

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

FLÁVIA MATIAS OLIVEIRA DA SILVA

**“INFLUÊNCIA DAS CARGAS ELETROSTÁTICAS NA FILTRAÇÃO  
DE PARTÍCULAS EM MEIOS FILTRANTES DE FIBRA DE VIDRO”**

SÃO CARLOS – SP

2019

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

FLÁVIA MATIAS OLIVEIRA DA SILVA

**“INFLUÊNCIA DAS CARGAS ELETROSTÁTICAS NA FILTRAÇÃO  
DE PARTÍCULAS EM MEIOS FILTRANTES DE FIBRA DE VIDRO”**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós -  
Graduação em Engenharia Química da Universidade  
Federal de São Carlos como requisito para a obtenção  
do título de Doutora em Engenharia Química.

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

SÃO CARLOS – SP

2019

# FLÁVIA MATIAS OLIVEIRA DA SILVA

Tese apresentada ao Programa De Pós-Graduação,  
para obtenção do título de doutora em Engenharia  
Química pela Universidade Federal de São Carlos.

Orientadora

Dr<sup>a</sup>. Mônica Lopes Aguiar  
Universidade Federal De São Carlos

Colaborador

Dr. Marcos Vinícius Rodrigues  
Universidade Federal de Alfenas

Membros da Banca

Dr<sup>a</sup> Vádila Giovana Guerra Béttega  
Universidade Federal de São Carlos

Dr<sup>o</sup> Olimpio Gomes Silva Neto  
Instituto Federal do Sul de Minas

Dr<sup>o</sup> Rafael Sartin  
Universidade Federal do Espírito Santo

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE TESE DE FLÁVIA MATIAS OLIVEIRA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 30 DE ABRIL DE 2019.

BANCA EXAMINADORA:



Mônica Lopes Aguiar  
**Orientadora, UFSCar**



Marcos Vinícius Rodrigues  
**UNIFAL**



Rafael Sartim  
**UFES**



Vádila Giovana Guerra Béttega  
**UFSCar**



Olimpio Gomes da Silva Neto  
**IFSULDEMINAS**

*Não há vitórias sem derrotas, nem força e coragem sem o medo, escolheremos a melhor rota e sigamos com fé logo cedo!*

**Carlos Eduardo Veloso**

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus maiores apoiadores,  
meus **pais**, meu **esposo**, minha **irmã** e a minha filha **Penélope**.*

## AGRADECIMENTOS

A caminhada até aqui foi muito longa, tive muitas batalhas e felizmente tive muitas pessoas para batalhar ao meu lado.

As escolhas que fazemos em nossas vidas, sempre vêm de detalhes do passado, detalhes que às vezes não percebemos, entretanto, outros que nunca esqueceremos.

A escolha do doutorado veio com o tempo, nada foi planejado, foi acontecendo, Deus me guiou pelo caminho e durante minha caminhada tive que pular algumas janelas e atravessar várias portas, e aqui estou.

Primeiramente agradeço a **DEUS** por toda perseverança, coragem e teimosia que me deu, também quero agradecer imensamente aos meus pais **Luiz Matias de Oliveira** e **Simone Pereira da Silva Oliveira**, agradeço pela confiança, paciência e incentivo em todos os momentos, até nos mais propícios a desistir vocês me ajudaram de todas as formas a me manter firme no meu objetivo.

Ao meu companheiro **João Rafael** que esteve comigo sempre, mesmo que longe estávamos juntos, só posso dizer obrigado por tornar mais fácil meus dias, obrigado pela força, respeito, confiança e incentivo, sua parceria foi muito importante para mim.

A minha filha **Penélope** e minha irmã **Fernanda**, que sempre estiveram comigo em todos os momentos. Vocês são parte desta conquista, juntamente com meus amigos e familiares que acreditaram em mim.

Agradeço minha orientadora **Mônica Lopes Aguiar**, por ter se tornado uma amiga, uma pessoa íntegra, honesta e do bem, que diante de todas as aflições da área acadêmica se manteve firme e não se corrompeu. Obrigada por toda paciência e fé que teve em mim. Sorte a minha que Deus sempre me guiou, e colocou você no meu caminho. Enfim, sempre será um prazer conviver com você e desculpe minhas maluquices, mas se não as fizesse não seria EU.

Ao meu colaborador Prof. **Marcos Vinicius Rodrigues** só tenho que dizer muito obrigado, por dedicar seu tempo ao meu trabalho, pelas conversas de incentivo e apoio, você foi imprescindível. Você sempre chegava na hora certa, mesmo tendo que viajar por horas até São Carlos nunca hesitou.

Agradeço também a minha colaboradora no exterior **Christhina Candido** professora na universidade de Sydney que me recebeu de braços abertos, me acolhendo e me incentivando neste período que estive fora, foi uma experiência inenarrável poder trabalhar com você, como já disse você foi um anjo.

Aos meus amigos do grupo de pesquisas de controle ambiental muito obrigada, vocês me ajudaram em cada minuto, nas alegrias e nas tristezas, nas conquistas e nas decepções. Em especial agradeço a **Paula Remiro**, **Eduardo Alexandrina**, **Dani Bonfim** e a **Guilhermina Schultz Siaka**, em especial porque foi pra eles que eu dei mais trabalho, amo muito todos vocês. Agradeço muito ao **Marcos Oishio** técnico do laboratório por ser um excelente profissional que sempre esteve a disposição para me ajudar e com o tempo tornou-se uma pessoa muito querida.

## RESUMO

Atualmente, nos processos de filtração de gases, a presença de cargas eletrostáticas nas partículas, tem se mostrado um fator que contribui positivamente para o desempenho do meio filtrante. Devido à grande competitividade no mercado de equipamentos de separação gás-sólido, o filtro híbrido tem demonstrado grandes benefícios, podendo operar com baixa queda de pressão e alta eficiência de coleta para o material particulado fino, aumentando a vida útil das mangas, além de reduzir os gastos com energia e manutenção dos equipamentos de filtração. Os filtros híbridos, são a junção de dois ou mais equipamentos de separação gás-sólido com objetivo de melhorar o processo de filtração de gases. Neste propósito, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da carga eletrostática aplicada nas partículas de cimento, durante a formação de tortas de filtração de gases em um meio filtrante de fibra de vidro. Para tal finalidade foram investigados: a distribuição granulométrica das partículas de cimento, a resistência específica da torta e a porosidade da torta de filtração utilizando a equação de Ergun, com um carregamento eletrostático de -1,0, -2,0, -4,0 -10,0 e -12,0 kV sendo que somente para -10 e -12 kV o efeito corona foi atuante. Foram obtidas imagens em um microscópio eletrônico de varredura (SEM) para determinar a penetração das partículas no meio filtrante, o diâmetro médio das partículas e a porosidade experimental da torta de filtração. Para as cargas de -1, -2 e -4 kV aplicadas nas partículas, a resistência específica da torta, a queda de pressão em função da massa coletada e do tempo de filtração foram estimadas e verificou-se que a resistência específica da torta e a queda de pressão diminuíram enquanto que a quantidade de material particulado retido no meio filtrante e o tempo total de filtração aumentaram. Já para as tensões de -10 e -12 onde o efeito corona foi atuante, o precipitador eletrostático chegou a reter 89% do material particulado alimentado no processo e dessa forma a penetração das partículas no tecido diminuiu e o tempo de filtração aumentou em até 6 vezes para curva de -12 kV. Os testes de filtração demonstraram uma influência positiva da carga eletrostática nas partículas de cimento durante a formação da torta de filtração.

**Palavras-chave:** Carga eletrostática, Cimento, Filtração, Filtros de Mangas e Material Particulado.

## ABSTRACT

Currently, in the gas filtration processes, the presence of electrostatic charges in the particles has been shown to contribute positively to the performance of the filter medium. Due to its high competitiveness in the market for gas-solid separation equipment, the hybrid filter has shown great benefits, being able to operate with low pressure drop and high collection efficiency for fine particulate matter, increasing the useful life of bags, besides reducing the expenses with energy and maintenance of filtration equipment. Hybrid filters are the combination of two or more gas-solid separation equipment with the aim of improving the gas filtration process. In this purpose, the objective of this work was to evaluate the effect of the electrostatic charge applied on the cement particles, during the formation of the dust cake filtration in a glass fiber filter medium. For this purpose, we investigated the particle size distribution of the cement particles, the specific resistance of the cake and the porosity of the filter cake using the Ergun equation with an electrostatic charge of -1, -2, -4, -10 and -12 kV but just -10 and -12 kV there are corona effect. Images were obtained in a scanning electron microscope (SEM) to determine the penetration of the particles in the filter media, the mean particle diameter and the experimental porosity of the filter cake. For the -1, -2 and -4 kV loads applied to the particles, the specific resistance of the dust cake, the pressure drop as a function of the collected mass and the filtration time were estimated and it was verified that the specific resistance of the dust cake and the pressure drop decreased while the amount of particulate material retained in the filter media and the total filtration time increased. At the tensions of -10 and -12 where the corona effect was active, the electrostatic precipitator retained 89% of the particulate material fed in the process and thus the penetration of the particles in the tissue decreased and the filtration time increased by up to 6 times for a -12 kV curve. The filtration tests showed a positive influence of the electrostatic charge on the cement particles during the formation of the dust cake.

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

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2. 1- ESQUEMA DE CAPTURA POR CAPTAÇÃO DIRETA.....	22
FIGURA 2. 2 - MECANISMO DE COLETA ELETROSTÁTICA: (A) COULÔMBICO E (B) DIPOLO IMAGEM. ....	23
FIGURA 2. 3 - ATUAÇÃO DOS MECANISMOS DE COLETA NA EFICIÊNCIA DE UM ÚNICO COLETOR EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DE PARTÍCULA.....	24
FIGURA 2. 4 - (A) FILTRAÇÃO DE PROFUNDIDADE E SUPERFICIAL; (B) ETAPA DE TRANSIÇÃO, DEPOSIÇÃO DAS PARTÍCULAS ENTRE AS FIBRAS. ....	27
FIGURA 2. 5 - PONTO DE COLMATAÇÃO DO NÃO TECIDO.....	28
FIGURA 2. 6 - DETERMINAÇÃO DO ARRASTE EFETIVO NOS ESTÁGIOS INICIAIS DA FILTRAÇÃO.....	34
FIGURA 2. 7 - FILTRO DE MANGAS INDUSTRIAL. ....	43
FIGURA 2. 8 - TIPOS DE ENTRELAÇAMENTO DE FIBRAS. ....	44
FIGURA 2. 9- TECIDO NÃO TRANÇADO OU FELTRO.....	45
FIGURA 2. 10 - ESQUEMA DE UM PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO.....	49
FIGURA 2. 11 - FILTRO ELETROSTÁTICO HÍBRIDO COM UM PRÉ-CARREGADOR E UM FILTRO DE MANGAS.....	50
FIGURA 2. 12 - PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO HÍBRIDO. ....	51
FIGURA 2. 13- IONIZAÇÃO DE PARTÍCULAS SOLIDAS.....	54
FIGURA 2. 14 - ESQUEMA DE FILTRAÇÃO COM CARREGADOR CORONA (A); E FILTRAÇÃO NORMAL (B).....	55
FIGURA 2. 15 - ESQUEMA DE FORMAÇÃO DOS DENDRITOS EM UMA ÚNICA FIBRA. ....	55
FIGURA 3. 1 - ESQUEMA DO EQUIPAMENTO DE FILTRAÇÃO (A) E UMA VISTA GERAL DO APARATO EXPERIMENTAL (B) .....	64
FIGURA 3. 2 – PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO: ESQUEMA DE VISTA LATERAL (A) E SUPERIOR COM DIMENSÕES EM (CM) (B) E UMA FOTOGRAFIA DO PRECIPITADOR (C).....	65
FIGURA 3. 3 - CAIXA DE FILTRAÇÃO.....	67
FIGURA 3. 4 - ALIMENTADOR DE PÓ E AMPLIFICAÇÃO DO PRATO GIRATÓRIO. ....	68
FIGURA 3. 5 - DISTRIBUIÇÃO CUMULATIVA DA GRANULOMETRIA DO PÓ DE CIMENTO.....	70

FIGURA 3. 6 - PARTÍCULAS DE CIMENTO COM AMPLIAÇÃO DE 1500X.....	71
FIGURA 3. 7 – (A) MEIO FILTRANTE NA FORMA DE MANGAS; (B) MEIO FILTRANTE NA FORMA UTILIZADA NO TRABALHO; (C) MEIO FILTRANTE DE FIBRA DE VIDRO COM AMPLIAÇÃO DE 100 X PELO MEV.....	72
FIGURA 3. 8 – UNIDADE EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR A PERMEABILIDADE DO MEIO FILTRANTE.....	73
FIGURA 3. 9– FOTO DO SUPORTE DO “PRÉ-EMBUTIMENTO” DA TORTA (A) E ESQUEMA DO APARATO DE “PRÉ-ENDURECIMENTO” DA TORTA (B). .....	78
FIGURA 3. 10 (A-E) – AS IMAGENS A SEGUIR DESCREVEM O PROCEDIMENTO DE ENDURECIMENTO DA TORTA. ....	79
FIGURA 3. 11– ESQUEMA DE CINCO FOTOS TIRADAS DO INTERIOR DO MEIO FILTRANTE, EM SEQUÊNCIA, PARA DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO, COM AUMENTO DE 2000X.....	80
FIGURA 3. 12– COMPARAÇÃO ENTRE A MICROGRAFIA DA FOTO ORIGINAL (A) E A BINARIZAÇÃO PELO SOFTWARE (B). .....	81
FIGURA 4. 2– FILTRO ELETROSTÁTICO NO MOMENTO EXATO DA FORMAÇÃO DE UM ARCO ELÉTRICO.....	84
FIGURA 4. 3– IMAGENS OBTIDAS PELO MEV DO MEIO FILTRANTE DE FIBRA DE VIDRO, (A) AMPLIAÇÃO DE 200X E (B) AMPLIAÇÃO DE 1000X.....	85
FIGURA 4. 4- PERMEABILIDADE DO MEIO FILTRANTE LIMPO.....	86
FIGURA 4. 5– CURVAS DE FILTRAÇÃO EM MEIOS FILTRANTES MODIFICADOS (A) SEM CARGAS ELETROSTÁTICAS NAS PARTÍCULAS (B) COM -4 KV APLICADOS. ....	87
FIGURA 4. 6– COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA FILTRAÇÃO COM O FILTRO TOTALMENTE LIMPO E COM O FILTRO SEM UMA PRÉVIA LIMPEZA. .....	89
FIGURA 4. 7 - CURVAS DE FILTRAÇÃO COM DIFERENTES CARGAS ELETROSTÁTICAS APLICADAS PARA PARTICULAS DE CIMENTO.....	90
FIGURA 4. 8 - CURVAS DE FILTRAÇÃO COM OS PONTOS DE COLMATAÇÃO.....	92
FIGURA 4. 9 – GRÁFICOS DE QUEDA DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DA MASSA RETIDA, COMPARANDO O TRABALHO DE MARQUES (2017) (A-C) COM O TRABALHO REALIZADO (B-D).....	95

FIGURA 4. 10- IMAGENS OBTIDAS PELO MEV, USADAS PARA CÁLCULOS (APÓS FILTRAÇÃO) NO SOFTWARE IMAGE-PRO PLUS 7 COM AMPLIAÇÃO DE 500X. .....	99
FIGURA 4. 11- IMAGENS DA SUPERFÍCIE SUPERIOR DA TORTA OBTIDAS PELO MEV COM AMPLIAÇÃO DE 200X.....	101
FIGURA 4. 12- IMAGENS DA FILTRAÇÃO DE PROFUNDIDADE OBTIDAS ATRAVÉS DO MEV COM AMPLIAÇÕES DE 1000X. ....	103
FIGURA 4. 13– IMAGEM INTERNA DO PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO APÓS O TESTE DE -12KV. ....	106
FIGURA 4. 14- CURVAS DE FILTRAÇÃO DE QUEDA DE PRESSÃO POR TEMPO PARA 0, - 4, -10 E -12 KV.....	107
FIGURA 4. 15- CURVAS DE FILTRAÇÃO DE QUEDA DE PRESSÃO POR MASSA RETIDA PARA 0, - 4, -10 E -12 KV. ....	109
FIGURA 4. 16- CURVAS DE FILTRAÇÃO DE MASSA RETIDA POR TEMPO PARA 0, - 4, -10 E -12 KV.....	111
FIGURA 4. 17– DETERMINAÇÃO DO PONTO DE COLMATAÇÃO NAS CURVAS DE FILTRAÇÃO. ....	112
FIGURA 4. 18- IMAGENS DA TORTA DE FILTRAÇÃO COM O EMBUTIMENTO DA TORTA, VISTA SUPERIOR OBTIDAS ATRAVÉS DO MEV COM AMPLIAÇÃO DE 35 X, PARA A CARGA APLICADA DE 0KV (A), -4KV (B), -10KV (C) E -12KV (D). .....	115
FIGURA 4. 19- IMAGENS DA TORTA DE FILTRAÇÃO (0 KV) VISTA DO INTERIOR DA TORTA DE FILTRAÇÃO ATRAVÉS DO MEV COM AMPLIAÇÃO DE 1000 X, CARGA APLICADA 0KV (A) E COM CARGA APLICADA DE -12KV (B).....	116
FIGURA 4. 20- IMAGENS DA TORTA DE FILTRAÇÃO VISTA TRANSVERSAL OBTIDAS ATRAVÉS DO MEV COM AMPLIAÇÕES DE 400X DAS TORTAS EMBUTIDAS, PARA A CARGA APLICADA DE 0KV (A), -4KV (B), -10KV (C) E -12KV (D).....	119
FIGURA 4. 21 - IMAGENS DA TORTA DE FILTRAÇÃO VISTA TRANSVERSAL OBTIDAS ATRAVÉS DO MEV COM AMPLIAÇÕES DE 400X DAS TORTAS EMBUTIDAS.....	120
FIGURA 4. 22– CURVAS CUMULATIVAS EM PORCENTAGEM DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA EM CADA PARTE DO PROCESSO DE FILTRAÇÃO: (A) PARA TESTES COM 0 KV, (B) PARA TESTES COM -4 KV, (C) PARA TESTES COM -10 KV E (D) PARA OS TESTES COM -12 KV. ....	125

FIGURA 4. 23 - GRÁFICOS DE QUEDA DE PRESSÃO POR TEMPO COM VELOCIDADES DE FILTRAÇÃO DIFERENTES 6 CM/S E 10 CM/S: (A) PARA 0 KV; (B) PARA -4 KV; (C) PARA -10 KV; (D) PARA -12 KV E (E) UMA COMPARAÇÃO DE TODAS AS CURVAS.....	126
FIGURA 4. 24– GRÁFICOS DE QUEDA DE PRESSÃO POR TEMPO COM AMPLIAÇÃO DA FILTRAÇÃO INICIAL PARA VELOCIDADES DE FILTRAÇÃO DIFERENTES 6 CM/S E 10 CM/S: (A) PARA 0 KV; (B) PARA -4 KV; (C) PARA -10 KV; (D) PARA -12 KV.....	1329
FIGURA 4. 24– GRÁFICOS DE RESISTÊNCIA ESPECÍFICA DA TORTA POR TENSÃO, PARA VELOCIDADES DE FILTRAÇÃO DE 6 CM/S E 10 CM/S. ....	132

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2. 1 – PROPRIEDADES DOS MEIOS FILTRANTES. ....	46
TABELA 3. 1 - DIMENSÕES DO PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO.....	66
TABELA 3. 2 - CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO.....	75
TABELA 4. 1 – RESULTADOS DO PONTO DE COLMATAÇÃO E MASSA RETIDA DE ACORDO COM A CARGA ELETROSTÁTICA APLICADA NAS PARTÍCULAS....	93
TABELA 4. 2 – RESULTADOS DA RESISTÊNCIA ESPECÍFICA DA TORTA. ....	94
TABELA 4. 3 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE MARQUES (2018) E O OBTIDOS.....	96
TABELA 4. 4- RESULTADOS DE TODOS OS PARÂMETROS ESTUDADOS NA FILTRAÇÃO DE GASES .....	100
TABELA 4. 5- : RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA FIGURA 4.14. ....	105
TABELA 4. 6– RESULTADOS DO PONTO DE COLMATAÇÃO E MASSA RETIDA DE ACORDO COM A CARGA ELETROSTÁTICA APLICADA NAS PARTÍCULAS..	113
TABELA 4. 7- VALORES DE RESISTÊNCIA ESPECIFICA DA TORTA .....	114
TABELA 4. 8– VALORES DAS POROSIDADE DE ERGUN, POROSIDADE EXPERIMENTAL E ÁREA DE ESPAÇOS VAZIOS. ....	121
TABELA 4. 9– DIÂMETRO MÉDIO DAS PARTÍCULAS EM CADA PARTE DO PROCESSO.....	123
TABELA 4. 10 - PARÂMETROS DOS ENSAIOS COM DIFERENTES VELOCIDADES 6 CM/S E 10 CM/S. ....	131

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

Capes – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CNPq – Conselho Nacional de desenvolvimento Científico e Tecnológico

DEQ - Departamento de Engenharia Química

HEFS – Sistema Eletrostático Híbrido de Filtração

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos

## LISTA DE SÍMBOLOS

- 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 [ $M.L^{-2}.t^{-1}$ ]  
**kV** – medida de tensão elétrica [E]  
**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 [ $M.L^{-2}$ ]  
 **$\Delta P$**  - queda de pressão na direção do escoamento [ $M.L.t^{-1}$ ]  
 **$\Delta P_T$**  - queda de pressão total [ $M.L.t^{-1}$ ]  
 **$\Delta P_M$**  - queda de pressão no meio filtrante [ $M.L.t^{-1}$ ]  
 **$\Delta P_C$** - queda de pressão da torta de filtração [ $M.L.t^{-1}$ ]  
 **$\Delta M$**  - massa acumulada por unidade de área [M]  
 **$\epsilon$**  - porosidade da torta de filtração, adimensional.  
 **$\epsilon_{MP}$**  - porosidade do meio poroso, adimensional.  
 **$\rho_p$** - densidade de partícula [ $M.L^{-3}$ ]  
 **$\mu$**  - viscosidade do fluido [ $M.L^{-1}.t^{-2}$ ]

## SUMARIO

<b>RESUMO</b> .....	ii
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	iv
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	x
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>1. 2. Objetivo</b> .....	16
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	18
<b>2.1. .... Fundamentos da Filtração</b> .....	18
<b>2.1.1. Material Particulado</b> .....	18
<b>2.1.2. Mecanismos de Coleta</b> .....	21
<b>2.1.3. Formação das Tortas de Filtração</b> .....	24
<b>2.1.4. Velocidade de filtração</b> .....	28
<b>2.1.5. Queda de Pressão na Filtração</b> .....	31
<b>2.1.6. Permeabilidade</b> .....	34
<b>2.1.7. Resistência Específica da Torta</b> .....	36
<b>2.1.8. Porosidades dos tecidos e da torta de filtração</b> .....	37
<b>2.2. .... Equipamentos utilizados na filtração de limpeza de Gases</b> .....	41
<b>2.2.1. Filtros de Mangas</b> .....	41
<b>2.2.1.1. Princípios de um Filtro de Mangas</b> .....	41
<b>2.2.1.2. Tecidos Filtrantes</b> .....	43
<b>2.2.2. Precipitador Eletrostático</b> .....	47
<b>2.2.2.1. Princípios de um Precipitador Eletrostático</b> .....	47

2.2.3.	<b>Filtros Híbridos.....</b>	<b>49</b>
2.2.3.1.	<b>Princípios de um sistema de filtração eletrostático híbrido.....</b>	<b>49</b>
2.2.4.	<b>Cargas Eletrostáticas nos filtros e nas partículas .....</b>	<b>52</b>
2.3.	<b>.....História dos estudos sobre cargas eletrostáticas aplicadas na filtração .....</b>	<b>56</b>
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>63</b>
<b>3.1.</b>	<b>..... Materiais .....</b>	<b>63</b>
3.1.1.	<b>Equipamento de Filtração de Ar.....</b>	<b>63</b>
3.1.2.	<b>Fonte de Alta Tensão.....</b>	<b>65</b>
3.1.3.	<b>Precipitador Eletrostático.....</b>	<b>65</b>
3.1.5.	<b>Gerador de Pó .....</b>	<b>67</b>
3.1.6.	<b>Sistema de Aquisição de Dados .....</b>	<b>69</b>
3.1.7.	<b>Outros Equipamentos .....</b>	<b>69</b>
3.1.8.	<b>Material Pulverulento .....</b>	<b>70</b>
3.1.9.	<b>Meio Filtrante .....</b>	<b>71</b>
<b>3.2.</b>	<b>..... Métodos .....</b>	<b>73</b>
3.2.1.	<b>Simulação de um sistema de filtração híbrido em escala laboratorial .....</b>	<b>74</b>
3.2.2.	<b>Determinação da curva corrente-tensão.....</b>	<b>76</b>
3.2.3.	<b>Determinação Experimental da Porosidade das Tortas de Filtração de Gases e diâmetro volumétrico das partículas: na alimentação, no precipitador eletrostático e na torta de filtração. ....</b>	<b>77</b>
3.2.4.	<b>Software e Cálculos .....</b>	<b>80</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>82</b>
<b>4.1</b>	<b>análises preliminares .....</b>	<b>82</b>
4.1.1.	<b>Caracterização elétrica.....</b>	<b>82</b>
4.1.2.	<b>Caracterização do Meio Filtrante .....</b>	<b>85</b>
4.1.2.1.	<b>Permeabilidade do Meio Filtrante .....</b>	<b>85</b>

4.1.2.2. Testes de neutralização do meio filtrante .....	86
4.1.3. Caracterização do equipamento.....	89
<b>4.2. Ensaio de filtração de gases com carregamento eletrostático das partículas de cimento sem o efeito corona. ....</b>	<b>90</b>
4.2.1. Determinação do Ponto de Colmatação.....	92
4.2.2. Determinação da Resistência Específica da Torta ( $K_2$ ).....	93
4.2.3. Determinação da Porosidade Teórica e Experimental.....	98
<b>4.3. Ensaio de filtração de gases com partículas de cimento para carregamento eletrostático das partículas com o efeito corona. ....</b>	<b>104</b>
4.3.1. Análise do Precipitador Eletrostático .....	104
4.3.2. Análise das Curvas de Filtração .....	107
4.3.3. Determinação do Ponto de Colmatação.....	111
4.3.4. Determinação Resistência específica da Torta $K_2$ .....	113
4.3.5. Determinação da porosidade da torta de filtração .....	114
4.3.5.1. Determinação do Diâmetro Mediano das Partículas .....	122
<b>4.4. Investigação da influência da velocidade na filtração de gases com o efeito corona .....</b>	<b>125</b>
<b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>135</b>
<b>6. SUGESTÕES .....</b>	<b>137</b>
<b>7. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>138</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As emissões de materiais particulados vindas de indústrias químicas e veículos de transportes constituem uma das principais fontes de poluentes primários na maioria das cidades do mundo, e são reconhecidas como um risco para a saúde da população (ZHANG et al. 2013; G. TU et al. 2018). As partículas finas tóxicas (menores que 1  $\mu\text{m}$ ) associadas à poluição atmosférica podem causar sérios problemas de saúde e podem até ser depositadas no cérebro humano, causando doenças cerebrais degenerativas, incluindo Alzheimer e demência, bem como a redução da inteligência (MAHER et al. 2016).

Adicionalmente, para atender os limites de emissões de material particulado fino na atmosfera impostos pelas legislações vigentes, cada vez mais rígidas, grandes esforços científicos e de inovação tecnológica, baseados em princípios físicos distintos, têm sido dedicados ao desenvolvimento de novos processos, equipamentos e até mesmo o aperfeiçoamento de equipamentos já existentes no mercado de separação gás-sólido. A meta é torna-los mais eficientes na remoção partículas submicrômicas, econômicos na implantação e operação destes equipamentos e com o menor gasto energético.

