Standards and Technology, 2001.

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

LANDRIGAN, P. J. et al. The Lancet Commission on pollution and health. **The Lancet**, v. 388, n. 10053, p. 1659–1724, out. 2017.

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.

LI, J.; LI, S.; ZHOU, F. Effect of moisture content in coal dust on filtration and cleaning performance of filters. **Physicochemical Problems of Mineral Processing**, v. 52, n. 1, p. 365–379, 2016.

MANZANO-AGUGLIARO, F.; CARRILLO-VALLE, J. Conversion of an existing electrostatic precipitator casing to Pulse Jet Fabric filter in fossil power plants. **Dyna**, v. 83, n. 195, p. 189–197, 2016.

MARKETSANDMARKETS. **Bag Filter Market - Global Forecast to 2020**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/bag-filter-market-32029421.html>>.

MERKUS, H. G. **Particle Size Measurements: Fundamentals, Practice, Quality**. 1. ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. v. 17

MORRIS, K.; ALLEN, R. W. K. The influence of dust and gas properties on cake adhesion in fabric filters. **Filtration & Separation**, v. 33, n. 4, p. 339–334, abr. 1996.

MORRIS, K.; ALLEN, R. W. K. Fabric Filters. In: SEVILLE, J. P. K. (Ed.). **Gas Cleaning in Demanding Applications**. London: Blackie Academic & Professional, 1997. p. 70–95.

MUKHOPADHYAY, A. Pulse-jet filtration: An effective way to control industrial pollution Part I: Theory, selection and design of pulse-jet filter. **Textile Progress**, v. 41, n. 4, p. 195–315, 29 dez. 2009.

MUKHOPADHYAY, A.; PANDIT, V.; DHAWAN, K. Effect of high temperature on the performance of filter fabric. **Journal of Industrial Textiles**, v. 45, n. 6, p. 1587–1602, 1 maio 2016.

OBERDÖRSTER, G. et al. Translocation of Inhaled Ultrafine Particles to the Brain. **Inhalation Toxicology**, v. 16, n. 6–7, p. 437–445, jan. 2004.

PARK, O. H.; YOO, G. J.; SEUNG, B. J. A lab-scale study on the humidity conditioning of flue gas for improving fabric filter performance. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 24, n. 5, p. 717–722, 10 set. 2007.

PURCHAS, D. B. **Handbook of Filter Media**. 2. ed. Kidlington: Elsevier Science & Technology Books, 2002.

QIAN, Y. et al. Effect of filtration operation and surface treatment on pulse-jet cleaning performance of filter bags. **Powder Technology**, v. 277, p. 82–88, jun. 2015.

RAVERT, E. **Precoating new filters for better airflow, longer filter life**. Disponível em: <http://www.clarcorindustrialair.com/Portals/38/Documents/industrial-filtration/articles/uas/filter-precoating-better-airflow-longer-life-uas-technical-article.pdf>. Acesso em: 29 out. 2017.

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, out. 2010.

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.

SAJID, M. et al. Impact of nanoparticles on human and environment: review of toxicity factors, exposures, control strategies, and future prospects. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 6, p. 4122–4143, 30 mar. 2015.

SAKHPARA, D. **Methods to evaluate PTFE membrane filter bags**. Eighth NCB International Seminar on Cement And Building Materials. **Anais...**New Delhi: 2003

SALAZAR-BANDA, G. R. et al. The Influence of Particulate Matter and Filtration Conditions on the Cleaning of Fabric Filters. **Separation Science and Technology**, v. 48, n. 2, p. 223–233, 2012.

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

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

SCHILLER, S.; SCHMID, H.-J. Ultrafine Dust Filtration Using Precoat Materials Considering the Influence of Filter Media. **Chemical Engineering & Technology**, v. 37, n. 6,

p. 1009–1020, jun. 2014.

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

SHERMAN, C. P. C.; LEITH, D.; SYMONS, M. J. Outlet Mass Flux from a Pulse-Jet Cleaned Fabric Filter: Testing a Theoretical Model. **Aerosol Science and Technology**, v. 13, n. 4, p. 426–433, jan. 1990.

SILVA, C. R. N. et al. Influence of gas velocity on cake formation and detachment. **Powder Technology**, v. 101, n. 2, p. 165–172, fev. 1999.

SPARKS, T.; CHASE, G. **Filters and Filtration Handbook**. 6. ed. Kidlington: Elsevier Science & Technology Books, 2016.

TARDOS, G. I. Separation of Airborne Dust in Deep-Bed Filtration, Chapter 12. In: SPURNY, K. R. (Ed.). . **Advances in Aerosol Filtration**. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1998. p. 241–257.

