



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

FLÁVIA MATIAS OLIVEIRA

**“ESTUDO DO EFEITO ELETROSTÁTICO NA FILTRAÇÃO DE
PARTÍCULAS DE CIMENTO EM FILTROS DE MANGAS”**

São Carlos

2015

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

**“ESTUDO DO EFEITO ELETROSTÁTICO NA FILTRAÇÃO DE
PARTÍCULAS DE CIMENTO EM FILTROS DE MANGAS”**

FLÁVIA MATIAS OLIVEIRA

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química da Universidade Federal de São Carlos,
como parte dos requisitos necessários à obtenção
do título de Mestre em Engenharia Química,
área de concentração em Pesquisa e
Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientadora: Prof.^a Dra. Mônica Lopes Aguiar.

São Carlos

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

O48ee

Oliveira, Flávia Matias.

Estudo do efeito eletrostático na filtração de partículas de cimento em filtros de mangas / Flávia Matias Oliveira. -- São Carlos : UFSCar, 2015.

83 f.

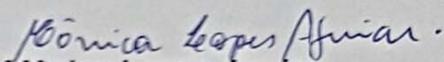
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2015.

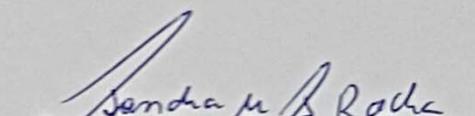
1. Filtração de gases. 2. Carregador corona. 3. Material particulado. 4. Cimento. 5. Filtros de manga. I. Título.

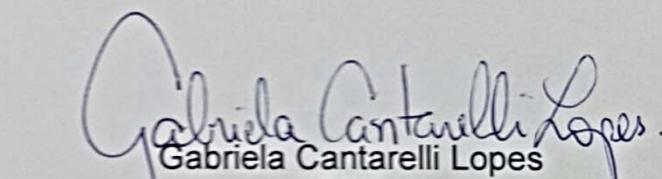
CDD: 660.284245 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE FLÁVIA MATIAS OLIVEIRA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 30 DE ABRIL DE 2015.

BANCA EXAMINADORA:


Mônica Lopes Aguiar
Orientadora, UFSCar


Sandra Mara Santana Rocha
UFES


Gabriela Cantarelli Lopes
UFSCar

DEDICATORIA

*Dedico este trabalho primeiramente aos meus pais
Luiz e Simone, por todo apoio oferecido durante toda
minha vida e a minha filha Penélope para que lhe
sirva de exemplo que o saber nunca tem
fim.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por toda força e renovação de fé que me provou ser capaz de realizar este trabalho.

*Aos meus pais, **Luiz** e **Simone** por todo sacrifício, ajuda e confiança.*

*A minha filhinha, **Penélope** que sempre esteve comigo, faço isso por nós.*

*Ao **João** pelo carinho, apoio e compreensão.*

*Aos meus irmãos, **Fernanda** e **Guto** por sempre estarem presentes, e acreditar que sou capaz.*

Aos meus familiares, tios, tias e primos que sempre estiveram comigo, compartilhando minhas escolhas.

*A professora **Mônica**, pela orientação, pela oportunidade, pela paciência e principalmente por ter acreditado neste trabalho.*

*Aos amigos do laboratório de **Controle Ambiental** pelas tardes intensas compartilhando conhecimentos, trabalhos e boas risadas durante todo o trabalho.*

Aos amigos da Votorantim Cimentos S.A. ,pelo apoio e fornecimento de recursos para este trabalho.

*A todos os **amigos** feitos em São Carlos e aos reencontrados aqui.*

Ao CNPQ pelo apoio financeiro e ao Departamento de Engenharia Química da UFSCar pela infraestrutura para realização deste trabalho.

Finalmente, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Só é digno da vida aquele que vai, todos os dias, à luta por ela.”
(Johan Wolfgang Van Goethe)*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE SIMBOLOS	viii
RESUMO.....	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Filtros de Mangas.....	3
2.2. Meios Filtrantes de Tecidos	5
2.2.1. Tecidos Trançados.....	6
2.2.2. Tecidos Não Trançados	7
2.3. Mecanismo de Captura do Material Particulado	9
2.4 Teoria da Filtração	11
2.4.1. Formação da Torta de Filtração	12
2.4.2. Perda de Carga na Filtração.....	14
2.4.3. Permeabilidade	15
2.4.4. Resistência Específica da Torta (K_2).....	16
2.4.5. Porosidade	19
2.5. Cargas Eletrostáticas na Filtração	20
2.6. Partículas de Cimento	22
2.7. Comparação dos Filtros Eletrostáticos com os Filtros de Mangas	24
2.8. Pesquisas relacionadas	25
3.1. Equipamentos.....	28
3.1.1. Equipamentos utilizados para filtração.....	28
3.1.2. Caixa de Filtração.....	29
3.1.3. Alimentador de Pó	30
3.1.4. Sistema de Aquisição de Dados	31
3.1.5. Outros Equipamentos	32
3.2. Materiais	32
3.2.1. Material Particulado	32
3.2.2. Meio Filtrante	34
3.3. Metodologia	37
4.1 Ensaio de Filtração	40
4.1.1. Testes Experimentais: Partículas de 8 μm utilizando tecido de fibra de vidro. 40	

4.1.2. Testes Experimentais: Partículas de 20 µm utilizando tecido de fibra de vidro.....	44
4.1.3. Ensaios de filtração: partícula de 14 µm utilizando um tecido de fibra de vidro. 48	
4.1.3.1. Ensaios de Filtração: partícula de 14 µm, variando os meios filtrantes de fibra de vidro e de polipropileno.....	52
5. CONCLUSÕES.....	59
6. SUGESTÕES	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXO A.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Filtro de Mangas	04
Figura 2.2- Imagens de um filtro de mangas (a) vista de fora (b) vista do interior do filtro....	05
Figura 2.3- Estrutura de um (a) tecido plano e (b) estrutura da superfície do tecido trançado gerado no MEV com ampliação de 100x.....	07
Figura 2.4- Estrutura da superfície do tecido não trançado.....	08
Figura 2.5- Mecanismo físicos de coleta.....	10
Figura 2.6- Mecanismo de coleta eletrostática: (a) Coulômbico e (b) Dipolo Imagem.....	11
Figura 2.7- Filtração de profundidade e superficial.....	13
Figura 2.8- (a) modelo dendrito, (b) modelo aumentando a fibra, (c) modelo combinado.....	13
Figura 2.9- Ponto de colmatação do não tecido (WALSH et al., 1996).....	14
Figura 2.10- Fator de resistência R versus porosidade para modelos de Kozeny-Carmam e Rudnick-Hapell para resistência de meios porosos.....	18
Figura 2.11- Ionização de partículas sólidas.....	21
Figura 2.12- Imagem do Cimento ampliado 500x gerada em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).	23
Figura 3.1- Esquema geral do equipamento de filtração.	29
Figura 3.2- Sistema de carregamento corona com unidade das medidas em cm. (a) Vista frontal, onde a região hachurada representa a placa de cobre (eletrodo de coleta). (b) Vista superior, no centro encontra-se o suporte metálico dos fios de cobre que possui a função de distribuir corrente elétrica entre os mesmos.	29
Figura 3.3 - Caixa de Filtração.	30
Figura 3.4– Alimentador de Pó.	31
Figura 3.5- Distribuições granulométricas do pó de cimento obtidas antes dos ensaios.....	33
Figura 3.6: Gráfico representativo da composição química do cimento.	34
Figura 3.7– Meio filtrante na sua forma original e molde utilizado nos ensaios sobre a balança analítica.....	35
Figura 3. 8– Meio filtrante de fibra de vidro com ampliação de 100 x gerada em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).	36
Figura 3. 9: Gráfico representativo da composição química do tecido de fibra de vidro.....	36

Figura 4.1 - Curvas de filtração no tecido de fibra de vidro, com aplicação de cargas eletrostática, para queda de pressão por massa retida, com partículas de 8 μm	42
Figura 4.2 - Curvas de filtração de massa retida por tempo, para partículas de 8 μm	43
Figura 4.3 - Curvas de filtração no tecido de fibra de vidro, com aplicação de cargas eletrostática, para queda de pressão por massa retida, com partículas de 20 μm	44
Figura 4.4- Comparação de resultados para queda de pressão em relação à massa retida.....	45
Figura 4.5- Curvas de filtração de massa retida por tempo, para partículas de 20 μm	46
Figura 4.6- Curvas de filtração de massa retida por tempo, para partículas de 20 μm , apresentando o intervalo de tempo de 200 a 300 s.	47
Figura 4.7 - Curvas de filtração no tecido de fibra de vidro, com aplicação de cargas eletrostática, para queda de pressão por massa retida, com partículas de 14 μm	49
Figura 4.8- Curvas de filtração no tecido de fibra de vidro, com aplicação de cargas eletrostática, para queda de pressão por massa retida, com partículas de 14 μm , com aumento de 50% a partir de 500 Pa.	50
Figura 4.9- Curvas de filtração de massa retida por tempo para partículas de 14 μm	51
Figura 4.10 - Curvas de filtração sem carga eletrostática para o Filtro de Fibra de vidro e Polipropileno.	53
Figura 4.11- Curvas de filtração com carga de -1 kV para o Filtro de Fibra de vidro e Polipropileno.	54
Figura 4.12- Curvas de filtração com carga de -2 kV para o Filtro de Fibra de vidro e Polipropileno.	54
Figura 4.13- Curvas de filtração para o Filtro de Fibra de Vidro	55
Figura 4.14- Curvas de filtração para o Filtro de polipropileno.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de medição para eficiência do filtro elétrico.....	25
Tabela 2- Composição do cimento em porcentagem.....	33
Tabela 3- Composição do filtro de fibra de vidro em porcentagem.	37
Tabela 4 - Parâmetros de Ensaio para partículas de 8, 20 e 14 μm	39
Tabela 5- Valores de porosidades de Ergun e resistência específica obtidos pelo Método Indireto para partículas de 8 μm	43
Tabela 6- Valores de porosidades de Ergun e resistência específica obtidos para partículas de 20 μm :.....	47
Tabela 7- Porosidade, resistência e massa de acordo com as tensões aplicadas para partícula 14,0 μm	52
Tabela 8- Valores da resistência específica obtidos pela Equação (2.9).	56

LISTA DE SIMBOLOS

- A - área superficial da torta de filtração [L^2]
- A - área de filtração [L^2]
- d_p - diâmetro médio das partículas [L]
- f_{MR} - fração de massa removida, adimensional.
- K - constante de vazão volumétrica [L]
- K_1 - constante de permeabilidade Darciana [L^2]
- K_c - resistência específica da torta [t^{-1}]
- K_M - resistência específica do meio filtrante [$M.L^{-2}.t^{-1}$]
- L - espessura do meio filtrante [L]
- L_c – espessura da torta [L]
- M_d - massa depositada [M]
- M_T - massa da torta de filtração [M]
- Q - vazão mássica de pó [$M. t^{-1}$]
- t - tempo de filtração [t]
- T - tempo total da filtração [t]
- v - vazão de pó depositada no meio filtrante [$M. t^{-1}$]
- v_f - velocidade de filtração [$M. t^{-1}$]
- W - massa de material particulado por unidade de área [$M.L^{-2}$]
- ΔP - queda de pressão na direção do escoamento [$M.L. t^{-1}$]
- ΔP_T - queda de pressão total [$M.L. t^{-1}$]
- ΔP_M - queda de pressão no meio filtrante [$M.L. t^{-1}$]
- ΔP_C - queda de pressão da torta de filtração [$M.L. t^{-1}$]
- ΔM - massa acumulada por unidade de área [M]
- ε - porosidade da torta de filtração, adimensional.
- ε_{MP} - porosidade do meio poroso, adimensional.
- ρ_p - densidade de partícula [$M. L^{-2}$]
- μ - viscosidade do fluido [$M.L^{-1}. t^{-2}$]

SIGLAS:

MEV- Microscopia eletrônica de varredura

DEQ- Departamento de Engenharia Química

UFSCar- Universidade Federal de São Carlos

RESUMO

Atualmente o controle da poluição industrial é essencial. Através da filtração, é possível remover os sólidos suspensos nos gases. Tem-se então a necessidade de métodos eficientes para filtração de gases a fim de reduzir a geração de resíduos e diminuir o consumo de energia. O presente estudo objetivou investigar o comportamento do material particulado, cimento e a influência do seu tamanho de partícula na formação da torta de filtração de gases, com e sem carregamento eletrostático. Foram analisados os aspectos do filtro com intuito de determinar e comparar suas características após as filtrações, definindo qual delas será mais adequada operacionalmente para este processo. Além destas investigações o estudo busca otimizar a operação de filtração. Para que se possa obter uma maior retenção de particulados. Neste sentido, foram analisados filtros de tecidos, de fibra de vidro e polipropileno, durante a filtração de gases. Utilizou-se o cimento como material particulado, com granulometrias de 8, 14 e 20 μ m, o carregamento corona foi adicionado na filtração durante a formação da torta de filtração. Os testes foram realizados na tentativa de compreender esses efeitos causados a partir de cargas eletrostáticas, objetivando melhorar e aumentar o tempo de vida útil dos meios filtrantes. Para isso adaptou-se um sistema de filtração de gases, existente no Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), para receber um carregador corona. Posteriormente determinou-se o ponto ótimo de operação a uma vazão mássica de 9 mg/s e velocidade de filtração de 10 cm/s, variando-se a tensão da unidade entre 0, e -2,0 kV. Através dos ensaios realizados foi possível observar que, com a aplicação da corrente corona, ocorreu uma alteração na formação da torta de filtração. Pode-se dizer que o tamanho da partícula afeta diretamente a eficiência da filtração e que a carga, pode aumentar a eficiência de coleta das partículas e diminuir a perda de carga durante a filtração de gases.

Palavras chaves: Carregador Corona, Filtração, Material particulado, Cimento e Filtros de Mangas.

ABSTRACT

Nowadays the control of industrial pollution is essential. Through filtering, you can remove the suspended solids in gases. It has been need for more efficient methods for gas filtration in order to reduce waste generation and decrease energy consumption. In this study was proposed to investigate the behavior of the particulate matter, cement and the influence of particle size in formation of gas dust cake, with and without eletrostatic charged. The filter in order to determine aspects were analyzed and compare their characteristics after filtration, defining which one operationally more suitable for this process. In this investigation the study aims optimize the filtration operation. In order to obtain a greater retention of particulates. In this sense, fabric filter were analyzed, glass and polypropylene filter, while gas filtration. Cement was used as particulate material with grain sizes 8, 14 and 20 μ m, the corona charging was added in the filtration of gas during the formation of dust cake. The tests were conduction in an attempt to understand this effect the electrostatic charge, improve and increase the service life of the filter media. Was necessary to adapt it to the equipment one system gas filtration, localized in Department of Chemical Engineering (DEQ) of Federal University of São Carlos (UFSCar), for receive the corona charged. The experiment was conducted from voltage of 0 to -2 kV test with a filtration rate of 10 cm/s, and the mass flow of 9 mg/s. With the tests done, it possible show that, with the application the corona charging the dust cake changes. It can be that the particle size directly affects the filtration efficiency and the load, can increase the efficiency the collect to particulate and decrease pressure drop during filtration of gases.

Keywords : Corona Charger, Filtration, Particulate matter, Cement and Bag Filter.

1. INTRODUÇÃO

A procura por métodos eficientes de filtração de gases cresce à medida que as empresas necessitam controlar a perda de matéria prima em seus processos.

Atualmente, além do controle das emissões, as grandes empresas têm investido em tecnologias de produção mais eficientes e de menor geração de resíduos. Neste contexto, os equipamentos de controle de emissão tornam-se parte essencial do processo produtivo, sendo encarados como recuperadores de matéria-prima ou co-produtos.

Em busca de equipamentos mais eficientes na área de filtração de gases, novas fibras vêm sendo desenvolvidas ou aperfeiçoadas para coletar partículas cada vez menores, chegando a se obter uma alta eficiência até mesmo para as nano partículas.

Processos industriais, como a produção de cimento, fazem o uso de meios filtrantes na retenção de matéria prima, devido à dispersão de materiais particulados no ar. Na tentativa de reduzir a perda desse material, e controlar os gases emitidos no processo, necessita-se da filtração de gases. Neste caso os filtros mais utilizados são os filtros de mangas.

Hoje em dia as pesquisas também estão relacionadas ao desenvolvimento e estudo de meios filtrantes que sejam mais resistentes e adequados em situações críticas, como altas temperaturas e pressões.

Além disso, vários estudos estão sendo realizados com a finalidade de avaliar o processo de formação da torta de filtração de gases e a sua interação com o meio filtrante. Afinal com um resultado positivo pode-se otimizar esse processo, com reduções na queda de pressão ou a melhoria do processo de remoção da torta resultando em benefícios para as indústrias, diminuindo as despesas com investimentos e/ou manutenção de uma planta, assim como inovar as pesquisas acadêmicas.

Segundo Rodrigues (2005) embora reconhecido como importante há muito tempo, o efeito eletroforético tem sido pouco investigado, provavelmente devido às dificuldades experimentais inerentes.

Rodrigues (2005) estudou a filtração de partículas de rocha fosfática em um meio filtrante de polipropileno com a aplicação de carga eletrostática tipo corona. Os resultados observados pelo autor foram positivos, houve um aumento da eficiência de coleta devido à carga aplicada nas partículas, e um decréscimo na queda de pressão, devido a não formação da torta de filtração.

Fenara et al (2011) demonstraram que com a aplicação da carga eletrostática nas partículas, aumenta a eficiência de coleta do material particulado e diminui a perda de carga do sistema. Esta diminuição da perda de carga pode economizar energia e prolongar o tempo de filtração de gases, bem como melhorar o processo de limpeza das mangas.

Buscando inovar no processo de filtração deixando-o mais ágil e obtendo uma retenção maior de material particulado, com uma menor queda de pressão, foram analisadas neste trabalho a queda de pressão, das curvas de filtração, mediante a aplicação de cargas eletrostáticas com voltagens entre -0.5 kV e -2.0 kV.

Com isso espera-se uma melhoria no processo de filtração aumentando a vida útil das mangas e buscando uma eficiência de filtração mais adequada a situações críticas. Este estudo permitirá a expansão da aplicação desses métodos em vários setores como: comercial, industrial, entre outros, com ênfase na diminuição de custos operacionais e no aumento da produtividade.

Portanto o objetivo geral deste estudo foi estudar o comportamento da torta de filtração na filtração de gases com a aplicação do carregamento corona nas partículas de cimento.

Utilizando os equipamentos otimizados pelo Departamento de Engenharia Química-DEQ da Universidade Federal de São Carlos-UFSCar.

A partir disto têm-se os objetivos específicos deste trabalho:

- Continuar os estudos já realizados no DEQ, com filtração de gases;
- Otimizar o processo de filtração aumentando a vida útil das mangas;
- Estudar a filtração de gases com o carregador corona adicionado na filtração;
- Verificar o efeito da carga eletrostática nas partículas durante a formação da torta;
- Investigar a influência do tamanho das partículas na filtração;
- Investigar o comportamento das curvas de filtração utilizando cimento como material particulado e com meio filtrante de fibra de vidro e polipropileno.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os principais conceitos para a realização do trabalho.

Existem vários equipamentos clássicos que são empregados na separação gás-sólidos, como os ciclones, lavadores de gases, filtros de mangas, filtros cerâmicos e precipitadores eletrostáticos. A seguir serão descritos os de maior interesse deste estudo que são os filtros de mangas.

2.1. Filtros de Mangas

Os filtros de mangas têm por finalidade separar as partículas existentes no fluxo de ar industrial através da passagem do ar carregado de partículas por meio das mangas, onde as partículas ficam retidas na superfície e nos poros dos tecidos, formando uma torta que atua também como meio filtrante. Para reduzir a resistência ao fluxo do ar a torta deve ser periodicamente removida. A separação de partículas do fluxo de ar é frequentemente realizada por filtros de fibras naturais ou sintéticas.

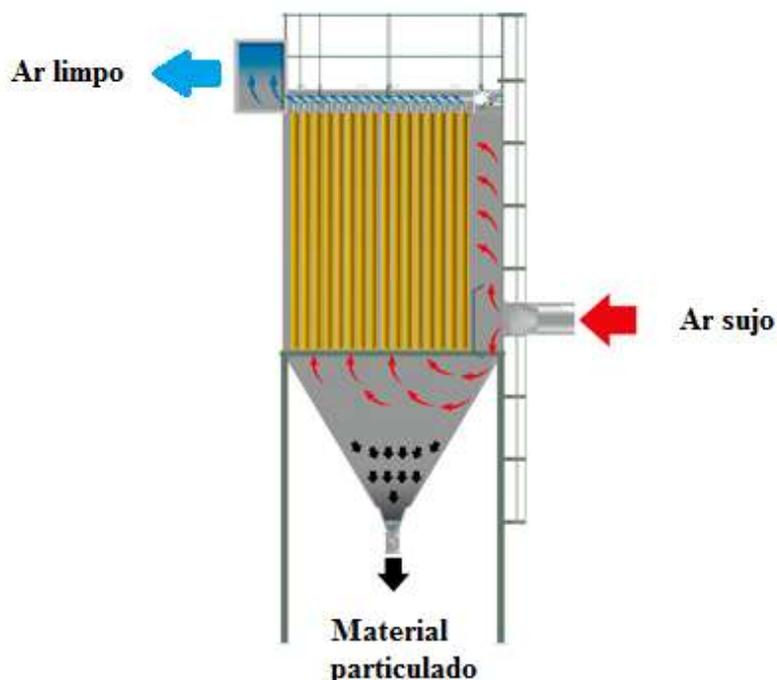
Entretanto existem algumas limitações no uso dos filtros de mangas para que ele opere adequadamente.

É necessário, então, que se opere a seco, utilizando na limpeza das mangas um jato de ar comprimido seco, pois a umidade dentro do filtro atrapalha a filtração.

A perda de carga do sistema tem que ser levada em consideração, uma vez que ela é responsável por monitorar a vida útil das mangas. Quando a perda de carga aumenta, um dos motivos é que pode haver uma ruptura em alguma das mangas dentro do filtro. A temperatura de operação não pode exceder, pois os tecidos das mangas não suportam temperaturas acima de 250°C, ou seja, altas temperaturas prejudicam a vida útil das mangas.

Na Figura 2.1, demonstra-se a estrutura de um filtro de mangas.

Figura 2.1. -Filtro de Mangas.



Fonte: BERNAUER, 2015.

O acompanhamento do desempenho de um filtro de mangas, geralmente, é feito por um medidor de pressão que possibilita a verificação do diferencial de pressão entre o compartimento sujo (entrada de gases) e o compartimento limpo (saída de gases). À medida que as mangas vão ficando sujas, o diferencial de pressão vai aumentando até valores pré-estabelecidos para cada tipo de filtro. Estes valores dão um referencial de estado do filtro, indicando a necessidade de trocar as mangas (VOTORANTIM, 2014).

Estes elementos filtrantes geralmente possuem formato de tubos que são fixos em estruturas denominadas gaiolas (estrutura metálicas que dão suporte ao filtro), como demonstrado na Figura 2.2. Estes filtros apresentam, na maioria das vezes grandes volumes de gás e de material particulado.

Eles são empregados para coleta de material particulado via seca, com altíssimas eficiências de retenção.

Na Figura 2.2 apresentam-se uma imagem do filtro de mangas da empresa Votorantin Cimentos S.A. visto de fora (a) e uma vista do interior do filtro(b). Este filtro, que anteriormente foi um filtro eletrostático, foi adaptado como filtro de mangas. Porém, devido a normas ambientais e segurança da empresa, esta optou pela troca do filtro eletrostático por um filtro de mangas.

Hoje este filtro opera em um moinho no processo de produção de cimento via seco, ele possui aproximadamente 12,5 m de altura contando com seu plenum, onde se tem a saída do ar limpo, uma área aproximada de 100 m². O filtro contém 1.760 mangas, cada uma possui 7 m de altura e 15,3 cm de diâmetro, e são constituídas de fibra de vidro. São elas que fazem a captura do material particulado liberado neste processo, operando a 150°C e a uma pressão de 135 mm H₂O. Utiliza-se 176 válvulas pneumáticas para a limpeza das mangas por pulso reverso.

Uma das desvantagens de um filtro de mangas se dá na necessidade de troca das mangas que, devido à grande dimensão do filtro de mangas e a grande quantidade de mangas, isso dificulta a troca das mangas, quando necessário. O processo de substituição é complicado, pois se dá somente nas paradas programadas da empresa ou quando se tem uma queda de pressão considerável, pois para a troca das mangas o processo de produção deve estar parado.

Figura 2.2 - Imagens de um filtro de mangas (a) vista de fora (b) vista do interior do filtro.

(a)

(b)



Fonte: Votorantim Cimentos S.A. 2014.

2.2. Meios Filtrantes de Tecidos

É de extrema importância conhecer o tipo de tecido utilizado na filtração. Os tecidos são classificados em trançados e não trançados e são constituídos por fios ou fibras.

Fios: A fiação transforma as fibras em fios, por um processo em que as mesmas são

torcidas em fios, sendo esse processo medido pelo número de volta por polegada. Quanto mais torcido o fio mais forte este será, até certo ponto limitante depois do qual tornam-se quebradiços e perdem sua elasticidade (DONOVAN, 1985).

Fibras: São as componentes básicas do fio. O fio pode ser confeccionado por materiais sintéticos ou naturais e ser constituído por fibras curtas que são denominadas fibras cortadas ou por filamentos, que é uma fibra contínua (CHEREMISINOFF e YOUNG, 1977).

Padronização: Apesar da existência de vários parâmetros de caracterização dos tecidos, a indústria têxtil padronizou sistemas mais convenientes, como o Tex e o Denier. O número Tex é definido pela massa em gramas de um quilômetro de fio. Multiplicando este valor por 9 obtém-se o número em Denier (CHEREMISINOFF e YOUNG, 1977).