Entretanto, os equipamentos de limpeza de gases (precipitadores eletrostáticos, lavadores e filtros de mangas) tem um alto custo de implementação, já que a cada ano as legislações se tornam mais rigorosas atuando na faixa de  $\text{PM}_{2,5}$ ,  $\text{PM}_{10}$  e nano partículas.

Rodrigues (2005), descreveu em seu trabalho que o melhor conhecimento do fenômeno dos filtros híbridos, tornará possível a combinação das vantagens dos filtros de leito fixo (fibrosos, granulares, etc.) com as vantagens dos filtros eletrostáticos, o que pode levar à construção de equipamentos compactos e com baixa perda de carga.

Os equipamentos de separação gás-sólido mais comumente usados são: os ciclones, lavadores de gases, precipitadores eletrostáticos e filtros de mangas, porém a maioria deles tem um alto custo de implementação, manutenção e operação. Os ciclones são os que apresentam o menor custo, no entanto tem como limitação a eficiência de coleta que é menor, ficando, a maioria deles, abaixo de 90% para partículas menores que 10 micrometros. Os lavadores de gases são altamente eficientes, mas apresenta como desvantagem a separação a úmido, o que

aumenta os custos com o tratamento da lama que sai dos lavadores.

Para a separação do material particulado a seco, tanto os precipitadores eletrostáticos como os filtros de mangas são muito utilizados. O precipitador eletrostático possui alta eficiência de coleta para partículas acima de 1 micrometro, baixa queda de pressão, pode operar tanto a seco quanto a úmido e a altas temperaturas, além de apresentarem custo operacional relativamente baixo. As indústrias que mais utilizam os precipitadores eletrostáticos atualmente são as indústrias de energia elétrica, produção de cimento, de papel e celulose e indústrias siderúrgicas entre outras (MCCAIN et al., 1975; WANG, et al., 2014; NI et al., 2016; TU et al., 2016).

Já os filtros de mangas podem fornecer eficiência de filtração relativamente alta, maiores que 99%, para partículas submicrônicas quando comparados a outros equipamentos de limpeza de gás, no entanto, a queda de pressão através do filtro pode ser elevada, chegando a 2 kPa (EMI, H. 1991; KARMAKAR et al, 2015). Com o aumento da queda de pressão no filtro é necessária uma energia adicional para manter o escoamento de gás constante, isto faz com que os custos operacionais do sistema de limpeza de gases aumentem (PEUKERT e WADENPOHL, 2001; ROY et al., 2014).

Uma alternativa para tornarem os sistemas de separação gás-sólido mais eficientes, principalmente na coleta de material particulado fino (abaixo de 1  $\mu\text{m}$ ) é o sistema de filtração híbrido, que consiste em unir o princípio de dois equipamentos convencionais de separação gás-sólido em um único dispositivo e desta forma melhorar o processo de limpeza de gases. Os purificadores eletrostáticos, ciclones eletrostáticos e filtros de mangas e de leito granular são mecanismos eletrostáticos que têm sido empregados nos filtros híbridos. (GUTIERREZ-ORTIZ et al, 2007; KRIGMONT et al, 2004; JAWOREK et al, 2007-2019).

Segundo Jaworek et al. (2019) a implementação de precipitadores eletrostático híbridos vem crescendo no meio industrial e hoje em dia está sendo uma das opções com melhor custo benefício para as empresas e para o meio ambiente. Neste aspecto, à junção de dois métodos de separação gás-sólido (filtros híbridos) surgiu como sendo uma alternativa para se obter uma filtração de ar mais eficiente (OLIVEIRA et al, 2015; GIVEHCHI et al, 2015; RODRIGUES, 2017).

De acordo com a empresa HITACHI (2016), a carga eletrostática auxilia na filtração de partículas em filtros de mangas, aumentando a retenção do material particulado nos meios filtrantes, no entanto, reduzindo a queda de pressão durante a filtração de gases e conseqüentemente, influencia diretamente na vida útil das mangas, podendo prolongar o tempo em que as mesmas são substituídas por novas.

No entanto, trabalhar com a geração de cargas eletrostáticas é extremamente difícil, principalmente no controle dessas cargas, porque, na maioria das vezes, as cargas não são estáveis. Alguns pesquisadores como Frederick (1974), Pastore (2009), Givehchi et al. (2015) investigaram o efeito da aplicação de cargas eletrostáticas durante a filtração gás-sólido e concluíram que a eficiência de coleta das partículas aumentou.

Estudos anteriores demonstraram a eficiência que a carga eletrostática tem sobre as partículas, otimizando a operação de filtração (GIVEHCHI et al., 2015; REIS, 2014; FENARA et al., 2011; RODRIGUES, 2005; JI et al., 2003; FENG, 2016; TU et al., 2017; RODRIGUES et al., 2017; JAWOREK et al., 2019).

Entretanto, ainda são poucas as informações sobre o efeito do carregamento eletrostático de partículas finas durante a formação da torta de filtração de gases. Assim, torna-se necessário uma maior abordagem deste tema, visto que as indústrias vêm obtendo um crescimento constante nos últimos anos, como também vêm aumentando as restrições ambientais para as emissões de materiais particulados no ar. Para indústria cimenteira, que aumenta a cada ano a produção mundial de cimento, este estudo se faz necessário para avaliar o custo benefício que pode ser agregado na indústria.

Atualmente, os maiores produtores de cimento do mundo são principalmente os países emergentes como a China e a Índia e, mais recentemente, os Estados Unidos. Os três países, juntos, correspondem a 66 % de todo cimento produzido no mundo (CIMENTO.ORG, 2019). No Brasil, em 2016, foi produzido 60 bilhões de toneladas de cimento. A Votorantim Cimentos, indústria brasileira, é a 6º maior companhia do setor cimenteira no mundo, com a capacidade de produção instalada de 52,8 milhões de toneladas, divididas em suas 41 plantas distribuídas pelo país (VOTORANTIM CIMENTOS, 2019).

Desta forma, este estudo almejou otimizar o processo de filtração de gases, avaliando a massa de material particulado retido, a resistência específica da torta, a porosidade da torta, o ponto de colmatação da torta e a influência do carregamento eletrostático nas partículas de cimento, operando com dois equipamentos de separação (precipitador eletrostático e um filtro de mangas). O precipitador eletrostático teve duas funções: a primeira como um carregador de partículas e na segunda como precipitador eletrostático, onde as partículas maiores foram capturadas deixando somente as partículas finas chegarem no filtro de mangas. Imagens da torta de filtração foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e utilizadas para determinar o diâmetro das partículas que penetraram no meio filtrante, os valores experimentais de porosidade obtidos através do software Image Pro Plus 7, o volume dos espaços vazios na torta de filtração e a profundidade de deposição das partículas no meio filtrante.

## **1. 2. OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho foi investigar a performance da filtração de gases com adição de carga eletrostática nas micropartículas durante a formação da torta de filtração de gases em filtros de tecidos.

Para tal finalidade, avaliou-se a massa retida no meio filtrante após a filtração, a resistência específica da torta, a porosidade, o ponto de colmatação da torta, a queda de pressão em função da massa de material particulado retido no meio filtrante e do tempo de filtração. Para determinar o diâmetro das partículas retidas no tecido, os valores experimentais de porosidade, o volume dos espaços vazios na torta de filtração e a penetração das partículas no meio filtrante foram obtidas microimagens da torta de filtração geradas por microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Comparar o comportamento do filtro híbrido em dois contextos:
  - Utilizando um precipitador eletrostático com tensões abaixo e acima do valor do

efeito corona.

- Verificar pela técnica experimental de análise de imagens o comportamento da deposição das partículas no meio filtrante, a porosidade da torta, o tamanho das partículas depositadas no interior dos meios filtrantes, para os diferentes níveis de carregamento.
- Averiguar o efeito da velocidade superficial do ar durante a formação da torta de filtração de gases com partículas sem e com cargas eletrostáticas.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo serão relatados alguns estudos teóricos e práticos encontrados na literatura que ajudaram na discussão deste trabalho.

### **2.1. Fundamentos da Filtração**

#### **2.1.1. Material Particulado**

O estudo das propriedades das partículas é essencial para aplicação de projetos nos processos industriais. A caracterização das propriedades primárias da partícula e a correlação com as propriedades secundárias do sistema particulado como um todo é um problema comum para todos os ramos do estudo sobre materiais particulados (SVAROVSKY, 1981). Na filtração de ar, isso não foge à regra, sendo o material particulado uma das principais variáveis de projeto dos equipamentos de separação gás-sólido, como filtros de mangas, precipitadores eletrostáticos, lavadores de gases, entres outros. Portanto, conhecer as propriedades química e física das partículas torna-se um dos primeiros passos para a escolha correta do equipamento a ser utilizado na separação gás-sólido.

As partículas podem ser caracterizadas fisicamente de acordo com a sua forma, tamanho e densidade, sendo a propriedade mais importante o tamanho (HINDS, 1998). Ele influi nas propriedades do aerossol e também nos mecanismos de captura.

A escolha dos parâmetros que representam o tamanho de partícula depende do formato da mesma. O tamanho de uma partícula esférica homogênea é definido unicamente por seu diâmetro, enquanto para uma partícula cúbica o único parâmetro necessário é a dimensão da aresta. Para partículas irregulares, o tamanho de partícula depende do método escolhido para realizar a medida sendo os mais comuns: a área projetada, área superficial, o diâmetro, etc. (ALLEN, 1997).

É possível observar e medir partículas através de análise microscópica. Utilizando o microscópio pode-se medir o diâmetro de cada partícula individualmente e, ao dividi-lo pelo número total de partículas, obtém-se o diâmetro médio, ou seja, um único número que representa a partícula ou o tamanho de partícula (AZEVEDO, 2009).

De acordo com Allen (1997), a descrição de um objeto tridimensional com apenas um número é o fator que imprime maior dificuldade na determinação do tamanho de partícula. Assim, vários tipos de diâmetros de partícula são utilizados na caracterização do tamanho das partículas.

Rodrigues (2006) realizou diversos ensaios com rocha fosfática e polvilho doce com diferentes diâmetros e os seus resultados mostraram que o maior diâmetro de partículas resultou em uma melhor acomodação tanto interna (refletida no maior tempo de filtração de profundidade) quanto superficial da torta, uma vez que a resistência específica da torta de partículas grossas (acima de 10  $\mu\text{m}$ ) foi inferior àquela apresentada pela torta constituída por partículas finas (abaixo de 10  $\mu\text{m}$ ). Essa influência do diâmetro havia sido relatada por Rembor e Kasper (1996) e Aguiar e Coury (1996). Os autores concluíram que as partículas de maiores diâmetros efetuam um recobrimento menos eficiente das fibras, resultando em uma menor perda de carga.

As partículas menores controlam muitos aspectos dos ciclos de filtração. São elas que penetram no tecido no início da filtração e formam a torta de filtração bem próxima ao tecido. São as partículas pequenas que mais contribuem com a área superficial das partículas e com a resistência específica da torta de filtração (WAKEMAN, 2007).

Segundo Hawkins (1990) a forma das partículas é necessária para descrever o comportamento das partículas nos processos industriais e nos produtos. O formato é reconhecido como uma das propriedades fundamentais, afeta, por exemplo, o empacotamento, a densidade, a porosidade, a permeabilidade, a coesão entre outras propriedades. Partículas completamente diferentes podem ser consideradas, equivocadamente, como idênticas se apenas a distribuição granulométrica for considerada.

Qualitativamente, é comum que se use alguns termos para definir a forma de uma partícula, assim como: esférica, regular, irregular, arredondada, quadrada, entre outros. Esses

termos são inadequados para determinar o fator de forma da partícula que pode ser utilizado em equações que necessitem desse parâmetro (ALLEN, 1997). Para esse fim, é necessário que seja possível medir e definir o formato quantitativamente. Deve ser definido se o que se deseja é apenas medir um valor que possa ser comparado ou poder recriar a partícula a partir dos dados obtidos.

A relação numérica entre várias medidas da partícula depende da forma da partícula e uma relação adimensional dessas medidas é chamada fator de forma. A relação entre as dimensões medidas da partícula e seu volume ou área superficial é chamada coeficiente de forma (ALLEN, 1997).

Boskovic et al. (2005) realizaram experimentos utilizando nano partículas, esféricas e cúbicas, com o objetivo de verificar a influência da forma na eficiência da filtração. Os resultados mostraram que a eficiência da filtração foi bem diferente entre os dois tipos de partículas, sendo menor para as partículas cúbicas, e essa diferença aumentou com o aumento do tamanho das partículas. Após ter excluído o mecanismo de difusão como um possível fator para essa diferença, os autores concluíram que a razão para a diferença estava no movimento das partículas ao longo da superfície das fibras do tecido. As partículas esféricas depois de tocar a fibra podem deslizar ou rolar e as partículas cúbicas apenas deslizam ou “tombam”, nesta fase, as partículas podem tocar a fibra com as laterais ou com as arestas, o que muda a superfícies de contato entre a fibra e a partícula significativamente, e aumenta a possibilidade da partícula não ficar retida na fibra.

Lucas (2000) realizou ensaios de filtração utilizando talco, rocha fosfática e polvilho, sendo que a rocha fosfática e o talco possuíam densidades e distribuições granulométricas muito próximas. O autor atribuiu a menor porosidade da torta formada pela rocha ao formato irregular das partículas.

Ito e Aguiar (2009) ao estudarem a porosidade de tortas formadas por polvilho doce, amido de milho e concentrado fosfático concluíram que o formato das partículas juntamente com sua distribuição granulométrica foram as variáveis mais importantes na formação das tortas.

### 2.1.2. Mecanismos de Coleta

Para que ocorra a filtração, é necessário que haja contato físico entre partícula e coletor. Além disso, é necessário que a partícula fique retida no coletor.

No início da filtração as partículas penetram o meio filtrante e vão revestindo de pó as fibras do tecido. Esta deposição inicial de poeira ocorre em virtude de uma combinação de mecanismos de coleta, que dependem do tamanho da partícula a ser coletada. Os principais são: interceptação direta; separação inercial; difusão; gravitacional e mecanismos eletrostática (COURY, 1983; RODRIGUES, 2006; MATESON E ORR, 1987).

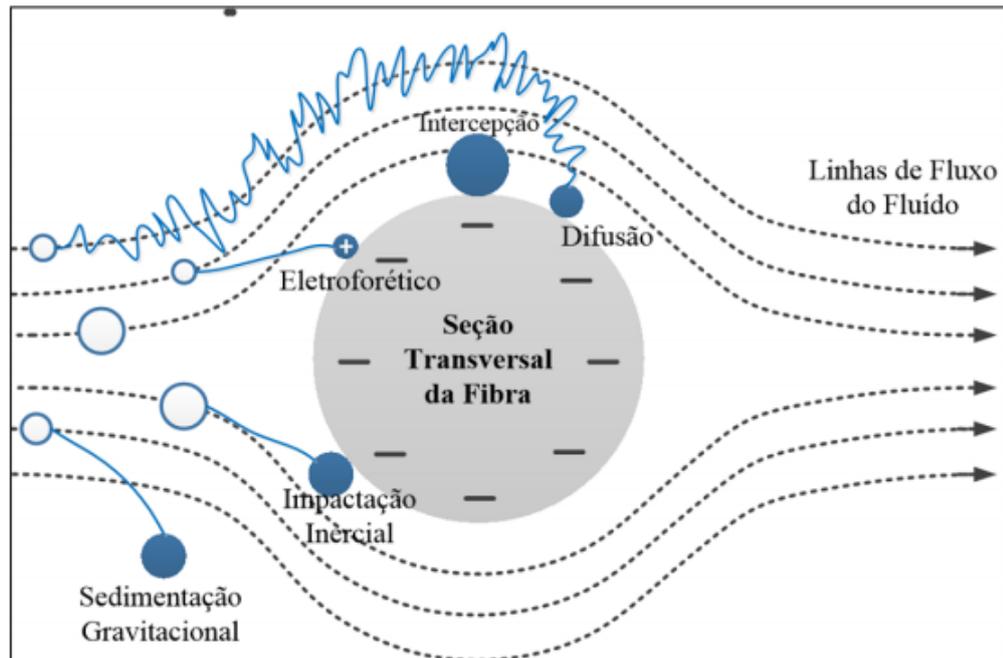
Interceptação Direta: A coleta por interceptação direta acontece porque a partícula tem tamanho finito (COURY, 1986; OGAWA, 1984). Se seu centro de massa passar por uma distância menor que  $d_p/2$  da superfície do coletor, ela será coletada. Este mecanismo só é significativo para partículas muito grandes com  $d_p$  de ordem de grandeza pouco abaixo do diâmetro coletor.

Separação Inercial: De acordo com DULLIEN, 1989, este mecanismo resulta da inércia da partícula, em que as linhas de corrente do gás se curvam ao passar em torno do coletor, enquanto que as partículas, dependendo de sua massa e da velocidade do gás, ou seja, de sua inércia, tendem a colidir contra a superfície da fibra. Este mecanismo é predominante para o número de Stokes maior que  $10^{-2}$ .

Difusão: O mecanismo difusional é atuante em partículas de diâmetro menores que  $1 \mu\text{m}$  e em baixas velocidades de filtração. Neste mecanismo, as linhas de corrente não coincidem com a trajetória das partículas, por se tratar de partículas de tamanho muito reduzido e de movimento aleatório, referente ao movimento Browniano (HINDS, 1998). Ocorre predominantemente em partículas submicrômicas e/ou baixas velocidades de filtração ( $St < 10^{-3}$ ).

Na Figura 2.1 estão apresentados os mecanismos de coleta: Impactação inercial, difusão, gravitacional, interceptação direta e atração eletrostática.

Figura 2. 1- Esquema de captura por captação direta.



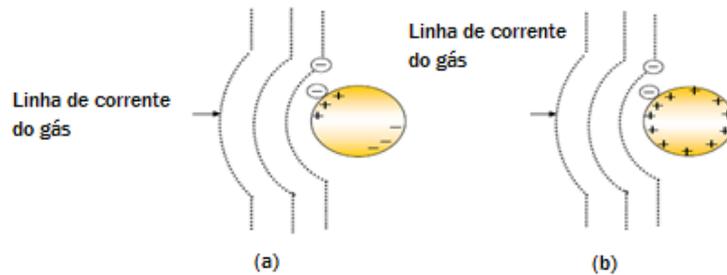
Fonte: Adaptado de CIRQUEIRA, 2017.

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 (St. 10). A eficiência depende da direção do fluxo, ou seja, a eficiência é maior quando o fluxo ocorre de cima para baixo do que de baixo para cima (AGUIAR, 1991).

Mecanismos eletrostáticos: Toda partícula pode possuir algum grau de carga eletrostática devido aos choques e atritos entre elas e o filtro durante o processo de filtração (NUNES, 2011). Os principais mecanismos de coleta por deposição eletrostática são: a atração entre as partículas carregadas e o 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).

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 2.2 estão apresentados os dois métodos de coleta.

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



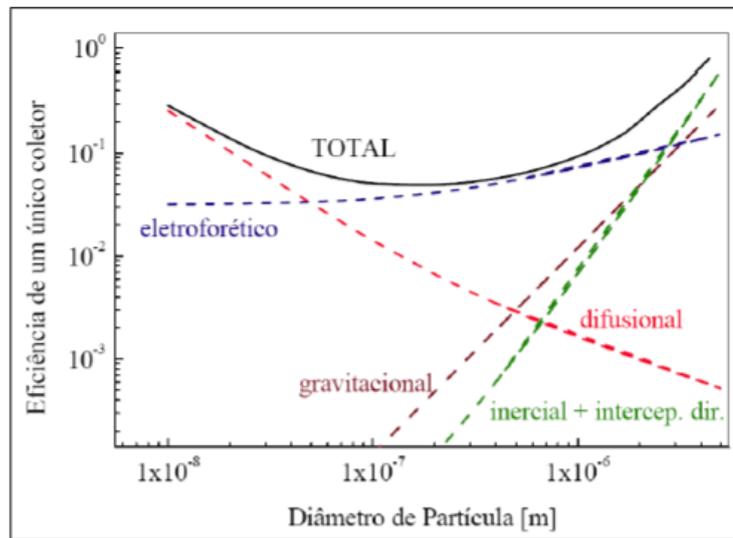
Fonte: Adaptado de TANABE, 2008.

Segundo Coury (1983), geralmente, admite-se que a eficiência total de coleta de um coletor é a soma das eficiências individuais. Isto não é inteiramente correto, uma vez que há influência de um mecanismo sobre o outro.

Por estas informações, tem-se que, aumentando-se o diâmetro de partículas, os mecanismos de interceptação, impaction e gravidade tendem a prevalecer, enquanto que a diminuição delas incentiva a coleta pela difusão Browniana. Inevitavelmente, haverá regiões com predomínio de mais de um mecanismo de captura. Conforme LEE (1982), nestas regiões ocorre maior penetração de partículas através do meio filtrante, ou seja, regiões de eficiência mínima. A Figura 2.3 ilustra a eficiência pertinente a cada mecanismo e a eficiência total, para um filtro de espessura igual a 1 mm, densidade de empacotamento ( $\alpha$ ) igual a 0,05, diâmetro de fibras igual a 2,0  $\mu\text{m}$  e velocidade de 0,1m/s, conforme a teoria de captura por uma fibra simples (RODRIGUES, 2006).

A partir desta constatação, FUCHS (1964) mostrou que a eficiência total não é dada pela soma das eficiências pertinentes a cada mecanismo, mas é menor que ela. Isto porque vários mecanismos acabam competindo pela mesma partícula, e sua captura pode ser contabilizada mais de uma vez (HINDS, 1999).

Figura 2.3 - Atuação dos mecanismos de coleta na eficiência de um único coletor em função do diâmetro de partícula.



Fonte: HINDS,1999.

No caso de filtros não trançados, a eficiência de coleta é normalmente alta (maior que 99% para partículas acima de  $1 \mu\text{m}$ ), satisfazendo na maioria dos casos os limites de tolerância estabelecidos oficialmente. Tal é o caso do meio filtrante utilizado neste estudo, razão pela qual não serão detalhadas as expressões para os mecanismos de coleta. Outro ponto importante é que estes mecanismos só são atuantes quando o tecido é virgem e para os instantes iniciais da filtração.

### 2.1.3. Formação das Tortas de Filtração

O processo de filtração se desenvolve, a partir de um tecido limpo (ou virgem), em uma sequência de etapas. O comportamento e duração de cada fase são determinados por uma série de fatores (RODRIGUES, 2006).

Em linhas gerais admite-se que, para os tecidos utilizados em filtros de manga, a filtração se dá primeiramente pela captura de partículas no interior do meio filtrante, na superfície das fibras. A esta etapa segue-se a impregnação do tecido e a formação de uma

camada superficial de material particulado, denominada torta de filtração (POWELL et al., 1998).

Na primeira etapa da filtração, no estágio inicial da formação da torta, denominada de filtração de profundidade e, também, de filtração interna, para um filtro nunca utilizado antes, as fibras do meio filtrante são responsáveis pela captura das partículas. Estas ficam retidas nas fibras por ação dos mecanismos descritos anteriormente (THEODORE e BUONICORE, 1988). Nesta fase, a penetração de partículas através do tecido é maior, e tende a diminuir com o tempo de filtração (GRAEF et al., 1995), o que implica em uma menor eficiência de captura apresentada pelo tecido neste período, mas que aumenta rapidamente com o decorrer do processo. No entanto, a perda de carga nesta fase aumenta lentamente (WALSH et al., 1996), e esta resposta é diretamente proporcional ao número de partículas coletadas, ou seja, a perda de carga apresenta um comportamento linear em função da massa coletada e dependente dos mecanismos de captura (RODRIGUES, 2006; JAPUNTICH et al., 1994).

Deve-se ressaltar que essa fase só ocorre em superfícies limpas ou após a limpeza do filtro, até que a deposição de pó no meio filtrante seja completamente estabelecida, ou seja, com uma quantidade de partículas retida ou acumulada entre as fibras dos meios filtrantes de feltros (non-woven). Assim, a intensidade de penetração das partículas tende a diminuir em função do tempo de filtração enquanto a eficiência de coleta das partículas e a queda de pressão tendem a aumentar. Ao atingir o valor da queda de pressão máxima pré-estabelecida, têm-se a necessidade de fazer a limpeza do meio filtrante (WALSH, 1996).

O tempo que esta fase inicial de filtração leva para formar a primeira camada de pó, caracterizado pelo lento acréscimo da perda de carga, pode ter maior ou menor duração, dependendo das características (eficiência) do tecido (WALSH, 1996; CALLÉ *et al.*, 2002). No caso de filtros HEPA (sigla em inglês para filtros de ar de alta eficiência - High Efficiency Particulate Aerosol), esta etapa é praticamente inexistente, sendo a formação da torta quase instantânea (JAPUNTICH et al., 1994). Para os demais tipos de filtros industriais, a duração desta fase é mais evidente no primeiro ciclo, com um tecido virgem, e tem sua duração sensivelmente diminuída nos ciclos subsequentes (ROTHWELL, 1980), mas mesmo no primeiro ciclo sua duração é muito rápida (PAYATAKES, 1977).

Com o transcorrer da filtração e conseqüente aumento das partículas coletadas,

inicia-se uma fase de transição, com a formação de dendritos (WALSH et al., 1996). Estes dendritos são estruturas formadas pela aglomeração de partículas no interior do meio, que passam a agir como novos elementos coletores (REMBOR; KASPER, 1996). Quanto menor a velocidade de filtração, maior a porosidade destas estruturas dendríticas (KANAOKA; HIRAGI, 1990), e quanto menor as partículas, mais rápido se dá o desenvolvimento destes dendritos (WALSH; STENHOUSE, 1997).

PAYATAKES (1977) subdivide esta fase intermediária em duas, sendo que inicialmente ocorre a deposição de partículas sobre partículas, e segue-se a fase em que estes dendritos crescem e interagem com seus vizinhos, formando uma cobertura de espessura não uniforme ao redor de cada fibra, formando o que o autor denomina de matriz porosa interna. Como resultado da formação destas estruturas, tem-se um acréscimo na taxa de aumento da queda de pressão e significativa diminuição da penetração das partículas através do filtro (WALSH, 1996; BROWN e WAKE, 1999). Os dendritos formados vêm a constituir, finalmente, uma camada superficial de material particulado, denominada torta de filtração.

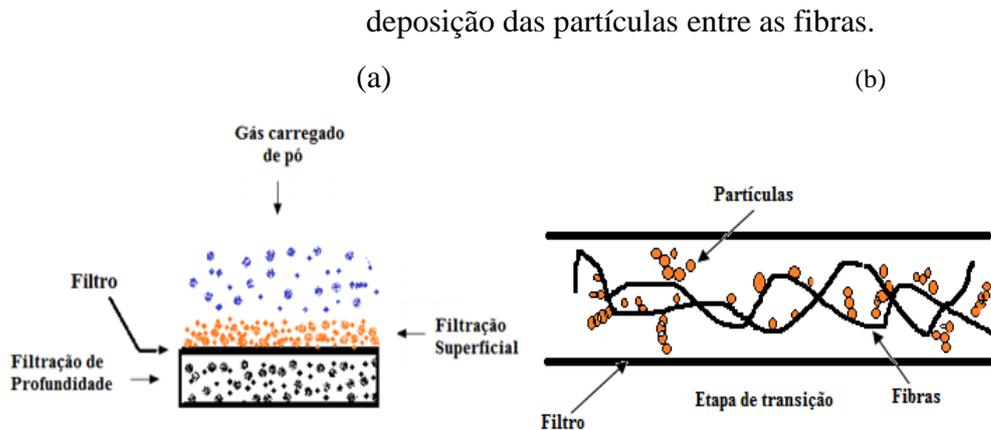
A partir da existência da torta na superfície do tecido, tem-se a terceira fase da filtração, conhecida como filtração superficial, em que a perda de carga alcança a sua máxima taxa de aumento e a penetração através do tecido e a eficiência tornam-se constantes (WALSH, 1996; BROWN e WAKE, 1999; THOMAS et al., 2001, RODRIQUES, 2006). Nesta terceira fase, o meio filtrante passa a atuar apenas como suporte para a torta, sendo esta capaz de remover partículas mais finas da corrente gasosa por peneiramento, ou por outros mecanismos de captura já descritos anteriormente. Desta forma, é interessante que se estabeleça a filtração superficial o quanto antes, para que o sistema alcance maior eficiência de remoção (ROTHWELL, 1980; BARROS, 2010). A filtração superficial também pode ocorrer no meio filtrante trançado, onde não ocorre a filtração de profundidade.