TSI INCORPORATED. **Aerosol Statistics Lognormal Distributions and $dN/d\log D_p$** . Disponível em: <http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Application_Notes/PR-001-RevA_Aerosol-Statistics-AppNote.pdf>. Acesso em: 7 set. 2017.

TURNER, J. H. et al. **Particulate Matter Controls**. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/ttn/catc1/dir1/cs6ch1.pdf>>. Acesso em: 8 nov. 2017.

WALSH, D. C.; STENHOUSE, J. I. T. The effect of particle size, charge, and composition on the loading characteristics of an electrically active fibrous filter material. **Journal of Aerosol Science**, v. 28, n. 2, p. 307–321, mar. 1997.

WANG, L. K.; WILLIFORD, C.; CHEN, W. Fabric Filtration. In: **Handbook of Environmental Engineering Volume 1: Air Pollution Control Engineering**. New Jersey: Humana Press, 2004. v. 1p. 59–95.

WANG, X. Extra Low Sulfur and Non-metallic Inclusions Control for Ultra Fine Grain High Strength Steels. In: WENG, Y. (Ed.). . **Ultra-Fine Grained Steels**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 431–472.

WHO. **Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide**. Disponível em: <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69477/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf>. Acesso em: 28 set. 2017.

YUAN, C.-S. J.; SHEN, T. T. Electrostatic Precipitation. In: **Handbook of Environmental Engineering Volume 1: Air Pollution Control Engineering**. New Jersey: Humana Press, 2004. v. 1p. 153–196.

ZUKERAN, A. et al. Collection efficiency of ultrafine particles by an electrostatic precipitator under DC and pulse operating modes. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 35, n. 5, p. 1184–1191, 1999.

WEB OF SCIENCE. Levantamento de artigos publicados com o filtro: (Título: *"baghouse" or "bag filter" or "filter bag" or "fabric filter" or "fabric filtration" or "pulse jet filter" or "pulse jet cleaning" or "pulse jet filtration" or "pulse-jet filter" or "pulse-jet cleaning" or "pulse-jet filtration" or "patchy cleaning" or "filter cloth" or "filter fabric" or "fibrous filter" or "dust cake" not "water"*). Refinado por: Tipos de documento: (*article*). Disponível em <<http://apps.webofknowledge.com>>. Acesso em 25 fev. 2018.

APÊNDICE A - Despoeiramento secundário da aciaria de uma indústria siderúrgica

Na produção do aço existem vários processos em que materiais particulados são gerados, sendo necessários equipamentos de filtração para a captura dos mesmos. Entre o alto forno (produção do ferro-gusa) e a aciaria (produção do aço) são gerados efluentes gasosos contendo partículas que são enviados para tratamento em filtro de manga. Este processo específico de filtração de gases é denominado despoeiramento secundário da aciaria. Também fazem parte desse despoeiramento secundário a captura do material particulado formado na carga do convertedor e nos silos aéreos da aciaria.

O alto forno de uma indústria siderúrgica é um reator que produz gusa a partir da redução e fusão da carga metálica formada por minério de ferro, fundentes (cal, sílica), combustível e coque como redutor. O ferro-gusa é um produto metálico composto majoritariamente por ferro contendo entre 4,5 a 5% de carbono e contém impurezas como enxofre e fósforo. Geralmente o enxofre é uma impureza indesejável pois causa fragilidade no aço, o que torna necessário sua remoção (GHOSH, 2001). Dessa maneira, a dessulfuração do gusa ocorre no próprio carro-torpedo (processo ATH) ou no reator Kambara (processo KR), através da adição de carbureto de cálcio ou cal. Segundo Wang (2009), o processo KR remove o enxofre de maneira mais eficiente que o ATH.

Do alto forno o gusa é vazado em um carro-torpedo e pode seguir para duas rotas possíveis. Na operação normal, o gusa é vazado em uma panela, a qual é pesada e enviada para o processo de dessulfuração KR. Em seguida a escória é removida pelo *skimmer* e a panela segue para a aciaria, onde o gusa é vazado para o convertedor onde será produzido o aço, com adição de reagentes armazenados nos silos aéreos. Se, por razões operacionais, não ser possível dessulfurar no KR, a remoção de enxofre é realizada no próprio carro-torpedo (ATH). Caso houver a necessidade de produzir um aço de menor teor de enxofre, trata-se a gusa nos dois processos, sendo primeiro o ATH e em seguida o KR.

Então, o filtro de mangas do despoeiramento secundário recebe os efluentes gasosos contendo materiais particulados gerados nas etapas de pesagem, dessulfuração (KR e ATH), retirada da escória (*skimmer*) e estocagem de reagentes nos silos aéreos. Os dados de operação e particularidades desse filtro são apresentados na Tabela A1.