2.2.1. Tecidos Trançados

Tecidos de feltro, ou chamados não trançados, incluem uma base de tecidos trançados. Estes tecidos são produzidos através dos entrelaçamentos das fibras que o compõem.

Os filtros de mangas no qual o gás flui de dentro das mangas para fora, usam tecidos trançados quase que exclusivamente, com sistema de limpeza por fluxo de ar reverso e vibração mecânica. Os filtros de tecido trançados oferecem baixa resistência ao fluxo de gás e seu acabamento macio confere boa característica de liberação da torta de filtração (TOGNETTI, 2007).

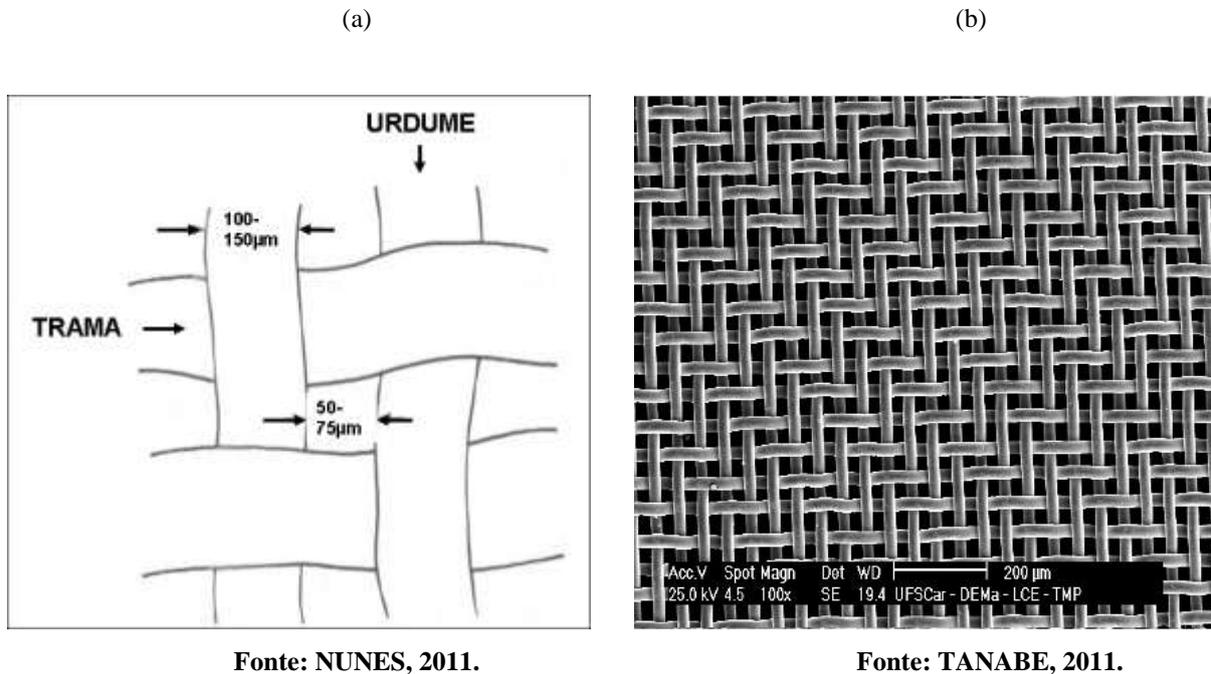
Segundo NUNES (2011), o conjunto de fios que percorre longitudinalmente em um plano e forma a estrutura fundamental do tecido trançado denomina-se urdume. Já o fio entrelaçado ao urdume corresponde à trama.

Os tecidos podem ser trançados de varias formas. O trançado plano é a mais simples, em que cada fio da trama é passado acima e abaixo do urdume.

Na Figura 2.3 é apresentada a estrutura do tecido plano (a) e a estrutura do tecido trançado (b) gerada no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Gramatura é a classificação dada para tecidos de um único grupo de fios, por ligamentos e pela resistência ao estouro da fibra (ABINT, 2012). A maioria das fibras trançadas apresenta baixa resistência ao fluxo do gás e são empregadas em sistemas que atuam a baixas vazões, como as operações de limpeza por fluxo de ar reverso ou por vibração mecânica (RODRIGUES, 2004; TANABE, 2011; CERON, 2012).

Figura 2. 3- Estrutura de um (a) tecido plano e (b) estrutura da superfície do tecido trançado gerado no MEV com ampliação de 100x.



2.2.2. Tecidos Não Trançados

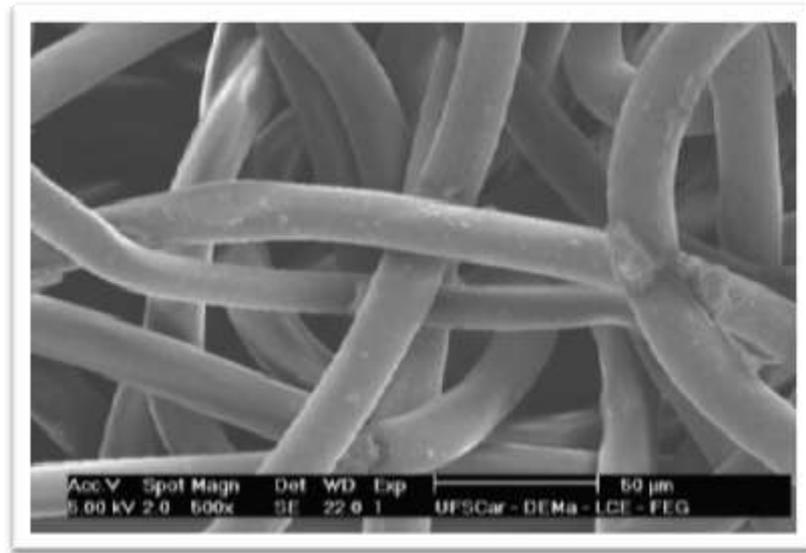
Os tecidos não trançados são muito aplicados em operações de filtração de gases para filtros de mangas em que a etapa de limpeza realiza-se por pulso de ar reverso, por apresentarem mais poros por unidade de área e exigirem alta energia na etapa de limpeza da torta de filtração (THEODORE e BUONICORE, 1988; TANABE, 2008; SALEEM *et al.*, 2011; CERON, 2012; CIRQUEIRA, 2013).

Tecidos não trançados apresentam tratamentos como a calandragem e o chamuscamento. O chamuscamento facilita o desprendimento das partículas através da queima das fibras superficiais, evitando que estas sejam incorporadas à torta de filtração (ABINT, 2012). Já a calandragem garante uma superfície mais lisa e uniforme, com menos fibras soltas e maior facilidade no desprendimento de partículas. Além disso, aumenta a densidade do tecido, evitando alterações dimensionais quando exposto a temperaturas elevadas (DONOVAN, 1985).

Segundo a norma NBR-13370, o tecido não trançado é uma estrutura plana, flexível e porosa, composta por uma manta de fibras ou filamentos, orientados direcionalmente ou ao acaso, consolidados por processo mecânico e/ou químico e/ou térmico e a combinação desses

processos (ABINT, 2012). Na Figura 2.4 é apresentada a estrutura da superfície de um tecido não trançado.

Figura 2. 4- Estrutura da superfície do tecido não trançado.



Fonte: CIRQUEIRA, 2013.

Um estudo realizado por Kyung (2008), com fibras de tecidos não trançados, demonstra a aplicação de cargas eletrostáticas em meios filtrantes, na filtração de gases. A eficiência de filtração de ar destes materiais não tecidos foram medidas durante 6 meses por um medidor de campo eletrostático TSI 8130, medindo as cargas residuais deste equipamento a uma distância de 25 mm. Os materiais utilizados no trabalho foram polipropileno e poliéster.

As fibras principais do material variam na escala de fios denier de 0,9 a 15 (~9,5 a ~40 μm , no caso do poliéster), estas fibras de poliéster são geralmente usadas para produzir meios filtrantes através de processos de deposição secos e úmidos. As fibras básicas em combinação com fibras bi componente têm obtido maior aceitação no mercado de filtros de ar. Para obter menores resistências fluido-dinâmicas nos filtros, é desejável que se tenha uma ampla faixa de diâmetros. Os diâmetros utilizados variam entre 0,1 e 9 micrômetros e entre 12 e 25 micrômetros.

O carregamento destes filtros deu-se através de carregamento corona com cargas de 42 kV. Observou-se uma oscilação deste valor para o tecido de polipropileno, não observado no meio filtrante de poliéster.

Os resultados obtidos por Kyung (2008) alcançaram uma eficiência melhor, quando comparada com o filtro sem carregamento eletrostático.

Para o filtro de poliéster a eficiência dobrou em relação ao filtro não carregado. Entretanto, a eficiência caiu drasticamente após uma hora e os ganhos de eficiência zeraram completamente após 3 dias. Com a aplicação eletrostática os diferenciais de pressão não se alteraram. Já para o filtro de polipropileno a eficiência quase triplicou em relação ao filtro sem carregamento corona, e houve uma queda de 7% a 10% após o período de um dia, durante os 6 meses de monitoramento o diferencial de pressão se manteve constante.

É discutível a eficiência do carregamento eletrostático em meios filtrantes do tipo não tecidos para filtros de ar, com os resultados supracitados têm-se um processo para se investigar. Neste trabalho não se especificou o aerossol utilizado, e nem o efeito causado na queda de pressão, se esta foi afetada ou não.

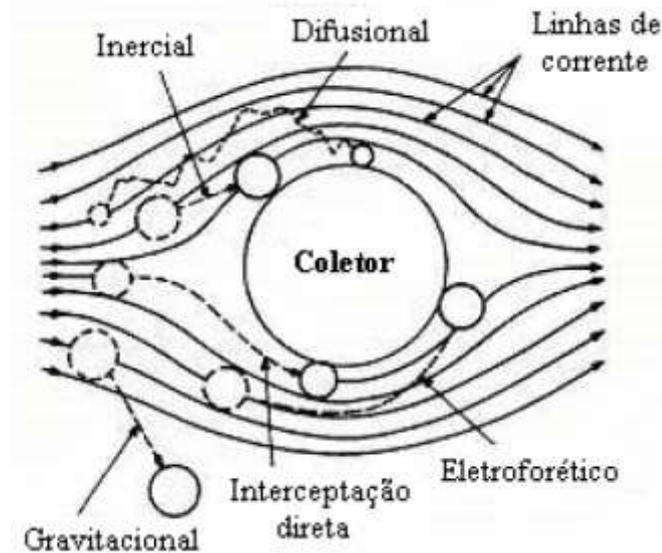
2.3. Mecanismo de Captura do Material Particulado

No início da filtração as partículas penetram nos meios filtrantes e depositam-se nas fibras dos tecidos.

Existem cinco mecanismos básicos para deposição de partículas no meio filtrante: interceptação direta, impactação inercial, difusão, sedimentação gravitacional e ação eletrostática. Estes mecanismos formam um conjunto de tipos de deposição sobre um filtro de ar (HINDS, 1998) e são importantes para as primeiras etapas da filtração (MATESON e ORR, 1987). Eles estão descritos a seguir.

Interceptação direta: Ocorre quando uma partícula segue o fluxo de gás penetrando nas fibras dos tecidos. Estas partículas são capturadas, devido ao seu raio ser significativamente maior que o espaçamento entre as fibras. Na interceptação direta, como mostra a Figura 2.5, as partículas seguem o fluxo da linha original (KIM et al, 2000).

Figura 2. 5- Mecanismo físicos de coleta.



Fonte: RODRIGUES, 2005.

Difusão ou movimento Browniano: Ocorre predominantemente em partículas submicrônicas em baixas velocidades de filtração. As linhas de corrente não coincidem com a trajetória das partículas, pelo fato destas serem pequenas, com o diâmetro menor que $1\mu\text{m}$ e influenciarem no movimento Browniano (CLIFT ET AL, 1978).

Impactação Inercial: De acordo com DULLIEN, 1989, as partículas são projetadas de suas linhas de corrente originais por ação inercial e se chocam com o corpo coletor, podendo ou não se depositar em sua superfície.

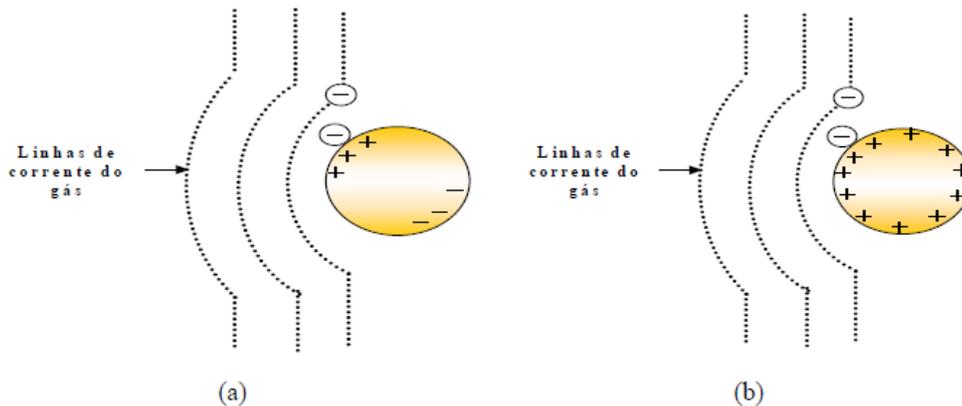
Gravidade ou Sedimentação: A partícula desvia da sua trajetória normal, devido ao efeito da gravidade, este mecanismo é dominante em filtrações com baixas velocidades de gás e grandes partículas (HINDS, 1998).

Forças Eletrostáticas: São vistas principalmente em precipitadores eletrostáticos, formando um campo elétrico externo, devido à presença de cargas elétricas nos meios filtrantes. O aumento da carga das partículas e fibras aumenta a eficiência de recolhimento de partículas pelo tecido (HINDS, 1998).

Na Figura 2.6 estão apresentados os mecanismos de coleta por forças eletrostáticas. Os principais mecanismos em que se dá a coleta são a atração entre as partículas carregadas e coletor carregado, com carga oposta, (Coulômbico) e a atração entre partículas carregada e

dipolo induzido do coletor globalmente neutro (Dipolo-Imagem) (AGUIAR, 1991; TANABE, 2008).

Figura 2. 6- Mecanismo de coleta eletrostática: (a) Coulômbico e (b) Dipolo Imagem.



Fonte: TANABE, 2008.

2.4 Teoria da Filtração

A filtração de gases consiste em um fluído contendo material particulado que passa por um meio filtrante (tecido ou não tecido), aonde as partículas vão se depositando e aderindo à sua superfície, permitindo somente a passagem dos gases (SVAROVSKY, 1981).

Um aspecto característico da filtração é a grande variedade de equipamentos disponíveis para a separação das partículas sólidas do fluido. A diversidade de produtos para este fim é resultado direto da grande variedade de problemas apresentados nesta área, sendo vasta a gama de concentrações de partículas a serem coletadas e suas propriedades físico químicas. Com base nestas propriedades da operação de filtração, das características da suspensão e das características das partículas a serem coletadas, pode-se racionalizar os métodos de separação utilizados, sendo basicamente três os tipos de arranjos de alvos coletores na filtração de gases:

- fibras individuais emaranhadas frouxamente dentro de um enchimento;
- material granular em leito fixo ou fluidizado;
- fibras, tecidas ou feltradas, dentro de uma estrutura, sendo utilizada no formato cilíndrico.

Todos estes filtros possuem altos valores de eficiência de coleta com aceitáveis valores de tempo de limpeza e queda de pressão. A principal limitação para a escolha do filtro está relacionada

com o material constituinte do meio filtrante, sendo necessário baixo custo e prolonga a vida útil sob as condições de operação a que será submetido.

Um filtro, para ter bom funcionamento, deve apresentar as seguintes características (CAVASSENO, 1980):

- ser suficientemente poroso para permitir uma satisfatória vazão de ar a uma queda de pressão compatível com o processo;
- resistir às forças de tensão causadas pela pressão diferencial, ao ataque e à ação química entre as fibras e o material filtrado e às altas temperaturas da exaustão de gases.
- apresentar uma textura de superfície que favoreça uma rápida liberação da torta durante a limpeza.

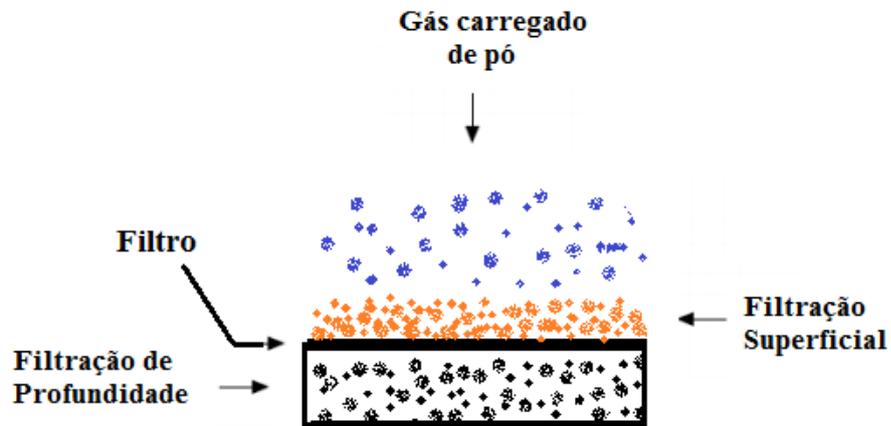
Dentre os diversos equipamentos utilizados na separação gás-sólido os filtros de mangas são um dos mais utilizados devido a sua alta eficiência para amplas faixas de granulometria e sua operação a seco. Além disso, são facilmente operados, apresentam simples manutenção e possuem a capacidade de operar com altas cargas de pó e grandes volumes de gás (THEODORE E BUONICORE, 1998).

2.4.1. Formação da Torta de Filtração

O processo de formação das tortas de filtração acontece em três estágios distintos nos ciclos de filtração, sendo eles: filtração de profundidade, etapa de transição e filtração superficial com distribuição uniforme da torta (KANAOKA et al., 2006).

No primeiro estágio da formação da torta de filtração, denominada filtração de profundidade, para um filtro virgem, as partículas de pó penetram intensamente no filtro e permanecem retidas nos interstícios das fibras. Esse estágio só ocorre na superfície limpa ou após a limpeza do filtro, até que a carga de pó estabelecida seja completamente retida ou acumulada na superfície do não tecido. Assim, a intensidade de penetração das partículas tende a diminuir em função do tempo de filtração e aumentar a eficiência de coleta das partículas e, conseqüentemente, a queda de pressão. Ao atingir o valor da queda de pressão máxima pré-estabelecido, têm-se a necessidade de fazer a limpeza do meio filtrante (WALSH, 1996). A Figura 2.7 apresenta a etapa de filtração em profundidade e superficial.

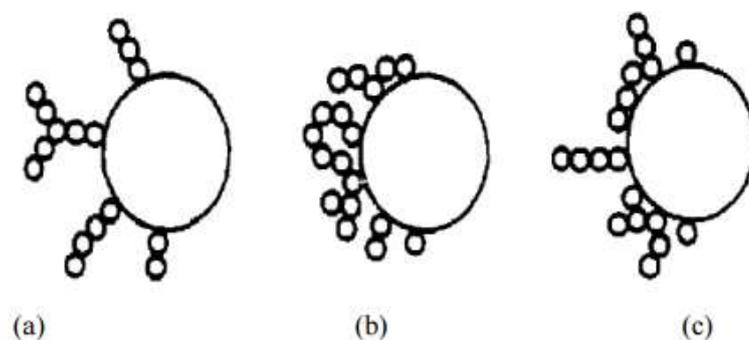
Figura 2. 7-Filtração de profundidade e superficial.



Fonte: Acervo pessoal.

À medida que ocorre a filtração, percebe-se uma aglomeração de partículas no interior do tecido, formando os chamados dendritos (WASH ET AL, 1996). Estes dendritos serão os novos meios de coleta das partículas, isto ocorre na etapa de transição. Segundo BERGMAN et al.,1981, a aglomeração dessas partículas ou o entupimento do tecido por partículas (modelo combinado) ocorre em três estágios de deposição, conforme visualizado na Figura 2.8.

Figura 2. 8- (a) modelo dendrito, (b) modelo aumentando a fibra, (c) modelo combinado.

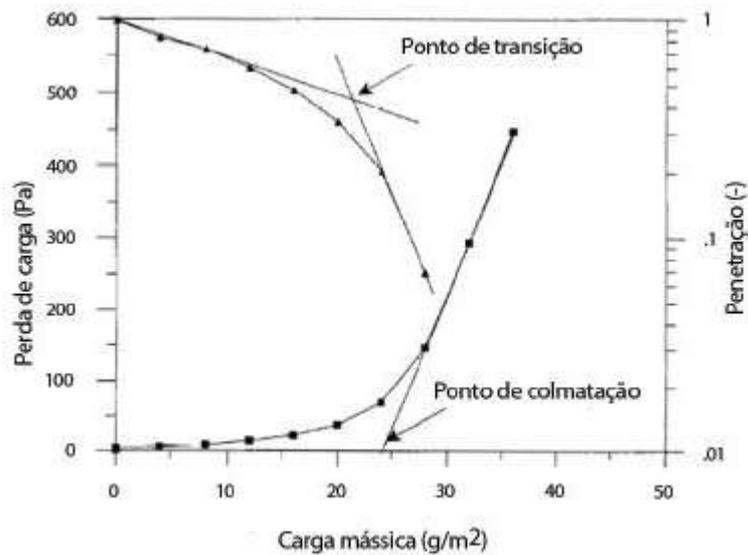


Fonte: Bergman et al., 1984.

O início da formação da torta de filtração é demarcado através de um valor experimental linear, que estabelece o ponto em que a torta se forma. (WASH,1996). Esse ponto é denominado de ponto de colmatação que é representado na Figura 2.9. Ele consiste no lugar geométrico

obtido para o cruzamento da assíntota da curva com o eixo das abscissas em que é obtida a massa de pó necessária, g/m^2 , para a formação da torta.

Figura 2. 9-Ponto de colmatação do não tecido (WALSH et al., 1996).



Fonte: WALSH et al., 1996.

Após a formação da torta de filtração tem-se a última etapa, denominada de filtração superficial, em que o não tecido atua como suporte para a torta de filtração, isso devido às fibras do não tecido ficar saturado. A torta é que desempenha o principal meio como coletor de partículas, sendo possível a captura das partículas mais finas presentes na corrente de gás, aumentando a eficiência do processo de filtração.

2.4.2. Perda de Carga na Filtração

A perda de carga ou queda de pressão descreve a resistência do filtro. Com ela verifica-se a eficiência do meio filtrante, pois à medida que as partículas se aderem ao filtro a queda de pressão aumenta, e aumenta a necessidade de limpeza dos meios filtrantes.

A diferença entre a pressão de entrada no filtro e a pressão de saída que atravessa o filtro é a queda de pressão total (ΔP_T) no filtro. Ela também pode ser definida pela somatória das pressões:

$$\Delta P_T = \Delta P_M + \Delta P_C \quad (2.1)$$

Em que ΔP_M é a queda de pressão no meio filtrante e ΔP_C é a queda de pressão da torta de filtração.

Como a perda de carga através da torta é dependente da velocidade superficial do gás de filtração (V) e W é a massa depositada por unidade de área, têm-se as Equações:

$$\Delta P_T = K_m V + K_c V W \quad (2.2)$$

Em que K_M é a resistência específica do meio filtrante; K_C é a resistência específica da torta; e ΔP_T é uma função linear da velocidade.

Se os membros da Equação 2.2 forem divididos por V , tem-se a Equação 2.3:

$$\frac{\Delta P_T}{V} = (K_M + K_C W) = S \quad (2.3)$$

Em que a razão $\frac{\Delta P}{V} = S$, é conhecida como arraste.

O arraste efetivo (S) pode ser definido como a resistência do filtro, ou seja, a perda de carga por unidade de velocidade de filtração.

2.4.3. Permeabilidade

A permeabilidade é a propriedade de um meio poroso que indica a maior ou menor facilidade à passagem do fluido através de seus poros ou vazios. Idealmente, o filtro deveria remover o máximo de impurezas com a mínima resistência ao fluido de arraste. Isso pode ocorrer aumentando o volume de vazios na estrutura ou o tamanho da passagem do fluido. Nas aplicações de filtração, baixas permeabilidades implicam em baixas taxas de filtração, o que não é economicamente vantajoso para o processo. No entanto, estruturas com baixa permeabilidade podem ser requeridas como prevenção à penetração de agentes indesejados que deterioram o material (INNOCENTINI et al, 1999).

As equações de Darcy (2.4) e de Forchheimer (2.5) são tradicionalmente utilizadas para avaliar o escoamento de fluidos em meios porosos, ambas relacionam os valores de perda de carga com a velocidade superficial.

Considerando, o escoamento de um fluido incompressível viscoso, pode-se aplicar a equação de Darcy (para fluidos à baixas velocidades):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K_1} V \quad (2.4)$$

Sendo que, ΔP é a queda de pressão na direção do escoamento; μ é a viscosidade do fluido; L é a espessura do filtro; K_1 é a constante de permeabilidade Darciana.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K_1} V_S + \frac{\rho}{K_2} V^2 \quad (2.5)$$

O termo $\frac{\mu}{K_1} V$ representa os efeitos viscosos, enquanto $\frac{\rho}{K_2} V^2$ representa os efeitos cinéticos ou inerciais.

Innocentini et al (1999), estudando a equação de Forchheimer, verificou que esta equação é amplamente aplicada a uma larga faixa de velocidades e para muitos meios porosos.

Se a torta for considerada incompressível, com permeabilidade e porosidade constantes, e se a densidade da partícula de pó (ρ_p) e a porosidade da torta (ϵ) forem conhecidas (AGUIAR, 1991) ela pode ser calculada pela massa de pó depositada por unidade de área (W), através da equação:

$$W = \rho_p (1 - \epsilon) L \quad (2.6)$$

Em que L é a espessura da torta.