A Figura 2.4 apresenta esquematicamente as três etapas descritas: filtração de profundidade, de transição e superficial com distribuição uniforme da torta (KANAOKA et al., 2006).

A torta nesse ponto é que irá desempenhar o principal meio para coletar as partículas, podendo até mesmo capturar as partículas mais finas presentes na corrente de gás,

aumentando assim a eficiência de coleta no processo de filtração (KANAOKA et al., 2006;). A filtração superficial também pode ocorrer no meio filtrante trançado, onde não ocorre a filtração de profundidade.

Figura 2. 4 - (a) Filtração de profundidade e superficial; (b) Etapa de transição,

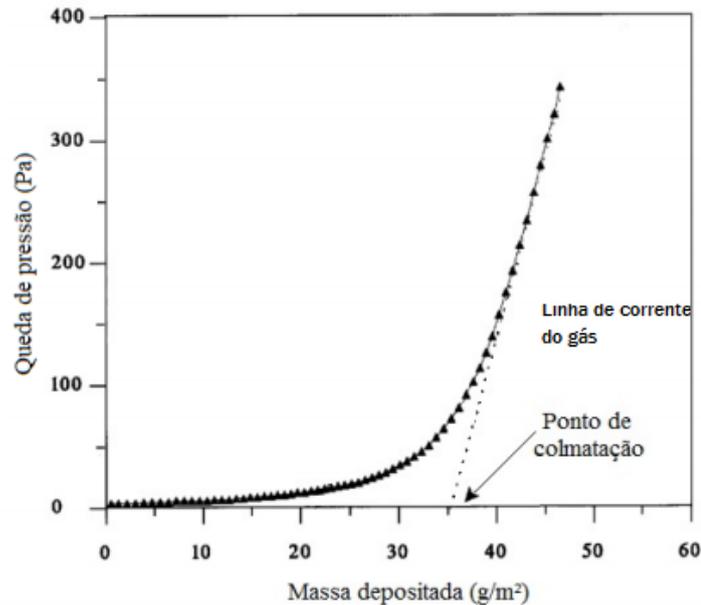


Fonte: ACERVO PESSOAL.

A previsão do momento exato de formação de torta é difícil de obter fisicamente, mesmo porque os tecidos não são materiais uniformes. Este ponto pode ser entendido também como sendo a capacidade de retenção do meio (JAPUNTICH et al., 1994). Vários autores admitiram um valor experimental para demarcar o ponto em que a torta se forma, designado por ponto de colmatação (JAPUNTICHI, 1994; WALSH, 1996; ROCHA et al., 2010).

O ponto de colmatação não pode ser determinado visualmente com precisão, mas, segundo WALSH (1996), o ponto de colmatação é dado pelo lugar geométrico obtido pelo gráfico de perda de carga em função da carga mássica, correspondente ao cruzamento da assíntota da curva com o eixo das abscissas, como apresentado pela Figura 2.5. Assim se obtém a massa de material particulado necessária para formar a torta (WALSH; STENHOUSE, 1997; CARVALHO, 2018).

Figura 2. 5 - Ponto de colmatação do não tecido



Fonte: Adaptado de WALSH et al., 1996.

A colmatação é tanto mais rápida quanto menores as partículas envolvidas (WALSH; STENHOUSE, 1997; WALSH et al., 1996), e quanto mais densamente empacotados forem os filtros utilizados (GRAEF et al., 1995; WALSH, 1996), uma vez que há um menor espaço disponível entre as fibras para a deposição das partículas (RODRIGUES, 2006).

Kanaoka e Hiragi (1990) verificaram um crescimento mais acelerado dos dendritos que antecedem a formação da torta nos casos em que prevalece a captura de partículas pelo mecanismo de difusão, sendo este crescimento mais moderado na faixa de coleta da interceptação direta e mais lento quando a coleta se dava no regime inercial. Estas informações foram ratificadas no trabalho de Japuntich et al. (1994) que comentaram que, no caso dos filtros de papel, este ponto é função do mecanismo de coleta que rege o processo e sugeriram que, para um dado mecanismo, este ponto é proporcional ao diâmetro do poro.

#### 2.1.4. Velocidade de filtração

A velocidade superficial de filtração é um dos parâmetros mais importantes na filtração de gases, pois está diretamente relacionada ao tempo necessário para a filtração, ao

desgaste do tecido e à profundidade que o material particulado consegue penetrar no tecido. Além disso, este parâmetro influencia na queda de pressão residual, ou seja, a queda de pressão após a limpeza do filtro antes de se iniciar uma nova etapa de filtração (TANABE, 2008; TOGNETTI, 2007).

A velocidade superficial de filtração,  $V_f$ , ou relação ar-pano, corresponde à razão entre a vazão volumétrica do gás ( $Q$ ) e a área de filtração ( $A$ ), conforme a equação:

$$V_f = \frac{Q}{A} \quad (2.1)$$

Podendo ser expressa em  $(m^3/min) / m^2$ ,  $m/min$  ou  $cm/s$ . Seu valor depende do material particulado a ser filtrado, podendo variar de 2,5 a 6,7  $cm/s$  (TURNER et al., 1998).

Segundo Leith e Allen, 1986 essa variável é influente no custo inicial do equipamento e também no custo operacional. Assim, valores intermediários de velocidade superficial de filtração devem ser utilizados. Recomenda-se operar os sistemas de filtração com velocidades variando entre 0,5 e 10  $cm/s$  (LEITH; ALLEN, 1986).

De acordo com Donovan (1985), velocidades baixas, aproximadamente 0,5  $cm/s$ , tem-se um maior consumo de energia, já que o tempo de retenção das partículas seria maior. Uma vantagem para se trabalhar com altas velocidades de filtração, aproximadamente 10  $cm/s$ , é que há uma redução da área de filtração utilizada, diminuindo o custo inicial. Todavia, o tempo de filtração é pequeno e a penetração das partículas no tecido é maior, o que dificulta a remoção da torta, além de aumentar a queda de pressão durante a filtração e após a remoção da torta tornando a vida útil do tecido menor (FARGNOLI, 2010).

A influência da velocidade superficial de filtração tem sido investigada em vários trabalhos que relatam que a perda de carga aumenta com o acréscimo da velocidade de filtração (DAVIS; KIM, 1999). Rembor e Kasper (1996) testaram o efeito do aumento do número de Stokes aumentando a velocidade de filtração e também aumentando o diâmetro de partículas. Os autores verificaram que, operando-se em um sistema com número de Stokes entre 9 e 16

(regime de interceptação/impactação), em que o número de Stokes era aumentando pelo incremento da velocidade de filtração de 0,3 até 1,2 cm/s, a perda de carga e a eficiência do filtro, para partículas de 1 $\mu$ m, aumentavam. No entanto, quando o número de Stokes era aumentado através do acréscimo do diâmetro de partículas esta tendência ficou menos evidente, tornando esse aumento mais ameno.

Ylituomi et al. (1995), avaliando a velocidade de filtração para diferentes números de Stokes, verificaram que para baixas velocidades (abaixo de 15 cm/s) a penetração das partículas através do filtro diminuiu com o aumento do diâmetro das partículas. Porém, quando o sistema foi operado com maiores valores de velocidade, a penetração inicialmente reduziu com o aumento do diâmetro de partículas e posteriormente aumentou, quando os efeitos inerciais passam a agir como mecanismo predominante.

Já Silva Neto et al. (1999) verificaram que o aumento de perda de carga influenciado pelo incremento da velocidade de filtração, para a faixa compreendida entre 5 e 15 cm/s, não foi proporcional. Os autores observaram que, quando a velocidade de filtração era aumentada de 5 para 10 cm/s, a taxa de aumento de perda de carga era maior em comparação ao aumento de perda de carga resultante do incremento da velocidade de 10 para 15 cm/s.

No entanto, Thomas et al. (2001) investigando a influência da velocidade de filtração, para uma faixa entre 1 e 50 cm/s, em meios filtrantes de fibra de vidro, verificaram que o coeficiente angular da parte linear da curva de filtração foi maior com o aumento da velocidade de filtração. Os autores, com o objetivo de certificar se este comportamento poderia ser atribuído apenas à diferença de velocidades, traçaram curvas relacionando a perda de carga com a velocidade ( $\Delta P/V$ ) de filtração em função da massa depositada, verificaram que as curvas foram coincidentes, assim concluíram que a velocidade de filtração não afetou a forma com que as partículas se depositavam nos tecidos.

Cheng e Tsai (1998), investigando a resistência específica da torta verificaram que, para velocidades de filtração entre 1 e 9 cm/s, esta variável aumentou proporcionalmente ao aumento da velocidade de filtração. Esta tendência da resistência específica da torta aumentar foi observada também nos estudos de Silva et al. (1999).

Silva et al. (1999) verificaram que, para a velocidade de filtração dentro de uma faixa de 7,5 a 15,5 cm/s, a porosidade da torta diminuiu à medida que a velocidade aumentava, tendendo a um valor constante para altos valores de velocidades. Segundo os autores, este fato pode ser atribuído à compressibilidade da torta. Nesta mesma linha de estudo, Ito (2002) adotando uma faixa de velocidades entre 5,0 e 15 cm/s, demonstrou que a velocidade de filtração interferiu diretamente no valor da porosidade da torta formada. Verificou também que, quando os filtros eram submetidos a velocidades de filtração maiores, a torta de filtração apresentou valores de porosidade menores. Silva et al, (1999) obtiveram os mesmos resultados, para uma faixa de velocidade de 7,5 a 15,5 cm/s.

#### 2.1.5. Queda de Pressão na Filtração

A queda de pressão é o parâmetro responsável por descrever a resistência ao escoamento do fluido ao transpor o meio filtrante. Matematicamente, a queda de pressão é dada pela diferença entre a pressão de entrada e a pressão de saída do filtro. Ou então como a soma da queda de pressão do meio filtrante com a queda de pressão proporcionado pela torta.

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

$$\Delta P_T = \Delta P_M + \Delta P_C \quad (2.2)$$

Em que  $\Delta P_M$  é a queda de pressão no meio filtrante e  $\Delta P_C$  é a queda de pressão da torta de filtração

A queda de pressão através da torta ( $\Delta P_T$ ) é dependente da velocidade superficial do gás de filtração ( $V$ ) e da massa de pó depositada por unidade de área ( $W$ ), demonstrado por:

$$\Delta P_T = K_M \cdot V + K_C \cdot V \cdot W \quad (2.3)$$

Em que  $K_M$  é a resistência específica do meio filtrante;  $K_C$  é a resistência específica da torta. Quando a filtração é conduzida a baixos valores de Reynolds, pode-se utilizar a lei de

Darcy para descrever a queda de pressão através do meio filtrante e da torta de filtração (TANABE, 2008).

À medida que as partículas são retidas na superfície do meio filtrante durante os ciclos de filtração, há a formação da torta de pó e consequente aumento da queda de pressão através do filtro. A queda de pressão ou perda de carga é a principal forma de consumo de energia do processo (SILVA NETO, 2002). Este é um dos parâmetros mais importantes, uma vez que determina a frequência de limpeza do filtro e, conseqüentemente, afeta o tempo de vida do tecido (JEON e JUNG, 2004). Além disso, a máxima queda de pressão, antes da limpeza, pode ser empregada para determinar a potência requerida no sistema. Os valores das queda de pressão operacionais são geralmente na faixa de 750 a 2000 Pa (SEVILLE, 1997).

A queda de pressão varia de ciclo para ciclo de filtração, ou seja, ao iniciar um novo ciclo de filtração, a queda de pressão através do filtro se encontra em um valor bem abaixo daquele imediatamente anterior à limpeza, mas ligeiramente superior ao valor inicial, correspondente ao filtro limpo e virgem. Isso se deve ao fato de, por mais eficiente que seja a limpeza, algumas partículas não são removidas, permanecendo nos interstícios do tecido (WILDER; BILLINGS, 1970b). De acordo com Aguiar (1991), no início da filtração pode-se notar um comportamento não linear da queda de pressão com o tempo, sendo que este comportamento tende a se linearizar após a formação da torta. Esta observação é confirmada pelo trabalho de SCHIMIDT (1995), que constatou um período de transição inicial, sendo que o tempo de duração da deposição das partículas no interior do tecido foi apenas de alguns segundos, seguido por outra fase em que a permeabilidade permaneceu constante, sem alteração da torta. Porém, com o decorrer do tempo de filtração, o autor notou um afastamento da linearidade, com aumento do coeficiente angular, e atribuiu a isso à compressibilidade da torta (AZEVEDO, 2009).

No entanto, alguns trabalhos da literatura apresentaram curvas de filtração com decréscimo do coeficiente angular, algum tempo após a formação da torta, ou seja, para uma dada quantidade de massa depositada a queda de pressão diminuía. SILVA et al. (1999) atribuíram este comportamento a uma diminuição da resistência específica da torta e da porosidade da mesma, determinada experimentalmente.

Deve-se esclarecer a diferença entre a queda de pressão do tecido limpo, a queda de pressão crítica (máxima), que indica o momento da limpeza, e a queda de pressão residual, que é a diferença de queda de pressão do filtro novo e do filtro após a limpeza.

A queda de pressão residual tende a aumentar após cada ciclo, como citado anteriormente, pelo crescente acúmulo de partículas no tecido (DULLIEN, 1989). Após vários ciclos este valor tende a se estabilizar, indicando uma “quantidade de equilíbrio de pó” no tecido, ou uma saturação do mesmo, que depende do tipo do material do filtro, do tamanho das partículas e do tempo e tipo de sistema de remoção da torta (CALLÉ et al., 2002a). Porém, segundo Koch et al. (1996) e Stöcklmayer e Höflinger (1998a), em alguns casos este equilíbrio pode nunca ser atingido, sendo que a operação prossegue até que a vazão de ar não possa mais ser mantida por muito tempo, sob condições adequadas de queda de pressão, tornando o processo impraticável, e conseqüentemente, sendo necessário a troca do tecido.

A queda de pressão pode em alguns casos ser representada pelo arraste do filtro (S), que pode ser obtido dividindo-se a equação 2.3 por V, assim tem-se:

$$\frac{\Delta P_T}{V} = (K_M + K_C W) = S \quad (2.4)$$

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

O arraste do filtro (S) pode ser definido como sendo a resistência do filtro, ou seja, a razão entre a queda de pressão e a velocidade específica do gás. Ele é a medida da resistência aerodinâmica do filtro preferida por modeladores, porque o seu uso preserva o conceito da propriedade da camada do meio, independente da velocidade de escoamento (DONOVAN, 1985).

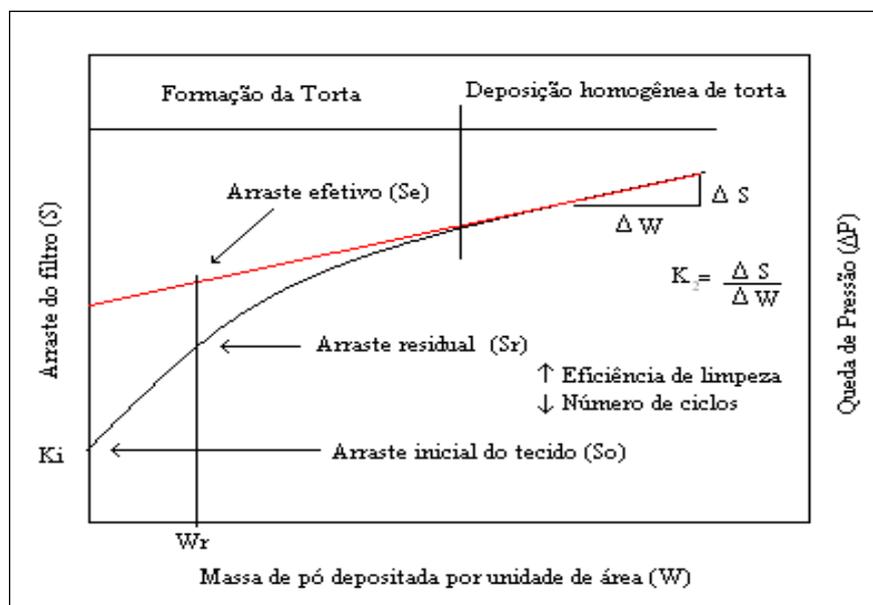
A Equação 2.4 mostra que, no caso de tortas incompressíveis, o aumento do arraste no filtro com o aumento da massa de pó depositada por unidade de área é linear. Entretanto, na verdade, isso só ocorre após a formação da torta de pó. Essa dificuldade, do ponto de vista experimental, pode ser contornada estimando-se o arraste pela extrapolação da parte linear da curva de filtração até o ponto da massa de pó residual por unidade de área ( $W_R$ ), determinado

experimentalmente. O valor do arraste nesse ponto é chamado de arraste efetivo, veja Figura 2.6. Deste modo a equação 2.4 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$S = \frac{\Delta P_T}{v} = S_e + K_2 \cdot (W - W_R) \quad (2.5)$$

Onde  $W_R$  é a massa residual de pó por unidade de área e  $S_e$  é o arraste, em um ponto qualquer nas condições de filtração.

Figura 2. 6 - Determinação do arraste efetivo nos estágios iniciais da filtração.



Fonte: Modificado de DONOVAN, 1985.

Para os ciclos consecutivos de operação de um filtro obtém-se uma série de curvas semelhantes, sendo o arraste cada vez mais pronunciado (STRANGERT, 1977), dependendo da eficiência de limpeza. Segundo Strangert (1977) a resistência efetiva da torta é dada pelo coeficiente angular da curva, de modo que a estrutura do tecido interfere muito pouco ou nada no valor do arraste (RODRIGUES, 2006).

#### 2.1.6. Permeabilidade

A permeabilidade é a propriedade de um meio poroso que indica a maior ou menor

facilidade à passagem do fluido através do filtro. 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 ao processo. No entanto, estruturas com baixa permeabilidade podem ser requeridas como prevenção à penetração de agentes indesejados que deterioram o material (INNOCENTINI et al., 2012).

Segundo Hung e Leung (2011), existem duas maneiras de melhorar a qualidade de um filtro. Uma delas é tornar mais eficiente a filtração do aerossol, a fim de aumentar a eficiência da filtração, e outra é torná-lo mais permeável, a fim de reduzir a queda de pressão (BORTOLASSI et al., 2017).

As equações de Darcy (2.6) e de Forchheimer (2.7) são tradicionalmente utilizadas para avaliar o escoamento de fluidos em meios porosos, sendo que ambas relacionam os valores de queda de pressão com a velocidade superficial.

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

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K_1} V \quad (2.6)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K_1} V_S + \frac{\rho}{K_2} V^2 \quad (2.7)$$

Sendo que,  $\Delta P$  é a queda de pressão na direção do escoamento;  $\mu$  é a viscosidade do fluido;  $L$  é a espessura do filtro;  $K_1$  é a constante de permeabilidade Darciana.

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.

A Equação 2.7 de Forchheimer considera que o fluido e o meio poroso exercem influência distinta sobre a queda de pressão. O primeiro termo representa a resistência do fluido devido ao atrito entre suas camadas e entre ele e a superfície do poro. O segundo retrata a contribuição da inércia e da turbulência, e pode ser desconsiderado caso o número de Forchheimer ( $Fo$ ) seja muito menor que a unidade (BEJAN, 2004):

$$Fo = V \frac{\rho K_1}{\mu K_2} \quad (2.8)$$

Comercialmente, a permeabilidade é normalmente informada como sendo a vazão volumétrica que atravessa uma área útil do meio filtrante e que resulta em determinada queda de pressão nesse filtro. Como por exemplo, pode ter as seguintes unidades:  $(m^3/min)/m^2@125Pa$ ,  $(L/min)/dm^2@20mmH_2O$  ou  $cfm/ft^2@1/2''H_2O$  (CARVALHO, 2018).

#### 2.1.7. Resistência Específica da Torta

A resistência específica da torta é regida pelo tipo de material e a porosidade do filtro, sendo estes últimos dependendo de parâmetros como a velocidade de filtração, a umidade e a natureza do pó (C. N. SILVA et al., 1999). Matteson e Orr, 1987 definiram que a queda de pressão total  $\Delta P_T$  é a soma da queda de pressão do meio filtrante  $\Delta P_M$  com a queda de pressão da torta de filtração  $\Delta P_C$ :

$$\Delta P_T = \Delta P_C + \Delta P_M \quad (2.9)$$

Sendo:

$$\Delta P_C = K'_2 \cdot V \cdot W \quad (2.10)$$

$$\Delta P_M = K'_1 \cdot V \quad (2.11)$$

Onde  $K'_1$  é a resistência específica do meio filtrante,  $K'_2$  é a resistência específica da torta e  $W$  é o valor da massa de pó depositada por unidade de área. Como a espessura da torta varia com a filtração admitiu-se que:

$$L = \frac{W}{\rho_p \cdot (1 - \epsilon)} \quad (2.12)$$

Tipicamente, a resistência específica da torta é assumida como constante, dependendo da porosidade. Como a porosidade é muitas vezes desconhecida, as equações teóricas são usadas para estimar a resistência específica da torta, geralmente com base em dados experimentais (LEITH e ALLEN, 1986; B. C. FENARA et al, 2011). A resistência específica da torta pode ser determinada experimentalmente a partir do aumento da queda de pressão através do meio filtrante devido ao acúmulo de material particulado (C. N. SILVA et al., 1999), de acordo com a equação (LEITH et al., 1986):

$$K_{2 \text{ EXPERIMENTAL}} = \frac{A}{V_F} * \frac{\Delta P}{\Delta M} \quad (2.13)$$

Em que  $K_2$  é a resistência específica da torta,  $A$  área de filtração e  $\Delta M$  a massa acumulada por unidade de área.

#### 2.1.8. Porosidades dos meios filtrantes e da torta de filtração

A porosidade é um parâmetro estrutural do meio filtrante muito importante na 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 et al, 2011). Assim, a porosidade total ( $\varepsilon_t$ ), que contabiliza os poros que contribuem e os que não contribuem para o escoamento (poros abertos e poros fechados), pode ser obtida pela equação:

$$\varepsilon_t = 1 - \frac{\rho_g}{\rho_s} \quad (2.14)$$

em que  $\rho_s$  a densidade do sólido,  $\rho_g$  a densidade total do meio ( $\rho_g = \text{massa de sólidos/volume total da amostra}$ ).

A porosidade dos meios pode também ser obtida por meio de equacionamentos bem estabelecidos na literatura. É o caso da equação proposta por Ergun (1952), largamente aplicada para leitos granulares com porosidade entre 0,1 e 0,75, e para partículas com diâmetro entre  $10^2$  e  $10^4 \mu\text{m}$  e número de Reynolds de partículas maiores que a unidade. Porém Aguiar e Coury

(1996) concluíram que a porosidade pode ser aplicada com confiabilidade para partículas com diâmetros menores, número de Reynolds mais baixos e tortas compressíveis com porosidade variável (CARVALHO, 2018; ITO, 2009; FARGNOLI, 2010).

A equação que expressa essa correlação está descrita a seguir:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu V_F}{\varepsilon^3 d_f^2} + 1,75 \cdot \frac{(1-\varepsilon) \rho_g V_F^2}{\varepsilon^3 d_f} \quad (2.15)$$

Nesta equação  $\rho_g$  é a densidade do gás,  $\mu$  é a viscosidade do gás,  $V_F$  é a velocidade superficial do fluido,  $d_p$  é o diâmetro da fibra (diâmetro de Stokes),  $L$  é a espessura do meio.

No trabalho de Mauschitz et al. (2005), os autores verificaram que filtros de feltro de poliéster mais porosos (85%) apresentaram maior retenção de partículas que o filtro de menor porosidade (51%). Segundo os autores, as partículas foram acomodadas mais na superfície do filtro menos poroso por causa da presença dos “*hot spots*”, ou pontos fundidos pelo tratamento superficial mais intenso sofrido por este tecido de menor porosidade. Além disso, esses pontos apresentaram forças de adesão mais fracas, facilitando a remoção e minimizando a massa retida após a limpeza (RODRIGUES, 2006).

A porosidade de tortas de filtração também é um parâmetro estrutural muito importante, pois tanto a queda de pressão no filtro durante o processo de filtração quanto à resistência ao escoamento e a força necessária para a remoção da torta dependem dessa propriedade. Ela está relacionada à compressibilidade da torta. A compressibilidade da torta de pó é uma característica que leva à sua compactação resultando na redução da porosidade, bem como em um aumento da queda de pressão através da torta (KIM et al., 1998; AGUIAR; COURRY, 1996; CHOI et al., 2004; ENDO et al., 1998).

A porosidade da torta é difícil de ser estimada experimentalmente, devido à grande fragilidade da camada de pó formada na superfície do filtro. No entanto, ela pode ser determinada indiretamente, ou seja, obtida a partir de correlações clássicas encontradas na literatura que descrevam a resistência de um meio poroso ao escoamento de um fluido (Método Indireto) (AGUIAR, 1995).

Coury (1983) desenvolveu um método que permite estimar a porosidade de tortas de filtração de gases indiretamente, a partir da correlação de Ergun (1952), utilizando a queda de pressão em um leito poroso, como mostrado na Equação (2.15). Isto é possível quando são conhecidas as quedas de pressão e a espessura das tortas de filtração.

A espessura da torta ( $L$ ) pode ser determinada da seguinte forma:

$$M = Q \cdot t = L \cdot A \cdot \rho_p (1 - \varepsilon) \quad (2.16)$$

Em que  $M$  é a massa da torta,  $Q$  a vazão mássica de pó por unidade de tempo ( $t$ ),  $A$  é a área superficial da torta de filtração,  $\rho_p$  é a densidade da partícula.

Rearranjando a equação 2.16, isola-se  $L$ , assim tem-se:

$$L = \frac{Q \cdot t}{A \cdot \rho_p (1 - \varepsilon)} \quad (2.17)$$

Substituindo a Equação (2.17) na Equação (2.15) tem-se a Equação de Ergun Modificada:

$$\frac{\Delta P}{t} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon) Q \mu V_F}{A \rho_p \varepsilon^3 d_p^2} + 1,75 \frac{Q P_g V_F^2}{A \rho_p \varepsilon^3 d_p} \quad (2.18)$$

O primeiro termo da Equação (2.18) é relativo aos componentes viscosos e o segundo termo é relativo ao componente inercial, sendo este último desprezível no caso de escoamentos puramente viscosos como nos gases. Assim a Equação (2.18) permite estimar a porosidade da torta de filtração a partir dos dados experimentais de queda de pressão ( $\Delta P$ ) em função do tempo ( $t$ ) (SILVA *et al.*, 1999).

Para filtros de mangas, que geralmente operam em baixas velocidades superficiais de filtração, o termo inercial na Equação 2.18 pode ser desprezível quando comparado ao termo viscoso, e a Equação 2.18 pode ser simplificada:

$$\frac{\Delta P}{t} = 150. \frac{(1-\varepsilon)Q \mu V_F}{A \rho_P \varepsilon^3 d_P^2} \quad (2.19)$$

Negrini et al., (1998) verificaram que a porosidade da torta aumentava da interface torta-tecido para a interface torta-ar, e diminuía com o aumento da espessura da torta, indicando uma compactação da mesma. Silva et al., (1999) verificaram também que o aumento da velocidade de filtração provocou uma diminuição da porosidade, tendendo a um valor constante para altos valores de velocidade de filtração.

Como mencionado anteriormente, a torta de pó formada na superfície do meio filtrante é bastante frágil, o que dificulta seu manuseio e, portanto, a determinação quantitativa de sua porosidade. Na tentativa de obter experimentalmente valores de porosidade de tortas de filtração de gases, Aguiar (1995) determinou a porosidade a partir de imagens representativas da seção transversal de tortas de filtração de gases obtidas por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV), sendo este método denominado como Método direto (TANABE, 2011).