Tabela A1 – Dados do filtro de mangas da indústria siderúrgica

Propriedade	Valor
Temperatura (operação ¹ /projeto)	58,5 / 120°C
Vazão de gás (operação ¹ /projeto)	1.435.966 / 1.550.000 Nm ³ /h
Carga de pó na entrada (operação ¹ /projeto)	0,811 / 5,0 a 9,0 g/Nm ³
Umidade relativa do gás (operação ¹)	2,81%
Diâmetro da manga	0,152 m
Comprimento da manga	5 m
Número de mangas	7920
Área de filtração	18.850 m ²
Relação ar-pano	1,27 (Nm ³ /min)/m ²
Tipo de limpeza das mangas	Jato de ar pulsante
Queda de pressão máxima	200 mmH ₂ O
Pressão do pulso	7 bar
Tempo do pulso	200 ms

(1) Valor médio obtido em medição realizada em 19/09/16.

Fonte: Arquivo pessoal

Como observa-se na Tabela A2, o material particulado em estudo é polidisperso, corrosivo e abrasivo. Esta tabela é apenas para referência, uma vez que a caracterização do pó foi realizada neste trabalho e apresentada na subseção 3.2.

De acordo com a Tabela 4 da subseção 2.3.3, os materiais indicados para este processo são acrílico, poliéster, PPS (Ryton®), aramida (Nomex®), poliimida (P84®), politetrafluoretileno (PTFE/Teflon®) e fibra de vidro. Estes filtros podem ser revestidos com uma membrana de PTFE que além de reduzir a penetração de partículas no meio filtrante (CALLÉ et al., 2002), diminui a adesão da torta e facilita a sua limpeza, sendo indicada para processos que contenham partículas altamente adesivas e hidrocópias (ALEKSANDROV; BARANOVA; VALDBERG, 2010).

Tabela A2 – Características do material particulado segundo documentação da indústria siderúrgica

Propriedade	Valor	
Massa Específica	1,2 a 1,8 g/cm ³	
Particularidades	Partículas corrosivas e abrasivas	
Distribuição granulométrica	Tamanho (µm)	%
	>100	16
	10 a 100	18
	1 a 10	34
	0,5 a 1	21
	<1	11
Composição	Grafite	55%
	Óxidos de ferro	35%
	CaO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃	10%

Fonte: Arquivo pessoal

APÊNDICE B - Legislação ambiental

No Brasil, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) definiu na Resolução nº 3 de 1990 (Artigo 1º) os padrões de qualidade do ar como “as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.” (BRASIL, 1990).

A maior parte dos estados brasileiros segue atualmente a Resolução do CONAMA nº 382 de 2006 (BRASIL, 2006), a qual estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fonte fixa, e que são baseados na Resolução nº 3 de 1990. Ela define a fonte fixa de emissão como “qualquer instalação, equipamento ou processo, situado em local fixo, que libere ou emita matéria para a atmosfera, por emissão pontual ou fugitiva”. Em seu artigo 5º, parágrafo 2º, inciso IV, afirma que o limite de emissão, o qual é monitorado continuamente, é atendido quando no mínimo 90% das médias diárias atendem a 100% do limite estabelecido, e que os demais 10% não devem ultrapassar 130% desse limite. Porém não distingue o tamanho da partícula em PM10 ou PM2.5.

Por sua vez, a Organização Mundial da Saúde (OMS) publicou em 2005 uma recomendação estabelecendo limites de emissão para PM10 e PM2.5 (WHO, 2005). A Tabela B1 informa tal recomendação e também informa os limites de emissão para indústrias siderúrgicas, disponibilizados no Anexo XIII da Resolução nº 382 do CONAMA.

Tabela B1 – Limites de emissão para material particulado

Resolução	Média	Limite de emissão (mg/Nm ³)	
		PM2.5	PM10
CONAMA nº 382/1990 – Anexo XIII (siderurgia)	Anual	40-100 ¹	
Recomendação OMS de 2005	Anual	10	20
	24 horas	25	50

¹Varia de acordo com o processo, e não especifica o tamanho da partícula. O limite para o despoejamento secundário da aciaria é de 50 mg/Nm³.

Fonte: WHO (2005) e BRASIL (2006)

Como observa-se na Tabela B1, os limites de emissão recomendados pela OMS são inferiores ao do CONAMA, além de introduzir o controle de PM2.5 e PM10. Seguindo esta linha, os estados brasileiros São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo emitiram decretos em 2013 que alteram gradativamente os limites de emissão, sendo baseados na recomendação da OMS.