2.4.4. Resistência Específica da Torta (K_2)

Normalmente, a resistência específica da torta é assumida constante, por depender da porosidade. E, como a porosidade é um parâmetro muitas vezes desconhecido teoricamente e as equações para estimar a resistência específica da torta são pouco utilizadas, na maioria das vezes utilizam-se valores experimentais (SILVA *et al.*, 1999).

Algumas expressões para determinar a resistência específica da torta K_C podem ser encontradas na literatura, onde se destacam a equação de Kozeny-Carmam e a equação de Rudnick-Happel. Onde a resistência específica da torta foi chamada de R .

Equação de Kozeny-Carmam

A relação de Kozeny-Carmam é usualmente utilizada para descrever a queda de pressão através de um depósito de pó (DONAVAN,1985; LEITH&ALLEN,1986).

Assumindo que o meio poroso pudesse ser representado por capilares, cuja superfície se iguala àquela das partículas que compõem o meio, e fixando o volume capilar igual os volumes de vazios do meio tem-se:

$$R = \frac{2 \cdot K_{cK} \cdot (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (2.7)$$

Em que K_{cK} é uma constante empírica, igual a 4,8 para esferas e 5,0 para formatos irregulares.

Equação de Rudnick-Hapell

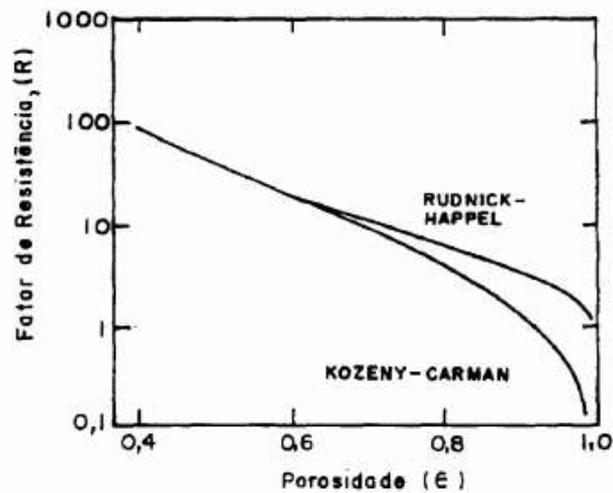
Foi determinada utilizando considerações de um modelo de célula de superfície livre que tornavam a equação de Navier-Stokes passível de solução exata. Assumindo-se os termos inerciais desprezíveis, tem-se:

$$R = \frac{3+2(1-\varepsilon)^{5/3}}{3-4,5(1-\varepsilon)^{1/3}+4,5(1-\varepsilon)^{5/3}-3(1-\varepsilon)^2} \quad (2.8)$$

Esta equação não contém constantes empíricas, sendo R função somente da porosidade.

Na Figura 2.10 apresenta-se a concordância das relações de Rudnick-Hapell e Kozeny-Carmam, para baixos valores de porosidade, menores que 0,6.

Figura 2. 10- Fator de resistência R versus porosidade para modelos de Kozeny-Carmam e Rudnick-Happel para resistência de meios porosos.



Fonte: LEITH&ALLEN,1986.

Determinação experimental da resistência específica da torta

A resistência específica depende do material e da porosidade do filtro, que por sua vez depende de alguns parâmetros como velocidade de filtração, umidade e propriedades do pó (SILVA ET AL, 1999).

Deste modo pode-se obter a resistência específica da torta experimentalmente pelo aumento da queda de pressão no meio filtrante através do acúmulo de material particulado no meio filtrante (LEITH e ALLEN, 1986), como mostra a Equação (2.9):

$$K_{2 \text{ EXPERIMENTAL}} = \frac{A}{V_F} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta M} \quad (2.9)$$

Em que:

K_2 : resistência específica da torta (s-1);

A: área de filtração (m²);

V_F : velocidade de filtração (m/s);

ΔP : queda de pressão nos pontos 1 e 2 da parte linear da curva de filtração (Pa);

ΔM : massa acumulada por unidade de área nos pontos 1 e 2 (Kg/m²).

2.4.5. Porosidade

A porosidade do meio filtrante é um parâmetro fundamental de operação de filtração ela mede a quantidade de espaços vazios no meio filtrante e tem grande importância na escolha do mesmo. Também vale destacar que quanto maior a porosidade do meio filtrante, maior é a quantidade de partículas que podem se depositar no seu interior (TANABE, 2011).

Das correlações existentes na literatura, a Equação de Ergun (1952) é uma das mais utilizadas na determinação da porosidade dos meios filtrantes (FARGNOLI, 2010). Esta é apresentada a seguir:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 (1-\varepsilon)^2 \mu V_F}{\varepsilon^3 d_P^2} + \frac{1,75 (1-\varepsilon) \rho_g V_F^2}{\varepsilon^3 d_P} \quad (2.10)$$

Sendo que nesta equação:

d_P : é o diâmetro médio das partículas;

ρ_g : é a densidade do gás;

μ : viscosidade do gás;

ε : é a porosidade do meio poroso;

V_F : é a velocidade de filtração;

L : é a espessura da camada porosa.

Existem dois métodos utilizados na determinação da porosidade da torta de filtração, o método direto e o método indireto. O método indireto consiste na utilização de equações encontradas na literatura, como a Equação de Ergun. O método direto consiste no uso de imagens da torta filtrante para obtenção da porosidade (AGUIAR e COURY, 1996).

A Equação Clássica de Ergun (1952) é utilizada para estimar a porosidade de um escoamento de fluido, utilizando a queda de pressão em um leito poroso, como mostrado na Equação (2.10). Isto é possível quando conhecidas a queda de pressão e a espessura da torta de filtração.

A espessura da torta de filtração pode ser determinada por:

$$M = Q.t = LA. \rho_P (1 - \varepsilon) \quad (2.11)$$

Em que:

M : massa da torta;

Q : vazão mássica de pó;

A : área superficial da torta de filtração;

ρ_P : densidade de partículas;

t : tempo de filtração.

Rearranjando a equação 2.11 chega-se a equação:

$$L = \frac{Qt}{A \cdot \rho_P (1-\varepsilon)} \quad (2.12)$$

Isolando-se a espessura da torta de filtração na Equação (2.12) e substituindo na Equação (2.10) tem-se a Equação de Ergun Modificada (2.13):

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{150 (1-\varepsilon) Q \mu V_F}{A \rho_P \varepsilon^3 d_P^2} + \frac{1,75 Q P_g V_F^2}{A \rho_P \varepsilon^3 d_P} \quad (2.13)$$

A Equação (2.13) permite estimar a porosidade da torta de filtração a partir dos dados de ΔP em função do t , medidos experimentalmente (SILVA *et al.*, 1999).

Rodrigues (2006), por exemplo, observou o acúmulo de partículas nas camadas superiores do tecido e a diminuição das partículas com a profundidade. Esta observação foi possível por meio da utilização do procedimento desenvolvido por Aguiar (1995). Este procedimento também permitiu verificar que o aumento do diâmetro de partículas resultou em maior profundidade de penetração e maior massa retida.

2.5. Cargas Eletrostáticas na Filtração

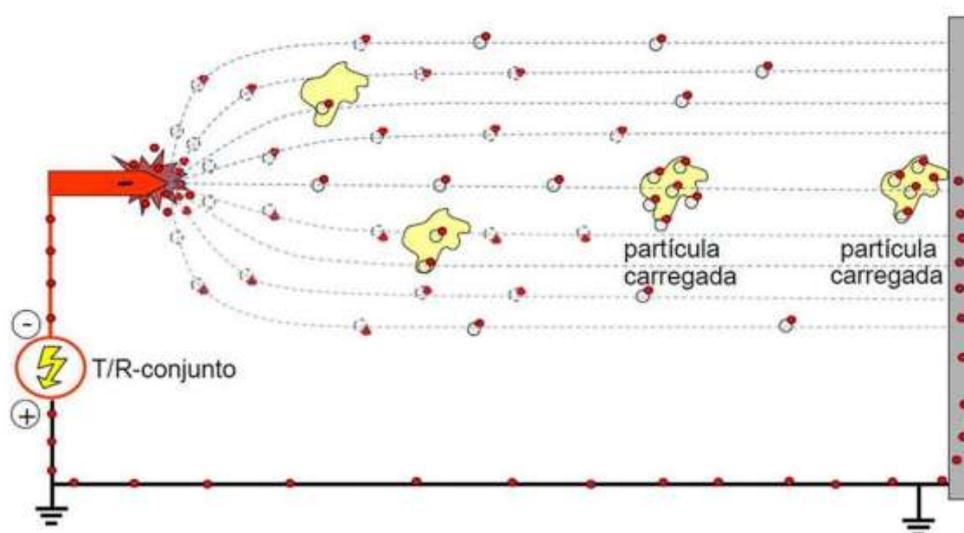
As cargas das partículas podem ocorrer espontaneamente por atrito ou choque (triboeletrificação ou impacto) das partículas, inerentes ao processo de filtração, ou podem ser deliberadamente introduzidas, por exemplo, por corrente corona (MEIRA, 2009).

O carregamento por corrente corona decorre em duas etapas. Na primeira, ocorre o

processo de ionização do gás e, na segunda, o carregamento das partículas.

Na ionização, ocorre uma grande produção de íons em fase gasosa por meio de um campo elétrico de alta intensidade obtido através do uso de altos potenciais aplicados a um eletrodo de descarga (RODRIGUES, 2005). Dessa forma, a ionização decorre da retirada de elétrons das moléculas neutras de gás por meio de impacto com elétrons livres movidos pelo campo elétrico. Na corona negativa os íons positivos se movem em direção ao eletrodo de descarga, como mostra a Figura 2.11.

Figura 2. 11- Ionização de partículas sólidas.



Fonte: Klaus Essen, 2011.

Com a eficiência dos filtros eletrostáticos na filtração de gases, pesquisadores enxergaram uma nova linha de pesquisa para utilização destas cargas eletrostáticas em outros processos, podendo assim realizar experimentos para testes de otimização da filtração já existente.

Ao longo destes anos vem-se estudando diversas maneiras de melhoria na filtração, aplicando cargas eletrostáticas em meios filtrantes de tecidos, aerossóis, fluxo de ar, etc.

Em 1988 Brown et al, realizou estudos sobre filtros respiratórios, e chegou à conclusão que o uso de filtros de respiradores mecânicos de alta eficiência tinha um potencial perigoso, visto que, em determinado momento as fibras poderiam se soltar do filtro. Naquela época já se acreditava no desempenho do carregamento eletrostático em filtros de tecidos, pois em seus testes, o campo elétrico interno das fibras aumentava a eficiência de filtração sem causar

qualquer resistência ao fluxo de ar. Porém notou-se uma pequena deterioração quando estes filtros foram expostos a aerossóis. Foram realizados testes com vários aerossóis industriais. Inicialmente a eficiência diminuiu com o aumento da carga de aerossóis, mas com cargas mais elevadas o entupimento pode ser compensado, causando uma resistência do filtro. Os autores sugeriram ser possível estimar o desempenho do filtro em laboratório.

A quantidade de carga, o tamanho médio das partículas e o material, afetam significativamente o desempenho de meios filtrantes de eletreto (filtro fibroso de eletreto compreendendo fibras de poliolefina para remover material em partículas de um fluido gasoso) com partículas submicrônicas, (JI et al, 2003).

Fyeld (1988) realizou experimentos para verificação do mecanismo de coleta de partículas com 0,5 micras em meios filtrantes de eletreto, para determinação do efeito da carga de partículas na penetração do filtro. Medindo a penetração através de um contador de partículas ótico, utilizaram como material particulado o poliestireno, carregado e não carregado. A penetração de partículas carregadas foi significativamente menor que as partículas descarregadas. Os autores concluíram que a eletroforese desempenhou um papel dominante na retenção de partículas carregadas.

2.6. Partículas de Cimento

O cimento é um aglomerante hidráulico constituído basicamente de óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro que quando misturados com água (em certas proporções) endurece, (PAIVA et al, 2010).

O processo de produção do cimento se dá através da mineração do calcário. Após a retirada do calcário das minas, este material passa por uma homogeneização, sendo armazenado em pátios. Nesta fase são feitos testes de laboratório para certificar a composição do material.

A composição química do calcário é constituída de cálcio, silício, ferro e alumínio, e ainda nas indústrias são colocados alguns aditivos nesta segunda fase, onde o calcário é moído em um moinho de farinha, com argila.

A qualidade do cimento se dá devido à mistura de alguns elementos essenciais como argila, ferro e alumínio.

Após o moinho, o material particulado se encontra em uma fase muito fina. Por isso é conhecido como farinha. Este material particulado possui baixa granulométrica, necessitando de um filtro para reter as partículas suspensas no ar, durante o processo, uma vez que estas são a

matéria prima da produção.

A farinha é estocada em silos especiais e enviada ao forno rotativo, chegando a atingir no interior do forno 1.450°C. A partir disto produz-se o clínquer.

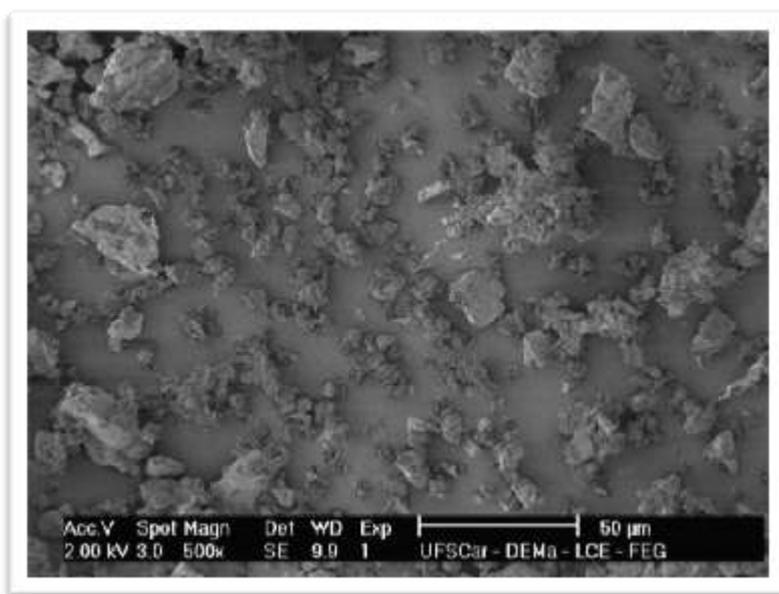
O clínquer é resfriado para temperaturas menores que 200°C. Com o auxílio de um filtro instalado nos fornos, o gás liberado no processo atinge a atmosfera sem poluentes.

O material é levado para o armazenamento com outras matérias-primas que compõem o cimento: gesso, calcário e pozolana ou escória. O tempo de cura (secagem) do cimento é ligado diretamente ao gesso incluído no processo.

Todo o material é transferido para o moinho de cimento, onde todos os componentes são moídos até atingirem a granulometria ideal, resultando em cimento de alta qualidade. Após sua moagem, o cimento é estocado em silos até ser ensacado e segue para a expedição para ser comercializado (VOTORANTIM CIMENTOS S.A.,2014).

Na Figura 2.12 está apresentada a imagem do cimento ampliada 500 x obtida por um microscópio eletrônico de varredura.

Figura 2. 12- Imagem do Cimento ampliado 500x gerada em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).



Fonte: Acervo pessoal.

Assim para conter a emissão do material particulado no ar, tem-se como alternativa a filtração de gases. Por isso as indústrias de diferentes seguimentos necessitam de conhecimentos sobre os meios filtrantes e como eles se comportam durante a separação gás-sólido dos processos, pois na maioria dos casos o material particulado é a matéria prima da empresa, que

não pode ser perdida durante o processo de produção.

2.7. Comparação dos Filtros Eletrostáticos com os Filtros de Mangas

De acordo com dados apresentados por PEREIRA (2014), foi analisado e comparado dois tipos de filtros: filtros de mangas e filtro eletrostático, em uma indústria cimenteira.

O diâmetro médio do material particulado utilizado no trabalho é aproximadamente 50 μm , sua densidade é 1,13 g/cm^3 . Este material particulado é o cimento, proveniente dos gases exauridos dos fornos e lavados pela torre de arrefecimento.

Com o auxílio de um Opacímetro DUSTHUNTER SB, Pereira (2014) obteve a leitura da quantidade de pó que estava sendo eliminada pela chaminé, que tem a funcionalidade de medir a concentração de pó no gás através de feixe de luz reversa. Os dados foram coletados e enviados a um Software, o PI Processbook, os valores vistos no comando central são armazenados como valores históricos para análises futuras.

Os dados apresentados foram coletados entre 2011 e 2013, a partir da linha de processos: moagem de cru, com produção nominal de 110 ton/h, forno de clínquer, com produção nominal de 115 ton/h. Constituído por um sistema de despoejamento que continha um filtro eletrostático de 5.184 m^2 , um conjunto de 738 placas coletoras cada placa com 34,2 m^2 cada, ionizadas com 2160 eletrodos, que teve sua operação até junho de 2012, depois desta foi instalado o filtro de mangas com a mesma área do filtro elétrico, porém substituído as placas por mangas num total de 1760 mangas, com um comprimento de 7 metros e 152 milímetros de diâmetro.

Embora o filtro de mangas tenha apresentado um consumo de energia 15% maior em comparação ao filtro eletrostático, o mesmo apresenta uma maior eficiência no controle de emissão de particulados em fornos de Clínquer, pois o filtro de mangas não sofre desligamentos e independente das variações sofridas pelo processo o mesmo mantém sua eficiência.

Os dados coletados neste estudo estão apresentados na Tabela 1, comparando os filtros de mangas com o filtro eletrostático, apresentando vários parâmetros de estudos como: velocidade, vazão, opacidade, eficiência e consumo de energia.

Tabela 1 - Valores de medição para eficiência do filtro elétrico.

		FILTRO ELETROSTÁTICO		FILTRO DE MANGAS	
		01/09/2011	01/04/2012	01/12/2012	01/08/2013
VARIÁVEIS		UNIDADE		UNIDADE	
Velocidade no Ponto de Medição	m/s	22,81	17,23	20,74	17,48
Vazão Mássica Total do Gás Chaminé	Kg/s	101,01	79,59	97,66	85,56
Vazão Mássica Total do Gás Chaminé	Kg/h	363.622,22	286.523,71	351.559,0	307.999,9
Vazão Volumétrica Total do Gás Chaminé	m ³ /s	129,36	97,68	117,61	101,94
Vazão Volumétrica Total do Gás Chaminé	m ³ /h	465.702,61	351.651,95	423.385,5	366.997,4
Vazão Volumétrica Total do Gás Chaminé	Nm ³ /h	284.348,12	219.256,28	265.873,8	231.895,4
Opacidade	mg/N m³	75,64	31,22	6,07	1,52
Vazão de pó na Saída	Kg/h	21,51	6,85	1,61	0,35
Vazão Mássica na entrada	%	9,60	9,17	9,32	11,00
Alimentação	ton/h	115,00	115,00	115,00	115,00
Vazão de pó na entrada	Kg/h	11.040,00	10.545,50	10.718,00	12.650,00
Eficiência	%	99,81	99,94	99,985	99,997
Consumo de energia	Média Kvh/T	37,4	39,54	44,41	43,18

Fonte: Votorantim (2014).

2.8. Pesquisas relacionadas

A seguir serão apresentados os principais trabalhos relacionados à filtração de gases com aplicação de cargas eletrostáticas em meios filtrantes e em partículas.

Segundo Rodrigues (2005), estudos sobre efeitos das cargas eletrostáticas em leitos granulares são menos frequentes que os desenvolvidos em leitos fibrosos. Os estudos experimentais sobre cargas eletrostáticas nos coletores de filtros granular são desenvolvidos em leitos fluidizados, porque partículas de matérias dielétricos, fluidizados por um fluxo de ar com baixa umidade, carregam naturalmente por triboeletrificação.

Ji et al (2003) estudou o desempenho do carregamento de partículas em filtros de tecidos de eletreto. Foram testados meios filtrantes utilizados na fabricação de filtros de ar de cabines, através da aplicação de dois estados de carregamento diferentes para as partículas testadas pulverização, por meio de eletrificação do processo de atomização e por ionização

bipolar utilizando um neutralizador de aerossol. Partículas sólidas com 0,1% ou 1% de NaCl ou sebacato dicotyl líquido (DOS), foram geradas por atomização e carregados no suporte do filtro. O equipamento continha um pré-filtro e um filtro principal de tecido de poliéster e outro de micro eletrodo de policarbonato respectivamente. O filtro de poliéster apoiou o filtro principal durante os experimentos. Os resultados verificados no trabalho foram que partículas altamente carregadas são retidas com mais eficiência pelos filtros elétricos em regimes transitórios. As partículas maiores que passam através do meio filtrante são removidas com mais facilidade, as partículas líquidas tiveram uma eficiência muito menor que as partículas sólidas. O rendimento global para partículas altamente carregadas foi ligeiramente superior aos outros.

RODRIGUES (2005) com seus estudos sobre a determinação da carga eletrostática em aerossóis e seu efeito na filtração de gases, concluiu que para partículas de rocha fosfática, com diâmetros médios entre 2,1 e 5,8 μm , houve uma menor queda de pressão para partículas não eletrizadas, ele realizou ensaios variando as tensões entre -3; -6; -9 e -15. Foi observado também que para partículas com diâmetros maiores a penetração delas no meio filtrante diminuiu em relação aos ensaios com partículas menores. Em relação ao trabalho que será apresentado a varias modificações entre elas o material particulado, o meio filtrante e os valores de tensões aplicadas, principalmente o objetivo que será verificar a reação das partículas carregadas na torta de filtração.

FENARA et al(2011) verificou o efeito do nível de cargas presentes nas partículas, geradas por carregamento corona, na eficiência de coleta e na perda de carga em filtros de polipropileno, poliéster, acrílico e celulose. Foi investigada a polaridade, o nível de carga nas partículas, o tamanho e a concentração das partículas, além de se medir a perda de carga no filtro durante a filtração. Os resultados e conclusões que Fenara (2011) chegou com este estudo foram que a penetração de partículas no filtro de celulose foi inferior a 2,5%, o que mostra a alta eficiência desse meio filtrante, tornando inviável o estudo do efeito eletrostático nesse tipo de filtro. Portanto, no estudo do efeito eletrostático somente foram avaliados experimentalmente o comportamento dos filtros de acrílico, polipropileno e poliéster tratado. Foi utilizada uma carga de -3kV para o desenvolvimento dos experimentos em função de que na utilização de cargas de magnitude mais elevada (-6 e -9kV), o carregador corona atuava como um precipitador eletrostático, onde as partículas carregadas se depositavam nas paredes das tubulações antes de serem coletadas pelo contador de partículas interferindo nos resultados experimentais.

REIS (2014) estudou o comportamento da torta de filtração com a adição do carregador corona na filtração de gases, utilizando partículas de rocha fosfática com diâmetro médio entre 6,5 e 44 μm , e meio filtrante de polipropileno. Mesmo após diversos ensaios, um comportamento

exato e reprodutível não foi alcançado quando aplicadas as tensões estudadas de -0,5 a -3 kV. Porém ela observou uma diminuição na perda de carga geral nos ensaios. A quantificação desse comportamento foi dificultada devido a não reprodutibilidade dos dados. Acredita-se que os motivos para isso podem ter sido a variação na distribuição granulométrica do pó, pois se constatou que o diâmetro médio das partículas não foi uniforme ao longo de todos os ensaios.

Com base nestes estudos o trabalho proposto visa à melhoria na filtração de gases utilizando um carregador corona, com intuito de carregar as partículas de cimento antes da filtração, em filtros de mangas, com tecidos de fibra de vidro e polipropileno. Simulando em escala piloto a filtração real que ocorre em uma indústria.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão relacionados os detalhes referentes aos equipamentos, materiais e métodos que foram utilizados nos procedimentos experimentais deste trabalho.

3.1. Equipamentos

Serão descritos a seguir os principais equipamentos utilizados nos procedimentos experimentais.

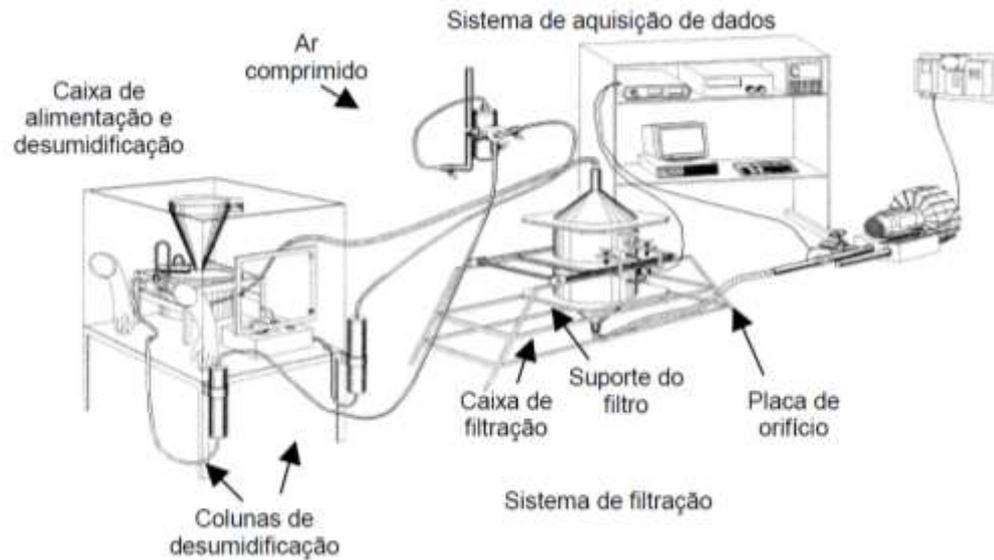
3.1.1. Equipamentos utilizados para filtração

O equipamento utilizado nos ensaios de filtração possui uma caixa de filtração, um alimentador de pó, um soprador, dois micro manômetros digitais e um sistema de controle.