Neste método, a torta de filtração passa por um processo de pré-endurecimento pela passagem de um adesivo instantâneo arrastado por um fluxo de ar úmido. Segundo Aguiar (1995), essa etapa é muito importante para que não ocorra um rearranjo de partículas na torta modificando a sua estrutura durante a etapa seguinte que consiste na penetração de um agente embutidor na estrutura, preenchendo todos os poros da camada de material particulado, sem causar variações na sua estrutura. Na etapa seguinte, a torta já endurecida é seccionada em retângulos que são introduzidos em moldes cilíndricos de PVC com uma resina termo rígida. Posteriormente, as amostras são esmeriladas e polidas. Por fim, elas são levadas ao microscópio eletrônico de varredura para obtenção de microfotografias. As imagens obtidas são, então, analisadas em um programa de tratamento de imagens onde a binarização das mesmas é possível. Após a binarização, as imagens são vistas apenas em dois níveis de cores permitindo, assim, que a área de pontos brancos (partículas) e de pontos escuros (espaços vazios) seja determinada. Dessa forma, a porosidade é dada pela razão da área de espaços vazios pela área total examinada. O autor concluiu que este método oferece resultados próximos aos calculados pelas equações da literatura, como a Equação 2.18.

Cheng e Tsai (1998) determinaram a porosidade usando valores de espessura da torta medida em um equipamento a laser e da massa de pó depositada no meio filtrante por

unidade de área. Segundo os autores, as partículas de formatos irregulares e com estreita faixa de distribuição granulométrica, são conduzidas ao filtro intercalando-se umas sobre as outras ao acaso e de maneira irregular, aumentando a porosidade, enquanto as partículas esféricas, por terem o mesmo formato, preenchem mais os espaços intersticiais permitindo uma menor porosidade.

## **2.2. Equipamentos utilizados na filtração de limpeza de Gases**

Diversos tipos de equipamentos podem ser empregados na remoção de partículas em gases industriais, dependendo do processo e dos interesses econômicos e ambientais de cada indústria. Os mais utilizados são os precipitadores eletrostáticos, o lavador de gás, o ciclone e o filtro de mangas.

### **2.2.1. Filtros de Mangas**

Os filtros de mangas vêm se tornando um dos equipamentos mais empregados na separação gás-sólido no meio industrial, por ser um dos métodos mais seguros de controle de emissão de poluentes secos, são considerados como separador de altíssima eficiência de coleta (chegando a 99,9% para partículas maiores que 1 micra), e de fácil operação (KARMAKAR et al., 2015).

#### **2.2.1.1. Princípios de um Filtro 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 de filtração que passa a atuar também como meio filtrante. No entanto, à medida que a espessura da torta aumenta a queda de pressão no filtro também aumenta e, quando atinge valores de aproximadamente 2500 Pa (MATTESON,1987) é necessária remoção da torta de filtração. Deste modo, a filtração é um processo cíclico, composto pelo processo de filtração (formação da torta de filtração de gases) e de remoção da torta.

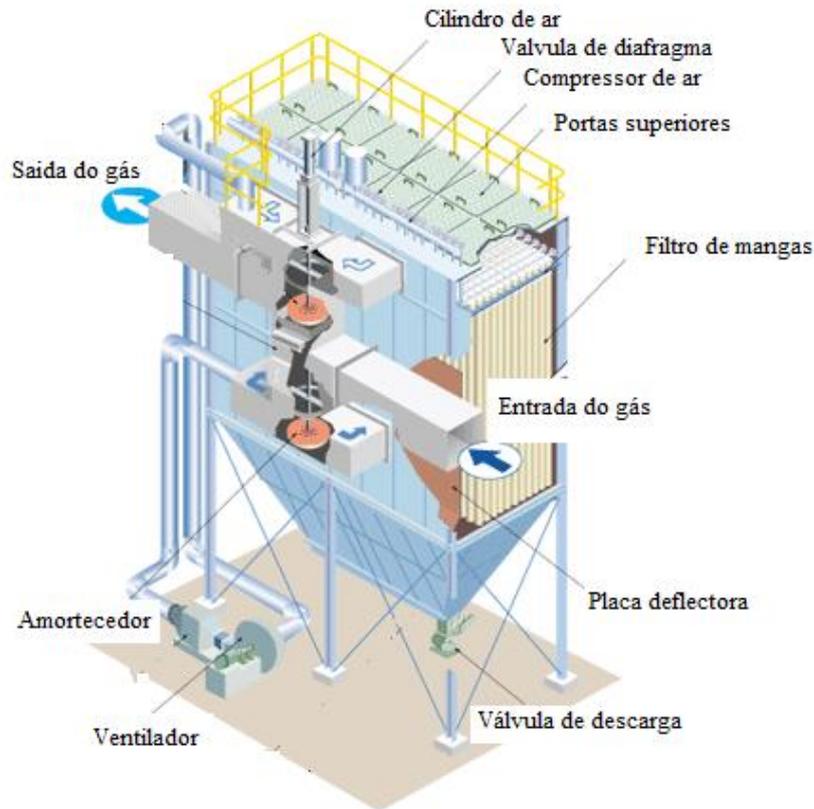
Para uma aplicação específica o desempenho satisfatório de um filtro de mangas depende da seleção adequada do material que será utilizado na confecção das mangas de filtração (meio filtrante), do projeto com geometria apropriada do coletor de sólidos e do mecanismo de limpeza a ser empregado e da compatibilidade do material pulverulento a ser removido. Deve-se ressaltar que tanto as características das fibras como dos fios influenciam na operação de filtração e de limpeza das mangas (BILLINGS; WILDER, 1970; RODRIGUES, 2004; ROCHA, 2010).

O sistema de limpeza das mangas pode ser realizado por agitação mecânica, fluxo de ar reverso ou jato de ar pulsante. Independentemente do método, deve-se fornecer energia suficiente para superar a força de adesão entre o material particulado e o meio filtrante, promovendo o destacamento da torta (DENNIS; WILDER; HARMON, 1981).

A limpeza das mangas pode ocorrer de fora para dentro ou de dentro para fora. O primeiro caso se aplica na limpeza por jato de ar pulsante e a torta é formada no exterior do filtro. Nos outros mecanismos de limpeza, o sentido do gás é de dentro para fora da manga, e as partículas ficam retidas no seu interior (CARVALHO, 2018).

Na Figura 2.7 está ilustrado um filtro de mangas industrial com limpeza de pulso de ar reverso, pois este processo é o mais utilizado nas indústrias hoje em dia. O processo de funcionamento deste filtro inicia-se na parte inferior direita da Figura 2.8 o fluxo de ar com material particulado (ar sujo) entra no equipamento e é levado até as mangas filtrantes, onde as partículas ficam retidas no tecido das mangas e o ar limpo é exaurido do equipamento pela parte superior esquerda. O processo de limpeza das mangas é estabelecido através de programação, para que haja a limpeza das mangas assim que estas estiverem impregnadas com as partículas, pulso de ar reverso é ligado e as partículas são desprendidas das mangas filtrantes voltando para o processo sendo coletadas na parte inferior do filtro.

Figura 2. 7 - Filtro de mangas industrial.



Fonte: HITACHI, 2015.

#### 2.2.1.2. Tecidos Filtrantes

O conhecimento do tipo de tecido utilizado na filtração é de extrema importância. Os tecidos são classificados em trançados e não trançados (feltros) e são constituídos por fios ou fibras. A seguir são apresentadas características dos tecidos filtrantes:

**Fibras:** São os componentes básicos 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; YOUNG, 1977).

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

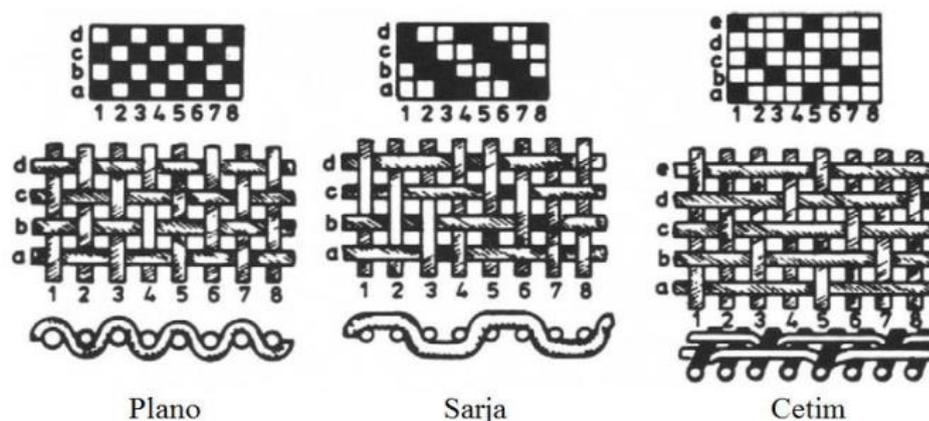
torcidas em fios, sendo esse processo medido pelo número de volta por polegada. Quanto mais torcido o fio mais forte este será, até certo ponto limitante depois do qual se tornam quebradiços e perdem sua elasticidade (DONOVAN, 1985).

**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; YOUNG, 1977).

**Tecidos Trançados:** Segundo a ABNT/TB-392, uma estrutura produzida pelo entrelaçamento de um conjunto de fios de trama formando um ângulo de 90° é um tecido trançado. Existem várias formas que os tecidos podem ser trançados, o trançado plano, o trançado sarja e o trançado cetim, como ilustrado na Figura 2.8.

De acordo com Purchas (2002), o tipo plano é o mais rígido e justo, e oferece a maior eficiência de coleta. Já o de sarja é o mais flexível e que proporciona a maior vida útil as mangas. Os de cetim possuem mais espaços entre os entrelaçamentos diminuindo a probabilidade das partículas se fixarem nas fibras, resultando em uma maior facilidade de limpeza. Porém estão mais sujeitos ao desgaste por abrasão reduzindo a eficiência.

Figura 2. 8 - Tipos de entrelaçamento de fibras.



Fonte: Adaptado de Purchas, 2002.

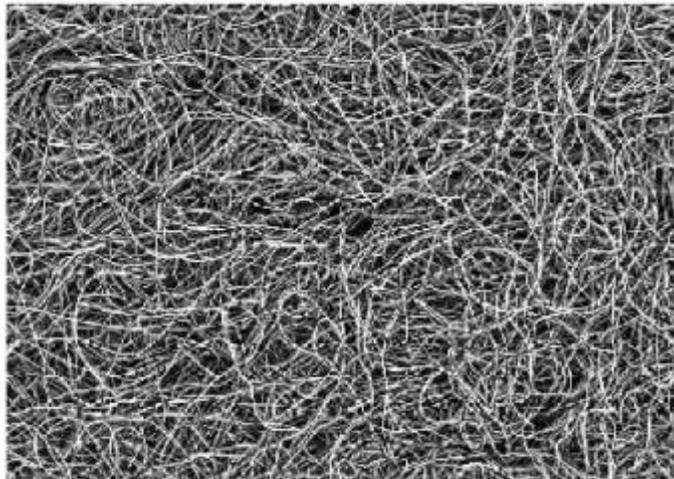
De acordo com Davis (1999) estes tecidos são utilizados em sistemas de filtração onde o fluxo do gás é direcionado de dentro dos sacos para fora, operando com baixas vazões de ar e utilizam limpezas de fluxo de ar reverso.

**Não tecidos ou feltros:** De acordo com a NBR 13370, uma estrutura plana, flexível e porosa é um não tecido.

Tecidos não trançados (feltros) 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).

Os feltros têm em sua estrutura mais poros por unidade de área que os tecidos trançados, devido ao próprio processo de fabricação. A Figura 2.9 ilustra um tecido de polipropileno não trançado.

Figura 2. 9– Tecido não trançado ou feltro.



Fonte: Adaptado de RODRIGUES, 2006.

Estes tecidos são muito aplicados em operações de filtração de gases para filtros de mangas em que a etapa de limpeza se realiza 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; BUONICORE, 1988; TANABE, 2008; CERON, 2012; CIRQUEIRA, 2013).

Para entender a eficiência dos meios filtrantes os fabricantes fornecem tabelas apresentando todas as propriedades dos tecidos. A Tabela 2.1 apresenta uma comparação das propriedades dos tecidos de polipropileno e fibra de vidro.

As propriedades importantes sobre os meios filtrantes são a temperatura, resistividade e a estabilidade química. O Filtro de fibra de vidro é indicado para altas temperaturas e possui boa estabilidade química, mesmo com custo relativo alto ainda é muito utilizado para indústria que trabalham em altas temperaturas.

Tabela 2. 1 – Propriedades dos meios filtrantes.

Fibra	Temperatura Máx (°C)		Resistência a Abrasão <sup>1</sup>	Estabilidade Química					Custo relativo <sup>1</sup>
	Operação	Pico		Hidrólise	Ácido	Base	Solvente	Óxido	
Polipropileno	77	107	E	E	E	E	R	B	1
Fibra de vidro <sup>1</sup>	260	-	R	E	NR	R	-	E	3

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

<sup>1</sup> – Dados retirados de Air Filter Sales & Service (2017)

Fonte: Adaptado de Casfil, 2016.

Theodore e Buonicore (1988) afirmam que os feltros limpos são mais eficientes que tecidos trançados limpos, mas que estes últimos são capazes de alcançar eficiências comparáveis após uma camada de partículas ter se acumulado em sua superfície. Na indústria, este processo de formação da torta pode durar, dependendo da carga e da natureza das

partículas, desde algumas horas até alguns dias. Por este motivo, no caso dos tecidos trançados, deve-se cuidar para que a limpeza não elimine completamente a camada superficial da torta, o que diminuiria a eficiência da filtração. Como afirmam os autores, este problema é mais difícil de ocorrer nos feltros pela grande quantidade de partículas retidas no interior do tecido após a limpeza. Assim, os feltros necessitariam de técnicas de limpeza mais rigorosas, empregando-se frequentemente os métodos de pulso de ar. Os referidos autores notificam ainda que tecidos trançados utilizados na remoção de partículas muito pequenas e a baixas cargas são normalmente revestidos com asbestos ou materiais semelhantes, com o objetivo de formar uma camada artificial que simularia uma torta de filtração, aumentando a eficiência inicial e evitando a penetração das partículas no tecido (RODRIGUES, 2006).

É discutível a eficiência do carregamento eletrostático em meios filtrantes do tipo não tecidos para filtros de ar, como por exemplo, Kyung (2008) realizou um estudo com filtros de tecidos não trançados, aplicando cargas eletrostáticas nos meios filtrantes e medindo a eficiência de filtração destes materiais (polipropileno e poliéster), com uma carga aplicada de 42 kV. Foi observado que somente o filtro de polipropileno obteve variação neste valor, porém os dois meios filtrantes obtiveram uma melhor eficiência na filtração quando comparados com os filtros sem carga eletrostática aplicada.

### 2.2.2. Precipitador Eletrostático

Na limpeza de gases o precipitador eletrostático ainda é muito utilizado para o controle de material particulado, devido ao seu baixo custo operacional, obtendo uma alta eficiência de coleta para faixas de granulometria entre 0,01-10  $\mu\text{m}$  e baixas quedas de pressão. (MCCAIN et al., 1975; WANG. A. et al., 2014; NI M. et al., 2016; G. TU et al., 2017; ADAMIAK, 2013).

Os pontos principais do precipitador eletrostático estão descritos nos itens a seguir.

#### Princípios de um Precipitador Eletrostático

Um dos primeiros relatos do fenômeno de eletrização foi mostrado por Tales de Mileto. Seus experimentos foram realizados em aproximadamente 642 anos antes de Cristo, quando ele percebeu que, uma espécie de resina fóssil vegetal quando atritada, ganhava a

propriedade de atrair objetos leves como gravetos e palha. Estes resultados foram consolidados no tratado de Maxwell sobre Eletromagnetismo. Hoje, a eletrostática está presente em muitas tecnologias de produtos e processos importantes: as máquinas de eletrocópias, impressoras a laser, eletretos usados como transdutores acústicos, reciclagem de polímeros isolantes, fabricação de nanofibras e nanotubos poliméricos por fiação eletrostática, pintura eletrostática e filtração eletrostática (GOUVEIA, 2010).

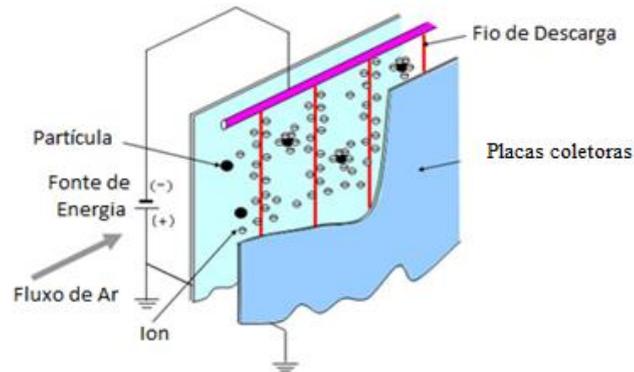
A precipitação eletrostática é um método de coleta de material particulado, que utiliza forças eletrostáticas sendo composto por fios de descarga e placas metálicas aterradas para a coleta de partículas. Alta voltagem é aplicada aos fios de descarga (eletrodos) formando um campo elétrico entre os fios e as placas de coleta ocasionando a ionização do gás em torno dos fios de descarga. Quando o gás que contém um aerossol (poeira, névoa) flui entre as placas de coleta e os fios de descarga, as partículas são carregadas pela corrente de íons gerada por uma descarga elétrica de eletrodos, e as partículas transportadas pelo gás, são carregadas devido à colisão dos íons com essas partículas (LAMB e CONSTANZA, 1978).

A força de Coulomb causado pelo campo elétrico faz com que as partículas sejam carregadas e atraídas pelas placas de coleta, saindo apenas o gás limpo. Este é o princípio de precipitação eletrostática, aplicada em escala industrial (HITACHI, 2015).

A Figura 2.10 apresenta um esquema de um precipitador eletrostático tipo placa-fio, este tipo de precipitador é usado em uma variedade de indústrias com o intuito de capturar partículas, em caldeiras, fornos de cimento, incineradores de resíduos não perigosos, caldeiras de recuperação em usinas de papel, unidades de refinaria de petróleo etc.

Neste equipamento o processo ocorre no duto, que contém eletrodos de descarga, com alto potencial elétrico (com valores de até 50 kV), no centro e placas coletoras nas paredes. Quando o material particulado passa através deste duto, submete-se a ação de um campo elétrico que gera um campo ionizado ao redor do eletrodo, este carrega as partículas, permitindo que as forças elétricas promovam a separação. As partículas adquirem carga e são atraídas na direção das placas coletoras. O processo de coleta é, portanto, uma concorrência entre as forças elétricas e as de inércia, as partículas se aproximam das paredes, onde o escoamento em regime turbulento decai, e estas são coletadas pela diminuição da velocidade do gás nesta região (CERDA, 2004).

Figura 2. 4 - Esquema de um precipitador eletrostático



Fonte: HITACHI, 2015.

Este tipo de precipitador é adequado para processar grandes volumes de gás. Quando operado em processo contínuo tem-se a necessidade de vibrar as placas coletoras para desprender o material retido nas placas.

### 2.2.3. Filtros Híbridos

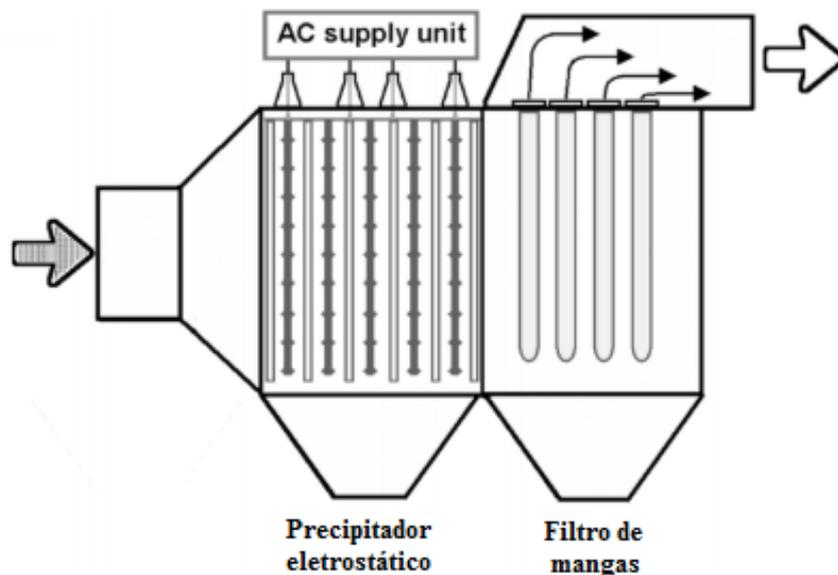
#### Princípios de um sistema de filtração eletrostático híbrido

No filtro eletrostático híbrido o processo de filtração é aprimorado pelo carregamento eletrostático das partículas, e opcionalmente, pode-se aplicar um campo elétrico no filtro de mangas (KWETKUS, 1997; KIM et al., 1998; PEUKERT et al., 2001; ALONSO et al., 2002).

A falta de terminologia para estes equipamentos fez com que cada autor os nomeasse de uma maneira diferente, havendo assim, vários nomes para o sistema de filtração eletrostático híbrido. Podem ser chamados por precipitador de filtro eletrostático híbrido (TU et al., 2017), precipitador eletrostático de difusão (ALONSO e AGUACIL, 2002), sistema de filtração eletrostático híbrido (FENG et al., 2016) entre outros, porém o mecanismo de funcionamento é o mesmo, um pré-carregador de partículas seguido de um filtro de mangas, ambos operando em série.

A Figura 2.11 apresenta o filtro eletrostático híbrido, que é composto por um pré-carregador eletrostático de partículas seguido de um filtro de mangas. O pré-carregador eletrostático desempenha um papel fundamental no processo de filtração por filtros eletrostáticos híbridos. As partículas são carregadas pela corrente de íons gerada por uma descarga elétrica nos eletrodos. Eletrodos de descarga com haste cravada no equipamento são mantidos em um alto potencial elétrico, geralmente de polaridade negativa. Íons negativos são emitidos pela descarga desses pontos e fluem para o eletrodo aterrado. As partículas transportadas pelo fluxo de gás são carregadas quando os íons colidem com estas partículas (JAWOREK et al, 2019).

Figura 2. 11 - Filtro eletrostático híbrido com um pré-carregador e um filtro de mangas



FONTE: ADAPTADO DE JAWORED et al, 2019.

O pré-carregador de partículas pode ser construído como um estágio separado, antes do filtro de mangas ou pode ser colocado diretamente na frente do filtro de mangas, com eletrodos de descarga voltados para a superfície do filtro condutor. No último caso, o processo de carregamento e filtragem de partículas deve ocorrer no mesmo dispositivo (PENNEY et al., 1985; KIM et al., 2000).

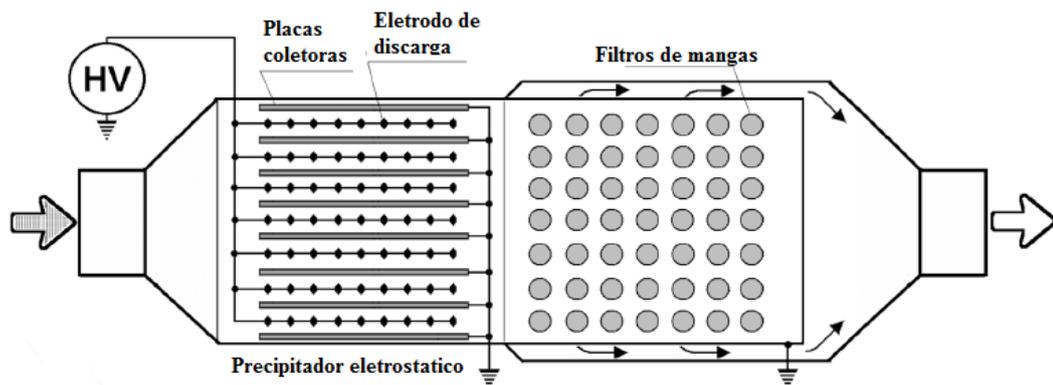
O filtro eletrostático híbrido tem um processo de filtração diferente do precipitador eletrostático híbrido. No primeiro caso, as partículas são somente carregadas com a descarga

eletrostática enquanto passam pelo precipitador eletrostático seguindo para o filtro de mangas, que neste caso, é o único equipamento de filtração utilizado. No segundo caso, o precipitador eletrostático é utilizado para reter as partículas maiores, deixando somente as partículas finas chegar ao filtro de mangas.

Um esquema do precipitador eletrostático híbrido é mostrado na Figura 2.12. Este equipamento é mais utilizado em usinas de energia elétrica para a remoção de partículas de cinzas voláteis dos gases de escape.

O precipitador eletrostático híbrido difere do filtro eletrostático híbrido, pois o primeiro estágio do equipamento é projetado para remoção de partículas grossas, enquanto no filtro eletrostático híbrido as partículas são apenas eletrizadas no pré carregamento, antes da sua filtração nas mangas. A fim de aumentar a eficiência dos sistemas híbridos e utilizar a energia adicional (pré carregamento do filtro híbrido) necessária para carregar as partículas, o uso do precipitador eletrostático pode coletar as partículas nos dois estágios em um único dispositivo, melhorando ainda mais a filtração (FENG et al., 2016).

Figura 2. 5 - Precipitador eletrostático híbrido.



FONTE: ADAPTADO DE JAWORED et al, 2019.

A Figura 2.12 apresenta o precipitador eletrostático híbrido, a filtração ocorre da esquerda para direita onde o fluxo de gás com material particulado passa inicialmente no precipitador eletrostático, as placas coletoras retêm as partículas grossas, deixando assim, as

partículas finas chegarem ao filtro de mangas, estas partículas, com o auxílio do efeito corona produzido dentro do precipitador, conseguem formar tortas de filtração mais porosas, conseqüentemente com maior permeabilidade, facilitando o escoamento do gás pelas mangas, ou seja, a saída do gás limpo do equipamento com menor queda de pressão.

Kwetkus (1997) e Feng et al., (2016) estudaram vários tipos de pré-carregadores usados em filtros eletrostáticos híbridos e os sistemas de energização afim de aumentar a eficiência de coleta destes equipamentos. Kwetkus (1997) utilizou a descarga eletrostática nas partículas, sem atingir a descarga corona, e concluíram que não houve uma melhora significativa no desempenho de coleta das partículas nos filtros. Feng et al., (2016) investigou a eficiência de coleta para partículas PM<sub>2.5</sub> de um filtro eletrostático híbrido com um pré-carregador de agulha única com tensão positiva ou negativa. O sistema foi usado em uma instalação de ar condicionado. Os autores concluíram que a eficiência de coleta do filtro eletrostático híbrido com pré-carregador eletrostático foi maior para tensão negativa do que para a tensão positiva.

Gutierrez-Ortiz et al., 2007, desenvolveram em escala piloto um precipitador eletrostático híbrido, acoplando a três campos eletrostáticos, seguido de um filtro de mangas. Os referidos autores utilizaram este equipamento para remover partículas PM<sub>10</sub> e PM<sub>2.5</sub> produzidas por uma caldeira de carvão. A eficiência da coleta para as partículas PM<sub>10</sub> foi superior a 99,95%, e para PM<sub>2,5</sub> ficou entre 96% e 98%. Os resultados experimentais mostraram que a taxa de aumento da queda de pressão através do filtro de mangas foi maior quando aumentou o número de campos ativos do precipitador eletrostático, porque as partículas menores, que escapavam do precipitador, penetravam nas fibras do filtro formando uma torta menos porosa. Os autores concluíram que a tecnologia híbrida requer apenas cerca de 60% da área de coleta total de um precipitador eletrostático convencional, e cerca de 50% da superfície total do filtro de mangas convencional. Este efeito foi alcançado com o aumento da velocidade superficial na entrada do filtro de mangas (JAWOREK et al., 2019).

#### 2.2.4. Cargas Eletrostáticas nos filtros e nas partículas

A presença de forças elétricas num filtro pode ser devido a presença de cargas eletrostáticas nas partículas e/ou coletores ou pode ser induzida por campo externo. As partículas podem ser carregadas espontaneamente por atrito ou choque (triboeletrificação ou

impacto), inerentes ao processo de filtração, ou podem ser deliberadamente introduzidas, por exemplo, por corrente corona (MEIRA, 2009).

Tais forças podem proporcionar aumento na eficiência de filtração e, no caso de existência de torta, causar a formação de tortas menos compactas, que oferecem baixa resistência ao escoamento do gás (COURY, 1983, SHAPIRO et al., 1988).

A atração entre partículas e coletor ocorre através de alguns mecanismos, classificados por Ranz e Wong (1952) apud Matteson (1987). Considerando a ausência de um campo elétrico externo, o conhecimento de como as forças eletrostáticas atua entre partículas e fibras é indispensável.

- Partícula carregada e fibra carregada (força Coulômbica)
- Partícula carregada e dipolo induzido na fibra neutra (dipolo-imagem no coletor)
- Fibra carregada e dipolo induzido na partícula neutra (dipolo-imagem na partícula)
- Repulsão de carga espacial, de uma partícula carregada por uma partícula próxima com carga similar.

Outro processo capaz de eletrizar um corpo é feito pelo contato entre eles. Se dois corpos condutores, sendo pelo menos um deles eletrizado, são postos em contato, a carga elétrica tende a se estabilizar, sendo redistribuída entre os dois, fazendo com que ambos tenham a mesma carga, inclusive com mesmo sinal (SILVA, 2015). O cálculo da carga resultante é dado pela média aritmética entre a carga dos condutores em contato. Como mostra a equação:

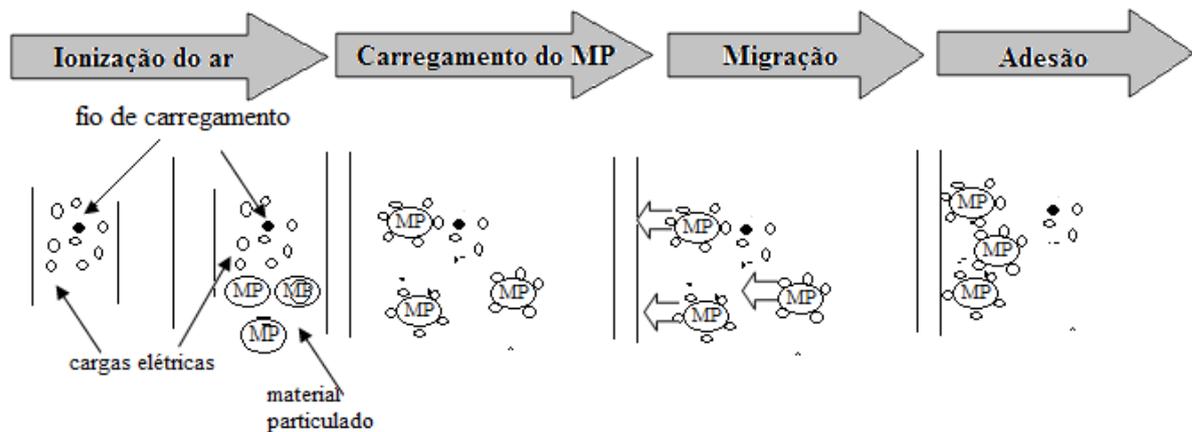
$$Q' = \frac{Q_1 + Q_N}{2} \quad (2.19)$$

Sendo que  $Q'$  é a carga resultante,  $Q_1$  é o corpo condutor 1 e  $Q_N$  é o corpo neutro.

Já na eletrização por indução, os corpos não precisam ter contato, ela ocorre apenas com a aproximação de um corpo eletrizado, indutor, e um corpo neutro, induzido. Assim os dois corpos ficam eletrizados.

O processo de carregamento das partículas (ionização do gás) está demonstrado na Figura 2.13. Onde o fio de carregamento ioniza o fluxo de gás em que as partículas estão em trânsito e elas vão se aglomerando a medida que passam pelo filtro e são carregadas eletrostaticamente até que são coletadas pelas placas coletoras através das forças de atração envolvidas nesta operação.

Figura 2. 13- Ionização de partículas solidas.

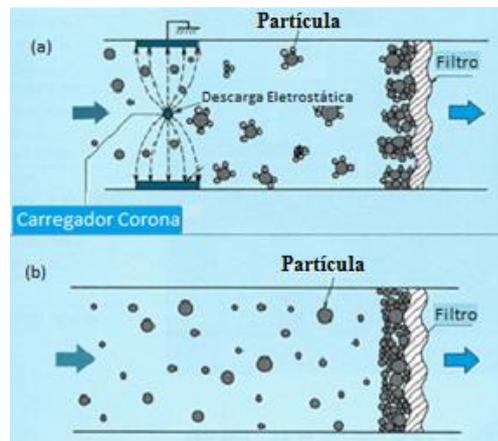


Fonte: Adaptado de MELO, 2015.

Nos passos iniciais da Figura 2.13 pode ser visto o mecanismo de deposição das partículas carregadas sobre as fibras do tecido, conforme a investigação feita por Huang et al., 2006. À medida que o fio de carregamento ioniza o fluxo de ar as partículas são carregadas eletrostaticamente e ao invés de migrar para as placas coletoras seguem um fluxo de ar até se depositarem no filtro de tecido.

Na Figura 2.14 está demonstrado, o efeito que a descarga eletrostática causa nas partículas durante o processo de filtração. Para a filtração com a adição de um carregador corona as partículas têm um rearranjo na sua estrutura ao longo da filtração, fazendo com que a deposição das partículas eletrizadas no filtro seja modificada, formando tortas de filtração com diferentes características em relação à filtração convencional, sem cargas nas partículas.

Figura 2. 14 - Esquema de filtração com carregador corona (a); e filtração normal (b).

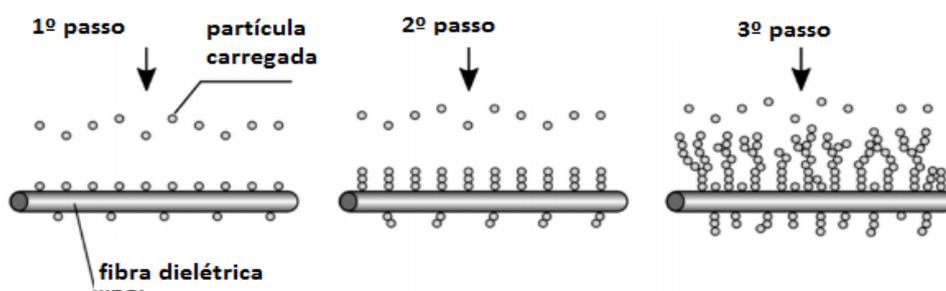


Fonte: ADAPTADO DE HITACHI, 2016.

A Figura 2.14 compara a filtração de gases com uma descarga eletrostática nas partículas e uma filtração normal (sem descarga eletrostática nas partículas). Este comportamento é devido à ionização do gás, que produz 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).

Estudos para compreender o comportamento das partículas com a descarga eletrostática na formação da torta de filtração, foram realizados por Huang et al., 2006. Para esta investigação os autores utilizaram partículas de cinzas voláteis e mais dois tipos de partículas cerâmicas. As partículas foram carregadas por dois métodos: por carga tribo elétrica (carregamento corona) e por polarização induzida. O processo de formação dos dendritos ocorre em três estágios apresentados na Figura 2.15.

Figura 2. 15 - Esquema de formação dos dendritos em uma única fibra.



Fonte: Adaptado de JAWOREK et al. (2019).

No estágio inicial (1º passo) as partículas são depositadas sobre a fibra uma a uma, no estágio dois (2º passo) são formadas cadeias curtas e retas, com distâncias uniformes entre si, e crescem gradualmente para cadeias mais longas, mas simultaneamente, partículas individuais são depositadas na fibra entre estas correntes, no último estágio (3º passo) vários ramos são formados sobre essas cadeias retas formando as estruturas semelhantes a dendritos (HUANG et al., 2006; JAWOREK, 2019).

Quando as partículas estão carregadas e penetram no interior do filtro de tecido, as forças eletrostáticas contribuem para a formação de “pontes” (dendritos) entre as fibras, deixando mais espaços livres entre estas pontes, e, como resultado, a torta de filtração fica mais porosa (FREDERICK, 1974). Quando o pré-carregador é do tipo co-fluxo e a descarga eletrostática flui através da torta, as forças coesivas entre as partículas formam dendritos muito mais fortes (FENG et al., 2016).

Conforme Henry e Ariman (1986) quando um meio filtrante é submetido à ação de um campo elétrico, os dendritos que se formam na superfície das fibras mais uniformes, tendem a diminuir a densidade de empacotamento das partículas (formando tortas mais porosas), proporcionando assim, menor resistência ao escoamento do ar.

### **2.3. Estudos sobre cargas eletrostáticas aplicadas na filtração**

Os filtros de tecidos também podem ser produzidos para receber cargas elétricas, como por exemplo, o filtro de eletreto, que é um material dielétrico que absorve ou retém cargas elétricas de forma duradoura, passando a ter propriedades magnéticas (polarização). Filtros de eletreto são utilizados largamente em aplicações que requerem alta eficiência e baixa perda de carga. Estes filtros utilizam-se dos mecanismos eletrostáticos de captura de partículas em adição aos mecanismos mecânicos convencionais (ROMAY, 1998).

Um dos primeiros estudos sobre o efeito do campo elétrico e o carregamento de partículas no processo de filtração em meios filtrantes foi realizado provavelmente por Hansen em 1930, utilizando meios filtrantes com fibras de lã (HENRY et al. 1985). Outros autores estudaram o efeito eletrostático em filtros de tecidos como Gillespie 1960 e Frederick 1974.

Gillespie (1960) investigou o efeito da carga elétrica na filtração de partículas de sílica em filtros de tecidos carregados (filtro eletreto) e concluiu que a eficiência de filtração para partículas carregadas no filtro de eletreto foi maior para velocidades filtração do gás menor.

Frederick (1974) avaliou os filtros de tecidos com e sem aplicação de um campo elétrico. A voltagem foi estabelecida em 7500 volts aplicados em um fio que atravessava o filtro de mangas (tecido de carbono). Foram feitos testes com partículas de cimento, e foi observado que houve uma redução da quantidade de material particulado acumulado entre as fibras do tecido. Frederick apresentou resultados positivos com um filtro normal e a aplicação de cargas elétricas no material particulado, reduzindo em 24% a resistência específica da torta de filtração. Também foi observada que com a aplicação da carga elétrica no meio filtrante a penetração das partículas no tecido diminuiu.

Na década de 70 foram realizados mais estudos (FREDERICK, 1974; PENNEY, 1977; HELFRITCH, 1977; LAMB AND CONSTANZA, 1980) sobre a aplicação prática de forças eletrostáticas na filtração de partículas em filtros de mangas.

Helfritch (1977) descobriu que a queda de pressão diminuiu e a eficiência de filtração aumentou com as partículas carregadas eletrostaticamente. Quando as partículas foram carregadas a vazão de alimentação de pó aumentou em 4 vezes mantendo a pressão constante (HENRY et al. 1985).

Oak e Saville (1980), demonstraram que o número de partículas depositadas sobre as fibras aumentou quando se utilizou um campo elétrico perpendicular ao fluxo de gás, mesmo que este carregamento seja baixo ( $\pm 3e$ ). Sem o campo elétrico, as partículas foram depositadas por intercepção direta na montante da fibra formando dendritos ramificados a partir dessas partículas. No entanto, quando um campo elétrico foi aplicado ao filtro, longas estruturas de partículas quase lineares foram formadas em ambos os lados da fibra, paralelas às linhas do campo elétrico.

Lamb e Constanza (1980), estudaram a eficiência de filtração através de filtros de tecidos energizados. Obtiveram diferentes resultados de queda de pressão, isto devido a influência do campo elétrico na formação da torta de filtração. No campo elétrico, o material

particulado foi depositado principalmente nas regiões onde a distância entre as fibras era maior, deixando espaços mais curtos, que permaneciam livres para o fluxo de gás (JAWOREK et al. 2019).

Segundo Matteson (1987) a presença de cargas eletrostáticas nas fibras e/ou nas partículas pode influenciar na operação de filtração, alterando a trajetória das partículas bem como sua ligação na superfície das fibras. Alguns estudos conseguiram aumentar a massa retida de particulados e diminuir a queda de pressão, melhorando a eficiência de filtração (REIS e AGUIAR, 2014; OLIVEIRA et al, 2015; FENG et al. 2016; RODRIGUES et al. 2017).

Ji et al (2003), estudou o carregamento das partículas de NaCl em filtros de tecidos e chegou ao resultado que partículas altamente carregadas são retidas com mais eficiência pelos filtros de tecido em regimes transitórios. Na mesma linha de pesquisa Rodrigues (2005) estudou sobre a aplicação da carga eletrostática em partículas de rocha fosfática, com diâmetros médios entre 2,1 e 5,8 $\mu$ m, concluiu que houve uma menor queda de pressão para partículas não eletrizadas, ele realizou ensaios variando as tensões ente -3; -6; -9 e -15 kV.

Givehchi et al (2015), aplicou uma carga eletrostática em partículas de NaCl de 10 nm a 100 nm, os resultados mostraram que a carga eletrostática obteve bons resultados na filtração de nano aerossol, otimizando o modelo existente da filtração convencional. A eficiência de filtração aumentou com o tamanho das nano partículas a um nível de aproximadamente 30%. Os resultados também mostraram uma correlação positiva entre a eficiência de filtração devido a forças eletrostáticas e o tempo de permanência das partículas no escoamento de ar.

Feng et al. (2016), utilizaram um sistema híbrido de filtração eletrostática (HEFS), que continha um sistema com um precipitador eletrostático (ESP) e um filtro fibroso instalado a jusante do ESP. Em seus experimentos, inicialmente as partículas passavam pelo precipitador eletrostático, onde eram carregadas eletrostaticamente e seguiam para o filtro. Durante a filtração de gases, os testes demonstraram uma maior eficiência na filtração de partículas. Em 2016, os autores utilizando um filtro de polietileno e partículas de dioctilftalato com 0,4  $\mu$ m, verificaram que a eficiência aumentou de 5% para 60% devido a maior tensão aplicada e devido ao mecanismo inercial (ou eletroforético).

Feng et al. (2018), verificaram os parâmetros do sistema, incluindo o tipo de filtro, a tensão aplicada e a distância entre o ESP e o filtro fibroso na eficiência global do sistema. Os resultados provaram que a eficiência do filtro aumentou com uma maior tensão aplicada e maior eficiência de filtração inicial. A distância entre o filtro e o ESP não teve nenhuma influência na eficiência da filtração do sistema e a eficiência do filtro em HEFS fornecida com a tensão positiva foi ligeiramente menor do que para a tensão negativa.

Tu et al. (2016) exploraram o efeito da carga eletrostática nas partículas de cinzas durante a filtração, utilizando dois tipos de filtros comerciais, filtros fibrosos e de membrana. Para o filtro fibroso, quando as partículas estavam carregadas eletrostaticamente a eficiência de limpeza do filtro aumentou. Os autores também observaram que o ponto de colmatação da torta de filtração aumentou reduzindo assim a emissão de particulados.

A porosidade média das tortas de filtração foram calculadas a partir do método direto desenvolvido por Aguiar e Coury em 1996, no filtro fibroso e no filtro de membrana, as porosidades foram aumentadas com a carga nas partículas, diminuindo assim a queda de pressão. À medida que o carregamento de partículas aumentava, a porosidade da torta nos filtros fibrosos diminuiu, enquanto comportamento oposto foi observado para os filtros de membrana, em que a queda de pressão aumentou.

Tu et al. (2017) investigaram recentemente os mecanismos da descarga eletrostática em um coletor de partículas compactado, utilizaram partículas com 1 e 10  $\mu\text{m}$ , as partículas de 10  $\mu\text{m}$  terminaram seus processos de carregamento mais rápido que as partículas de 1  $\mu\text{m}$ , também foi observado que para as partículas de 10  $\mu\text{m}$ , a carga eletrostática final foi de aproximadamente 100 vezes maior que para as partículas de 1  $\mu\text{m}$ . Os autores focaram seus estudos exclusivamente no carregamento das partículas.

Jaworek et al. (2019) estudaram trabalhos relacionados ao sistema de filtração eletrostático híbrido no controle da emissão de particulados. Os autores fizeram um 'review' com todos os trabalhos relevantes ligados ao tema iniciando em 1930 até os dias atuais. O trabalho relata sistemas de operação dos diferentes filtros híbridos utilizados hoje em dia, descrevendo minuciosamente todas suas características desde o precipitador eletrostático até a torta de filtração formada nas fibras dos tecidos. O 'review' deixou claro que, os sistemas de

filtração eletrostático híbrido parecem ser os dispositivos mais eficientes utilizado para a remoção de partículas de cinzas voláteis em centrais elétricas a carvão no futuro.

### **Estudos do grupo de Controle Ambiental do DEQ-UFSCar**

Os trabalhos descritos a seguir foram realizados nas dependências do Laboratório de Controle Ambiental do DEQ-UFSCar. Os estudos relatados reportaram resultados importantes para o presente trabalho.

Em 1983, Coury investigou a filtração de partículas de cinza leve carregadas eletrostaticamente em filtro granular de areia. As partículas de cinza leve eram polidispersas, com diâmetro médio de 2  $\mu\text{m}$  e carregadas negativamente por triboeletrificação durante o processo de dispersão. Foram utilizados pelo autor grânulos coletores de areia com diâmetro médio de 350 e 780  $\mu\text{m}$  e velocidade de filtração de 0,062 e 0,122 m/s. Observou-se a diminuição na penetração inicial das partículas, de diâmetro menor que 2  $\mu\text{m}$ , quando comparada com a penetração das partículas neutralizadas por fonte radioativa de Polônio-210 (RODRIGUES, 2005).

Pesquisadores como Meira (2009), Fenara et al (2011) e Reis e Aguiar (2014) estudaram a aplicação de cargas eletrostáticas nas partículas em filtros de tecidos. Meira (2009) avaliou o desempenho de um precipitador eletrostático placa-fio na coleta de aerossol de NaCl de granulometria entre 6 e 245 nm, com velocidades de 1 e 10 cm/s e campo elétricos entre 4 e 5,5 kV/cm. A eficiência do precipitador aumentou conforme o aumento do campo elétrico e também observou o aumento da eficiência para diâmetros menores. Para velocidades maiores como 2 e 10 cm/s foi observado uma diminuição da eficiência, isto pode ter ocorrido devido a diminuição do tempo de residência das partículas no equipamento.

Fenara et al (2011) verificou o efeito do nível de cargas presentes nas partículas de rocha fosfática, geradas por carregamento eletrostático, na eficiência de coleta e na perda de carga em filtros de 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. O autor utilizou uma carga de -3kV para o desenvolvimento dos experimentos pois com a utilização de cargas de magnitude mais elevada (-6 e -9kV), o carregador corona atuava

como um precipitador eletrostático, onde as partículas carregadas se depositavam no precipitador eletrostático e nas paredes das tubulações antes de serem coletadas pelo contador de partículas, interferindo nos resultados experimentais. Fenara et al (2011) conclui 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.

Reis e Aguiar (2014) iniciou estudos com aplicação de cargas eletrostáticas de -0,5 a -3 kV nas partículas de rocha fosfática com um diâmetro mediano entre 6,5 e 44 $\mu$ m, o meio filtrante utilizado foi de polipropileno. Os estudos demonstraram que a carga eletrostática pode otimizar o processo de filtração, porém os resultados não foram conclusivos devido à falta de repetitividade dos experimentos. O autor supôs que estes resultados não foram conclusivos devido à grande variação do diâmetro médio das partículas durante os ensaios.

Dando continuidade ao trabalho de Fenara et al (2011) e Reis e Aguiar (2014), Oliveira et al (2015) investigou o comportamento das partículas de cimento durante a filtração de gases em filtros de fibra de vidro, com uma aplicação de carga eletrostática de -1 e -2kV. Os resultados obtidos demonstraram que a aplicação da carga eletrostática nas partículas aumentou a retenção do material particulado e diminuiu a queda de pressão. Oliveira et al (2015) determinou a porosidade da torta de filtração e conclui que a porosidade da torta aumentou para uma carga aplicada de -2 kV, melhorando a passagem do ar entre as fibras do filtro e diminuindo a queda de pressão durante a filtração.

Rodrigues et al. (2017), com a finalidade de verificar a deposição inicial das partículas com diâmetro médio de Stokes de 3,35  $\mu$ m, em filtros de polipropileno, aplicou cargas elétricas de -3 e -6 kV nas partículas de rocha fosfática durante a filtração de gases, com apenas um eletrodo de descarga, os autores observaram que a eficiência da filtração aumentou e houve uma redução nos valores de queda de pressão.

Marques (2017), realizou testes com velocidade superficial de 0,1 m/s, umidade mantida a 20% e temperatura ambiente  $\sim$ 25 °C, o material particulado foi o proveniente de uma indústria siderúrgica com sua composição baseada em Óxido de Cálcio (CaO) e Óxido Férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), com pequenos traços de Óxido de Silício (SiO<sub>2</sub>) e Óxido de Alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) com diâmetro médio volumétrico de 19,5  $\mu$ m e o meio filtrante utilizado foi de polipropileno. Foram aplicadas tensões de -1, -2 e -3 kV e foi observado que o melhor comportamento da curva de

filtração foi obtido para tensão de -3 kV seguido de -1 kV, conseguiu-se diminuir a queda de pressão e a resistência específica da torta e aumentar o material particulado retido.

Carvalho (2018) avaliou os meios filtrantes de poliéster com e sem revestimento de PTFE, utilizados em filtros de mangas para o despoejamento secundário da aciaria de uma indústria siderúrgica. Concluiu que o poliéster com PTFE apresentaram eficiência de coleta próxima a 100% tanto para nano partículas quanto para micropartículas. Analisando a penetração das partículas, a queda de pressão e o tempo de filtração.

Embora estudos sobre a influência da carga eletrostática na filtração estejam sendo realizados com mais frequência, a maioria desses estudos estão focados na deposição das partículas no meio filtrante e na fase inicial da filtração, onde os mecanismos de coleta ainda são atuantes (RODRIGUES ET AL. 2017).

No entanto, estudos sobre a influência da carga eletrostática durante a formação da torta de filtração de gases com partículas de cimento, ainda é escasso e precisa ser explorado com mais detalhes. Devido a estes fatores este trabalho teve por objetivo verificar o comportamento das partículas micrométricas carregadas eletrostaticamente durante a formação da torta de filtração. Para tal finalidade serão descritos nos itens subsequentes os materiais e métodos utilizados para a produção desta pesquisa, e posteriormente será apresentado os resultados e discussões explorando os diferentes estudos de forma lúcida e didática para o leitor.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo serão descritos os principais materiais empregados durante a realização dos experimentos, como também serão apresentadas as metodologias utilizadas ao longo do trabalho, para a obtenção dos resultados e cumprimento dos objetivos propostos.

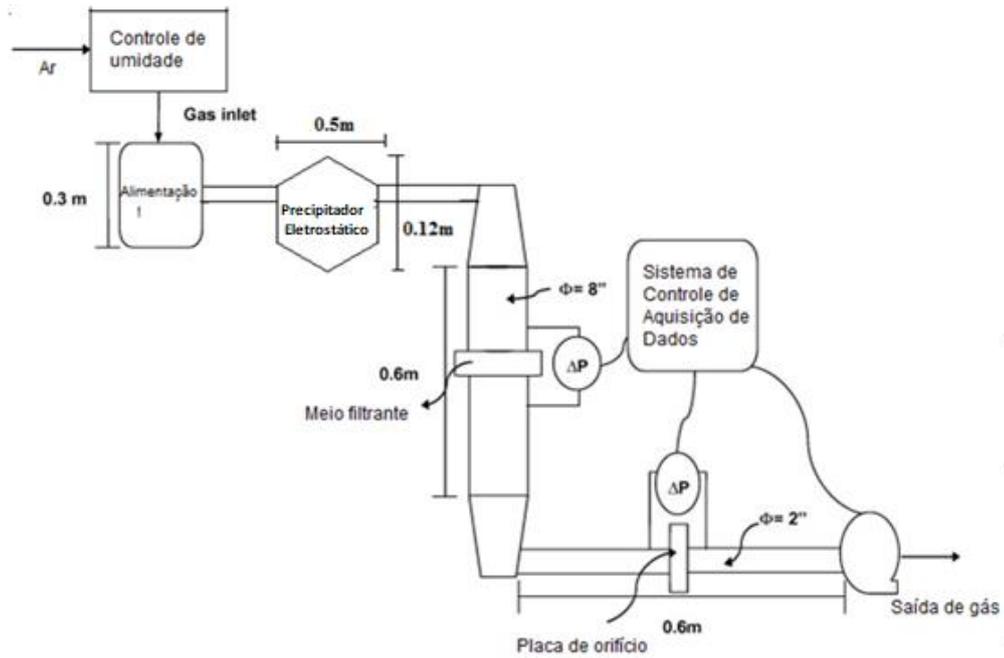
#### **3.1. Materiais**

##### **3.1.1. Equipamento de Filtração de Ar**

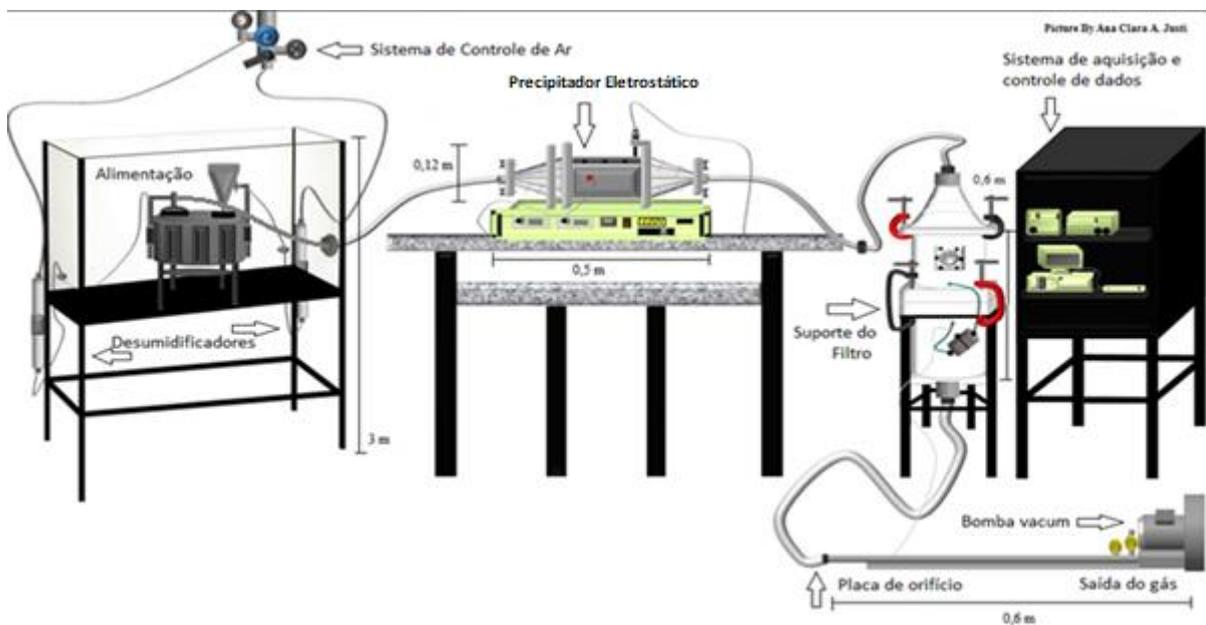
O equipamento utilizado nos testes de filtração era composto basicamente por um precipitador eletrostático e um filtro de mangas. Associados a estes equipamentos, o sistema o aparato também era composto por: um alimentador de pó, um dispositivo para geração do aerosol e controle de umidade, uma caixa de filtração, um soprador, dois micros manômetros digitais e um sistema de controle e aquisição de dados. O esquema do equipamento está ilustrado na Figura 3.1 (a) e (b).

O Equipamento está Localizado no Laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Figura 3. 1 - Esquema do equipamento de filtração (a) e uma vista geral do aparato experimental (b) .