Para controle de umidade, o ar comprimido era forçado a passar por dois desumidificadores contendo sílica gel antes de entrar em contato com pó, para sugá-lo e conduzi-lo para a caixa de filtração, onde a torta era formada.

Foi instalado um transdutor para controle de rotação do soprador, garantindo assim uma velocidade de filtração constante durante os ensaios realizados. A Figura 3.1 mostra um desenho do equipamento de filtração utilizado neste trabalho. Os ensaios experimentais de filtração foram realizados com e sem carga eletrostática. O equipamento que foi utilizado para obter os dados de filtração pertence ao Laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

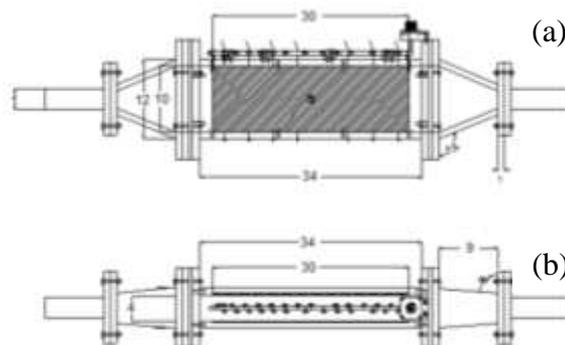
Figura 3. 1- Esquema geral do equipamento de filtração.



Fonte: Tanabe, 2008.

Esta unidade experimental foi adaptada para receber o carregador corona, demonstrado na Figura 3.2, entre a caixa de alimentação e a caixa de filtração.

Figura 3. 2- Sistema de carregamento corona com unidade das medidas em cm. (a) Vista frontal, onde a região hachurada representa a placa de cobre (eletrodo de coleta). (b) Vista superior, no centro encontra-se o suporte metálico dos fios de cobre que possui a função de distribuir corrente elétrica entre os mesmos.



Fonte: Tanabe, 2008.

3.1.2. Caixa de Filtração

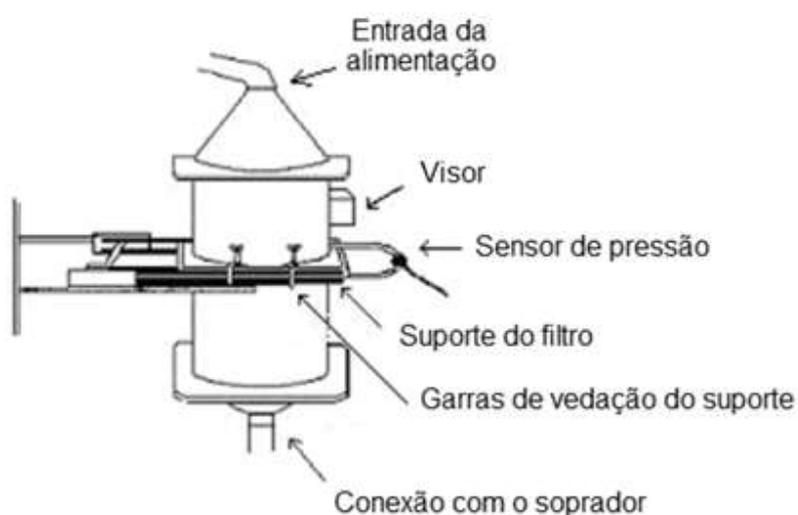
A filtração e a deposição do pó no prato de alimentação, ocorreram na caixa de filtração, que foi constituída de dois cilindros de PVC com uma gaveta entre eles acoplada entre

duas molduras de aço inoxidável, onde o meio filtrante era inserido, conforme mostrado na Figura 3.3.

O meio filtrante foi recortado de forma circular, com uma área útil de filtração de $0,0254 \text{ m}^2$.

A filtração foi realizada com a caixa de filtração na posição vertical, onde o meio filtrante ficava na posição horizontal. Os dados de queda de pressão foram enviados para o sistema de controle através de micro manômetros, instalados antes e após a passagem do fluxo pelo filtro.

Figura 3. 3 - Caixa de Filtração.

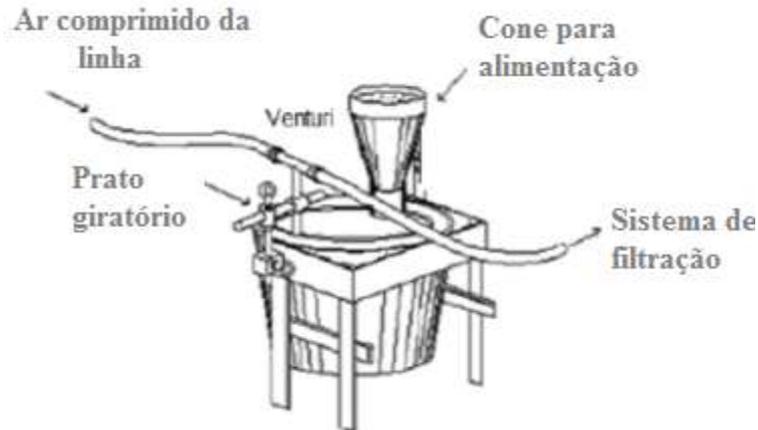


Fonte: Tanabe, 2008.

3.1.3. Alimentador de Pó

O alimentador de pó do tipo prato giratório, conforme mostrado na Figura 3.4, foi colocado dentro de uma caixa de acrílico, para manter a umidade interna estável. O equipamento consiste em um prato giratório com um sulco semicircular em seu contorno, que girava em torno de seu próprio eixo. Sua alimentação é feita a partir de um cone onde as partículas são colocadas. Durante o ensaio essas partículas vão alimentando o sulco mais fino do prato uniformemente até que alcance o tubo venturi, conectado no equipamento, onde a linha de ar comprimido ao passar pelo tubo venturi suga o material particulado levando-o ao sistema de filtração.

Figura 3. 4– Alimentador de Pó.



Fonte: Tanabe, 2008.

3.1.4. Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados foi constituído por um microcomputador 486 DX2, provido de uma placa para aquisição de dados para computadores compatíveis como padrão IBM-PC, que permitia a leitura de 16 sinais de sensores externos e controle de dois atuadores analógicos e 24 linhas de entrada e saída digitais (tipo liga-desliga). O software que controlava o experimento e realizava o registro das variáveis de interesse, foi elaborado na linguagem Visual Basic 3.0 especialmente para este tipo de aplicação.

O software atuava na rotação do motor mantendo a velocidade do ar constante, durante o período da filtração. Este controle foi feito pela placa de aquisição de dados e por uma placa de orifício calibrada colocada na linha entre os dois medidores de pressão que foram ligados aos micro manômetros digitais.

Para o registro das variáveis a perda de carga era instrumentada por um sensor de pressão e lida pela placa de aquisição de dados, sendo registrada juntamente com o tempo e velocidade.

Com os dados salvos, esses eram passados para um arquivo do bloco de notas do Windows, e posteriormente enviados para o Excel com alguns pequenos ajustes para o reconhecimento dos valores.

3.1.5. Outros Equipamentos

Outros equipamentos utilizados foram: a balança digital Marte Modelo AM5500 para pesagem dos filtros antes e depois da filtração; um picnômetro de Hélio marca Micrometrics, para determinação da densidade do material particulado e um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Carl-Zeiss, modelo DSM-940-A, localizado no Centro de Caracterização e desenvolvimento de Materiais da UFSCar (CCDM), para obtenção de micrografias dos tecidos.

3.2. Materiais

Os materiais utilizados nos experimentos estão descritos no próximo item.

3.2.1. Material Particulado

Utilizou-se como material particulado o cimento. Este foi fornecido pela Votorantim Cimentos S.A. de Itaipu de Minas (MG) e é comercializado para área de construção civil em todo país. Este material foi escolhido devido à sua grande aplicação no mercado.

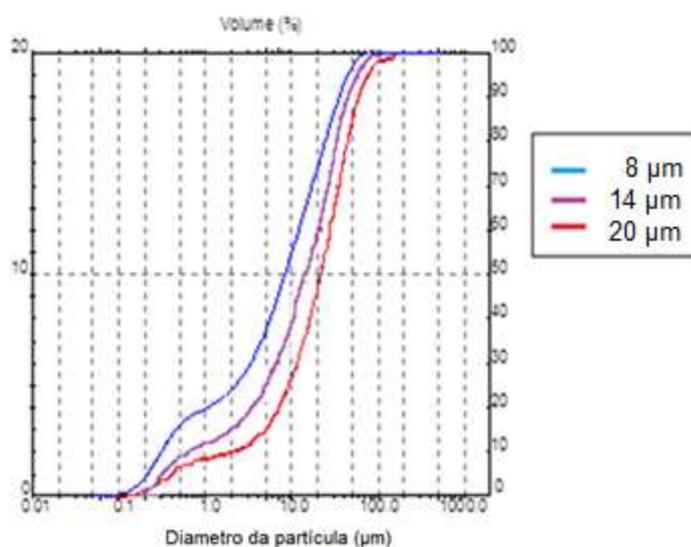
Determinou-se a densidade das partículas de cimento pelo sistema Accupyc 1330 V3.03 e o valor obtido foi de $3,1 \text{ g/cm}^3$.

O diâmetro médio volumétrico das partículas de cimento foi obtido por meio do equipamento MASTERSIZER MALVERN v.2.19, localizado no laboratório de cristalização do Departamento de Engenharia Química UFSCar. Inicialmente a granulometria obtida foi de $21,5 \mu\text{m}$. Colocou-se este material particulado no moinho de bolas, a uma velocidade de 40 m/s , por um período de 72 horas, para diminuir o tamanho das partículas. E assim, obteve-se um diâmetro volumétrico médio de $8 \mu\text{m}$.

Novamente foi doado pela Votorantim Cimentos S.A. o cimento, com uma granulometria de trabalho de $14 \mu\text{m}$, e outra porção do material particulado com $20 \mu\text{m}$, assim obteve-se varias granulometrias para o trabalho..

Na Figura 3.5 estão demonstrados as curvas de distribuições granulométricas obtidas.

Figura 3. 5- Distribuições granulométricas do pó de cimento obtidas antes dos ensaios.



Fonte: Acervo pessoal

Pode-se constatar a partir da Figura 3.5 que 50% das partículas possuem diâmetro volumétrico de 8, 14, 20 μm respectivamente.

Após os ensaios foram levadas amostras do material particulado, cimento, para o Laboratório de Caracterização Estrutural da UFSCar onde foram realizadas análises do material, na Figura 3.6 está apresentada a micro análise por Raios-X do cimento, as análises são realizadas no material com aplicação de uma voltagem de -25 kV. Assim o equipamento capta todos elementos presentes na amostra.

Na Tabela 1 está descrita a porcentagem de cada composto químico obtido na amostra de cimento.

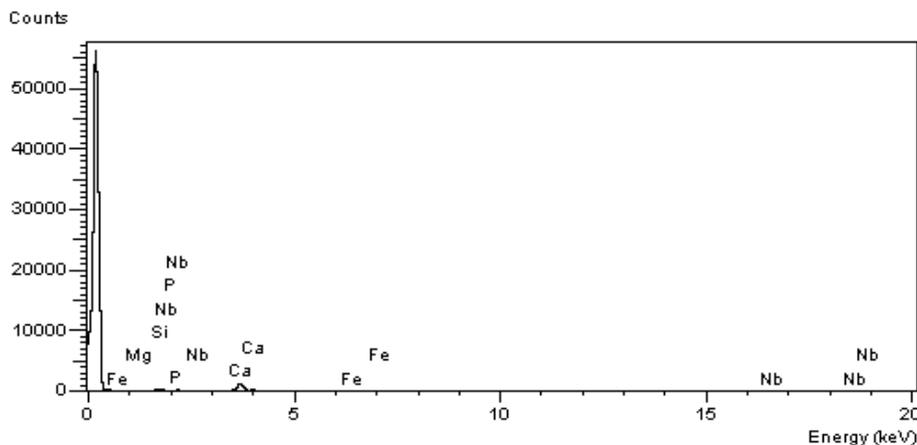
Tabela 2– Composição do cimento em porcentagem.

Compostos Químicos	Porcentagem (%)
Cálcio – Ca	74,5
Silício – Si	11,5
Magnésio – Mg	4,1
Ferro – Fe	2,6
Nióbio – Nb	7,3
TOTAL	100

Fonte: Acervo pessoal.

A composição química do cimento é constituída de cálcio, silício, ferro e alumínio. Nas análises realizadas não foram encontrados traços de alumínio, porém o Nióbio foi encontrado. Ele é um metal de transição utilizado em ligas de ferro, e atualmente está sendo adicionado na produção de cimento.

Figura 3. 6: Gráfico representativo da composição química do cimento.



Fonte: Acervo pessoal.

3.2.2. Meio Filtrante

Com a finalidade de comparar o efeito das cargas na formação da torta de filtração para diferentes meios filtrantes, foram realizados ensaios de filtração para dois meios filtrantes muito utilizados em filtros de mangas. Os meios filtrantes utilizados foram o filtro de fibra de vidro fornecidos pela Votorantim Cimentos S.A, de Itaú de Minas, produzidos pela BWF, Itália, e o feltro agulhado com 100% da fibra de polipropileno (3008PP), produzido pelo fabricante (Gino Cacciari) com peso específico de 0,22 g/cm³ e espessura de 2,5 a 2.8mm.

Os filtros de fibra de vidro foram recebidos na forma de mangas, com 15,2 cm de diâmetro e 7 m de comprimento.

Para a adaptação do meio filtrante no suporte do filtro, estes foram cortados em moldes

circulares de aproximadamente 0,2 m de diâmetro e área de filtração de 0,0254 m², pesando aproximadamente 20 g. Na Figura 3.9 esta apresentado o meio filtrante de fibra de vidro utilizado nos ensaios.

Figura 3. 7– Meio filtrante de fibra de vidro na sua forma original e molde utilizado nos ensaios sobre a balança analítica.

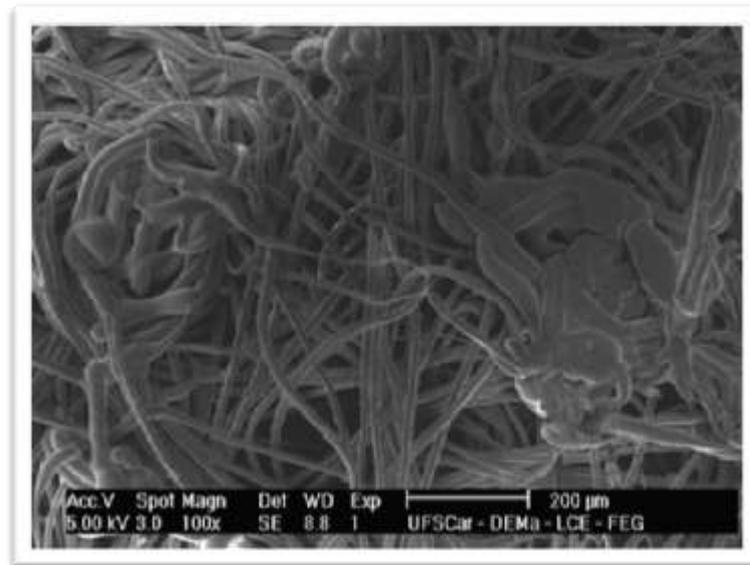


Fonte: Acervo pessoal.

A escolha do meio filtrante de fibra de vidro foi feita em razão da sua grande utilização na indústria cimenteira e por ser um material utilizado para processos com altas temperaturas.

A Figura 3.10 apresenta uma imagem gerada a partir de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), obtida no Laboratório de Caracterização Estrutural da UFSCar, para analisar as fibras do tecido de fibra de vidro.

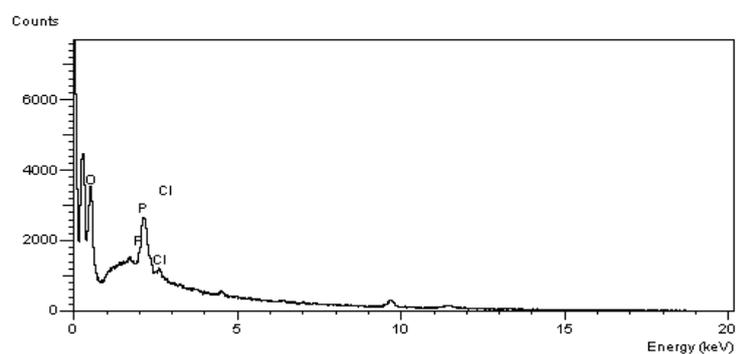
Figura 3. 8– Meio filtrante de fibra de vidro com ampliação de 100 x gerada em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).



Fonte: Acervo pessoal.

Foram realizadas análises de Raios-X também para o meio filtrante de fibra de vidro a Figura 4.7 apresenta um gráfico com os compostos químicos encontrados. Na Tabela 7 estão descritas as porcentagens dos compostos químicos encontrados.

Figura 3. 9: Gráfico representativo da composição química do tecido de fibra de vidro.



Fonte: Acervo pessoal.

Tabela 3– Composição do filtro de fibra de vidro em porcentagem.

Compostos Químicos	Porcentagem (%)
Carbono – C	38,7
Oxigênio – O	61
Cloro – Cl	1,3
TOTAL	100

Fonte; Acervo pessoal.

Estes foram os resultados obtidos através das análises realizadas, podendo assim confirmar as referências dos fabricantes.

3.3. Metodologia

Filtração

O procedimento de filtração constitui na passagem do ar, contendo material particulado disperso, através do meio filtrante, que retém as partículas do pó em sua superfície, formando assim a torta de filtração RODRIGUES, (2004).

Para o início do ensaio, verifica-se a rotação do prato do alimentador de pó, após testes preliminares, realizados no laboratório. As condições experimentais consideradas adequadas para o sistema foram, uma rotação de 0,5 rpm, vazão de 10 cm/s, utilizando o sulco mais fino do prato. A cada ensaio experimental, a unidade de carregamento corona era limpa com jatos de ar comprimido para evitar influência do pó remanescente nas análises posteriores.

A caixa de alimentação era controlada com uma umidade de 20%, a partir de tubos de sílica acoplados no equipamento. Antes de cada ensaio de filtração a temperatura e a umidade do ambiente e do interior da unidade experimental eram medidos por meio de um termo higrômetro digital (TFA). Segundo WOODHEAD e ARMOUR-CHÉLU, (2003), a umidade é um fator que influencia no carregamento de partículas.

A fase de teste foi importante para determinação de outros parâmetros que poderiam

influenciar nos experimentos. Por exemplo, notou-se que as massas iniciais dos filtros influenciavam significativamente nas curvas de perda de carga. Apesar de utilizar um mesmo molde para o corte do tecido do filtro no formato correto, as massas destes podiam diferir em até 0,4 g devido à diferença na sua estrutura interna, uma vez que o tecido utilizado é do tipo não trançado sendo, portanto, fabricado com uma disposição aleatória dos fios. Estes moldes eram acoplados nos suportes metálicos da caixa de filtração, que eram juntados com a amostra entre eles e inseridos na gaveta da caixa, onde eram apertados usando-se grampos de fixação.

A velocidade foi mantida constante igual a 10 cm/s durante toda filtração, por meio de um transdutor que controla a rotação do soprador. Optou-se por esta velocidade para que a carga eletrostática aderisse com mais facilidade nas partículas, visto que com uma velocidade maior isto poderia não ocorrer, devido ao tamanho das partículas.

Feitos os ajustes de temperatura, umidade e pesagem do meio filtrante, iniciaram-se os testes. Ligava-se simultaneamente o soprador para sugar o ar da caixa de filtração, e o alimentador de pó, para dispersar o pó no ar sugado. O ar era sugado através de um tubo tipo venturi e levado para o interior da caixa de filtração, passando através do carregador corona localizado entre a caixa de alimentação e a caixa de filtração. Este foi utilizado com o intuito de apenas carregar as partículas eletrostaticamente via efeito corona e não para arrastá-las como ocorre na filtração por precipitação.

Após a passagem pelo carregador corona, o gás com as partículas carregadas ultrapassam o meio filtrante, e parte do material particulado fica depositado na superfície, formando a torta de filtração. O meio filtrante foi pesado e assim obtiveram-se os valores de massa retida.

A filtração foi mantida até que a queda de pressão atingisse o valor pré-estabelecido de 100 mmH₂O (979 Pa).

A queda de pressão inicial referente ao tecido limpo variava em torno de 100 Pa, afim de normatizar os dados de queda de pressão, o valor inicial da queda de pressão, ou seja, o valor do tecido limpo, foi subtraído dos valores obtidos de queda de pressão durante a filtração para todos os ensaios.

Os ensaios foram realizados com cargas de zero, -1.0, -2.0 kV, para maioria dos ensaios, em apenas um ensaio foi adicionada cargas de -0.5,-1.5, assim analisando a formação das tortas. Foram feitas réplicas e trélicas para confirmação de resultados.

A seguir na Tabela 4 estão descritos os parâmetros de ensaios para partículas de 8,14 e 20 µm com suas respectivas cargas e massa retida durante os ensaios, também estão apresentados os dados para os dois tipos de meios filtrantes utilizados fibra de vidro e

polipropileno.

Tabela 4 - Parâmetros de Ensaios para partículas de 8, 20 e 14 μm .

Parâmetros fixados T in(C°) 21,2 / H in(%) 20												
Diâmetro médio (μm)	8,0			20,0			14,0					
							Filtro de Fibra de Vidro			Filtro de Polipropileno		
Carga (kV)	0	-1	-2	0	-1	-2	0	-1	-2	0	-1	-2
Massa retida (g)	2,6	3,2	2,2	3,4	2,9	2,7	2,82	2,80	3,305	2,23	2,65	2,47

Fonte: Acervo pessoal.

Após os ensaios foram calculadas as resistências específicas da torta (K2) e a porosidade de Ergun (ϵ) a partir das Equações 2.9 e 2.10 respectivamente. Com estes dados foram possíveis descrever os resultados adquiridos a partir dos ensaios de filtração.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios experimentais durante todas as etapas do trabalho, e comparados em alguns aspectos com trabalhos de Rodrigues (2005) e Mello (2007).

Segundo FENARA et al (2011), a presença de cargas eletrostáticas em partículas afeta significativamente o desempenho do filtro aumentando a eficiência de coleta das partículas e reduzindo a perda de carga.

A primeira fase dos ensaios teve como objetivo investigar o comportamento da torta de filtração com a aplicação de carga eletrostática, com diferentes tensões, em partículas com diâmetros médios diferentes.

Inicialmente utilizou-se o material particulado com diâmetro volumétrico médio de 8 μm . Para obter esse diâmetro médio, o pó fornecido pela empresa Votorantim S.A. foi moído em um moinho de bolas por 72 horas. Posteriormente, para obter um número maior de materiais, que possibilite a comparação da influencia do tamanho da partícula na operação, utilizou-se o pó com diâmetro de 14 μm e 20 μm . Nesse caso, o pó foi adquirido através de doações feitas pela Votorantim S.A, já com essas distribuições granulométricas.

Os ensaios foram realizados com tensões de 0, -1 e -2 kV para as partículas de 8 e 20 μm , e de 0 a -2kV em um intervalo de - 0,5 kV, para as partículas com 14 μm para averiguar qual tensão proporcionaria os melhores resultados. Com os resultados obtidos, determinou-se a porosidade e a resistência específica da torta.

4.1 Ensaios de Filtração

4.1.1. Testes Experimentais: Partículas de 8 μm utilizando tecido de fibra de vidro.

Com a finalidade de observar o comportamento da torta de filtração após uma carga eletrostática aplicada na partícula, realizou-se ensaios preliminares de filtração que consistiam em simplesmente realizar testes sem carga (0 kV, ou seja com a fonte de alta tensão desligada) e outros com a aplicação de -1,0 e -2,0 kV de tensão. Os ensaios foram realizados com uma velocidade de filtração de 10 cm/s e uma queda de pressão máxima de 100 mmH₂O (979 Pa). A umidade relativa dentro da caixa de alimentação foi mantida durante todo o experimento em 20%.

Nesse item foram realizados ensaios com partículas de cimento, com diâmetro médio volumétrico de 8 μm .

De acordo com estudos realizados por Fyeld (1988), partículas com diâmetros menores alcançam uma maior penetração nas fibras dos tecidos. No entanto o comportamento da deposição das partículas carregadas no meio filtrante ainda não está bem definido.

Não se sabe ao certo, se as partículas com cargas eletrostáticas saem do percurso normal da filtração e se aglomeram com uma menor força de coesão, o que poderia facilitar a limpeza dos tecidos, diminuindo o desgaste do mesmo e reduzindo a perda de carga. Ou se ocorre o inverso, o empacotamento é mais coesivo dificultando a remoção da torta e aumentando o gasto energético no momento da limpeza do meio filtrante, conseqüentemente um valor alto de queda de pressão com pouca retenção das partículas no filtro.

Os parâmetros de ensaios foram mantidos os mesmos para toda filtração, na Tabela 4 estão apresentados os valores.

Na Figura 4.1 estão representadas as curvas de filtração para as partículas com diâmetro médio de 8 μm . Observa-se que, com a aplicação das cargas, as massas coletadas tiveram variações, ficando em torno de 2,6 g para a carga de 0 kV; 3,2 g para -1kV, e 2,2g para -2 kV.

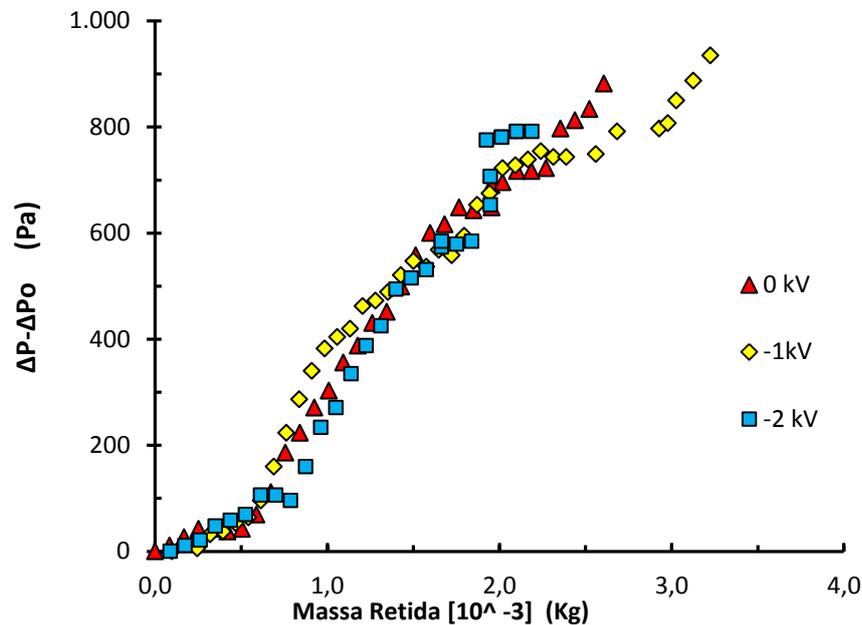
Deste modo, foi possível observar que com o diâmetro médio das partículas de 8 μm , a carga não influenciou na formação da torta, permanecendo praticamente constante, o comportamento das curvas de filtração.

Sabe-se que com uma alta concentração de partículas, pode haver a diminuição do campo elétrico e da corrente corona, impedindo um carregamento normal.

Além disso, alguns autores descreveram que o decaimento da carga eletrostática pode acontecer devido à exposição à alta umidade, radiação ionizante, aerossóis carregados eletricamente, partículas oleosas, altas temperaturas ou em função do tempo (FJELD; OWENS, 1988).

Com estes dados e sabendo que nos ensaios experimentais temperatura e umidade podem afetar o trabalho, necessita saber quão estas variáveis podem afetar a eficiência do trabalho.

Figura 4.1 - Curvas de filtração no tecido de fibra de vidro, com aplicação de cargas eletrostática, para queda de pressão por massa retida, com partículas de 8 μm .



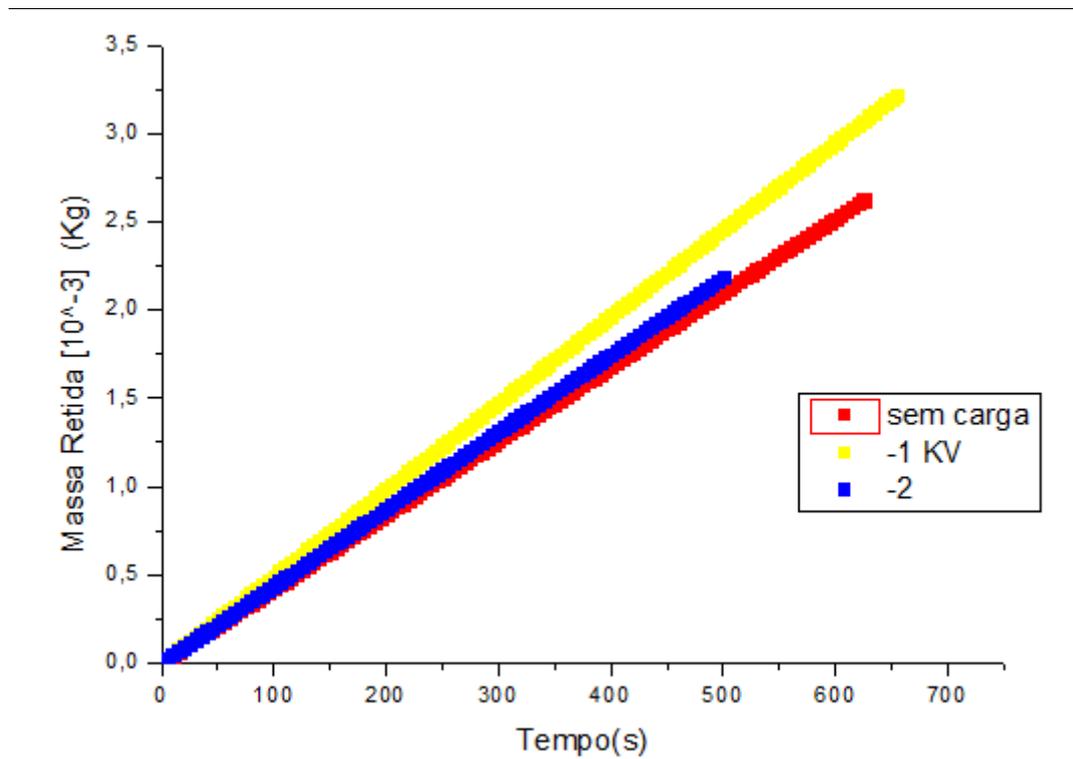
Fonte: Acervo pessoal

Pode-se dizer que o ponto de colmatação, da Figura 4.1, foi alcançado em torno de 0,5g.

Na Figura 4.2 esta apresentada às curvas de massa retida por tempo, para comparação com a Figura 4.1.

As curvas de massa retida por tempo de filtração apresentadas na Figura 4.2 apontam para uma mesma linha de tendência para carga de 0 e -2 kV. No entanto a curva para carga de -1 kV resultou em uma maior massa retida. A diferença entre a curva de -1kv é de 1g para a menor massa retida obtida com a curva de -2kV.

Figura 4. 2 - Curvas de filtração de massa retida por tempo, para partículas de 8 μm .



Fonte: Acervo pessoal

Na Tabela 5 verificam-se os valores de porosidade e resistência específica da torta, obtidos a partir da equação de Ergun (2.10) e da Equação (2.9).

Tabela 5- Valores de porosidades e resistência específica obtidos pelo Método Indireto para partículas de 8 μm .

Tensão (kV)	ϵ_{Ergun}	$K_2[10^{-3}] (s^{-1})$
0	0,71	141,9
-1	0,72	149
-2	0,70	183,7

Fonte: Acervo pessoal

A porosidade diminuiu de 0,71 para 0,70 da curva sem carga para a curva de -2 kV, entretanto, para -1kV houve aumento da porosidade para 0,72. Concordando com esses

resultados estão às resistências específicas da torta, que para uma porosidade de 0,70 teve um valor de $91,8 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$.

Mesmo com uma maior queda de pressão obteve-se uma resistência específica da torta maior e uma porosidade menor.

4.1.2. Testes Experimentais: Partículas de 20 μm utilizando tecido de fibra de vidro.

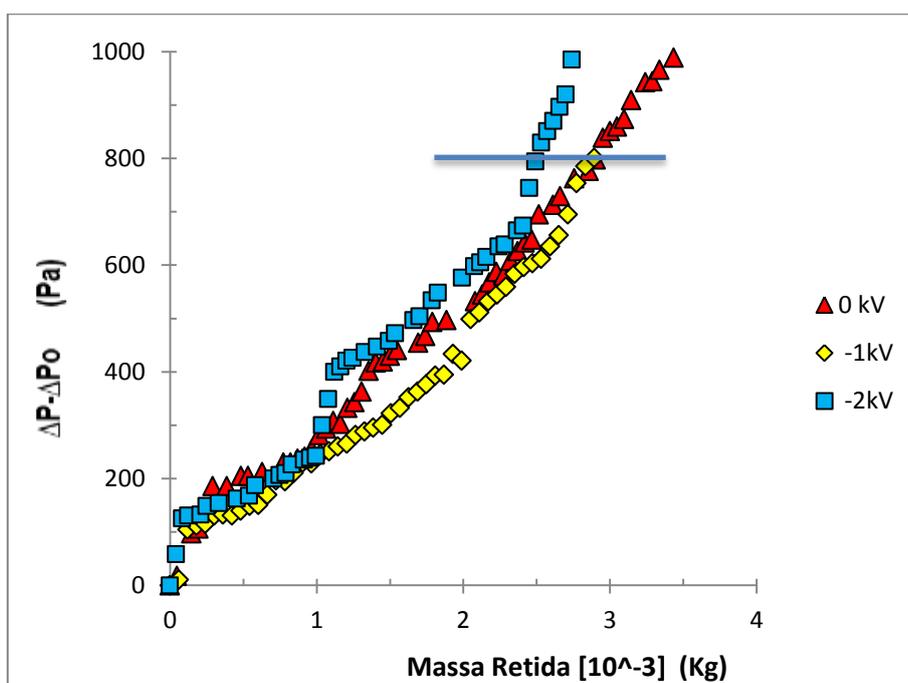
Cargas eletrostáticas podem ser introduzidas no processo de filtração por carregamento corona, que é o utilizado neste trabalho ou por atrito (triboeletrificação) causado pelas próprias partículas ao se chocarem durante o processo de filtração.

Nesse item serão apresentados os resultados obtidos para partículas de cimento com diâmetro médio de $20\mu\text{m}$. Esse pó não sofreu nenhum tratamento.

Levando-se em conta os parâmetros que constam na Tabela 4, foram realizados os ensaios de filtração.

Com os resultados obtidos nas filtrações, construiu-se o gráfico apresentado na Figura 4.3, de queda de pressão (Pa) por massa retida (MR), para o meio filtrante de fibra de vidro. Os ensaios foram realizados em triplicatas com desvio padrão de 20%.

Figura 4. 3 - Curvas de filtração no tecido de fibra de vidro, com aplicação de cargas eletrostática, para queda de pressão por massa retida, com partículas de $20\mu\text{m}$.



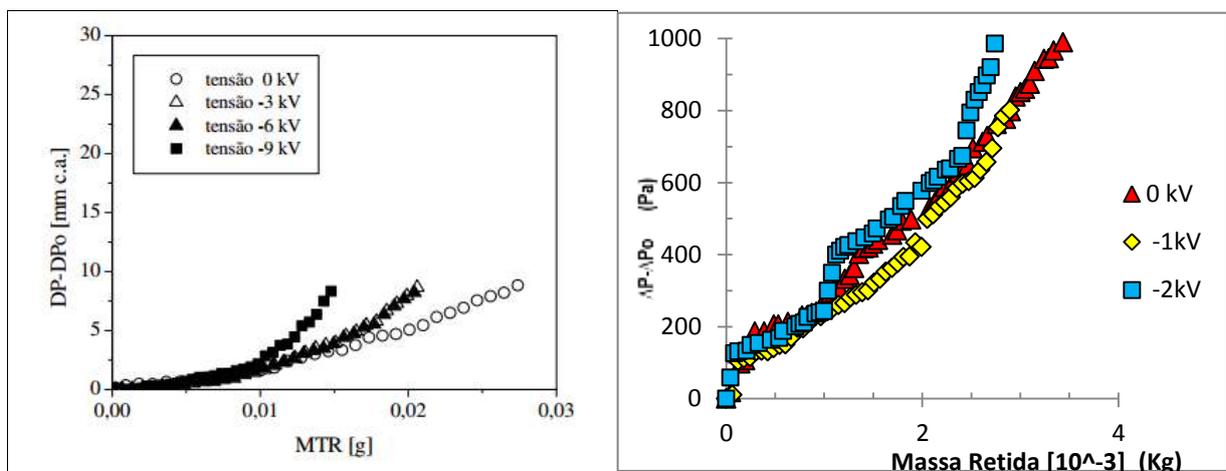
Fonte: Acervo pessoal

Observa-se na Figura 4.3, que em um ponto de mesma massa retida 2,5g, a curva com aplicação da carga de -2 kV obteve a maior queda de pressão, com uma variação de 148 Pa, em relação a curva de -1 kV, que obteve a menor queda de pressão neste ponto. Isso pode ter ocorrido devido a absorção da carga nas partículas de 20 μm , quando aplicada a carga de -1 kV. As partículas de 20 μm provavelmente absorveram melhor está carga, enquanto que, mantendo as condições experimentais de filtração, a carga de -2 kV não se comporta favoravelmente para esse tamanho de partícula durante a operação de filtração.

No valor demarcado no gráfico com uma reta horizontal, para a queda de pressão de 800 Pa, as curvas com aplicação da carga de -1kV e sem aplicação de carga obtiveram uma massa retida bastante próximas durante a filtração. O mesmo não ocorreu para a curva de -2 kV, que obteve uma menor massa coletada. Ou seja, para partículas sem carga, foi coletado 2,83g de cimento, já para partículas com carga de -1,0 kV, foram coletadas 2,75g de cimento, e para -2 kV, coletou-se 2,49g de cimento.

A curva sem carregamento eletrostático foi a que obteve maior massa retida. Isto pode ser explicado pelo fato de um maior número de partículas ficarem retidas nos eletrodos de descarga e na carcaça do carregador quando este é utilizado em alta tensão. Comparando os resultados obtidos neste estudo com os relatados por Rodrigues (2005), verifica-se na Figura 4.4 o mesmo comportamento, ou seja, a formação da torta foi mais favorável com a condição experimental sem carregamento eletrostático nas partículas.

Figura 4. 4- Comparação de resultados para queda de pressão em relação à massa retida.



Fonte: Rodrigues, 2005.

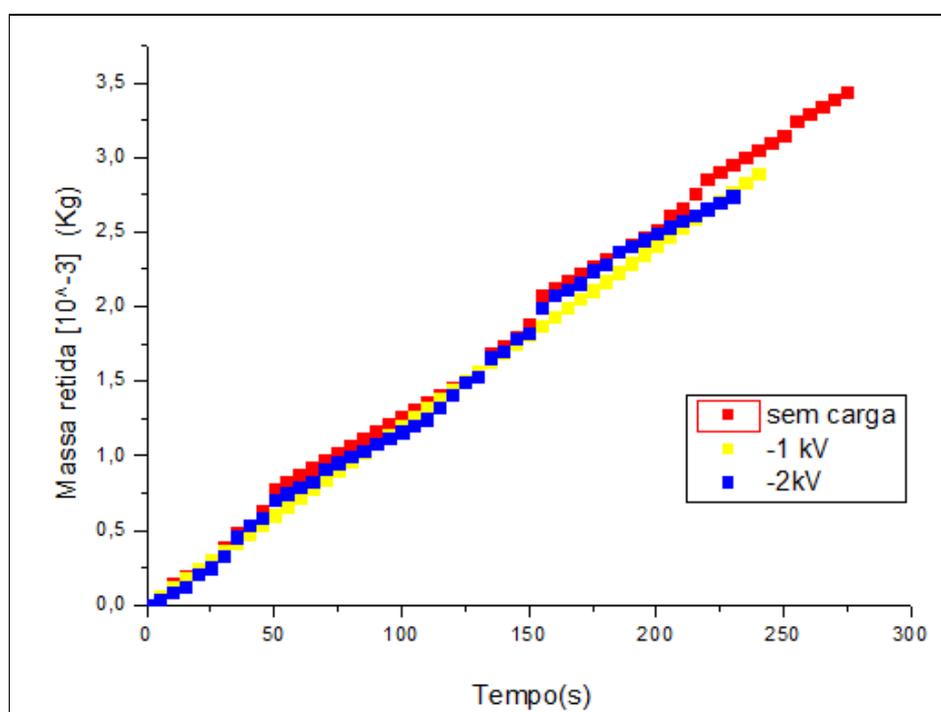
Fonte: Acervo Pessoal.

Rodrigues (2005) sugeriu que com o aumento da velocidade de filtração pode-se minimizar essa diferença de massa retida.

A Figura 4.5. apresenta curvas de massa retida, durante a filtração, em função do tempo, para as partículas sem carga, e com aplicação de cargas de -1 kV e de -2 kV.

Observa-se na Figura 4.5 que as curvas de massa retida por tempo se mantiveram aproximadamente constantes durante toda a operação de filtração. Para uma melhor visualização, a Figura 4.6 apresenta um gráfico ampliado de massa retida por tempo. Verifica-se que o filtro coletou uma maior quantidade de partículas quando as mesmas estavam sem cargas.

Figura 4. 5- Curvas de filtração de massa retida por tempo, para partículas de 20 μ m.



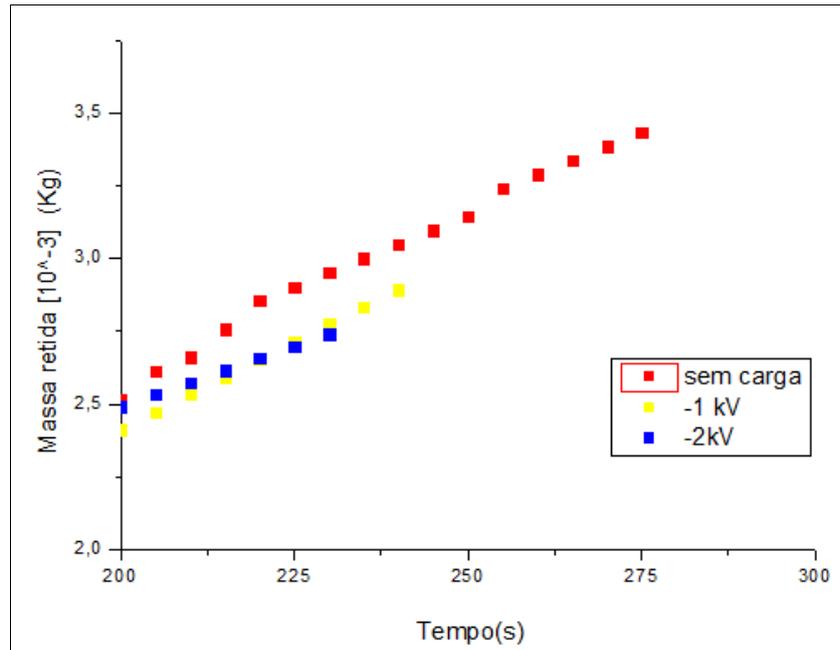
Fonte: Acervo pessoal

Observa-se na Figura 4.6 que para um intervalo de tempo entre 215s a 236s a quantidade de massa retida no tecido foi praticamente a mesma, para as partículas com carga de -2 kV e de -1 kV. No entanto para partículas sem carga foi possível coletar uma maior quantidade de massa retida para o mesmo tempo de filtração. Isso indica que uma maior quantidade de partículas ficaram depositadas no equipamento não alcançando o tecido. Dessa forma, as cargas impediram que uma porcentagem maior das partículas chegasse ao seu destino

final, o meio filtrante.

Notasse na Figura 4.6 com a ampliação do gráfico que as partículas sem cargas obtiveram uma maior massa retida em relação às partículas carregadas.

Figura 4. 6- Curvas de filtração de massa retida por tempo, para partículas de 20 μ m, apresentando o intervalo de tempo de 200 a 300 s.



Fonte: Acervo pessoal

Na Tabela 6 são mostrados os valores de porosidade e resistência específica da torta obtidos através das Equações 2.10 e 2.9, respectivamente.

Tabela 6 - Valores de porosidades de Ergun e resistência específica obtidas, para partículas de 20 μ m.

Tensão (kV)	ϵ_{Ergun}	$\kappa_2 [10^3 \text{ s}^{-1}]$
0	0,50	73,3
-1	0,51	70,4
-2	0,48	91,3

Fonte: Acervo pessoal.

Verifica-se na Tabela 6 que, para as partículas de cimento, com diâmetro médio de 20 μm , com aplicação da carga de -2 kV, a porosidade foi 0,48, apresentando o menor valor em relação as outras tortas. Ou seja, a torta ficou mais compactada, o que fez com que a perda de carga fosse maior com o tempo de filtração. Esse comportamento pode ser comprovado com os valores de resistência específica da torta, que foi de $73,3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ para partículas sem carga e sendo maior para partículas com carga aplicada de -2 kV, apresentando um valor de $91,3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$.

Já para as curvas com a carga de -1kV, a resistência específica da torta foi menor, obtendo-se um valor de $70,4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ e a porosidade ficou em torno de 0,51.

Segundo Mateson (1987) e Rodrigues (2005) a presença de cargas eletrostáticas nas fibras e/ou nas partículas pode influenciar na operação de filtração, alterando a trajetória das partículas e sua aderência na superfície das fibras. No entanto este comportamento não ficou muito claro com os resultados obtidos nesse estudo.

4.1.3. Ensaios de filtração: partícula de 14 μm utilizando um tecido de fibra de vidro.

A continuidade do estudo deu-se com ensaios de filtração, com aplicação de cargas de 0, -0.5, -1.0 -1.5 e -2.0 kV com partículas de diâmetro volumétrico médio de 14 μm . Para esse diâmetro optou-se por fazer uma investigação mais detalhada aplicando uma maior variação de cargas, por ser um diâmetro intermediário no comportamento das curvas de filtração.

Os ensaios foram realizados em triplicatas e as curvas apresentadas são as médias dos ensaios.

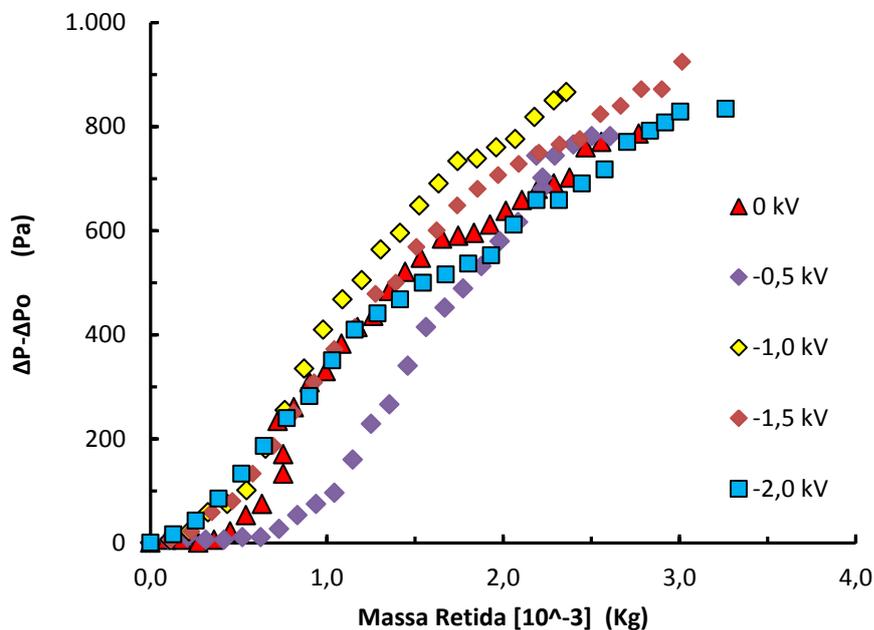
A Figura 4.7 mostra curvas de queda de pressão por massa retida, em função da tensão aplicada, de 0, -0.5, -1.0 -1.5 e -2.0. Observa-se na Figura 4.7 que até 500 Pa de queda de pressão, as curvas de filtração tiveram comportamento similar. Após este valor, houve uma maior variação da queda de pressão e o comportamento das curvas de filtração foi diferente entre si, não obedecendo a uma lógica entre as cargas aplicadas. Nota-se que, com a aplicação da carga nas partículas, após uma determinada massa retida de aproximadamente $0,4 \times 10^{-3} \text{ Kg}$, as partículas começam a assumir um padrão único para cada curva de filtração.

Observando as curvas de filtração, verifica-se na Figura 4.7, que as partículas com cargas de -0.5 kV, inicialmente penetram mais no tecido, indicando que houve uma maior filtração de profundidade entre as fibras. Esse comportamento levou a uma queda de pressão menor, no entanto, com maior retenção de massa coletada, isso ocorreu devido ao rearranjo

natural das partículas entre as fibras, o que garante uma filtração de profundidade mais adequada.

Já para as partículas com aplicação de cargas maiores, no início da filtração não se observa grandes mudanças, podendo-se dizer que, o tempo da filtração de profundidade nestas curvas foi menor. No entanto, a perda de carga foi maior do que a perda de carga para -0.5 kV.

Figura 4. 7 - Curvas de filtração no tecido de fibra de vidro, com aplicação de cargas eletrostática, para queda de pressão por massa retida, com partículas de 14 μm .



Fonte: Acervo pessoal

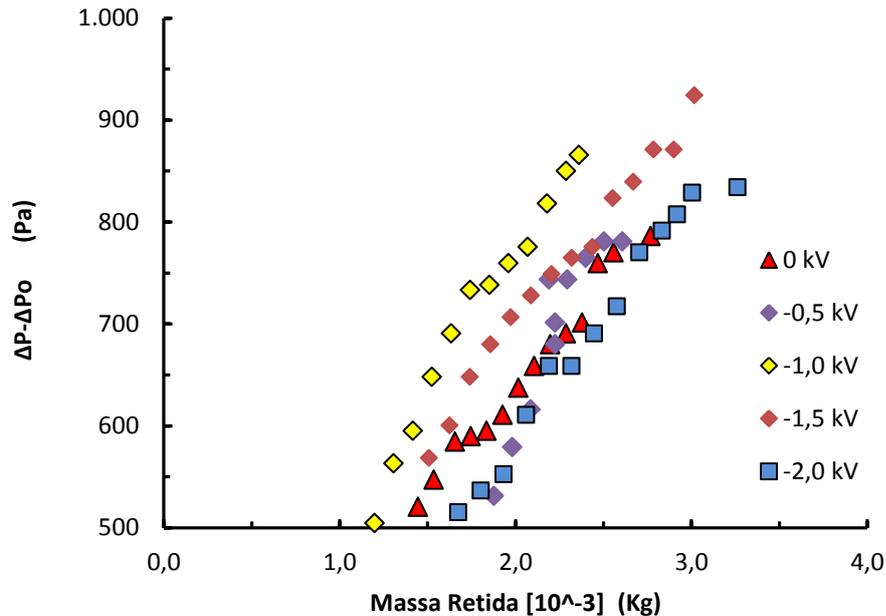
A medida que ocorreu a filtração até 300 Pa, as partículas com cargas de -1 kV começaram a aumentar a perda de carga mais rápido que as partículas com cargas maiores, retendo uma menor quantidade de massa, este comportamento pode estar ligado a compactação das partículas na torta de filtração, fazendo com que as partículas formem uma torta de filtração mais compacta, ocasionando uma resistência maior na passagem do fluxo gás no meio filtrante. O mesmo comportamento foi observado para partículas com -1.5 kV á uma perda de carga de aproximada de 600 Pa. Sendo que para partículas com carga aplicada de -2 kV e sem carga, praticamente as curvas de filtração tiveram o mesmo comportamento.