(a)



(b)

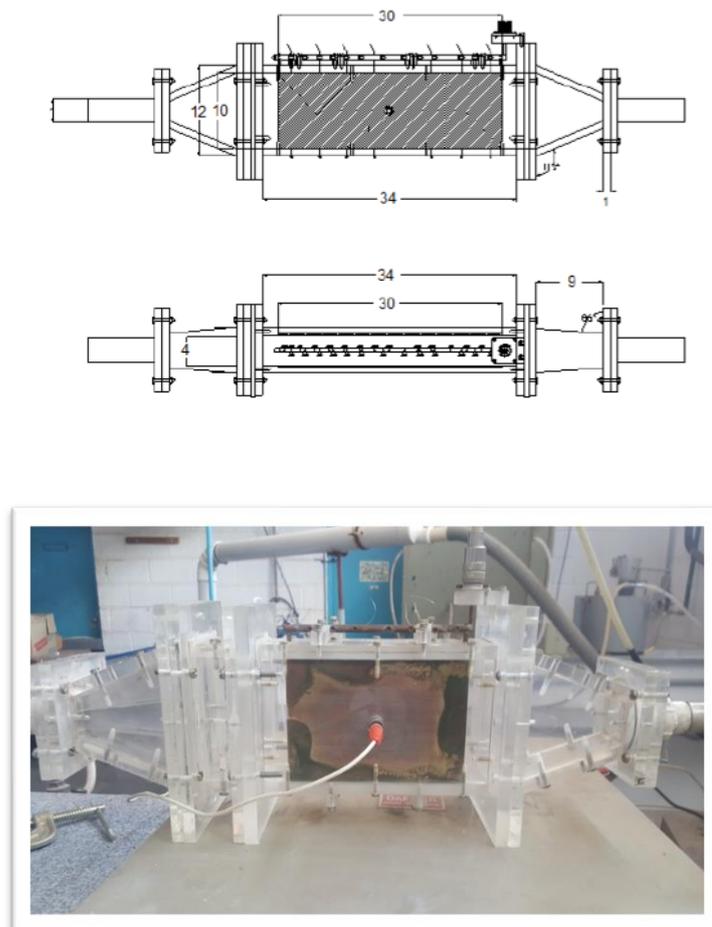
### 3.1.2. Fonte de Alta Tensão

Foi utilizado uma fonte de tensão contínua da marca Spellman, modelo SI1200, para a geração de corona negativa, sua faixa de operação para tensão é de 0 a 50 kV e para corrente de 0 a 20mA.

### 3.1.3. Precipitador Eletrostático

O equipamento utilizado para o carregamento das partículas do aerossol foi o precipitador eletrostático do tipo placa-fio de estágio único, como demonstrado na Figura 3.2.

Figura 3. 2 – Precipitador eletrostático: esquema de vista lateral (a) e superior com dimensões em (cm) (b) e uma fotografia do precipitador (c).



Fonte: Adaptado de MEIRA, 2009.

A Tabela 3.1 apresenta as dimensões do precipitador eletrostático: altura, comprimento, distância entre as placas de coleta, diâmetro dos eletrodos de descarga, espaçamento entre os eletrodos de descarga e a distância entre os eletrodos de descarga e a placa de coleta.

Tabela 3. 1 - Dimensões do precipitador eletrostático.

<b>Dimensão</b>	<b>Medidas (cm)</b>
Altura	30
Comprimento	10
Distância entre as placas de coleta	4
Diâmetro dois eletrodos de descarga	0,025
Espaço entre os eletrodos	4
Distância entre os eletrodos e a placa coletora	2

Fonte: Adaptado de MEIRA, 2009.

O precipitador eletrostático foi construído em acrílico onde foram colocadas duas placas de cobre nas suas laterais. Estas placas foram conectadas através de fio de cobre revestido a um sistema de aterramento, que consiste de 10 barras de cobre de 2 metros aterradas. Assim as placas funcionavam como eletrodo de coleta. Os eletrodos de descarga, onde era aplicada a tensão consistiam em fios de aço inoxidável colocados no interior da caixa acrílica. Foram utilizados 5 eletrodos de descarga, posicionados verticalmente, paralelos as placas coletoras e igualmente espaçadas entre si com 6 cm.

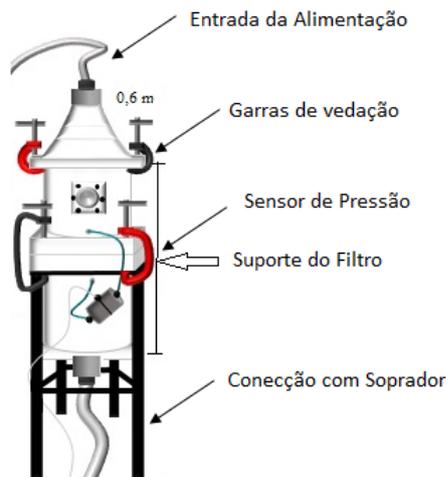
### 3.1.4. Caixa de Filtração

A filtração ocorria na caixa de filtração, que era 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 que era inserido entre as molduras da caixa de filtração apresentava formato circular, com 17 cm de diâmetro e área útil de filtração de 227 cm<sup>2</sup>.

A filtração foi realizada com a caixa de filtração na posição vertical, com o meio filtrante em seu interior na posição horizontal. Os dados de queda de pressão durante a filtração eram registrados no sistema de controle através de sensores de pressão, instalados antes e após a passagem do escoamento de ar pelo filtro.

Figura 3. 3 - Caixa de Filtração.



Fonte: Acervo pessoal, 2018.

### 3.1.5. Gerador de Pó

A alimentação de pó do sistema de filtração era realizada a partir de um gerador de pó tipo prato giratório, projetado e construído no Departamento de Engenharia Química da UFSCar, conforme mostrado na Figura 3.4. O prato foi construído em aço inoxidável e girava em torno de seu eixo, no qual se fixou um cone onde o pó ficava armazenado. Nesse cone acoplou-se um motor que fazia o prato vibrar, para facilitar o escoamento do pó que alimentava

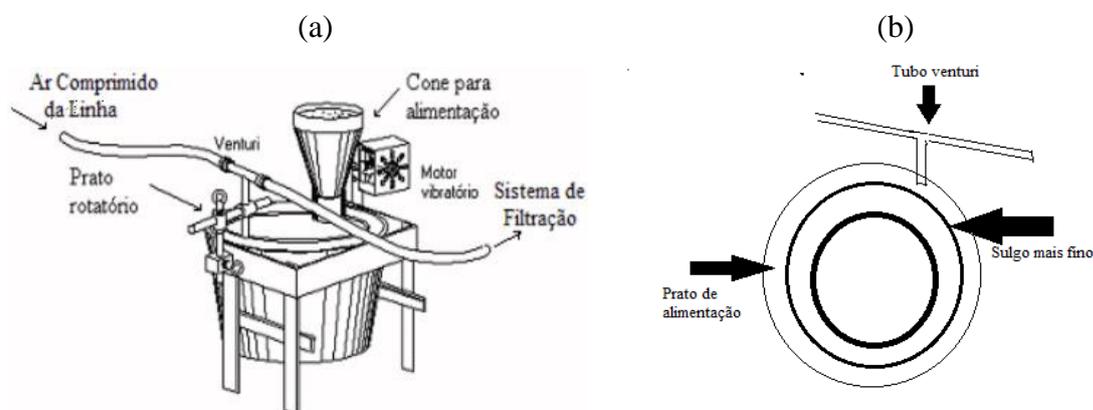
o prato giratório. Envolta deste prato havia um sulco semicircular, que o pó tendia a preencher. Uma vez alimentado o pó era forçado a escoar radialmente pela ação de um nivelador sobre a extensão do prato.

Na parede externa do gerador de pó era fixado um sugador tipo venturi, alimentado por ar comprimido que ficava a uma distância de 2 mm do sulco. O pó era aspirado do sulco a medida que o ar comprimido passava. A tomada de baixa pressão era conectada ao sulco do prato através de um tubo de ¼ de polegada, cuja ponta aspira permanentemente o pó à medida que o prato gira.

O prato era acoplado a um variador de velocidade, de modo permitir diferentes taxas de alimentação de pó. A velocidade de rotação do prato foi mantida em 0,5 rpm, mantida constante durante todos os experimentos.

Este equipamento encontrava-se dentro de uma caixa de acrílico. Acoplado a esta caixa foi instalado duas colunas de sílica gel, no qual o ar comprimido passava por uma prévia secagem antes do contato deste com o pó, evitando que possíveis gotas de óleo e água aglomerassem o material particulado. Também tinha como objetivo tentar manter a umidade constante durante os experimentos. Assim, a temperatura e a umidade eram registradas constantemente no decorrer da filtração. Para medir a umidade foi utilizado um higrômetro da marca Rotronic, modelo Hygropan, que possui faixas de aplicação entre -10 e 60° C e 0 e 100% U.R.

Figura 3. 4 – (a) Alimentador de Pó e (b) amplificação do prato giratório.



Fonte: Acervo pessoal, 2018.

### 3.1.6. Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados era 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 era feito pela placa de aquisição de dados e por uma placa de orifício calibrada colocada na linha entre os dois medidores de pressão que estavam ligados aos micros manômetros digitais.

Para o registro das variáveis, a queda de pressão era continuamente monitorada por sensor de pressão e os valores registrados pela placa de aquisição de dados, sendo registrada juntamente com o tempo e velocidade.

Os dados salvos eram primeiramente abertos em arquivo do bloco de notas do Windows, e posteriormente enviados para o Excel com alguns pequenos ajustes para o reconhecimento dos valores.

### 3.1.7. Outros Equipamentos

Outros equipamentos utilizados foram: balança digital Marte Modelo AM5500 para pesagem dos filtros antes e após a filtração; 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.

### 3.1.8. Material Pulverulento

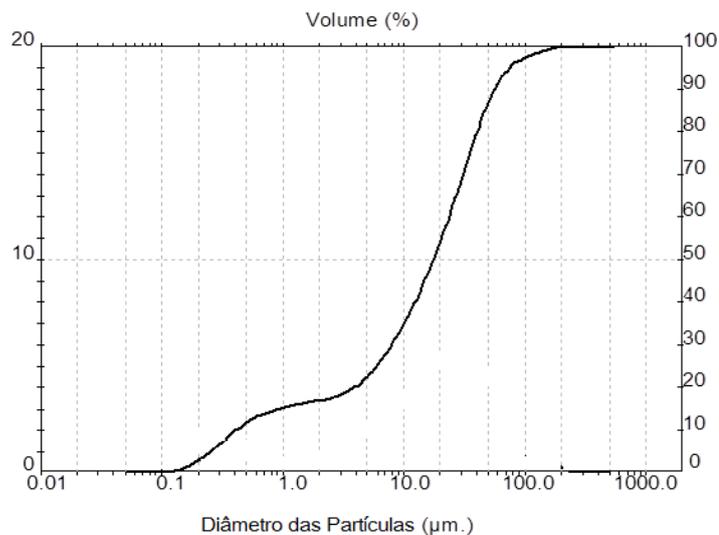
Foi utilizado como material pulverulento o cimento, fornecido pela Votorantim Cimentos S.A. de Itaú de Minas (MG). Trata-se de um material comercializado para área de construção civil, sendo escolhido devido a sua grande utilização no mercado mundial.

A curva de distribuição volumétrica cumulativa do diâmetro médio das partículas de cimento está apresentada na Figura 3.5, foi obtido por meio do equipamento MASTERSIZER MALVERN v.2.19, que opera pela técnica de difração a laser, localizado no laboratório de cristalização do Departamento de Engenharia Química UFSCar. O material particulado possui a seguinte distribuição granulométrica:

- $D(v, 0,1) = 0,41 \pm 0,01 \mu\text{m}$  ;
- $D(v, 0,5) = 17,61 \pm 0,13 \mu\text{m}$  ;
- $D(v, 0,9) = 56,61 \pm 1,07 \mu\text{m}$ .

A distribuição granulométrica por concentração simples e cumulativa (em volume) da amostra única é apresentada na Figura 3.5 onde verifica-se que o material particulado é polidisperso.

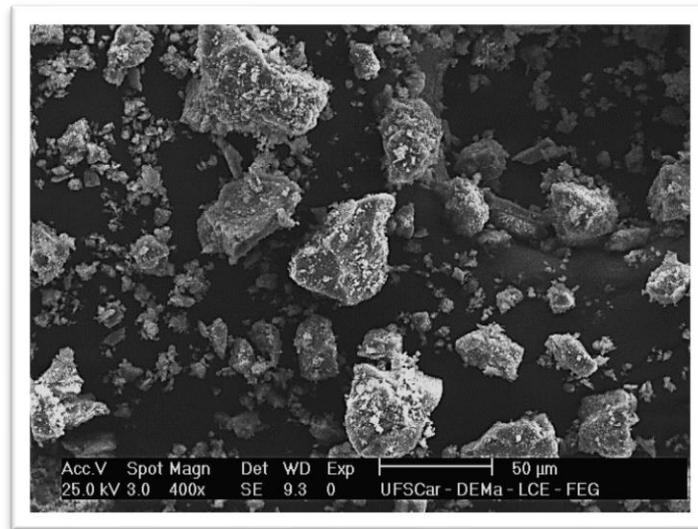
Figura 3. 5 - Distribuição cumulativa da granulometria do pó de cimento.



A densidade das partículas foi obtida por picnometria a Hélio, utilizando o equipamento Accupyc 1330 V3.03, da Micromeritics, cujo valor obtido foi de  $3,1 \text{ g/cm}^3$ .

A Figura 3.6 mostra a microscopia do material particulado, obtida no microscópio eletrônico de varredura (MEV), Carl-Zeiss, modelo DSM-940-A, com ampliação de 1500X.

Figura 3. 6 - Partículas de cimento com ampliação de 1500X.



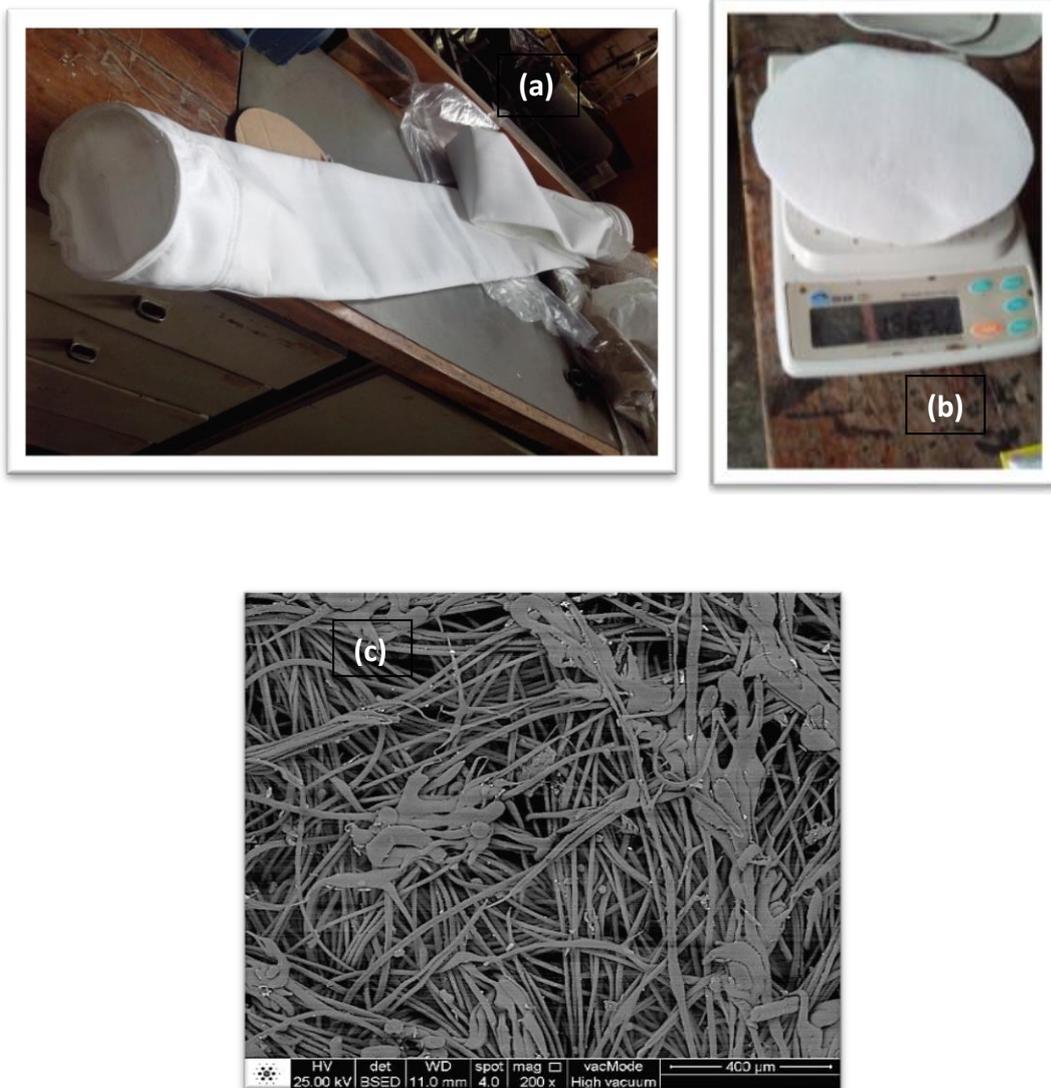
### 3.1.9. Meio Filtrante

O meio filtrante utilizado no trabalho foram mangas de fibra de vidro, de 7 m de comprimento e de 15,2 cm de diâmetro, com uma gramatura de  $750 \text{ g/m}^2$  apresentada na Figura 3.7 (a). 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.

Para a adaptação do meio filtrante no suporte do filtro, as mangas foram cortadas em moldes circulares de aproximadamente 0,2 m de diâmetro e área de filtração de  $0,0254 \text{ m}^2$ , pesando aproximadamente 20 g (vide Figura 3.7(b)), para serem inseridos na caixa de filtração apresentada na Figura 3.3.

O meio filtrante de fibra de vidro foi analisado antes da filtração através de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) (vide Figura 3.7(c)), obtida no Laboratório de Caracterização Estrutural da UFSCar.

Figura 3. 7 – (a) Meio filtrante na forma de mangas; (b) Meio filtrante na forma utilizada no trabalho; (c) Meio filtrante de fibra de vidro com ampliação de 100 X pelo MEV.

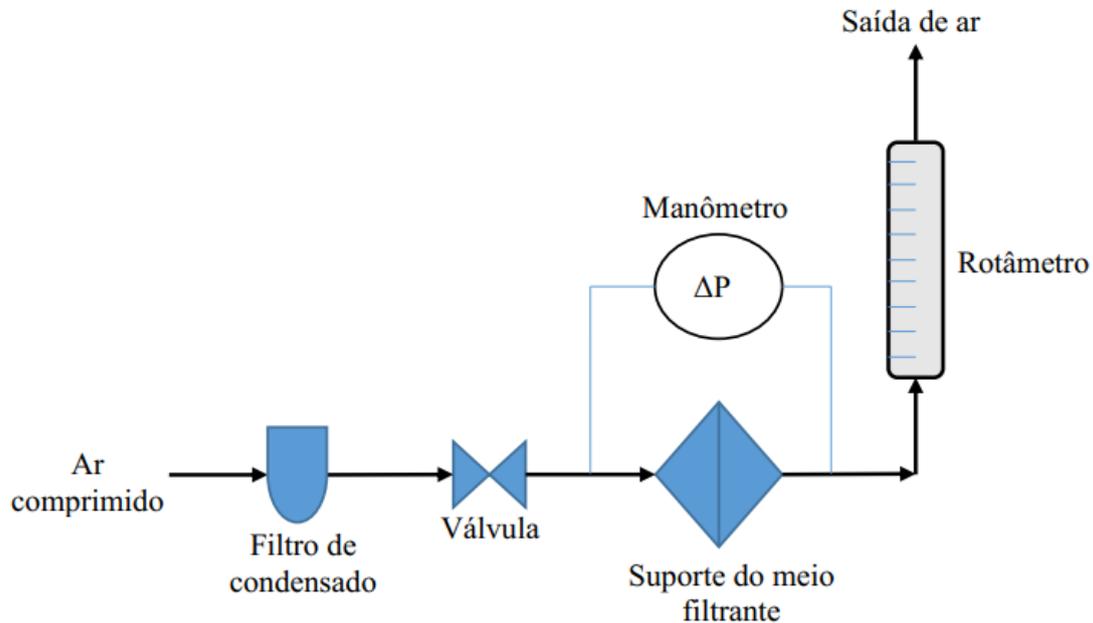


### Determinação da Permeabilidade

Utilizou-se a unidade experimental ilustrada na Figura 3.8 para o cálculo da permeabilidade do meio filtrante virgem. Variou-se a velocidade superficial de entrada do ar através da válvula e determinou-se a perda de carga resultante na amostra de meio filtrante de 40,15 cm<sup>2</sup> de área útil em função da vazão volumétrica medida pelo rotâmetro. Com estes dados

construiu-se as curvas de perda de carga em função da velocidade superficial, para o tecido de fibra de vidro, baseado na Equação (2.6).

Figura 3. 8 – Unidade experimental para determinar a permeabilidade do meio filtrante



Fonte: Adaptado de CIRQUEIRA, 2017.

O meio filtrante utilizado em todos os testes de filtrações, foi testado, com o auxílio do kit antiestática para balança analítica, tipo PRX U Smal da marca Haug, com intuito de verificar a carga eletrostática inicial do filtro virgem, o filtro foi pesado antes, e depois de ser passado pelo equipamento onde supostamente foi retirada as cargas eletrostáticas do filtro. Verificou-se que a massa do filtro diminui em 0,0002 g após o teste, assim avaliou-se desnecessário o uso deste equipamento nos filtros de mangas, visto que os valores de massa retida no filtro utilizados para o estudo foram de até 3 casas decimais, portanto este valor não influenciaria nos resultados.

### 3.2. Métodos

Serão descritos a seguir os procedimentos utilizados nos ensaios de filtração a partir da unidade experimental apresentada na Figura 3.1.

### 3.2.1. Simulação de um sistema de filtração híbrido em escala laboratorial

Para realizar os ensaios de filtração, primeiramente o material particulado era disperso no ar de modo a gerar uma corrente gasosa suja, que passava pelo precipitador eletrostático e posteriormente pelo filtro.

Antes do início dos ensaios, o prato do alimentador de pó foi calibrado para uma rotação de 0,5 rpm, porque após testes preliminares, considerou-se essa rotação como sendo a mais adequada. Essa rotação do prato garantia uma vazão mássica, mantida constante em todos os ensaios realizados.

Através dos testes preliminares também foram considerados como variáveis de trabalho a velocidade de filtração de 6 - 10 cm/s e a concentração do particulado 9 - 12 g/m<sup>3</sup>, utilizando o sulco mais fino do prato. Os ensaios foram realizados em triplicatas, e a cada ensaio experimental, a unidade de carregamento corona foi limpa com jatos de ar comprimido para evitar influência do pó remanescente nas análises posteriores.

Nesta etapa, o meio filtrante de fibra de vidro foi submetido a ensaios de filtração com concentrações de pó (9-12 g/m<sup>3</sup>) e velocidade superficial de ar (6 cm/s e 10 cm/s) constantes até que a queda de pressão atingisse o valor máximo de 1000 Pa. O equipamento de filtração utilizado está descrito na seção 3.1.1, e as condições experimentais estão descritas na Tabela 3.2. O meio filtrante foi pesado antes e após os ensaios de filtração, para obter a massa de material particulado retido no filtro.

Tabela 3. 2 - Condições experimentais dos ensaios de filtração

<b>Dado</b>	<b>Valor</b>
Velocidade de filtração	3,6 - 6 m/mim
Concentração do particulado	9 - 12 g/m <sup>3</sup>
Vazão mássica de pó alimentado	0,083 Kg/s
Temperatura de filtração	24-26 °C
Tensões utilizadas	-1,-2,-4,-10 e -12 kV
Diâmetro da manga	0,0254 m <sup>2</sup>
Umidade de filtração	20%
Queda de pressão máxima	100 mmH <sub>2</sub> O (979 Pa)

A umidade relativa do ar foi mantida em 20%, segundo Woodhead e Armour-chélu (2003) é um importante parâmetro na filtração de gases, podendo influenciar no carregamento das partículas, e por isso foi monitorada durante todos os experimentos. Para garantir essa umidade foram utilizados tubos de PVC recheados de sílica gel acoplados ao equipamento. Antes de cada ensaio de filtração, a temperatura e a umidade do ar ambiente e do interior da unidade experimental eram aferidas por um termo higrômetro digital (TFA).

Outra variável extremamente importante para a filtração de ar é a velocidade superficial de filtração, que foi de 0,1 m/s e mantida constante durante toda a filtração, por meio de um transdutor que controlava a rotação do soprador. Embora, o valor mais utilizado para a velocidade de filtração seja em torno de 0,016 m/s em filtros eletrostáticos híbridos, foram encontrados na literatura valores aproximados aos valores de velocidade que foram empregados neste trabalho, como de Mori et al. (1982) e Zhu et al.,(2012) que trabalharam com uma velocidade superficial de 0,17 m/s ou de Gutierrez-Ortiz et al., (2007) que trabalharam com velocidades superficial de 0,8 – 1,8 no precipitador eletrostático e 0,02 e 0,1 m/s no filtro de

tecido. Segundo Givehchi (2015), o tempo em que as partículas permanecem no escoando de ar, ao serem carregadas, também deve ser levado em consideração durante o carregamento das partículas.

Para cada ensaio de filtração, foram coletados dados de queda de pressão em função do tempo. A queda de pressão máxima admitida em cada ciclo foi estabelecida em 1000 Pa, por ser este valor usualmente aplicado na indústria (RODRIGUES, 2006). Porém para os testes com efeito corona atuantes (voltagens de -10 e -12 kV) foi estabelecida a queda de pressão máxima de 400 Pa.

A massa do filtro limpo foi obtida em uma balança Marte modelo AM500, de dois dígitos. Após cada filtração a massa retida era obtida, através do cálculo da massa de pó depositada.

Ligava-se simultaneamente o soprador e o alimentador de pó, para iniciar o processo da filtração. O ar era sugado através de um tubo tipo venturi e levado para o interior da caixa de filtração juntamente com o material particulado, passando através do carregador eletrostático, localizado entre a caixa de alimentação e a caixa de filtração. O carregador eletrostático, inicialmente, foi utilizado com o intuito de apenas carregar as partículas eletrostaticamente e não de coletá-las nas placas aterradas, posteriormente foi utilizado como um precipitador eletrostático. Após a passagem pelo carregador eletrostático, o gás com as partículas carregadas atravessa o meio filtrante, formando assim a torta de filtração.

### 3.2.2. Determinação da curva corrente-tensão

Para se obter o valor exato do início da corrente corona (rompimento dielétrico do gás), foi gerada a curva de corrente-tensão, para a velocidade de gás de 10 cm/s. A umidade relativa do ar foi mantida em aproximadamente 20%, a temperatura ambiente, medida durante todo o experimento, ficou em torno de um valor médio de 26°C e o valor médio da pressão ambiente foi de 0,92atm. Inicialmente, foram realizados ensaios sem a presença de partículas (0 g/m<sup>3</sup>) durante o escoamento do gás e, posteriormente, adicionou-se na corrente gasosa partículas de cimento, com uma concentração de 11,8 g/m<sup>3</sup>. Assim foi possível comparar a influência das partículas no comportamento elétrico do sistema. Os valores de corrente eram

registrados pela fonte de alta tensão, para cada voltagem aplicada nos eletrodos de descarga, a partir de -8kV, com aumento de 1kV até alcançar o rompimento dielétrico do gás, que para o escoamento de ar com partículas ocorreu em 13kV. Todos os testes foram realizados em triplicatas.

### 3.2.3. Determinação Experimental da Porosidade das Tortas de Filtração de Gases e diâmetro volumétrico das partículas: na alimentação, no precipitador eletrostático e na torta de filtração.

Após a realização dos ensaios de filtração, as tortas de pó foram armazenadas em gavetas fechadas com sílica em gel, para manter a umidade da torta estável. Algumas amostras foram selecionadas para obter o valor da porosidade pelo método direto. O método consistia na preparação de uma camada de torta, para posteriormente ser examinada em um microscópio eletrônico de varredura, o qual era gerado imagens a serem analisadas em um programa de análise de imagens e, assim, obter dados quantitativos referentes à sua estrutura (Aguilar, M.L. e Coury, J. R.; 1996).

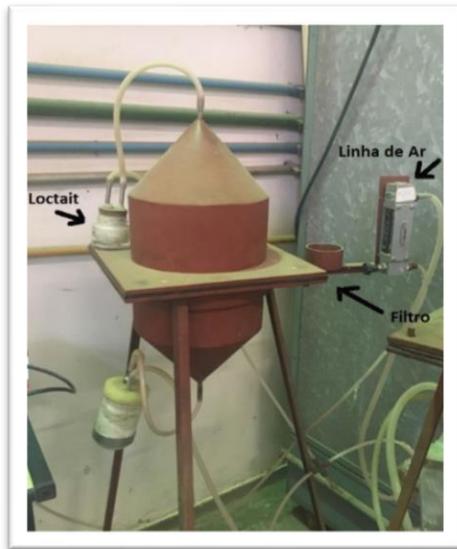
Inicialmente, a torta de pó formada passava por um procedimento de pré-endurecimento. O esquema do equipamento utilizado nesta etapa está ilustrado na Figura 3.9. O equipamento consistia de duas tampas de ferro galvanizado, semelhante à caixa de filtração. O sistema foi completamente vedado, através do revestimento das duas tampas com uma borracha macia. O meio filtrante juntamente com a torta, retirados cuidadosamente do local a onde foram armazenados, eram transportados e fixados na caixa de “pré-endurecimento (veja Figura 3.9).

Para medir a vazão do ar comprimido que arrastava o vapor do adesivo instantâneo (LOCTITTE-416) utilizou-se um rotâmetro. A vazão de ar foi mantida constante, durante todo o processo de pré-endurecimento, em 0,5 L/min.

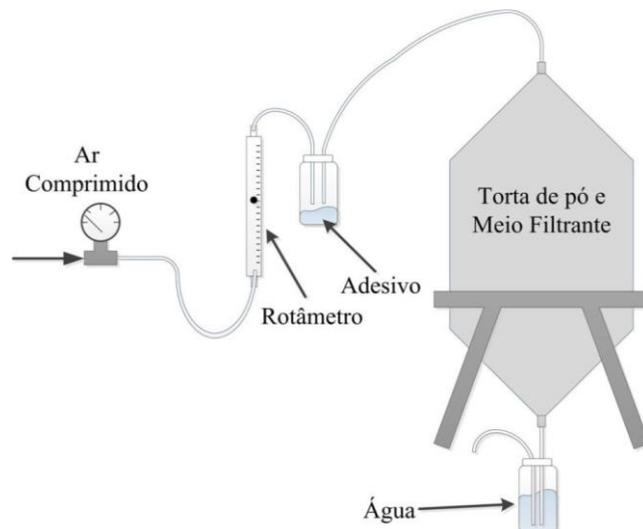
Essa etapa consistia em passar vapor do adesivo instantâneo, arrastado pelo fluxo de ar através do meio filtrante juntamente com a torta de filtração. A velocidade do gás de arraste foi mantida em aproximadamente 0,1 cm/s, bem abaixo da velocidade de filtração (10 cm/s), para evitar o rearranjo das partículas durante o ‘pré-endurecimento’. O tempo aproximado de duração desta etapa foi de 48 horas, em que foram aplicadas duas gotas de

adesivo a cada hora. Esse procedimento conferia uma boa estabilidade estrutural à camada de pó, mas não o suficiente para o tratamento necessário para a visualização no MEV.

Figura 3. 9– Foto do suporte do “pré-embutimento” da torta (a) e esquema do aparato de “pré-endurecimento” da torta (b).



(a)



(b)

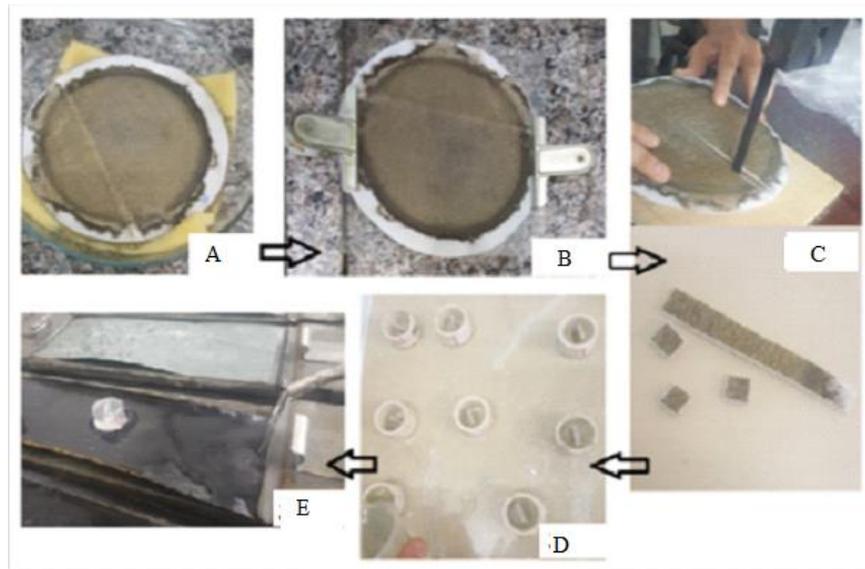
Fonte: Adaptado de CIRQUEIRA, 2013.

Após o “pré-endurecimento”, separou-se um recipiente de Piréx redondo e uma esponja de 0,5 mm de espessura, com a mesma área da amostra pré-endurecida (Fig.3.10a). Neste recipiente colocou-se uma resina Henkel PMS-10, de baixa viscosidade (7 a 10 cp), anaeróbica, de cor clara, não contém solvente, fornecida pela LOCTITE do Brasil, de forma que todo fundo do recipiente ficasse completamente preenchido com a mesma. Na resina, também foi adicionado 10 gotas de catalisador da Marca Arotec (líquido auto-polimerizante – P2). Depois de colocado o meio filtrante com a torta de pó no recipiente, adicionava-se, lentamente, mais resina com o catalisador até que toda a torta ficasse completamente encharcada.

A amostra encharcada pela resina foi colocada sobre uma placa de vidro (3.10b) e foi levada a uma estufa a 70°C para “curar” a resina, por aproximadamente 24 horas (CIRQUEIRA, 2017).

Após a secagem da amostra, estas foram seccionadas em quadrados com 1cm<sup>2</sup> pegando dois pontos semelhantes no filtro (Fig. 3.10c), estes foram colocados em cilindros de PVC (2,8 cm de diâmetro e 1,5 cm de altura), e preenchidas com uma resina líquida (DU Gel da Marca Du Latex e catalisador da mesma marca da resina) deixando secar por 48 horas (Fig. 3.10d), após este período o material passava por várias sessões de linchamento e polimento (Fig. 3.10e) até que estivessem completamente lisos e polidos. O polimento era feito até que todos os riscos deixados na amostra pela lixa fossem retirados. Esses riscos podiam ser observados em um microscópio óptico. A etapa de lixamento e de polimento é muito importante, pois é nessa etapa que é definido a qualidade das imagens que são geradas no microscópio eletrônico de varredura (MEV).

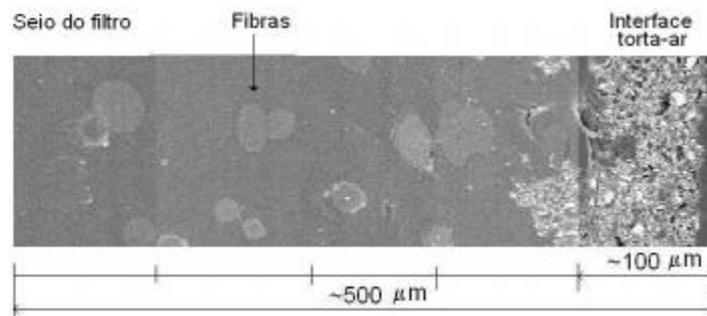
Figura 3. 10 (A-E) – As imagens a seguir descrevem o procedimento de endurecimento da torta.



Com as tortas devidamente embutidas e preparadas para obtenção de imagens pelo MEV (vide Fig. 3.10e), foram realizadas imagens de superfície e de perfis transversais da torta de filtração, foram tiradas cinco microfotografias sequencias do comprimento da torta de

filtração, da superfície torta-ar até aproximadamente 4 mm de profundidade, com aumentos de 400 e 1000 vezes. Assim foi possível observar a deposição das partículas entre as fibras do meio filtrante e na superfície do filtro. A Figura 3.11 apresenta uma ilustração deste processo, envolvendo as cinco primeiras fotos.

Figura 3. 11– Esquema de cinco fotos tiradas do interior do meio filtrante, em sequência, para determinação da profundidade de penetração, com aumento de 2000X.



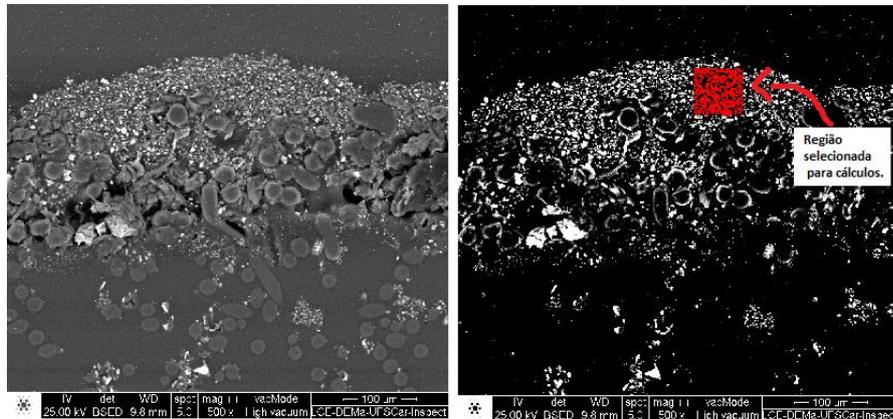
Fonte: Adaptado de RODRIGUES,2006.

#### 3.2.4. Software e Cálculos

Utilizou-se o software Image-Pro Plus 7 para calcular o diâmetro médio das partículas, área de espaços vazios na torta de filtração e porosidade experimental, estes dados foram obtidos através de imagens obtidas pelo MEV.

A Figura 3.12 ilustra a micrografia original e a binarização realizada pelo software. O modelo de cálculo do programa Image Pro Plus 7 é realizado a partir da área de objetos encontrado na imagem binarizada pelo software, não são contabilizados os espaços vazios encontrado na imagem. O cálculo do diâmetro médio é obtido através do comprimento médio das partículas encontradas na imagem.

Figura 3. 12– Comparação entre a micrografia da foto original (a) e a binarização pelo software (b).



(a)

(b)

Com o auxílio das equações encontradas na literatura (Ergun (Eq. 2.14), resistência específica da torta (Eq. 2.16) e queda de pressão (Eq. 2.6)) foi possível obter os resultados deste trabalho e apresentá-los em forma de gráficos e tabelas.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, foram analisados e discutidos os resultados dos testes experimentais. Inicialmente, foram feitos a caracterização elétrica, do meio filtrante, e da limpeza do equipamento antes da filtração.

Em seguida, foram apresentados os testes com o carregamento das partículas de cimento sem o efeito corona durante a filtração. Nestes testes foram utilizadas cargas menores de -1, -2 e -4 kV, as curvas de filtração foram analisadas e os resultados estão discutidos na seção 4.2.

Posteriormente foram realizados testes de filtração de gases com o efeito corona atuante na filtração das partículas de cimento, as cargas utilizadas nestes testes foram de -10 e -12 kV e os resultados obtidos foram analisados e discutidos na seção 4.3.

E finalmente, os resultados sobre a formação da torta de filtração com partículas de cimento durante a filtração de gases, foram discutidos e analisados em relação a alguns trabalhos da literatura, como de: Fenara et al. (2011), Feng et al. (2016), Tu et al. (2016); Marques (2017), Jaworek et al. (2019).

### 4.1 ANÁLISES PRELIMINARES

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos para a avaliação das condições operacionais do sistema experimental.

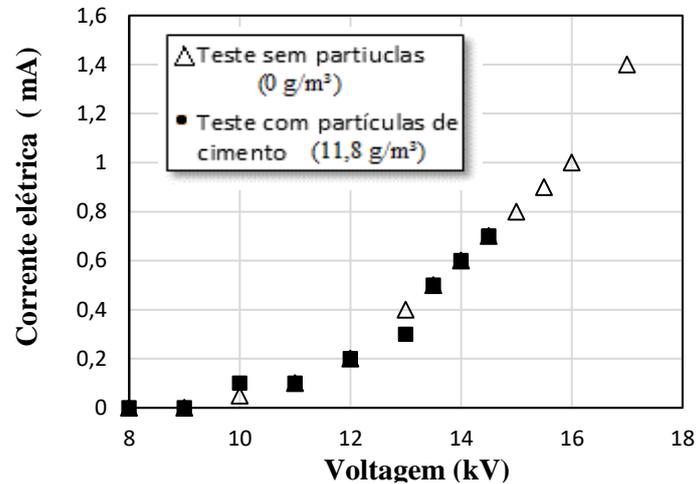
#### 4.1.1. Caracterização elétrica

A diferença de potencial necessária para suprir o campo elétrico no qual se inicia a descarga corona está representada na relação típica entre a corrente corona e a tensão, apresentados na Figura 4.1. Com o aumento da diferença de potencial aplicada, há uma grande elevação da corrente, que continua até que ocorra o rompimento elétrico do gás (faísca). Neste ponto o gás torna-se um condutor elétrico. A diferença de potencial é então denominada crítica e representa o limite máximo de operação do precipitador (FALAGUASTA, 2005).

Os parâmetros temperatura, umidade e velocidade do gás foram mantidos constantes, pois são fatores que influenciam nas condições de operação. A corrente também

pode ser modificada pela concentração de partículas. Os testes foram realizados em triplicatas, sem a presença de material particulado e com a presença dos mesmos, para averiguar a influência das partículas no efeito corona.

Figura 4. 1 – Teste de corrente-tensão para concentração de  $0 \text{ g/m}^3$  e  $11,8 \text{ g/m}^3$ .



Observa-se na Figura 4.1 que, à medida que a tensão aplicada ao escoamento de ar aumentava, ocorria a mudança na corrente elétrica. O ar limpo ( $0 \text{ g/m}^3$ ) passava pelo precipitador eletrostático em uma velocidade constante e a tensão do precipitador era aumentada de 1 em 1 kV (a corrente corona iniciou quando a tensão alcançou o valor de  $-10 \text{ kV}$  ( $-5,0 \text{ kV/cm}$ ), e o rompimento dielétrico do gás deu-se com  $-17,5 \text{ kV}$  ( $-8,75 \text{ kV/cm}$ ). No entanto, quando o ar carregado de partículas de cimento ( $11,8 \text{ g/m}^3$ ) escoava pelo precipitador, obteve-se o mesmo ponto de corrente corona, em  $-10 \text{ kV}$  ( $-5,0 \text{ kV/cm}$ ), porém o rompimento dielétrico do gás deu-se com  $-15 \text{ kV}$  ( $-7,5 \text{ kV/cm}$ ).

Segundo, White (1963), a corrente pode ser modificada pela concentração de partículas, altas concentrações na entrada dos precipitadores causam a diminuição da corrente e, dependendo das condições, podem até extingui-la. Este comportamento foi observado na Figura 4.1.

Observou-se que os efeitos da velocidade do gás e da concentração de partículas das curvas corrente-tensão foram proeminentes sob as maiores tensões (a partir de  $-10,0 \text{ kV}$ ), com estes dados ficou estabelecido que para o presente estudo foram utilizadas as cargas de  $-1$ ,  $-2$  e  $-4 \text{ kV}$  sem a influência do efeito corona, cargas de  $-10$  e  $-12 \text{ kV}$  em que o efeito corona

está presente na filtração.

Oliveira (2019), encontrou resultados semelhantes para seu estudo, os efeitos de velocidade do gás e da concentração de partícula sobre as curvas corrente-tensão também foram proeminentes sob as maiores voltagens (a partir de  $-5,5$  kV/cm) e o efeito para a voltagem utilizada em seu estudo ( $-4,0$  kV/cm) foi menos pronunciado, visto que ele não trabalhou com altas tensões.

O estudo com altas voltagens deve ser cauteloso, pois, voltagens acima da corrente corona pode gerar arcos elétricos, como mostra a Figura 4.2.

A Figura 4.2 apresenta o momento em que o precipitador eletrostático formou um arco elétrico, no fluxo de ar sem partículas, com uma tensão aplicada de  $-8,5$  kV/cm e uma corrente de  $1,4$  mA. Com este resultado visual, foi possível limitar os valores de tensões aplicadas no experimento, visando à segurança do operador.

Figura 4. 2– Filtro eletrostático no momento exato da formação de um arco elétrico.

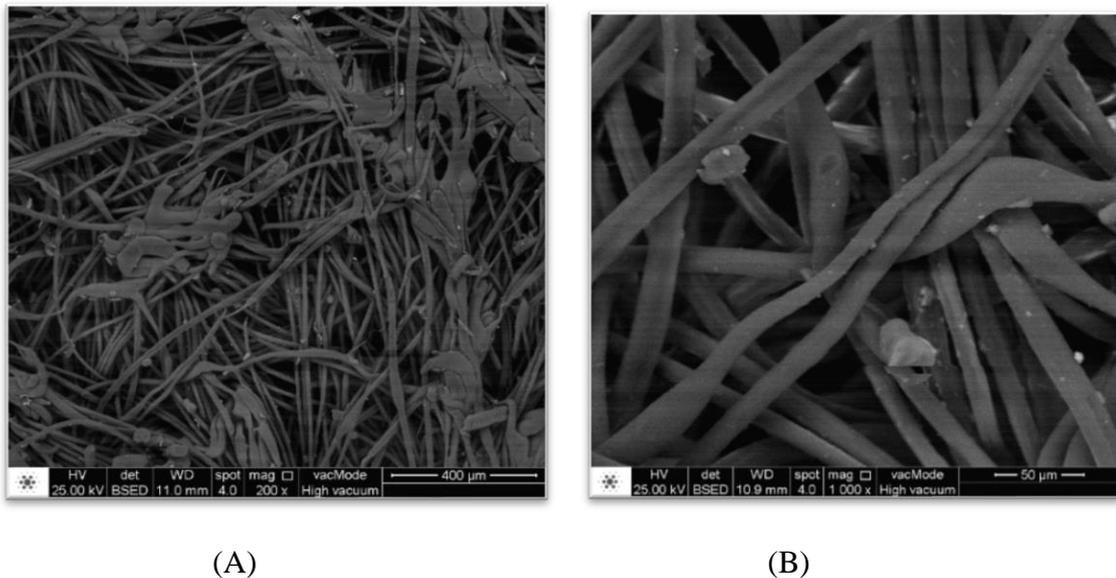


#### 4.1.2. Caracterização do Meio Filtrante

O tecido selecionado para o desenvolvimento da pesquisa foi o de fibra de vidro, devido a sua grande utilização nas indústrias cimenteiras. De posse da amostra do meio filtrante, foi realizada imagens da sua superfície pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), disponível no LCE/DEMa da UFSCar, ilustradas na Figura 4.3.

A Figura 4.3 (A-B) apresenta o tecido de fibra de vidro com uma ampliação de 200 X para 4.3(A) e 1000X 4.3(B). Foram tiradas microfotografias para analisar as fibras dos tecidos, pode se verificar que há um arranjo desordenado das fibras do meio filtrante caracterizando-as em feltros (não tecido), possui também, uma estrutura superficial mais fechada, resultante do processo de calandragem e/ou chamuscagem.

Figura 4. 3– Imagens obtidas pelo MEV do meio filtrante de fibra de vidro, (A) ampliação de 200X e (B) ampliação de 1000X.



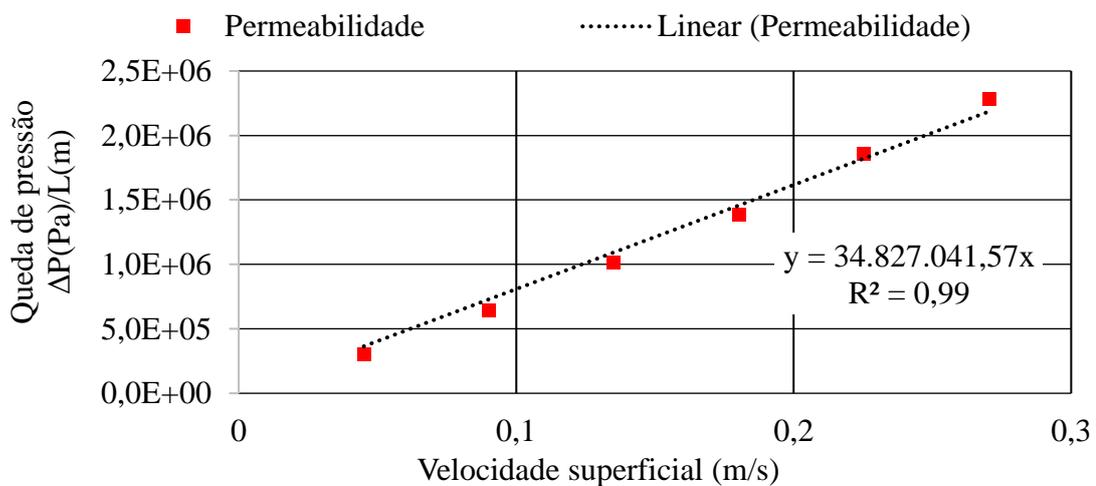
##### 4.1.2.1. Permeabilidade do Meio Filtrante

Foram realizados testes de permeabilidade do meio filtrante de fibra de vidro, conforme descrito na seção Materiais e Métodos. A Figura 4.4 apresenta a inclinação da parte

linear da curva da queda de pressão no filtro em função da velocidade superficial de filtração, utilizando a equação de Darcy, equação 2.6. A equação de Forchheimer, equação 2.7 não foi utilizada devido ao fato da curva experimental ser representada por uma reta, indicando a preponderância das forças viscosas com relação as inerciais.

O valor da permeabilidade do meio filtrante limpo foi de  $2.5 \times 10^{-12} \pm 2.7 \times 10^{-15}$  e o quadrado do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) foi 0,99.

Figura 4. 4- Permeabilidade do meio filtrante limpo.



#### 4.1.2.2. Testes de neutralização do meio filtrante

Sabe-se que o meio filtrante de fibra de vidro é um material constituído por numerosas fibras extremamente finas e que tem propriedades mecânicas aproximadamente comparáveis a outras fibras, tais como polímeros e fibras de carbono (LIMA, 2019). Estes filtros possuem cargas eletrostáticas naturais, provindas da sua própria fabricação.

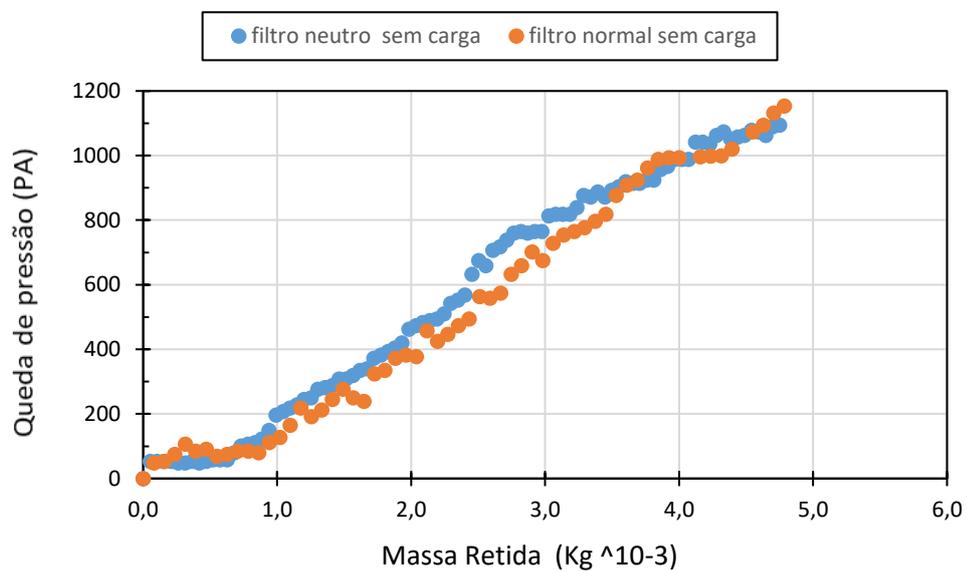
Para verificar o efeito desta carga na formação da torta de filtração de gases, para as partículas com cargas e sem cargas, utilizou-se o meio filtrante de fibra de vidro de duas maneiras diferentes, na sua forma normal (com cargas elétricas) e após os mesmos serem descarregados (sem cargas elétricas). Para descarregar os filtros, foi necessário colocá-los em um banho de álcool etílico por dois minutos e, em seguida, deixá-los secar por vinte e quatro horas. Os testes, utilizando o aparato experimental descrito na seção 3.1.1, com os meios

filtrantes carregados e descarregados foram realizados com a velocidade superficial de 0,05 m/s. As condições operacionais dos testes estão apresentadas na Tabela 3.2 (seção 3.2.1).

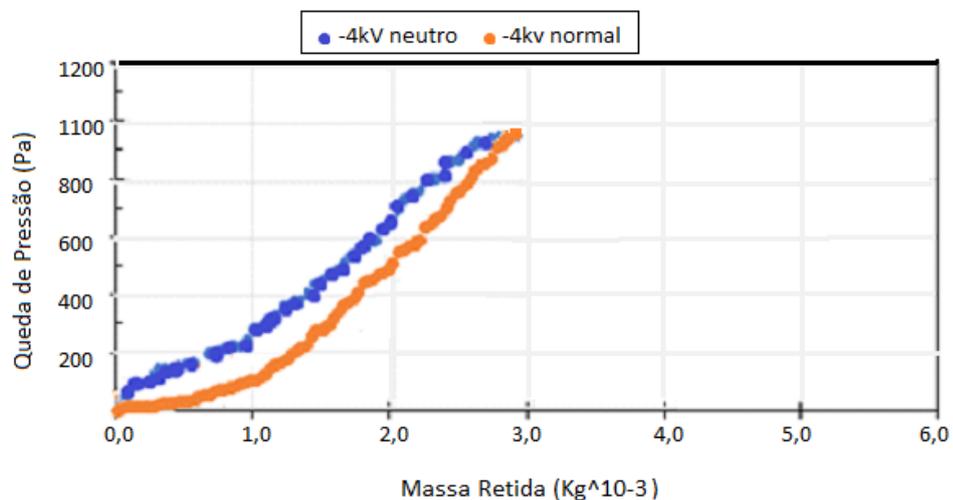
A Figura 4.5 (a) apresenta o desempenho dos meios filtrantes durante a filtração de ar sem carga eletrostática (0 kV) aplicada nas partículas e a Figura 4.5 (b) apresenta o desempenho dos meios filtrantes durante a filtração para a carga de -4 kV aplicados nas partículas de cimento.

Figura 4. 5– Curvas de filtração em meios filtrantes modificados (a) sem cargas eletrostáticas nas partículas (b) com -4 kV aplicados nas partículas para velocidade de 0,1m/s.

(a)



(b)



Verifica-se na Figura 4.5 (a) que o comportamento das curvas de filtração, com os meios filtrantes neutros e normais sem carga eletrostática (0 kV) foram semelhantes. As duas curvas tiveram um desempenho típico de feltros de fibra de vidro, ou seja, apresentaram filtração de profundidade, em que observa-se que no início da filtração a queda de pressão praticamente não se alterou com a deposição da massa no meio filtrante, apresentando um comportamento não linear, após uma certa quantidade de massa acumulada passou a apresentar uma tendência linear, em ambas as curvas. Portanto, a neutralização do meio filtrante não afetou o desempenho dos filtros, que apresentou praticamente o mesmo comportamento nas condições utilizadas.