É bom ressaltar que para uma queda de pressão de 600 Pa, com a carga aplicada de -0.5

kV, a curva de filtração se misturou às demais curvas, e após 800 Pa ela teve uma mudança de inclinação levando a crer que houve uma ruptura na torta de filtração.

Esse comportamento é melhor visualizado na Figura 4.8.

Figura 4. 8- Curvas de filtração no tecido de fibra de vidro, com aplicação de cargas eletrostática, para queda de pressão por massa retida, com partículas de 14 μm , com aumento de 50% a partir de 500 Pa.



Fonte: Acervo pessoal

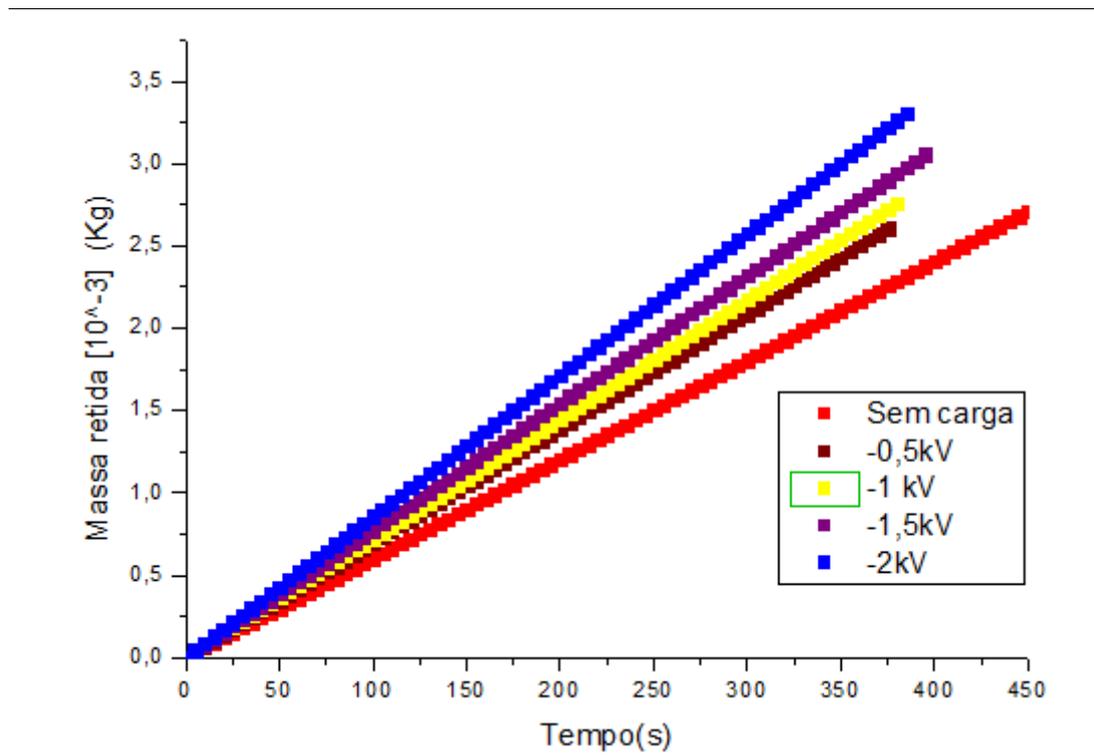
A partir dos dados apresentados foi possível notar que, com a aplicação da carga eletrostática, obtêm-se uma maior retenção das partículas. Para demonstrar esses resultados a Figura 4.9 apresenta o gráfico de massa retida por tempo. Observa-se que, com o aumento da tensão nas partículas, sua retenção no filtro de mangas foi maior.

Podendo-se dizer que, para partículas de 14 μm , à medida que aumenta a tensão se obtém uma maior massa retida.

Neste caso o ponto de colmatação, onde a torta de filtração se forma está em 50 s com aproximadamente 0,5g de massa retida. Este ponto também pode ser observado na Figura 4.9, no gráfico de queda de pressão por massa retida. Fica claro que não há interação das partículas com o filtro, apenas interação partícula com partícula após a colmatação. Isto pode ser visto pela maneira similar com que se iniciam as curvas de filtração, até que aconteça a filtração de superfície.

Analisando o efeito da massa coletada no tempo de filtração, como mostra a Figura 4.9, nota-se que com a aplicação de carga o tecido reteve uma maior quantidade de massa, para um mesmo tempo de filtração. Analisando o gráfico com o tempo de filtração de 350s a retenção da massa no meio filtrante é crescente a partir da curva sem carga com uma diferença de 0,95g a mais para a curva de -2 kV.

Figura 4. 9- Curvas de filtração de massa retida por tempo para partículas de 14 μm .



Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 4.9 fica claro que com a aplicação da maior carga que foi de -2 kV ocorreu uma maior coleta de massa. No entanto a queda de pressão não foi maior. Dessa forma, a carga foi favorável na retenção de massa coletada, isso reflete na maior porosidade e na menor resistência específica da torta, como mostra a Tabela 7.

A porosidade permaneceu praticamente constante à medida que se aplicou as tensões. Apenas com a carga de -2 kV houve um pequeno aumento, o que acarretou em uma diminuição da resistência específica da torta. (Tabela 7)

Tabela 7- Porosidade, resistência e massa de acordo com as tensões aplicadas para partícula 14,0 µm.

Carga (kV)	ϵ_{Ergun}	K2 [10 ^{^3}] (s ¹)	Massa Retida (g)
0	0,46	70,5	2,83
-0,5	0,46	82,1	2,61
-1	0,45	82,3	2,76
-1,5	0,46	76,7	3,06
-2	0,48	64,5	3,31

Fonte: Acervo pessoal.

4.1.3.1. Ensaio de Filtração: partícula de 14 µm, variando os meios filtrantes de fibra de vidro e de polipropileno.

Na Tabela 4 estão apresentados os principais parâmetros dos ensaios de filtração, realizados utilizando os dois meios filtrantes.

Analisando as curvas para os meios filtrantes de fibra de vidro e de polipropileno nas Figuras 4.10 a 4.14, verificam-se três fases da filtração. No caso do polipropileno, a primeira fase, ou estágio de filtração interna, onde ocorre a captura de partículas pelas fibras do meio filtrante, foi mais evidenciada do que para o meio filtrante de fibra de vidro. O ponto de colmatação ficou próximo a 0,6g para o polipropileno e em torno de 0,2g para o tecido de fibra de vidro para todas as cargas.

Com o decorrer das filtrações, após a formação da torta, caracterizada pela ponte linear da curva de filtração, ocorreu uma alteração deste padrão linear.

Para o tecido de fibra de vidro, ocorreu uma diminuição da taxa de aumento da perda de carga em função da massa coletada no filtro.

Este comportamento também foi observado por Rodrigues (2006) e ainda não é um fenômeno completamente compreendido, sendo muitas vezes atribuído a uma reestruturação do tecido ou da torta, ou ainda, ao rompimento de algumas fibras, quando submetidas a valores maiores de perda de carga.

Segundo Rodrigues (2006), alguns trabalhos na literatura apresentam curvas de filtração com decréscimo do coeficiente angular, algum tempo após a formação da torta, ou seja, a perda

de carga diminui para uma dada quantidade de massa retida. Isto pode ser visto nas Figuras 4.10 e 4.12, para o tecido de fibra de vidro, que a partir de um determinado valor de massa retida, tem suas curvas de filtração alteradas em relação ao início da filtração, assim observa-se a mudança na linearidade das curvas, diminuindo o crescimento da sua perda de carga.

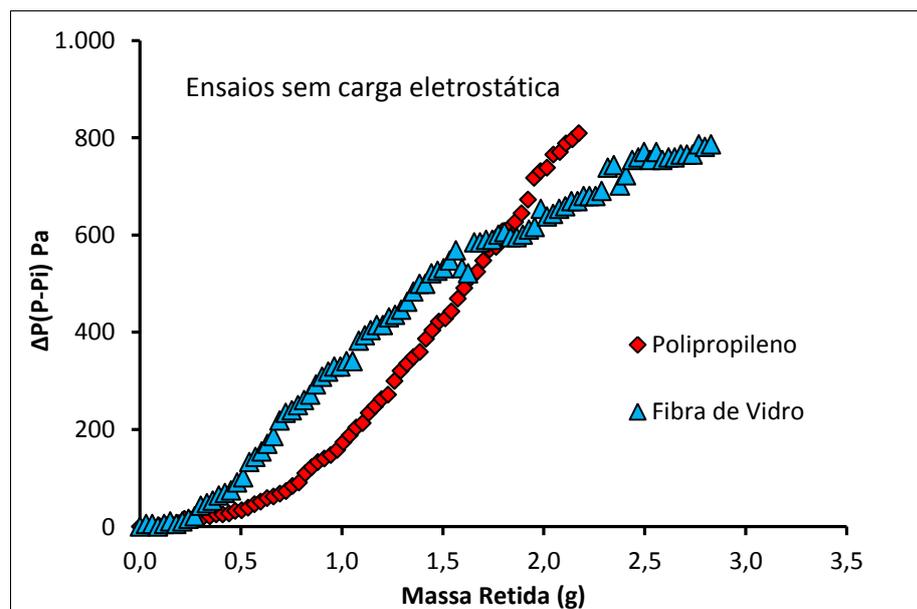
Nestas condições houve maior abertura para passagem do ar, modificando a estrutura do tecido, e tornando-o mais permeável e facilitando a passagem do ar.

Silva et al (1999), atribuíram este comportamento a um aumento da porosidade da torta da interface torta-filtro para a interface torta-ar, observado em experimentos, uma diminuição da resistência específica da torta.

Observando as Figuras 4.11 e 4.12, verifica-se que o ponto de colmatação foi maior, com a carga aplicada de -1 kV para o tecido de fibra de vidro e praticamente o mesmo para o polipropileno. No entanto a terceira fase, ou terceiro estágio, só ocorreu a uma pressão de 750 Pa, enquanto que para curva sem aplicação de cargas a terceira fase ocorreu a uma queda de pressão em torno de 600 Pa. Já para a carga de -2 kV isso ocorreu a uma queda de pressão bem menor em torno de 400 Pa, com o ponto de colmatação bem próximo a de partículas sem cargas. Para o tecido de polipropileno isto não ocorreu.

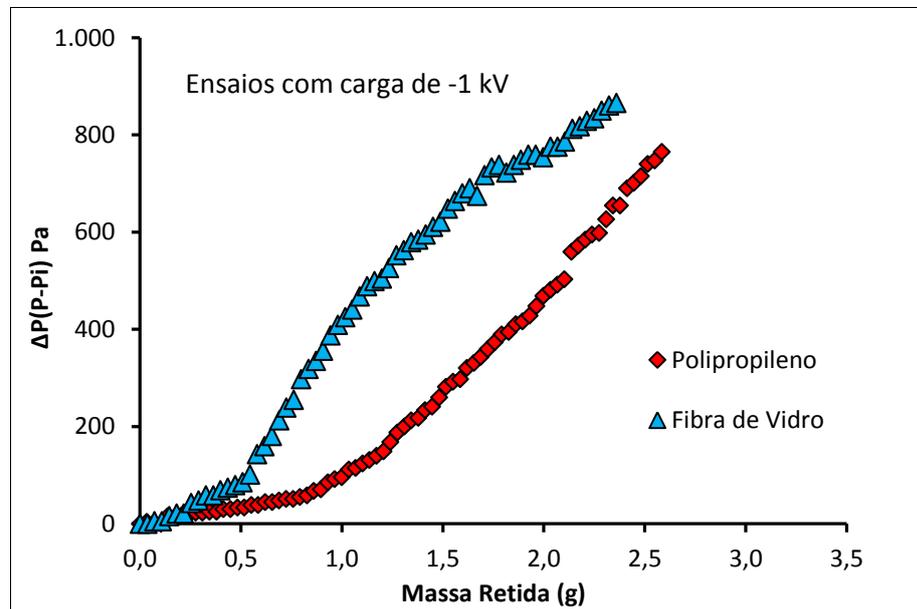
Nas Figuras 4.10 a 4.12 estão apresentadas as curvas de filtração para dois meios filtrantes: fibra de vidro e polipropileno.

Figura 4. 10 - Curvas de filtração sem carga eletrostática para o Filtro de Fibra de vidro e Polipropileno.



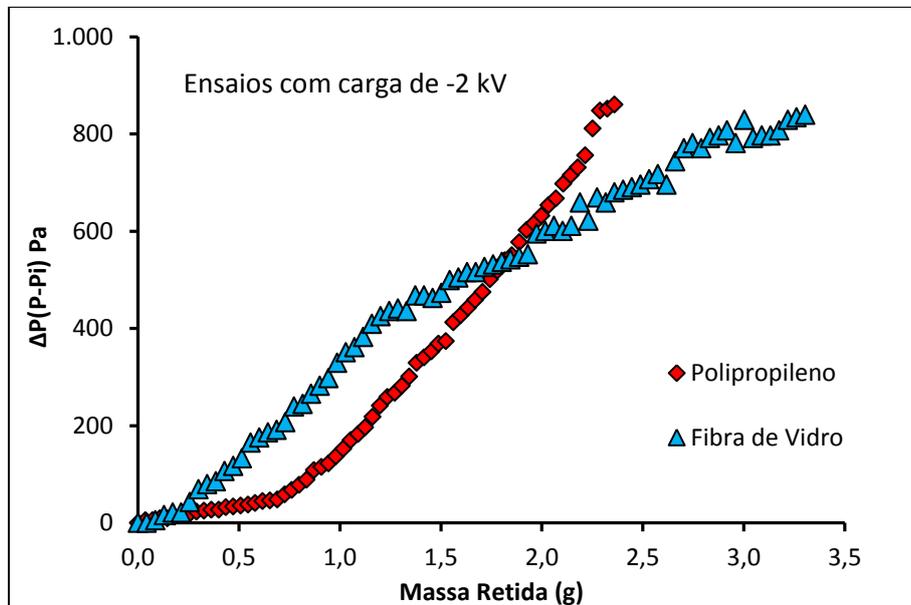
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4. 11- Curvas de filtração com carga de -1 kV para o Filtro de Fibra de vidro e Polipropileno.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4. 12- Curvas de filtração com carga de -2 kV para o Filtro de Fibra de vidro e Polipropileno.



Fonte: Acervo pessoal.

Nota-se que o filtro de polipropileno tem um comportamento de filtração de profundidade maior que o filtro de fibra de vidro, isto pode ser visto no início da filtração, antes do ponto de colmatação. Analisando as Figuras 4.13 e 4.14. pode-se dizer que o filtro de polipropileno tem suas curvas com a concavidade para cima, já o filtro de fibra de vidro tem suas curvas com a concavidade para baixo, deixando assim evidente a diferença na filtração entre os dois meio filtrantes.

Figura 4. 13- Curvas de filtração para o Filtro de fibra de vidro.

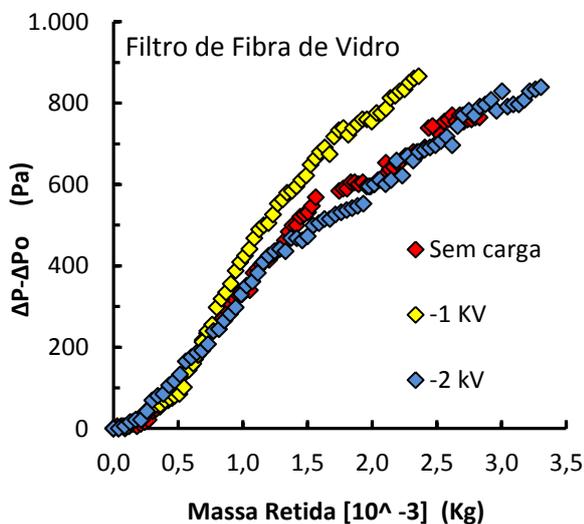
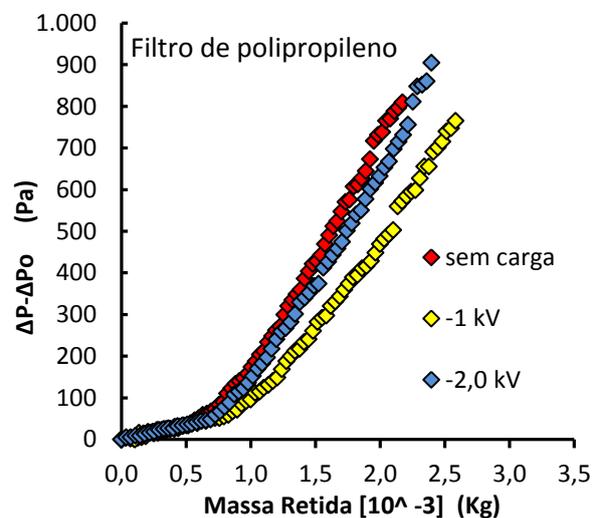


Figura 4. 14- Curvas de filtração para o Filtro de polipropileno.



Fonte: Acervo pessoal.

Com os estudos obtidos, observa-se que, para partículas de cimento com 14 μm , o filtro de fibra de vidro obteve uma melhor recolha das partículas nas curvas de 0 e -2kV. Enquanto que o filtro de polipropileno teve uma adaptação melhor em todas as curvas. Isto é notado nos gráficos 4.13 e 4.14, onde as curvas de filtração obtiveram um comportamento mais linear em relação às outras. Acredita-se que o meio filtrante de polipropileno pode ter uma carga eletrostática própria onde, para cargas maiores, as partículas se repelem, não formando uma torta de filtração muito grossa. Por outro lado, os ensaios realizados demonstraram que o filtro de fibra de vidro é neutro em relação à aplicação de cargas, ou seja, não tem interação com as partículas.

Analisando a Figura 4.14 vê-se que, para a carga de -1 kV a torta de filtração esta mais

adaptada recolhendo assim uma quantidade maior de partículas com uma queda de pressão menor. Em todos os ensaios foi possível observar que o comportamento das curvas de -2kV e a curva sem carga eletrostática são semelhante com comportamentos quase que idênticos, notando sempre um leve desvio da curva de -2kV, que tende para uma maior retenção de partículas e menor queda de pressão.

Verifica-se na Tabela 8, que para os dois meios filtrantes estudados, os valores da resistência específica da torta, diminuíram para carga de -2 kV, quando comparada a resistência das curvas sem cargas. Para o filtro de fibra de vidro a resistência diminuiu de $7,06 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ sem carga para $6,45 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ para -2 kV, porém para curva de -1 kV a resistência aumentou para $8,23 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$. Comprovando que a torta ficou mais compactada, dificultando o escoamento e a passagem do ar, como verificado na Figura 4.13.

O comportamento das curvas de filtração foi semelhante. Portanto, com a aplicação da carga eletrostática fica evidente através das curvas que alteraram a formação da torta, para o tecido de fibra de vidro, que é um tecido que não adere cargas. Entretanto para o tecido de polipropileno não se pode dizer que ocorreu alguma alteração. Verifica-se também que para o tecido de fibra de vidro, com a aplicação da carga de -1 kV, a formação da torta foi desfavorável, porque aumentou a perda de carga, com menor quantidade de massa retida. Esse comportamento é melhor visualizado na Figura 4.13. Porém para partículas com -2 kV e sem cargas a curva praticamente teve o mesmo comportamento.

A Figura 4.14, mostra que para o tecido de polipropileno as partículas com a carga aplicada de -1 kV, foram mais favoráveis na formação da torta, com a redução na queda de pressão e um aumento de massa coletada.

Tabela 8- Valores da resistência específica obtidos pela Equação 2.9.

Tensão (kv)	Filtro de fibra de vidro	Filtro de polipropileno
	K2 [10^3 s^{-1}]	
0	7,06	9,9
-1	8,23	7,32
-2	6,45	9,3

Fonte: Acervo pessoal.

Como apresentado na Tabela 9, para o filtro de polipropileno a maior resistência específica da torta obtida, foi para curva sem carga aplicada, com um valor de $9,9 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$,

enquanto a menor resistência específica da torta foi para curva de -1kV com $7,23 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$. Observando-se a Figura 4.14 vê-se que o ponto de colmatação das curvas de filtração para o polipropileno foi bem maior em relação as curvas do filtro de fibra de vidro apresentadas na Figura 4.13. Isto sugere que a filtração de superfície das partículas com o filtro somente se deu a partir de aproximadamente 0,75g de massa retida.

A menor resistência específica, foi obtida com uma carga de -1kV para o filtro de polipropileno e com tensão de -2,0 kV para o filtro de fibra de vidro.

Esta mudança de comportamento existe devido às diferenças dos meios filtrantes, já que os parâmetros de ensaios foram os mesmos.

Estes resultados comprovam os estudos realizados por Kyung (2008), onde é demonstrada a eficiência do tecido de polipropileno na absorção de cargas eletrostáticas, aplicadas através de carregamento corona. Quando comparado com outros meios filtrantes a eficiência de absorção do polipropileno é superior aos outros, podendo manter constante a eficiência de filtração por até 6 meses, isto foi comprovado no trabalho de Kyung (2008). Com isso, podemos dizer que o comportamento do filtro de tecido de polipropileno se mostrou diferente do tecido de fibra de vidro, devido à sua facilidade de absorção das cargas elétricas nas partículas, dificultando assim a interação das partículas com o filtro.

Enquanto que, para o filtro de fibra de vidro com partículas de 14 μm , as partículas carregadas se rearranjam com mais facilidade no meio, demonstrando que o filtro não tem interação com a carga eletrostática aplicada nas partículas, tornando-se neutro durante a filtração.

Apesar dos gráficos apresentarem um comportamento mais adequado nos filtros de polipropileno, este material não é indicado para o uso em fábricas de cimento, devido a grandes temperaturas no processo de produção. Os filtros de polipropileno não suportariam tal temperatura de trabalho.

Considerando que valores significativos de retenção de partículas foram obtidos através da aplicação da carga eletrostática e, à medida que se alterou o valor desta carga, obteve-se também uma leve mudança nos valores de porosidade e resistência específica da torta, na maioria dos casos apresentados.

Pode-se dizer que a aplicação da carga eletrostática na partícula tem efeito positivo na filtração de gases. Porém acredita-se que nem todas as partículas foram carregadas adequadamente devido à diferença de diâmetros utilizados. Nas partículas com 8 μm não se observou diferenças entre as curvas apresentadas na Figura 4.1, podendo se dizer que é provável que estas partículas, devido à sua geometria e tamanho, não aderiram as cargas aplicadas.

Na maioria dos ensaios apresentados a aplicação da tensão de -2 kV, diminuiu sua

resistência específica da torta e aumentou sua porosidade de Ergun, obtendo assim uma maior massa retida.

De acordo com BROWN (1988), é complicado analisar os resultados adquiridos com cargas eletrostáticas. O comportamento é difícil de prever e nem sempre são reproduzíveis. Foram apresentados resultados de filtros eletrostáticos carregados com aerossol, o efeito deste filtro é de aumentar a queda de pressão e reduzir a penetração no filtro, aumentando sua eficiência de filtração sem fazer qualquer contribuição para a resistência do fluxo de ar. A explicação deste comportamento é a formação de dendritos, causada pela atração eletrostática das fibras pelas partículas.

MELLO (2007), demonstra filtrações com cargas eletrostáticas nos meios filtrantes. Em comparação com o trabalho realizado, pode se dizer que as partículas carregadas podem ter transferido suas cargas eletrostáticas para o meio filtrante, e este se comportou conforme descrito acima, com aumento da queda de pressão e maior retenção de partículas. Ele ainda enfatiza no texto que a troca de carga elétrica é bem conhecida, apresentando como exemplo: o contato vigoroso de um pente de plástico com o cabelo, criando uma triboeletrificação.

RODRIGUES (2005); MELLO (2007), explica que para experimentos sem carregamento corona pode-se obter um aumento da eficiência eletroforética devido ao ganho de cargas elétricas nas partículas por triboeletrificação. O processo de carregamento elétrico por triboeletrificação é obtido a partir do choque das partículas nas tubulações de geradores de aerossóis, e ocorre simultaneamente com o carregamento corona. Isto ocorre devido ao contato e posteriormente separação de dois materiais, momento este onde há troca de elétrons entre duas superfícies. Portanto quanto maior a velocidade de filtração, mais vezes essas partículas se chocam trocando mais elétrons e aumentando cada vez mais sua carga elétrica, aumentando a eficiência de coleta. Isto pode explicar a eficiência das curvas de filtração sem cargas apresentadas no trabalho.

Contudo esta eficiência não é observada quando existe o carregamento corona, pois a magnitude do ganho de cargas através do efeito corona é muito superior que o da triboeletrificação. Porém em alguns casos apresentados neste trabalho não se vê com clareza a eficiência da aplicação do efeito corona, podendo-se dizer que a partícula não aderiu à carga, ou a carga não aderiu à partícula totalmente, ou o meio filtrante interferiu de alguma forma na eficiência da filtração.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitem apresentar as seguintes conclusões:

- Os ensaios realizados com aplicação de cargas nas partículas demonstraram em alguns casos, uma ótima adaptação para o filtro de fibra de vidro, com curvas de filtração tendendo ao aumento da torta de filtração e diminuição da resistência específica da torta.

- A carga ideal adquirida na maioria dos ensaios foi de - 2 kV, para partículas de cimento no meio filtrante de fibra de vidro. A massa retida foi superior a todas as outras cargas aplicadas, e a queda de pressão foi menor em relação às outras.

- Com a aplicação da carga de -2kV, foi observado que a porosidade aumentou e a resistência específica da torta, obteve seu menor valor. Com a diminuição da resistência específica, as mangas tendem a reter mais partículas, assim coletando uma carga maior do material particulado.

- Para o tecido de polipropileno a duração da filtração de profundidade foi bem maior em relação ao tecido de fibra de vidro.

- O filtro de fibra de vidro obteve curvas concorrentes que não convergiam para um mesmo ponto da torta de filtração nem de queda de pressão nos gráficos de perda de carga em função da massa retida. Enquanto que o polipropileno já obteve este perfil convergindo para um mesmo ponto.

- O diâmetro médio das partículas tem influência direta nos resultados, podendo ter uma grande interferência na eficiência de coleta das filtrações.

- Para as curvas sem aplicação de carga foi observado que em alguns casos, houve maior retenção de partículas. Isto ocorreu devido à dois fatores; a triboeletrificação natural que ocorre durante a filtração, que pode ter ocasionado uma carga nas partículas, fazendo com que elas se aderissem no filtro, com a torta mais compactada. Ou por não haver interação filtro-partícula durante a filtração, fazendo com que o processo não tivesse nenhuma interferência e a torta de filtração se formasse com mais facilidade.

6. SUGESTÕES

Como sugestões de trabalhos futuros sugerem-se:

- Uma maior investigação dos meios filtrantes, de suas características e possibilidade de obter uma carga eletrostática nos filtros antes mesmo da filtração. Utilização de outros meios filtrantes, pois há uma vasta gama de filtros no mercado;
- Estudar também outros tipos de material particulado no intuito de obter uma partícula que se adapte melhor com a carga eletrostática e obtenha uma menor perda de carga e maior massa retida no filtro;
- Avaliar a estrutura do meio filtrante após a filtração com o carregador corona para averiguar qual o desgaste do filtro, e assim analisar a viabilidade experimento.
- Realizar experimentos com aplicação da carga no meio filtrante, simultaneamente à aplicação de cargas nas partículas, para observar o comportamento das curvas de filtração e compará-las com as já existentes, a fim de concluir os métodos mais adequados para trabalhos futuros.
- Estudar minuciosamente qual é o tamanho de partícula ideal para uma filtração eficiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINT. Associação Brasileira das Indústrias de Não tecidos e Tecidos técnicos, 2012. Disponível em: <http://www.abint.org.br/>. (última verificação 02 -08-2012).

AGUIAR, M.L. **Filtração de ar em filtros de tecido**. (Dissertação de mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1991.

AGUIAR, M. L. **Filtração de ar em filtros de tecido: deposição e remoção da camada de pó formada**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 1995.

AGUIAR, M. L.; COURY, J. R.; Cake formation in Fabric Filtration of Gases. **Industrial Engineering Chemical Research**, v.35, p.3673-3679, 1996.

BERGMAN, W.; BIERMANN, A. Measurement Aerosol Concentrations as a Function of Size and Charge. *Aerosol Science and Technology*. 3, p 293-304, 1984.

BERNAUER. Disponível em; <www.bernauer.com.br>. Acesso em: 21/04/2015 às 10h33min.

BROWN, R.C.; GRAY,W.R.; BLACKFORD,D.B.; BOSTOCK,G.J. **Effect of industrial aerosols on the performance of electrically charged filter material**. *Annals of occupational hygiene*, 32 (1988) pp. 271-294.

CAVASSENO, V. **Industrial Air Pollution Engineering**, McGraw-Hill, USA, 1980.

CERON, L. P. **Desenvolvimento de filtro cartucho de polimida para altas temperaturas com resina epóxi dgeba e novo agente de cura**. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CHERMESINOFF, P.N.; YOUNG, R.A. *Air pollution control and design handbook*, part I. New York, Marcel Dekker Inc. 1977, p- 607.

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

CLIFT, R.; GRACE, J.R.; WEBER, M. E., Bubbles, Drops and particle. Academic Press. 1978 380p.

DENNIS, R.; KLEMM, H.A. **Recent concepts describing fabric filter system behavior.** Filtration and separation. Jan/Feb, 1982.

DONOVAN, R. P. **Fabric filtration for combustion sources.** Fundamental and basic technology. New York: Dekker, 1985.

DULLIEN, F. A. L. **Introduction to industrial gas cleaning.** San Diego: Academic Press, p.285, 1989.

FARGNOLI, A. G. **Estudo da compressibilidade de tortas de filtração de gases em filtros de tecido.** Dissertação de Mestrado. Universidade federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2010.

FENARA, B. C, RODRIGUES, M.V, AGUIAR, M.L. **Study of the electrostatic effect in the filtration of micrometer particles.** São Carlos: Departamento de Engenharia Química - UFSCar, 2011. II 265 Filtech.

FYELD, R.A.; OWENS, T.M. The effect of particle charge on penetration in an electret filter. IEEE Transactions on Industrial Application, 24 p. 725-731, 1988.

HINDS, W. C. **Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of airborne particles.** 2.ed., p.192-195, 1998.

INNOCENTINI, M.D.M.; PARDO, A.R.F; SALVINI, V.R.; PANDOLFELLI, V.C. How accurate is Darcy's Law for refractories. **The American Ceramic Society Bulltin**, November 1999.

JI,J.H.; BAE,G.N.; KANG,S.H.; HWANG,J. **Effect of particle loading on the collection performance of an electret cabin air filter for submicron aerosols.** Journal of aerosol science, Elsevier, November 2003.

KANAOKA, C.; MAO, N.; OTANI, Y.; YAO, Y. **Modeling the filtration process with a flat-type fabric filter.**Original paper. AdvancedPowderTechnol., vol. 17, nº 3, p. 237 – 256, 2006.

KIM, J.H. et al. **Temperature effect on the pressure drop and across the cake at coal gaseification ash formed on a ceramic filter.** Powder technology. V 18, p.67-73, 2008.

KYUNG,,J.C. **Morfologia e Eficiência de Filtragem de Ar por Materiais Não Trançados Carregados.** Trabalho apresentado no 18th ICCCS - International Symposium on Contamination Control. 2008.

LEITH, D.; ALLEN, R. W. K. Dust filtration by Fabric Filters. **Progress in Filtration and Separation**,v.4,p.1-55,1986.

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

MEIRA, C. R. de. **Desempenho de um precipitador eletrostático operando na remoção de nanopartículas de aerossóis.** 106 p. Tese (Mestrado em Engenharia Química). UFSCar, São Carlos, 2009.

MELLO, R. L. S., **Estudo do mecanismo eletroforético de coleta na filtração de aerossóis,** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2007.

NUNES, D. M. **Construção de um sistema de filtração de gases para o estudo da formação e remoção de tortas de filtração.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2011.

OGAWA, A. **Separation of particle from air and gases.** V.11, CRC Press, Boca Raton, FL 1984. 342p.

PEREIRA, R.L.F. **Estudo comparativo entre filtro de mangas e filtro eletrostático para o controle da emissão de particulados oriundos de fornos de clínquer.** Trabalho de Conclusão de Curso, UNIFRAN, 2014.

PAIVA A.; JUNIOR A. E.; CAMARA R.; ASSUNÇÃO A. B., FERREIRA E.M. **Custos Ambientais na Indústria de Cimento: Um Estudo na Itapetinga Agro- Industrial S/A.** XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2010;

REIS, J.C, AGUIAR, M.L. **Efeito do carregamento corona de partículas na formação de torta durante a filtração de gases.** Projeto de iniciação científica, Departamento de Engenharia química da UFScar. São Carlos, 2014.

RODRIGUES, A. C. M. **Estudo da formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos de polipropileno e de algodão.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2004.

RODRIGUES, M.V. **Determinação da carga eletrostática em aerossóis e seu efeito na filtração de gases.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2005.

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

SALEEM, M.; KHAN, R. U.; TAHIR, M. S.; KRAMMER, G. **Experimental study of cake formation on heat treated and membrane coated needle felts in a pilot scale pulse jet bag filter using optical in-situ cake height measurement.** *Powder Technology*, v.214, p. 388-399, 2011.

SILVA, C. R. N.; NEGRINI, V. S.; AGUIAR, M. L.;COURY, J. R. **Influence of gas velocity on cake formation and detachment.** *Powder Technology*, v.101, p. 165-172, 1999.

SVAROVSKY, L. **“Solid-Gas separation”**, Elsevier scientific publishing company, Amsterdam-oxford-new york, 1981.

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

TANABE, E.H. **Desempenho dos meios filtrantes na filtração de gases a altas pressões**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2011.

THEODORE, L. **Air pollution control equipment calculations**. Cap. 12, p. 503-513, 2008.

THEODORE, L.; BUONICORE, A.J. **Air pollution control equipment-particulates** Vol.01. CRC Press, Flórida, 1988.

TOGNETTI, E.R. **Influencia das condições operacionais na formação e remoção de tortas de filtração de gases**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2007.

VOTORANTIM CIMENTOS S.A., **Treinamento técnico operacional**. Itaú de Minas-MG, 2014.

WALSH, D. C. **Recent advances in the understanding of fibrous filter behaviour under solid particle load**. FiltrationandSeparation, June 1996, p. 501 – 506.

WOODHEAD, S. R.; ARMOUR-CHÉLU, D. I. **The influence of humidity, temperature and other variables on the electric charging characteristics of particulate aluminium hydroxide in gas-solid pipeline flows**. Journal of Electrostatics, 58, p. 171-183, 2003.

ANEXO A

- Ensaios de filtração para partículas de 8 μm , sem aplicação de carga eletrostática.

t (s)	ΔP (mmH ₂ O)	$\Delta P/\text{mi}$	Massa retida
0	10,30121	0	0,0000
5	8,67470	-15,9346369	0,0210
10	10,84337	5,31154564	0,0420
15	10,84337	5,31154564	0,0630
20	11,38554	10,6230913	0,0841
25	11,92771	15,9346369	0,1051
30	13,55422	31,8692739	0,1261
35	12,46988	21,2461826	0,1471
40	13,01205	26,5577282	0,1681
45	13,55422	31,8692739	0,1891
50	13,55422	31,8692739	0,2102
55	14,09639	37,1808195	0,2312
60	14,09639	37,1808195	0,2522
65	14,63855	42,4923651	0,2732
70	14,63855	42,4923651	0,2942
75	14,63855	42,4923651	0,3152
80	14,63855	42,4923651	0,3363
85	14,63855	42,4923651	0,3573
90	15,72289	53,1154564	0,3783
95	15,72289	53,1154564	0,3993
100	17,34940	69,0500933	0,4203
105	17,34940	69,0500933	0,4413
110	20,06024	95,6078216	0,4624

115	21,14458	106,230913	0,4834
120	21,68675	111,542458	0,5044
125	22,77109	122,16555	0,5254
130	23,85542	132,788641	0,5464
135	24,93976	143,411732	0,5674
140	29,27711	185,904097	0,5884
145	29,81928	191,215643	0,6095
150	29,27711	185,904097	0,6305
155	31,98795	212,461826	0,6515
160	33,07229	223,084917	0,6725
165	33,61446	228,396463	0,6935
170	34,69880	239,019554	0,7145
175	37,95181	270,888828	0,7356
180	37,95181	270,888828	0,7566
185	38,49398	276,200373	0,7776
190	40,12048	292,13501	0,7986
195	40,66265	297,446556	0,8196
200	41,20482	302,758102	0,8406
205	42,28916	313,381193	0,8617
210	45,54217	345,250467	0,8827
215	45,54217	345,250467	0,9037
220	46,62651	355,873558	0,9247
225	48,79518	377,119741	0,9457
230	48,25301	371,808195	0,9667
235	48,79518	377,119741	0,9878
240	49,87952	387,742832	1,0088
245	50,42169	393,054378	1,0298
250	52,04820	408,989014	1,0508
255	52,04820	408,989014	1,0718
260	54,21687	430,235197	1,0928

265	54,75904	435,546743	1,1138
270	55,84338	446,169834	1,1349
275	55,30121	440,858288	1,1559
280	56,38554	451,48138	1,1769
285	58,55422	472,727562	1,1979
290	60,72289	493,973745	1,2189
295	60,72289	493,973745	1,2399
300	61,26506	499,28529	1,2610
305	63,97591	525,843019	1,2820
310	65,60241	541,777655	1,3030
315	66,14458	547,089201	1,3240
320	67,22892	557,712292	1,3450
325	68,85542	573,646929	1,3660
330	68,85542	573,646929	1,3871
335	69,39759	578,958475	1,4081
340	71,56627	600,204658	1,4291
345	72,10844	605,516203	1,4501
350	72,65061	610,827749	1,4711
355	72,65061	610,827749	1,4921
360	73,19277	616,139294	1,5132
365	75,36145	637,385477	1,5342
370	75,36145	637,385477	1,5552
375	75,90362	642,697023	1,5762
380	76,44579	648,008568	1,5972
385	76,98796	653,320114	1,6182
390	78,07229	663,943205	1,6392
395	76,98796	653,320114	1,6603
400	75,90362	642,697023	1,6813
405	77,53012	658,63166	1,7023
410	78,61446	669,254751	1,7233

415	75,36145	637,385477	1,7443
420	80,78314	690,500933	1,7653
425	80,78314	690,500933	1,7864
430	76,98796	653,320114	1,8074
435	76,98796	653,320114	1,8284
440	76,44579	648,008568	1,8494
445	77,53012	658,63166	1,8704
450	78,07229	663,943205	1,8914
455	79,15663	674,566297	1,9125
460	78,07229	663,943205	1,9335
465	79,69880	679,877842	1,9545
470	80,24097	685,189388	1,9755
475	80,24097	685,189388	1,9965
480	81,32531	695,812479	2,0175
485	81,32531	695,812479	2,0386
490	81,32531	695,812479	2,0596
495	82,40964	706,43557	2,0806
500	83,49398	717,058662	2,1016
505	83,49398	717,058662	2,1226
510	84,03615	722,370207	2,1436
515	84,03615	722,370207	2,1646
520	83,49398	717,058662	2,1857
525	83,49398	717,058662	2,2067
530	83,49398	717,058662	2,2277
535	82,95181	711,747116	2,2487
540	84,03615	722,370207	2,2697
545	85,12049	732,993299	2,2907
550	85,66265	738,304844	2,3118
555	86,74699	748,927936	2,3328
560	91,62651	796,731846	2,3538

565	90,00000	780,797209	2,3748
570	90,00000	780,797209	2,3958
575	92,71085	807,354938	2,4168
580	93,25302	812,666483	2,4379
585	95,42169	833,912666	2,4589
590	95,96386	839,224211	2,4799
595	98,67470	865,78194	2,5009
600	95,42169	833,912666	2,5219
605	97,59037	855,158848	2,5429
610	97,59037	855,158848	2,5640
615	98,67470	865,78194	2,5850
620	100,30121	881,716577	2,6060
625	100,30121	881,716577	2,6270

- Ensaios de filtração para partículas de 8 μm , com aplicação de -1,0 kV.

t (s)	ΔP (mmH ₂ O)	$\Delta P/\text{mi}$	Massa retida
0	8,1325305	0	0,0000
5	7,5903618	-5,31154564	0,0246
10	8,1325305	0	0,0492
15	7,5903618	-5,31154564	0,0738
20	8,1325305	0	0,0984
25	8,6746992	5,31154564	0,1231
30	8,6746992	5,31154564	0,1477
35	10,843374	26,5577282	0,1723
40	10,843374	26,5577282	0,1969
45	11,3855427	31,8692739	0,2215

50	11,9277114	37,1808195	0,2461
55	11,9277114	37,1808195	0,2707
60	11,9277114	37,1808195	0,2953
65	12,4698801	42,4923651	0,3199
70	13,0120488	47,8039108	0,3445
75	13,5542175	53,1154564	0,3692
80	14,0963862	58,4270021	0,3938
85	14,6385549	63,7385477	0,4184
90	14,6385549	63,7385477	0,4430
95	16,8072297	84,9847303	0,4676
100	17,8915671	95,6078216	0,4922
105	17,8915671	95,6078216	0,5168
110	20,6024106	122,16555	0,5414
115	22,7710854	143,411732	0,5660
120	24,3975915	159,346369	0,5907
125	26,0240976	175,281006	0,6153
130	29,8192785	212,461826	0,6399
135	30,9036159	223,084917	0,6645
140	31,9879533	233,708008	0,6891
145	34,6987968	260,265736	0,7137
150	37,4096403	286,823465	0,7383
155	39,5783151	308,069647	0,7629
160	40,6626525	318,692739	0,7875
165	42,8313273	339,938921	0,8122
170	45,5421708	366,496649	0,8368
175	46,6265082	377,119741	0,8614
180	47,1686769	382,431286	0,8860
185	49,3373517	403,677469	0,9106
190	50,9638578	419,612106	0,9352
195	49,3373517	403,677469	0,9598

200	51,5060265	424,923651	0,9844
205	54,21687	451,48138	1,0090
210	50,9638578	419,612106	1,0336
215	54,21687	451,48138	1,0583
220	54,21687	451,48138	1,0829
225	55,3012074	462,104471	1,1075
230	55,8433761	467,416017	1,1321
235	56,3855448	472,727562	1,1567
240	56,3855448	472,727562	1,1813
245	57,4698822	483,350653	1,2059
250	57,4698822	483,350653	1,2305
255	58,0120509	488,662199	1,2551
260	58,5542196	493,973745	1,2798
265	59,0963883	499,28529	1,3044
270	61,2650631	520,531473	1,3290
275	60,7228944	515,219927	1,3536
280	63,4337379	541,777655	1,3782
285	63,9759066	547,089201	1,4028
290	65,060244	557,712292	1,4274
295	65,060244	557,712292	1,4520
300	62,8915692	536,46611	1,4766
305	65,6024127	563,023838	1,5013
310	66,1445814	568,335384	1,5259
315	66,1445814	568,335384	1,5505
320	66,1445814	568,335384	1,5751
325	66,1445814	568,335384	1,5997
330	65,060244	557,712292	1,6243
335	67,7710875	584,270021	1,6489
340	68,8554249	594,893112	1,6735
345	68,8554249	594,893112	1,6981

350	71,5662684	621,45084	1,7227
355	72,6506058	632,073931	1,7474
360	74,8192806	653,320114	1,7720
365	74,8192806	653,320114	1,7966
370	75,903618	663,943205	1,8212
375	76,9879554	674,566297	1,8458
380	78,0722928	685,189388	1,8704
385	80,7831363	711,747116	1,8950
390	81,8674737	722,370207	1,9196
395	82,4096424	727,681753	1,9442
400	83,4939798	738,304844	1,9689
405	82,4096424	727,681753	1,9935
410	81,8674737	722,370207	2,0181
415	82,9518111	732,993299	2,0427
420	83,4939798	738,304844	2,0673
425	83,4939798	738,304844	2,0919
430	83,4939798	738,304844	2,1165
435	85,1204859	754,239481	2,1411
440	83,4939798	738,304844	2,1657
445	85,6626546	759,551027	2,1904
450	84,0361485	743,61639	2,2150
455	84,0361485	743,61639	2,2396
460	83,4939798	738,304844	2,2642
465	84,0361485	743,61639	2,2888
470	85,1204859	754,239481	2,3134
475	84,0361485	743,61639	2,3380
480	85,6626546	759,551027	2,3626
485	84,5783172	748,927936	2,3872
490	85,1204859	754,239481	2,4118
495	84,5783172	748,927936	2,4365

500	84,5783172	748,927936	2,4611
505	85,1204859	754,239481	2,4857
510	85,1204859	754,239481	2,5103
515	87,2891607	775,485664	2,5349
520	88,9156668	791,420301	2,5595
525	85,6626546	759,551027	2,5841
530	88,9156668	791,420301	2,6087
535	88,9156668	791,420301	2,6333
540	85,6626546	759,551027	2,6580
545	89,4578355	796,731846	2,6826
550	89,4578355	796,731846	2,7072
555	87,8313294	780,797209	2,7318
560	85,1204859	754,239481	2,7564
565	87,2891607	775,485664	2,7810
570	85,6626546	759,551027	2,8056
575	86,2048233	764,862572	2,8302
580	86,2048233	764,862572	2,8548
585	85,6626546	759,551027	2,8795
590	89,4578355	796,731846	2,9041
595	90,5421729	807,354938	2,9287
600	92,168679	823,289575	2,9533
605	94,8795225	849,847303	2,9779
610	95,9638599	860,470394	3,0025
615	98,6747034	887,028122	3,0271
620	99,7590408	897,651214	3,0517
625	100,8433782	908,274305	3,0763
630	102,4698843	924,208942	3,1009
635	103,5542217	934,832033	3,1256
640	106,8072339	966,701307	3,1502
645	106,8072339	966,701307	3,1748

650	107,3494026	972,012852	3,1994
655	108,43374	982,635944	3,2240

- Ensaios de filtração para partículas de 8 μm , com aplicação de -2,0 kV.

t (s)	ΔP (mmH ₂ O)	$\Delta P/\text{mi}$	Massa retida
0	14,6385549	0	0,0000
5	14,6385549	0	0,0219
10	14,6385549	0	0,0438
15	14,6385549	0	0,0656
20	14,6385549	0	0,0875
25	15,1807236	5,31154564	0,1094
30	15,1807236	5,31154564	0,1313
35	15,1807236	5,31154564	0,1532
40	15,7228923	10,6230913	0,1750
45	16,265061	15,9346369	0,1969
50	16,8072297	21,2461826	0,2188
55	16,8072297	21,2461826	0,2407
60	16,8072297	21,2461826	0,2626
65	17,3493984	26,5577282	0,2844
70	17,3493984	26,5577282	0,3063
75	17,3493984	26,5577282	0,3282
80	19,5180732	47,8039108	0,3501
85	18,4337358	37,1808195	0,3720
90	19,5180732	47,8039108	0,3938
95	19,5180732	47,8039108	0,4157
100	20,6024106	58,4270021	0,4376

105	20,6024106	58,4270021	0,4595
110	21,1445793	63,7385477	0,4814
115	21,1445793	63,7385477	0,5032
120	21,686748	69,0500933	0,5251
125	22,7710854	79,6731846	0,5470
130	22,7710854	79,6731846	0,5689
135	23,3132541	84,9847303	0,5908
140	24,3975915	95,6078216	0,6126
145	25,4819289	106,230913	0,6345
150	28,1927724	132,788641	0,6564
155	29,8192785	148,723278	0,6783
160	30,9036159	159,346369	0,7002
165	32,530122	175,281006	0,7220
170	34,6987968	196,527189	0,7439
175	37,4096403	223,084917	0,7658
180	38,4939777	233,708008	0,7877
185	40,1204838	249,642645	0,8096
190	41,2048212	260,265736	0,8314
195	41,7469899	265,577282	0,8533
200	42,2891586	270,888828	0,8752
205	43,373496	281,511919	0,8971
210	46,0843395	308,069647	0,9190
215	48,2530143	329,31583	0,9408
220	48,795183	334,627375	0,9627
225	49,8795204	345,250467	0,9846
230	51,5060265	361,185104	1,0065
235	52,0481952	366,496649	1,0284
240	54,21687	387,742832	1,0502
245	55,8433761	403,677469	1,0721
250	56,3855448	408,989014	1,0940

255	57,4698822	419,612106	1,1159
260	58,0120509	424,923651	1,1378
265	59,0963883	435,546743	1,1596
270	59,638557	440,858288	1,1815
275	63,4337379	478,039108	1,2034
280	65,060244	493,973745	1,2253
285	65,060244	493,973745	1,2472
290	65,060244	493,973745	1,2690
295	66,6867501	509,908382	1,2909
300	67,2289188	515,219927	1,3128
305	68,8554249	531,154564	1,3347
310	69,3975936	536,46611	1,3566
315	69,9397623	541,777655	1,3784
320	68,8554249	531,154564	1,4003
325	68,8554249	531,154564	1,4222
330	71,5662684	557,712292	1,4441
335	72,1084371	563,023838	1,4660
340	73,1927745	573,646929	1,4878
345	72,6506058	568,335384	1,5097
350	73,1927745	573,646929	1,5316
355	74,2771119	584,270021	1,5535
360	73,7349432	578,958475	1,5754
365	74,2771119	584,270021	1,5972
370	74,2771119	584,270021	1,6191
375	74,8192806	589,581566	1,6410
380	74,2771119	584,270021	1,6629
385	75,903618	600,204658	1,6848
390	75,903618	600,204658	1,7066
395	78,0722928	621,45084	1,7285
400	81,325305	653,320114	1,7504

405	82,9518111	669,254751	1,7723
410	84,0361485	679,877842	1,7942
415	86,2048233	701,124025	1,8160
420	86,746992	706,43557	1,8379
425	91,6265103	754,239481	1,8598
430	92,168679	759,551027	1,8817
435	91,6265103	754,239481	1,9036
440	93,7951851	775,485664	1,9254
445	93,2530164	770,174118	1,9473
450	92,7108477	764,862572	1,9692
455	94,3373538	780,797209	1,9911
460	94,3373538	780,797209	2,0130
465	94,3373538	780,797209	2,0348
470	94,8795225	786,108755	2,0567
475	95,4216912	791,420301	2,0786
480	95,4216912	791,420301	2,1005
485	95,9638599	796,731846	2,1224
490	97,590366	812,666483	2,1442
495	97,590366	812,666483	2,1661
500	95,4216912	791,420301	2,1880

- Ensaios de filtração para partículas de 20 μm , sem aplicação de carga eletrostática.

tempo	ΔP Pa	Massa Retida
0	0	0
5	17,69277	0,04839052
10	97,31025	0,14517155
15	106,1566	0,19356206

20	136,2343	0,24195258
25	185,7741	0,2903431
30	185,7741	0,38712413
35	205,2362	0,48390516
40	205,2362	0,53229568
45	212,3133	0,62907671
50	230,006	0,77424826
55	230,006	0,82263878
60	237,0831	0,87102929
65	240,6217	0,91941981
70	254,7759	0,96781032
75	281,3151	1,01620084
80	293,7	1,06459136
85	307,8542	1,11298187
90	302,5464	1,16137239
95	332,6241	1,20976291
100	343,2398	1,25815342
105	362,7018	1,30654394
110	401,6259	1,35493445
115	417,5494	1,40332497
120	419,3187	1,45171549
125	429,9344	1,500106
130	440,55	1,54849652
135	454,7042	1,69366807
140	467,0892	1,74205858
145	493,6283	1,7904491
150	497,1669	1,88723013
155	532,5524	2,0807922
160	544,9374	2,12918271
165	567,938	2,17757323
170	587,4	2,22596375
175	580,3229	2,27435426
180	608,6314	2,32274478
185	626,3241	2,37113529

190	642,2476	2,41952581
195	647,5555	2,46791633
200	695,3259	2,51630684
205	713,0187	2,61308788
210	728,9422	2,66147839
215	762,5585	2,75825942
220	776,7127	2,85504046
225	797,944	2,90343097
230	838,6374	2,95182149
235	851,0223	3,000212
240	859,8687	3,04860252
245	874,0229	3,09699304
250	909,4085	3,14538355
255	943,0247	3,24216459
260	944,794	3,2905551
265	966,0253	3,33894562
270	1153,569	3,38733613
275	989,0259	3,43572665

- Ensaios de filtração para partículas de 20 μm , com aplicação de -1,0 kV.

tempo	ΔP Pa	Massa Retida
0	0	0
5	10,61566	0,060293
10	104,3874	0,120587
15	111,4645	0,18088
20	115,003	0,241174

25	130,9265	0,301467
30	132,6958	0,361761
35	130,9265	0,422054
40	139,7729	0,482348
45	148,6193	0,542641
50	150,3886	0,602935
55	169,8506	0,663228
60	196,3898	0,723522
65	194,6205	0,783815
70	210,544	0,844109
75	230,006	0,904402
80	228,2368	0,964696
85	245,9295	1,024989
90	251,2374	1,085283
95	260,0837	1,145576
100	265,3916	1,20587
105	281,3151	1,266163
110	288,3922	1,326456
115	295,4693	1,38675
120	300,7771	1,447043
125	322,0084	1,507337
130	332,6241	1,56763
135	352,0862	1,627924
140	362,7018	1,688217
145	376,856	1,748511
150	392,7795	1,808804
155	394,5488	1,869098
160	433,4729	1,929391
165	421,088	1,989685
170	498,9362	2,049978
175	511,3211	2,110272
180	532,5524	2,170565
185	544,9374	2,230859
190	559,0916	2,291152

195	583,8615	2,351446
200	596,2464	2,411739
205	603,3235	2,472033
210	612,1699	2,532326
215	635,1705	2,592619
220	656,4018	2,652913
225	695,32	2,713206
230	753,7	2,7735
235	785,5	2,833793
240	801	2,894087

- Ensaios de filtração para partículas de 20 μm , com aplicação de -2,0 kV.

Tempo	ΔP Pa	Massa Retida
0	0	0
5	58,38615	0,041511
10	125,6187	0,083022
15	130,9265	0,124534
20	132,6958	0,207556
25	148,6193	0,249067
30	153,9271	0,332089
35	162,7735	0,456623
40	168,0813	0,539645
45	187,5434	0,581156
50	199,9283	0,70569
55	207,0054	0,747201
60	210,544	0,788712
65	226,4675	0,830224

70	235,3139	0,913246
75	238,8524	0,954757
80	242,391	0,996268
85	300	1,037779
90	349	1,079291
95	399,8566	1,120802
100	410,4723	1,162313
105	421,088	1,203824
110	426,3958	1,245335
115	437,0115	1,328358
120	447,6271	1,41138
125	458,2428	1,494402
130	472,397	1,535913
135	497,1669	1,660447
140	504,244	1,701958
145	534,3217	1,784981
150	548,4759	1,826492
155	576,7844	1,992536
160	598,0157	2,075559
165	605,0928	2,11707
170	615,7085	2,158581
175	635,1705	2,241603
180	638,7091	2,283115
185	665,2482	2,366137
190	674,0946	2,407648
195	744,8657	2,449159
200	794,4055	2,490671
205	829,791	2,532182
210	851,0223	2,573693
215	870,4844	2,615204
220	897,0235	2,656715
225	920,0241	2,698226
230	985,4874	2,739738

- Ensaios de filtração para partículas de 14 μm , sem aplicação de carga eletrostática.

t (s)	ΔP (mmH ₂ O)	$\Delta P/\text{mi}$	Massa retida
0	15,1807236	0	0,0000
5	15,1807236	0	0,0301
10	15,7228923	5,31154564	0,0602
15	15,1807236	0	0,0903
20	15,7228923	5,31154564	0,1204
25	16,265061	10,6230913	0,1505
30	15,7228923	5,31154564	0,1806
35	16,265061	10,6230913	0,2107
40	16,8072297	15,9346369	0,2408
45	17,3493984	21,2461826	0,2709
50	19,5180732	42,4923651	0,3010
55	20,0602419	47,8039108	0,3311
60	20,6024106	53,1154564	0,3611
65	21,686748	63,7385477	0,3912
70	22,2289167	69,0500933	0,4213
75	22,7710854	74,361639	0,4514
80	24,3975915	90,2962759	0,4815
85	25,4819289	100,919367	0,5116
90	28,7349411	132,788641	0,5417
95	29,8192785	143,411732	0,5718
100	30,9036159	154,034824	0,6019
105	32,530122	169,969461	0,6320
110	34,1566281	185,904097	0,6621

115	37,4096403	217,773371	0,6922
120	39,0361464	233,708008	0,7223
125	39,5783151	239,019554	0,7524
130	40,6626525	249,642645	0,7825
135	41,7469899	260,265736	0,8126
140	42,8313273	270,888828	0,8427
145	45,0000021	292,13501	0,8728
150	46,6265082	308,069647	0,9029
155	47,7108456	318,692739	0,9330
160	48,795183	329,31583	0,9631
165	48,795183	329,31583	0,9932
170	49,8795204	339,938921	1,0233
175	49,8795204	339,938921	1,0534
180	54,21687	382,431286	1,0834
185	55,3012074	393,054378	1,1135
190	56,3855448	403,677469	1,1436
195	57,4698822	414,30056	1,1737
200	57,4698822	414,30056	1,2038
205	59,0963883	430,235197	1,2339
210	59,638557	435,546743	1,2640
215	60,7228944	446,169834	1,2941
220	62,3494005	462,104471	1,3242
225	64,5180753	483,350653	1,3543
230	66,1445814	499,28529	1,3844
235	66,1445814	499,28529	1,4145
240	68,3132562	520,531473	1,4446
245	68,8554249	525,843019	1,4747
250	69,3975936	531,154564	1,5048
255	71,0240997	547,089201	1,5349
260	73,1927745	568,335384	1,5650

265	69,3975936	531,154564	1,5951
270	68,3132562	520,531473	1,6252
275	74,8192806	584,270021	1,6553
280	74,8192806	584,270021	1,6854
285	75,3614493	589,581566	1,7155
290	75,3614493	589,581566	1,7456
295	76,4457867	600,204658	1,7756
300	76,9879554	605,516203	1,8057
305	75,903618	594,893112	1,8358
310	75,903618	594,893112	1,8659
315	76,4457867	600,204658	1,8960
320	77,5301241	610,827749	1,9261
325	78,0722928	616,139294	1,9562
330	81,8674737	653,320114	1,9863
335	80,2409676	637,385477	2,0164
340	80,7831363	642,697023	2,0465
345	81,8674737	653,320114	2,0766
350	82,4096424	658,63166	2,1067
355	83,4939798	669,254751	2,1368
360	83,4939798	669,254751	2,1669
365	84,5783172	679,877842	2,1970
370	84,5783172	679,877842	2,2271
375	84,5783172	679,877842	2,2572
380	85,6626546	690,500933	2,2873
385	90,5421729	738,304844	2,3174
390	91,0843416	743,61639	2,3475
395	86,746992	701,124025	2,3776
400	88,9156668	722,370207	2,4077
405	92,168679	754,239481	2,4378
410	92,7108477	759,551027	2,4679

415	93,7951851	770,174118	2,4979
420	92,168679	754,239481	2,5280
425	93,7951851	770,174118	2,5581
430	92,168679	754,239481	2,5882
435	92,7108477	759,551027	2,6183
440	92,7108477	759,551027	2,6484
445	93,2530164	764,862572	2,6785
450	93,2530164	764,862572	2,7086
455	93,2530164	764,862572	2,7387
460	95,4216912	786,108755	2,7688
465	94,8795225	780,797209	2,7989
470	95,4216912	786,108755	2,8290

- Ensaio de filtração para partículas de 14 μm , com aplicação de -1,0kV.

t (s)	ΔP (mmH ₂ O)	$\Delta P/\text{mi}$	Massa retida
0	15,1807236	0	0,0000
5	15,1807236	0	0,0363
10	15,7228923	5,31154564	0,0726
15	15,7228923	5,31154564	0,1089
20	16,8072297	15,9346369	0,1452
25	17,3493984	21,2461826	0,1815
30	17,3493984	21,2461826	0,2178
35	19,5180732	42,4923651	0,2541
40	20,0602419	47,8039108	0,2904
45	21,1445793	58,4270021	0,3267
50	21,1445793	58,4270021	0,3630

55	22,2289167	69,0500933	0,3993
60	22,7710854	74,361639	0,4356
65	23,3132541	79,6731846	0,4719
70	23,8554228	84,9847303	0,5082
75	25,4819289	100,919367	0,5445
80	29,8192785	143,411732	0,5808
85	31,4457846	159,346369	0,6171
90	33,6144594	180,592552	0,6534
95	36,8674716	212,461826	0,6898
100	39,5783151	239,019554	0,7261
105	41,2048212	254,954191	0,7624
110	45,5421708	297,446556	0,7987
115	47,7108456	318,692739	0,8350
120	49,3373517	334,627375	0,8713
125	51,5060265	355,873558	0,9076
130	54,7590387	387,742832	0,9439
135	56,9277135	408,989014	0,9802
140	58,5542196	424,923651	1,0165
145	60,1807257	440,858288	1,0528
150	62,8915692	467,416017	1,0891
155	65,060244	488,662199	1,1254
160	66,1445814	499,28529	1,1617
165	66,6867501	504,596836	1,1980
170	68,8554249	525,843019	1,2343
175	71,5662684	552,400747	1,2706
180	72,6506058	563,023838	1,3069
185	74,2771119	578,958475	1,3432
190	74,8192806	584,270021	1,3795
195	75,903618	594,893112	1,4158
200	77,5301241	610,827749	1,4521

205	78,6144615	621,45084	1,4884
210	81,325305	648,008568	1,5247
215	82,9518111	663,943205	1,5610
220	84,5783172	679,877842	1,5973
225	85,6626546	690,500933	1,6336
230	84,0361485	674,566297	1,6699
235	88,3734981	717,058662	1,7062
240	90,0000042	732,993299	1,7425
245	90,5421729	738,304844	1,7788
250	88,9156668	722,370207	1,8151
255	90,5421729	738,304844	1,8514
260	91,6265103	748,927936	1,8877
265	92,7108477	759,551027	1,9240
270	92,7108477	759,551027	1,9603
275	92,168679	754,239481	1,9966
280	94,3373538	775,485664	2,0329
285	94,3373538	775,485664	2,0693
290	95,4216912	786,108755	2,1056
295	98,1325347	812,666483	2,1419
300	98,6747034	817,978029	2,1782
305	99,7590408	828,60112	2,2145
310	100,3012095	833,912666	2,2508
315	101,9277156	849,847303	2,2871
320	103,012053	860,470394	2,3234
325	103,5542217	865,78194	2,3597
330	98,6747034	817,978029	2,3960
335	99,2168721	823,289575	2,4323
340	99,7590408	828,60112	2,4686
345	100,3012095	833,912666	2,5049
350	100,8433782	839,224211	2,5412

355	100,8433782	839,224211	2,5775
360	103,5542217	865,78194	2,6138
365	103,012053	860,470394	2,6501
370	103,5542217	865,78194	2,6864
375	103,5542217	865,78194	2,7227
380	106,2650652	892,339668	2,7590

- Ensaios de filtração para partículas de 14 μm , com aplicação de -2,0kV.

t (s)	ΔP (mmH ₂ O)	$\Delta P/\text{mi}$	Massa retida
0	13,0120488	0	0,0000
5	13,0120488	0	0,0429
10	13,5542175	5,31154564	0,0858
15	14,6385549	15,9346369	0,1288
20	15,1807236	21,2461826	0,1717
25	15,1807236	21,2461826	0,2146
30	17,3493984	42,4923651	0,2575
35	20,0602419	69,0500933	0,3005
40	21,1445793	79,6731846	0,3434
45	21,686748	84,9847303	0,3863
50	23,8554228	106,230913	0,4292
55	24,9397602	116,854004	0,4721
60	26,5662663	132,788641	0,5151
65	29,8192785	164,657915	0,5580
70	30,9036159	175,281006	0,6009
75	31,9879533	185,904097	0,6438
80	32,530122	191,215643	0,6868
85	34,1566281	207,15028	0,7297

90	37,4096403	239,019554	0,7726
95	37,951809	244,3311	0,8155
100	40,1204838	265,577282	0,8584
105	41,7469899	281,511919	0,9014
110	43,373496	297,446556	0,9443
115	46,6265082	329,31583	0,9872
120	48,795183	350,562012	1,0301
125	49,8795204	361,185104	1,0731
130	52,0481952	382,431286	1,1160
135	54,7590387	408,989014	1,1589
140	56,3855448	424,923651	1,2018
145	57,4698822	435,546743	1,2447
150	58,0120509	440,858288	1,2877
155	57,4698822	435,546743	1,3306
160	60,7228944	467,416017	1,3735
165	60,7228944	467,416017	1,4164
170	60,1807257	462,104471	1,4594
175	61,2650631	472,727562	1,5023
180	63,9759066	499,28529	1,5452
185	64,5180753	504,596836	1,5881
190	65,6024127	515,219927	1,6310
195	65,6024127	515,219927	1,6740
200	66,6867501	525,843019	1,7169
205	67,2289188	531,154564	1,7598
210	67,7710875	536,46611	1,8027
215	68,3132562	541,777655	1,8456
220	68,8554249	547,089201	1,8886
225	69,3975936	552,400747	1,9315
230	73,7349432	594,893112	1,9744
235	74,2771119	600,204658	2,0173

240	75,3614493	610,827749	2,0603
245	74,2771119	600,204658	2,1032
250	75,3614493	610,827749	2,1461
255	80,2409676	658,63166	2,1890
260	76,4457867	621,45084	2,2319
265	81,325305	669,254751	2,2749
270	80,2409676	658,63166	2,3178
275	82,4096424	679,877842	2,3607
280	82,9518111	685,189388	2,4036
285	83,4939798	690,500933	2,4466
290	84,0361485	695,812479	2,4895
295	85,1204859	706,43557	2,5324
300	86,2048233	717,058662	2,5753
305	84,0361485	695,812479	2,6182
310	88,9156668	743,61639	2,6612
315	91,6265103	770,174118	2,7041
320	92,7108477	780,797209	2,7470
325	91,6265103	770,174118	2,7899
330	93,7951851	791,420301	2,8329
335	94,3373538	796,731846	2,8758
340	95,4216912	807,354938	2,9187
345	92,7108477	780,797209	2,9616
350	97,590366	828,60112	3,0045
355	93,7951851	791,420301	3,0475
360	94,3373538	796,731846	3,0904
365	94,3373538	796,731846	3,1333
370	95,4216912	807,354938	3,1762
375	97,590366	828,60112	3,2192
380	98,1325347	833,912666	3,2621
385	98,6747034	839,224211	3,3050

Obs: Todos os ensaios acima foram realizados em filtro de fibra de vidro.

Filtros de polipropileno.

- Ensaios de filtração para partículas de 14 μm , sem aplicação de cargas.

t (s)	ΔP (mmH ₂ O)	$\Delta P/\text{mi}$	Massa retida
0	104,4603976	0	0,0000
5	102,6898824	- 1,77051521	0,0315
10	102,6898824	- 1,77051521	0,0630
15	106,2309128	1,77051521	0,0945
20	108,0014281	3,54103043	0,1260
25	109,7719433	5,31154564	0,1575
30	111,5424585	7,08206086	0,1890
35	120,3950346	15,9346369	0,2205
40	118,6245193	14,1641217	0,2520
45	120,3950346	15,9346369	0,2835
50	123,936065	19,4756674	0,3150
55	125,7065802	21,2461826	0,3465
60	129,2476106	24,787213	0,3780
65	129,2476106	24,787213	0,4095
70	131,0181258	26,5577282	0,4410

75	136,3296715	31,8692739	0,4725
80	138,1001867	33,6397891	0,5040
85	143,4117323	38,9513347	0,5355
90	150,4937932	46,0333956	0,5670
95	155,8053388	51,3449412	0,5985
100	162,8873997	58,4270021	0,6300
105	166,4284301	61,9680325	0,6615
110	171,7399758	67,2795781	0,6931
115	177,0515214	72,5911238	0,7246
120	187,6746127	83,2142151	0,7561
125	194,7566735	90,2962759	0,7876
130	214,2323409	109,771943	0,8191
135	226,6259474	122,16555	0,8506
140	237,2490387	132,788641	0,8821
145	244,3310995	139,870702	0,9136
150	251,4131604	146,952763	0,9451
155	262,0362517	157,575854	0,9766
160	277,9708886	173,510491	1,0081
165	292,1350103	187,674613	1,0396
170	308,0696472	203,60925	1,0711
175	316,9222233	212,461826	1,1026
180	338,1684059	233,708008	1,1341
185	352,3325276	247,87213	1,1656
190	366,4966493	262,036252	1,1971
195	375,3492254	270,888828	1,2286
200	403,6774688	299,217071	1,2601
205	424,9236514	320,463254	1,2916
210	439,0877731	334,627375	1,3231
215	453,2518948	348,791497	1,3546
220	463,8749861	359,414588	1,3861

225	490,4327143	385,972317	1,4176
230	508,1378664	403,677469	1,4491
235	525,8430186	421,382621	1,4806
240	532,9250794	428,464682	1,5121
245	547,0892011	442,628804	1,5436
250	573,6469293	469,186532	1,5751
255	594,8931119	490,432714	1,6066
260	616,1392945	511,678897	1,6381
265	628,532901	524,072503	1,6696
270	651,5495988	547,089201	1,7011
275	674,5662965	570,105899	1,7326
280	679,8778422	575,417445	1,7641
285	711,747116	607,286718	1,7956
290	717,0586617	612,598264	1,8271
295	731,2227834	626,762386	1,8586
300	748,9279355	644,467538	1,8901
305	777,256179	672,795781	1,9216
310	821,5190593	717,058662	1,9531
315	835,683181	731,222783	1,9846
320	842,7652419	738,304844	2,0162
325	869,3229701	764,862572	2,0477
330	874,6345157	770,174118	2,0792
335	892,3396679	787,87927	2,1107
340	901,1922439	796,731846	2,1422
345	913,5858504	809,125453	2,1737
350	564,7943533	460,333956	2,2052
355	577,1879598	472,727562	2,2367

- Ensaios de filtração para partículas de 14 μm , com aplicação de -1 kV.

t (s)	ΔP (mmH ₂ O)	$\Delta P/\text{mi}$	Massa retida
0	95,60782156	0	0,0000
5	99,14885198	3,54103043	0,0345
10	97,37833677	1,77051521	0,0689
15	95,60782156	0	0,1034
20	111,5424585	15,9346369	0,1378
25	109,7719433	14,1641217	0,1723
30	113,3129737	17,7051521	0,2068
35	113,3129737	17,7051521	0,2412
40	118,6245193	23,0166978	0,2757
45	118,6245193	23,0166978	0,3101
50	120,3950346	24,787213	0,3446
55	120,3950346	24,787213	0,3790
60	125,7065802	30,0987586	0,4135
65	125,7065802	30,0987586	0,4480
70	129,2476106	33,6397891	0,4824
75	129,2476106	33,6397891	0,5169
80	134,5591563	38,9513347	0,5513
85	134,5591563	38,9513347	0,5858
90	139,8707019	44,2628804	0,6203
95	139,8707019	44,2628804	0,6547
100	143,4117323	47,8039108	0,6892
105	146,9527628	51,3449412	0,7236
110	146,9527628	51,3449412	0,7581
115	150,4937932	54,8859716	0,7926

120	154,0348236	58,4270021	0,8270
125	162,8873997	67,2795781	0,8615
130	166,4284301	70,8206086	0,8959
135	180,5925518	84,9847303	0,9304
140	187,6746127	92,0667911	0,9648
145	191,2156431	95,6078216	0,9993
150	207,15028	111,542458	1,0338
155	210,6913105	115,083489	1,0682
160	219,5438865	123,936065	1,1027
165	226,6259474	131,018126	1,1371
170	235,4785235	139,870702	1,1716
175	244,3310995	148,723278	1,2061
180	263,8067669	168,198945	1,2405
185	283,2824342	187,674613	1,2750
190	295,6760407	200,068219	1,3094
195	308,0696472	212,461826	1,3439
200	313,3811929	217,773371	1,3784
205	329,3158298	233,708008	1,4128
210	336,3978907	240,790069	1,4473
215	355,873558	260,265736	1,4817
220	377,1197406	281,511919	1,5162
225	387,7428319	292,13501	1,5506
230	393,0543775	297,446556	1,5851
235	416,0710753	320,463254	1,6196
240	426,6941666	331,086345	1,6540
245	439,0877731	343,479952	1,6885
250	455,02241	359,414588	1,7229
255	469,1865317	373,57871	1,7574
260	485,1211686	389,513347	1,7919
265	490,4327143	394,824893	1,8263

270	506,3673512	410,75953	1,8608
275	511,6788969	416,071075	1,8952
280	524,0725033	428,464682	1,9297
285	543,5481707	447,940349	1,9642
290	564,7943533	469,186532	1,9986
295	577,1879598	481,580138	2,0331
300	587,8110511	492,203229	2,0675
305	598,4341423	502,826321	2,1020
310	655,0906292	559,482808	2,1365
315	667,4842357	571,876414	2,1709
320	679,8778422	584,270021	2,2054
325	690,5009335	594,893112	2,2398
330	694,0419639	598,434142	2,2743
335	722,3702073	626,762386	2,3087
340	750,6984507	655,090629	2,3432
345	750,6984507	655,090629	2,3777
350	786,108755	690,500933	2,4121
355	796,7318463	701,124025	2,4466
360	810,895968	715,288146	2,4810
365	835,683181	740,075359	2,5155
370	842,7652419	747,15742	2,5500
375	860,470394	764,862572	2,5844
380	554,171262	458,56344	2,6189
385	561,2533228	465,645501	2,6533

- Ensaios de filtração para partículas de 14 µm, com aplicação de -2 kV.

0	100,9193672	0	0,0000
5	106,2309128	5,31154564	0,0363
10	106,2309128	5,31154564	0,0726
15	109,7719433	8,85257607	0,1090
20	109,7719433	8,85257607	0,1453
25	113,3129737	12,3936065	0,1816
30	116,8540041	15,9346369	0,2179
35	118,6245193	17,7051521	0,2543
40	123,936065	23,0166978	0,2906
45	125,7065802	24,787213	0,3269
50	127,4770954	26,5577282	0,3632
55	127,4770954	26,5577282	0,3996
60	132,7886411	31,8692739	0,4359
65	134,5591563	33,6397891	0,4722
70	136,3296715	35,4103043	0,5085
75	138,1001867	37,1808195	0,5449
80	141,6412171	40,7218499	0,5812
85	145,1822475	44,2628804	0,6175
90	146,9527628	46,0333956	0,6538
95	148,723278	47,8039108	0,6901
100	159,3463693	58,4270021	0,7265
105	168,1989453	67,2795781	0,7628
110	178,8220366	77,9026694	0,7991
115	189,4451279	88,5257607	0,8354
120	208,9207953	108,001428	0,8718
125	216,0028561	115,083489	0,9081

130	223,084917	122,16555	0,9444
135	237,2490387	136,329671	0,9807
140	253,1836756	152,264308	1,0171
145	270,8888277	169,969461	1,0534
150	283,2824342	182,363067	1,0897
155	297,446556	196,527189	1,1260
160	318,6927385	217,773371	1,1624
165	341,7094363	240,790069	1,1987
170	359,4145884	258,495221	1,2350
175	368,2671645	267,347797	1,2713
180	382,4312862	281,511919	1,3076
185	401,9069536	300,987586	1,3440
190	430,235197	329,31583	1,3803
195	440,8582883	339,938921	1,4166
200	453,2518948	352,332528	1,4529
205	469,1865317	368,267165	1,4893
210	474,4980774	373,57871	1,5256
215	513,4494121	412,530045	1,5619
220	527,6135338	426,694167	1,5982
225	543,5481707	442,628804	1,6346
230	559,4828076	458,56344	1,6709
235	575,4174446	474,498077	1,7072
240	601,9751728	501,055806	1,7435
245	619,6803249	518,760958	1,7799
250	640,9265075	540,00714	1,8162
255	651,5495988	550,630232	1,8525
260	678,107327	577,18796	1,8888
265	702,89454	601,975173	1,9251
270	717,0586617	616,139294	1,9615
275	732,9932986	632,073931	1,9978

280	754,2394812	653,320114	2,0341
285	768,4036029	667,484236	2,0704
290	798,5023615	697,582994	2,1068
295	816,2075137	715,288146	2,1431
300	832,1421506	731,222783	2,1794
305	856,9293636	756,009996	2,2157
310	911,8153352	810,895968	2,2521
315	948,9961547	848,076788	2,2884
320	952,5371851	851,617818	2,3247
325	961,3897612	860,470394	2,3610
330	1005,652642	904,733274	2,3974
335	665,7137205	564,794353	2,4337
340	672,7957813	571,876414	2,4700