Quando se observa as curvas apresentadas na Figura 4.5 (b), com as partículas carregadas, com carga eletrostática de -4kV, pode-se notar na curva de filtração um comportamento típico de filtração de profundidade, que foi mais evidente para o meio filtrante normal quando comparada com a curva de filtração com meio filtrante neutralizado. O comportamento das curvas de filtração alterou, sendo que para curva de filtração com o tecido neutralizado a filtração ocorreu na superfície do tecido, não havendo filtração de profundidade. O meio filtrante considerado neutro, sem carga, apresentou valores de queda de pressão superiores ao meio filtrante considerado normal, sem o tratamento para retirada das cargas eletrostáticas. No entanto, os valores de queda de pressão para os dois testes, atingiram a queda de pressão máxima pré estabelecida de 1000 Pa, porém os valores de massa retida obtidos foram distintos, para curva com filtro normal alcançou um valor de  $2,9 \cdot 10^{-3}$  Kg e para o filtro neutro  $2,7 \cdot 10^{-3}$  Kg.

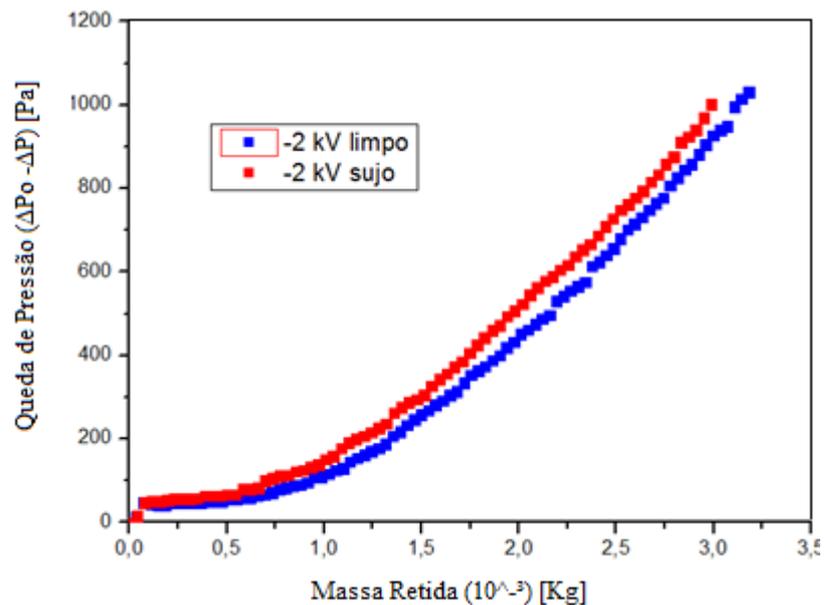
Ademais, optou-se por não fazer a neutralização dos meios filtrantes antes dos ensaios, visto que, os resultados obtidos nos testes demonstraram um aumento na queda de pressão durante a filtração, para a curva de filtração com o meio filtrante neutralizado e aplicação da carga eletrostática, o que não justifica o uso do processo de neutralização dos filtros para continuidade do trabalho, além de que, a utilização destes filtros nas indústria não necessita do processo de neutralização.

### 4.1.3. Caracterização do equipamento

Sabe-se que a operação de filtração de ar é complexa e qualquer parâmetro pode alterar os resultados, devido a isso optou-se por fazer uma análise minuciosa do equipamento antes de iniciar os testes principais. Para a averiguação do equipamento os ensaios foram realizados em triplicata.

A Figura 4.6, apresenta os resultados dos testes de filtração realizados com uma descarga eletrostática sobre as partículas de -2 kV. Inicialmente, realizou-se a filtração com o sistema de filtração completamente limpo (teste “limpo”) em sequência, realizou-se outro experimento de filtração, com as mesmas condições operacionais, com o equipamento contendo possíveis partículas remanescentes do experimento de filtração anterior, ou seja, sem efetuar a limpeza do equipamento, teste que foi denominado de ‘sujo’.

Figura 4. 6– Comparação do comportamento da filtração com o filtro totalmente limpo e com o filtro sem uma prévia limpeza.



Verifica-se na Figura 4.6, que o comportamento das curvas de filtração não foi semelhante. A curva de filtração com o equipamento limpo apresentou uma variação da queda de pressão aproximadamente 9% menor do que a filtração com o equipamento sujo. Houve uma

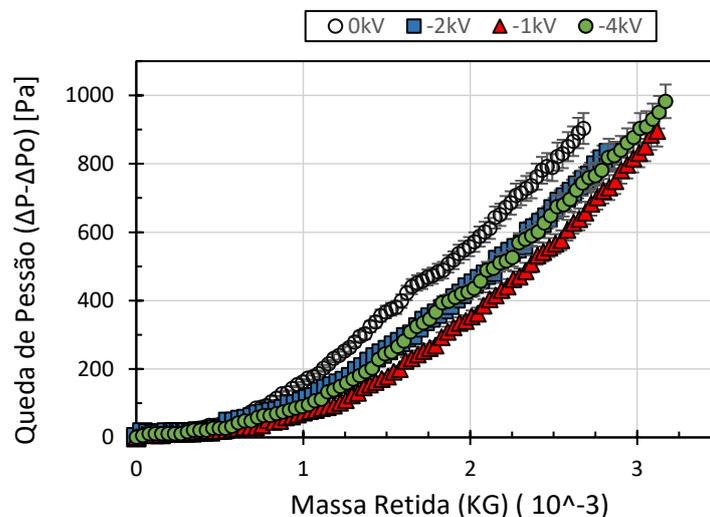
variação dos resultados quando o experimento foi realizado com o equipamento ‘limpo’ comparado com o resultado obtido na sequência, sem fazer a limpeza prévia do equipamento ‘sujo’. Portanto, tendo em vista esta variação optou-se por fazer todos os experimentos com o equipamento totalmente limpo antes de cada ensaio, este procedimento ajuda a diminuir as variáveis que podem vir a afetar os resultados dos testes.

#### 4.2. ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DE GASES COM CARREGAMENTO ELETROSTÁTICO DAS PARTÍCULAS DE CIMENTO SEM O EFEITO CORONA.

Foram realizados testes para analisar a queda de pressão no filtro de tecido em função da massa retida, com a aplicação de cargas eletrostáticas de -1kV, -2kV e -4kV. Estas tensões aplicadas estão abaixo do valor onde o efeito corona é atuante, que ocorre apenas a partir da tensão de -10 kV (-5 kV/cm). Nesta etapa o precipitador eletrostático foi utilizado somente como um carregador de partículas e não como um coletor.

A Figura 4.7 apresenta as curvas de filtração de gases em função da massa de pó depositada nos meios filtrantes, para as diferentes cargas eletrostáticas aplicadas. Todos os experimentos de filtração foram obtidos em triplicatas para as cargas eletrostáticas aplicadas de (0kV), -1 -2 e -4 kV. O desvio padrão obtido foi de 5% em relação à média dos três experimentos, como mostra a Figura 4.7.

Figura 4. 7 - Curvas de Filtração com diferentes cargas eletrostáticas aplicadas para partículas de cimento.



Observa-se na Figura 4.7 que todas as curvas apresentaram comportamento de filtração de profundidade. Sendo que para uma mesma quantidade de massa retida a curva de 0 kV foi a que apresentou maior queda de pressão, seguida da carga de -2 kV, -4 kV e com a menor queda de pressão a curva de filtração de -1 kV.

Sendo assim a curva de filtração que obteve o melhor comportamento foi a de -1 kV. Para esta carga aplicada, houve um aumento de 15% na massa retida para o mesmo valor de queda de pressão (800Pa), quando comparado com a curva de filtração sem carga eletrostática (0kV). Já para a carga de -2 kV o aumento foi de 10% na massa retida, considerando o mesmo valor de queda de pressão (800Pa). Verifica-se, portanto, que o comportamento das curvas de filtração foi modificando, tornando os valores de queda de pressão e massa retida das partículas no filtro dependentes da intensidade da carga aplicada.

Observa-se também na Figura 4.7 que quando a carga eletrostática aplicada foi de -4 kV (-2kV/cm) o comportamento da curva de filtração foi semelhante ao da carga de -2 kV (-1kV/cm), a alteração mais visível foi observada para o valor de massa retida, que para a carga de -2 kV a massa retida no filtro foi de  $2,83 \cdot 10^{-3}$  Kg enquanto que para a carga de -4 kV(-2kV/cm) foi de  $3,17 \cdot 10^{-3}$  Kg, para o mesmo valor de queda de pressão 820 Pa. Este comportamento similar entre as curvas de diferentes tensões foi também relatado no trabalho de Marques (2017), onde a curva de filtração para a carga de -1 kV (-0,5kV/cm) coincidiu com a de -3 kV (-1,5kV/cm), utilizando as mesmas condições experimentais utilizada neste estudo.

É interessante observar que os comportamentos das curvas de filtração apresentados na Figura 4.7 foram semelhantes para todas as condições investigadas durante a filtração de profundidade independente da carga eletrostática aplicada até que a massa retida alcançasse o valor aproximado de  $0,5 \cdot 10^{-3}$  Kg. Após esta etapa, iniciou-se a filtração de superfície, em que a interação passa a ser partícula-partícula, nesta fase as curvas de filtração começam a distanciar umas das outras. Pode-se verificar na Figura 4.7 que a inclinação das curvas alterou indicando que o ponto de colmatação das mesmas modificou-se, com a influência da carga eletrostática aplicada nas partículas, como pode ser verificado na Figura 4.8.

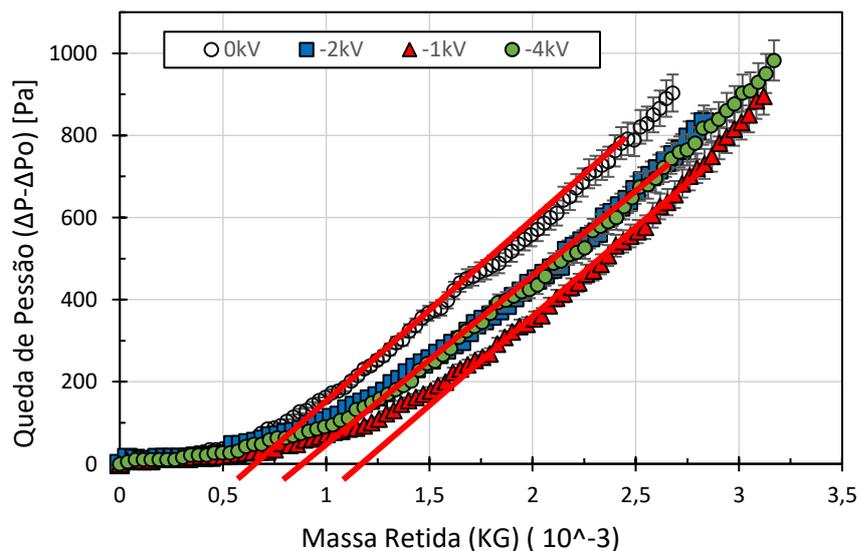
#### 4.2.1. Determinação do Ponto de Colmatação

Segundo Tognetti (2007) um ponto de colmatação maior torna a operação de filtração mais apropriada, pois proporciona menores quedas de pressão residuais.

A Figura 4.8 apresenta a mudança do ponto de colmatação à medida que a descarga eletrostática sobre as partículas foi aplicada, confirmando que, a presença de cargas eletrostáticas nas fibras e/ou nas partículas pode influenciar a formação da torta filtração, alterando a trajetória das partículas, bem como sua ligação partícula-fibra e partícula-partícula, ou seja, alterando a força de adesão e a força de coesão (Mateson et al. 1987). A alteração do ponto de colmatação resultou em uma maior deposição das partículas na superfície das fibras do meio filtrante (filtração de profundidade) e de transição.

G. Tu et. Al (2016) ao analisar as cargas eletrostática nas partículas durante a filtração em filtros de tecidos, também observou a alteração do ponto de colmatação da torta de filtração, que resultou no aumento da eficiência de limpeza das mangas.

Figura 4. 8 - Curvas de filtração com os pontos de colmatação.



Na Tabela 4.1 está apresentado os valores do ponto de colmatação obtidos a partir da Figura 4.8 juntamente com os valores de massa retida.

Observando os resultados obtidos através da Tabela 4.1 pode-se dizer que à medida que se aplicou a carga eletrostática nas partículas, o ponto de colmatação e a massa retida no meio filtrante aumentaram. Para as cargas de -2 e -4 kV o ponto de colmatação foi o mesmo e obteve-se um aumento de 24%, já para carga de -1 kV o aumento do ponto de colmatação foi de 71%, isto pode explicar o aumento na massa retida pois a medida que se altera o ponto de colmatação é possível reter mais partículas no meio filtrante prolongando o tempo da filtração de profundidade.

Tabela 4. 1 – Resultados do ponto de colmatação e massa retida de acordo com a carga eletrostática aplicada nas partículas.

<b>Tensão (kV)</b>	<b>Ponto de Colmatação (Kg 10<sup>-3</sup>)</b>	<b>Massa Retida (Kg 10<sup>3</sup>)</b>
<b>0</b>	0,70	2,71
<b>-1</b>	1,20	3,12
<b>-2</b>	0,87	2,83
<b>-4</b>	0,87	3,17

#### **4.2.2. Determinação da Resistência Específica da Torta (K<sub>2</sub>)**

A resistência específica da torta é um parâmetro muito importante na filtração de gases pois com ela é possível verificar a resistência do escoamento do ar que a torta de filtração oferece durante a filtração.

De acordo com Henry e Ariman (1986) a ação de um campo elétrico na filtração de ar em filtros de tecidos, tende a diminuir a densidade de empacotamento das partículas, proporcionando assim uma menor resistência ao escoamento do ar. Isto pode ser comprovado analisando a Tabela 4.2 onde estão apresentados os resultados da resistência específica da torta calculados a partir da Equação 2.13, para todas as curvas de filtração.

Tabela 4. 2 – Resultados da resistência específica da torta.

Tensão (kV)	Queda de pressão (Pa) (para o ponto de $2,5 \cdot 10^{-3}$ Kg)	$K_2$ ( $s^{-1}$ ) ( $10^{-3}$ )
0	789	168,7
-1	555	98,7
-2	679	104,1
-4	648	105,8

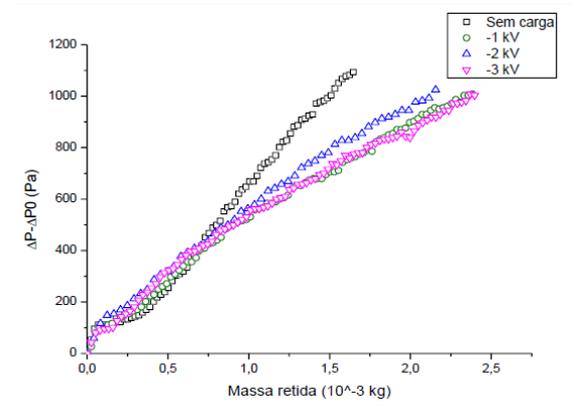
Observa-se na Tabela 4.2 que para a carga aplicada de -1 kV a resistência específica da torta apresentou o menor valor. Pode se dizer que o escoamento de ar ocasionou maior facilidade em ultrapassar a torta e o filtro. Para um mesmo ponto de massa retida ( $2,5 \cdot 10^{-3}$  Kg) foi visto que com a carga eletrostática aplicada nas partículas os valores de queda de pressão foram menores chegando a uma diminuição de 30% para carga de -1 kV. Comparando os valores de queda de pressão com a resistência específica da torta da Tabela 4.2, observa-se uma diminuição da queda de pressão na mesma proporção da resistência específica da torta que diminuiu para -1 kV de  $98,7 \cdot 10^{-3} s^{-1}$  seguido dos valores de -4 ( $105,8 \cdot 10^{-3} s^{-1}$ ) e -2 kV ( $104,1 \cdot 10^{-3} s^{-1}$ ).

Na Figura 4.9 apresenta uma comparação entre os trabalhos de Marques (2017) (a) e este trabalho (b) para os gráficos de queda de pressão por tempo, e Marques (2017) (c) e este trabalho (d) para os gráficos de massa retida por tempo. Os experimentos realizados por Marques (2017) foram realizados no mesmo aparato experimental utilizado neste estudo. Analisando a Figura 4.9 (a) verifica-se que para os ensaios em que as partículas foram carregadas eletricamente houve uma redução na inclinação da curva na faixa linear, região de formação da torta de filtração. Esse comportamento indica que o carregamento das partículas foi benéfico na redução da queda de pressão durante a filtração.

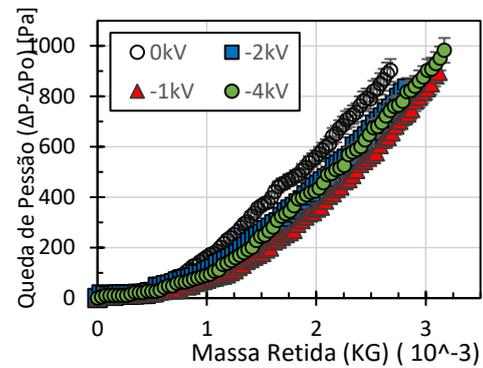
A Figura 4.9 (c) apresenta a tendência de retenção de material particulado com relação ao tempo para os mesmos experimentos, enquanto a Tabela 4.3 apresenta os valores mássicos retidos em cada ensaio. Como pode-se observar, as linhas de tendência foram semelhantes para as

condições de -1 kV e -3 kV, bem como apresentaram valores próximos de massa retida isto foi observado para Figura 4.9 (d) para carga aplicada de -2 e -4 kV.

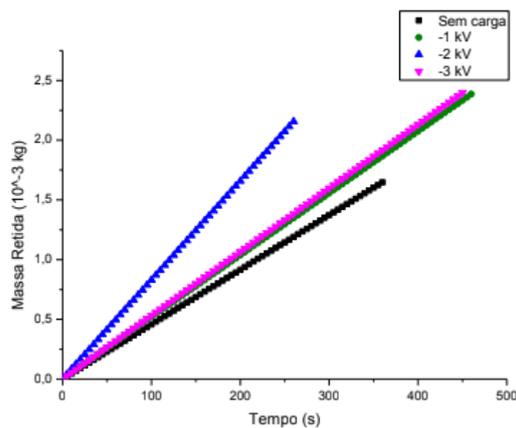
Figura 4. 9 – Gráficos de queda de pressão em função da massa retida, comparando o trabalho de Marques (2017) (a-c) com o trabalho realizado (b-d).



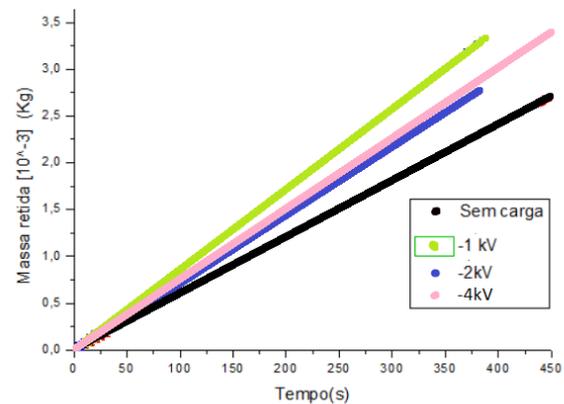
(a)



(b)



(c)



(d)

Na Figura 4.9 (c) para carga aplicada de -2 kV conseguiu-se coletar a maior quantidade de massa em menos tempo, porém compactou mais a torta, diminuindo o tempo total de filtração, este comportamento foi visto na Figura 4.9 (d) para carga aplicada de -1kV porem a diminuição no tempo de filtração não foi tão distinta das outras.

Comparando as três condições de carregamento de Marques (2017) entre si (-1, -2 e -3 kV), pode-se perceber que o comportamento das curvas se sobrepõe no início da filtração (entre 0 e 500 Pa). No entanto, a curva correspondente à carga de -2 kV se distanciou das demais

na faixa de 500 a 1000 Pa, apresentando um perfil mais inclinado e, portanto, maior perda de carga. Ou seja, houve um comportamento semelhante nas fases iniciais da filtração (interação partícula-meio filtrante, fase de transição e início da fase de interação partícula-partícula), mas à medida que a torta de filtração se torna mais espessa, há uma maior perda de carga para a condição de -2 kV. Já os perfis referentes as condições de -1 kV e -3 kV se sobrepuseram totalmente ao longo da filtração.

Observa-se também que para as curvas de filtração sem carga eletrostática aplicada (0kV), obteve a maior queda de pressão e menor massa retida como apresentado na Tabela 4.3 a comparação dos resultados dos trabalhos. Para as curvas de filtração com a carga de -1kV aplicado, este trabalho obteve um valor de 31% a mais na massa retida e uma resistência específica da torta de 3,2% menor quando comparado ao trabalho de Marques (2017). Já para as cargas de -2kV a massa retida neste estudo foi de 42% maior que a resistência específica da torta obtida por Marques (2017), que foi de 6,3% menor.

Tabela 4. 3 – Comparação dos resultados experimentais de Marques (2017) e os obtidos neste estudo, para os valores de massa retida, ponto de colmatação e resistência específica da torta com velocidade superficial de 0,1 m/s.

Tensão (kV)	MARQUES (2017)			RESULTADOS		
	Massa Retida (Kg 10 <sup>-3</sup> )	Ponto de Colmatação (Kg 10 <sup>-3</sup> )	Resistencia Especifica (s-1) (10 <sup>-3</sup> )	Massa Retida (Kg 10 <sup>-3</sup> )	Ponto de Colmatação (Kg 10 <sup>-3</sup> )	Resistencia Especifica (s-1) (10 <sup>-3</sup> )
0 kV	1,67	0,20	183	2,71	0,70	168,7
-1 kV	2,38	0,12	102	3,12	1,20	98,7
-2 kV	2,16	0,10	111	2,83	0,87	104,0
-3 kV	2,39	0,10	101	-----	-----	-----
-4 kV	-----	----	-----	3,17	0,87	105,8

Fonte: Adaptado de MARQUES (2017) e Acervo pessoal.

Comparando o ponto de colmatação entre os dois trabalhos pode-se notar que para o trabalho de Marques (2017) o ponto de colmatação foi menor por volta de  $0,10 \cdot 10^{-3}$  Kg para as cargas de -1, -2 e -3 kV, este resultado pode estar relacionado com as propriedades da partícula utilizada e a interferência da carga eletrostática aplicada, visto que, a carga de 0 kV obteve o maior ponto de colmatação em aproximadamente  $0,20 \cdot 10^{-3}$  Kg, entretanto, para este estudo foi obtido resultados inversos onde o ponto de colmatação para a curva de referência 0 kV foi o menor com  $0,7 \cdot 10^{-3}$  Kg e o maior valor de colmatação encontrado foi para carga de -1 kV.

Apesar da diferença entre o material particulado utilizado, os dois trabalhos conseguiram apresentar resultados similares que comprovam a influência positiva das cargas eletrostáticas na filtração de particulados, visto que as curvas de filtração com cargas eletrostáticas aplicadas obtiveram uma alteração na formação da torta de filtração. Pode ser observado na Tabela 4.3 que para as duas curvas com maior voltagem aplicada de -3 e -4 kV conseguiu-se obter uma maior massa retida, e para carga de -3 kV também se obteve a menor resistência específica da torta. As curvas de filtração apresentadas na Figura 4.9 (a) apresentaram um comportamento de filtração de superfície, isto pode ser visto ao observar a inclinação das curvas de filtração, por serem mais lineares.

Já para as curvas apresentadas na Figura 4.9 (b) seu comportamento demonstrou uma filtração de profundidade em todos os casos. Já o estudo realizado por Mello (2007) demonstra que o efeito eletroforético na fase inicial da filtração é mais pronunciado para partículas com diâmetro médio inferior a  $3 \mu\text{m}$ , apresentando uma maior penetração nas fibras do tecido. Para partículas com tamanho maiores, há uma redução da permeabilidade do meio filtrante, o que justifica o resultado encontrado. Desta forma pode-se dizer que o ponto de colmatação depende da carga e das propriedades químicas e físicas das partículas.

Outros trabalhos com estudos semelhantes, como o realizado por Fenara et al. (2011), não conseguiram descrever exatamente como a carga afeta o percurso das partículas ou sua deposição na torta de filtração. Mas o comportamento encontrado no trabalho de Marques (2017), bem como no trabalho de Oliveira et al. (2015) parece indicar que não há uma relação direta entre carga e a queda de pressão. Ou seja, o carregamento das partículas é responsável pela redução na queda de pressão, mas essa relação não é exatamente proporcional. Pode-se

considerar ainda o estudo de um ponto ou faixa ótima, a depender dos parâmetros de filtração e as propriedades químicas e físicas do material particulado.

#### **4.2.3. Determinação da Porosidade Teórica e Experimental**

A porosidade da torta de filtração foi determinada por dois métodos distintos. O primeiro é o método indireto, no qual assumiu-se que a queda de pressão em um leito poroso, devido ao escoamento de um fluido pode ser estimada pela Equação de Ergun. O segundo método foi descrito no capítulo 3, seção 3.3.3. (Método direto).

Utilizando os dados da Figura 4.7 de queda de pressão em função da massa retida e a Equação de Ergun, determinou-se a porosidade média das curvas de filtração para o método indireto. Já a porosidade pelo método direto foi obtida através das imagens da seção transversal da torta de filtração obtidas através do MEV e analisadas pelo software Image Pro Plus 7, onde as imagens foram binarizadas em preto e branco para melhor visualização das partículas (vide Figura 3.10), após todo o processo de endurecimento da torta, descrito na seção Materiais e Métodos no item 3.3.3.

Com as Figuras 4.10 (a); (b); (c); (d) foi possível calcular a porosidade experimental e os diâmetros de superfície medianos das partículas após a filtração (vide Tabela 4.4).

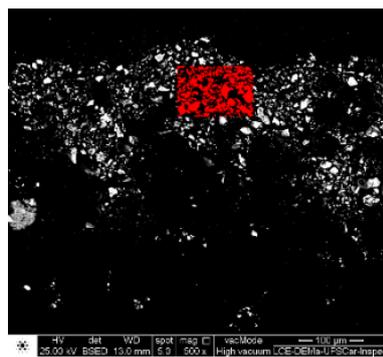
Ao analisar as imagens apresentadas na Figura 4.10 (a-d) a maior porosidade experimental encontrada foi de 0,42 para a carga de -1 kV (Fig. 4.10 (b)), este resultado foi similar ao valor de porosidade obtido pela equação de Ergun. No entanto o valor experimental foi menor que aproximadamente 7% do valor da porosidade, para a carga de -1 kV comparado com a curva de 0 kV. Para carga de -2 kV obteve-se um valor de porosidade experimental de 0,37 e porosidade de Ergun de 0,42 o mesmo valor encontrado para carga de 0 kV. Foi observado um comportamento oposto para carga de -4 kV, que obteve o menor valor de porosidade de Ergun de 0,40 e a porosidade experimental de 0,36, todos os valores foram relacionados a curva de referência de 0 kV.

Verifica-se na Tabela 4.4 que os valores de porosidades se apresentaram muito próximos com uma diferença entre os métodos de 7%, este mesmo resultado foi obtido por

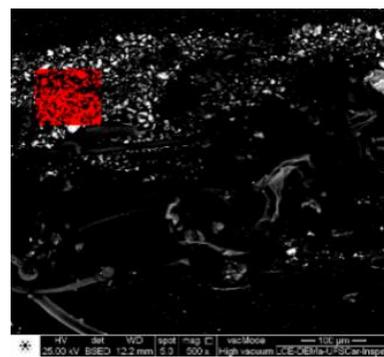
Aguiar e Coury em 1996. Como a diferença era inferior a 10%, a correlação de Ergun foi utilizada para determinar a porosidade média da torta de filtração.

Observa-se ainda na Tabela 4.4 que para a aplicação da carga de -1kV o valor da porosidade experimental foi maior para a menor resistência específica da torta. Para as cargas de -2 kV e -3 kV os valores das porosidades foram menores para os valores maiores de resistência específica da torta. Desta forma, a torta foi menos compactada quando uma carga de -1kV foi aplicada o que justifica o comportamento da curva de filtração ser mais lenta, que as demais curvas.

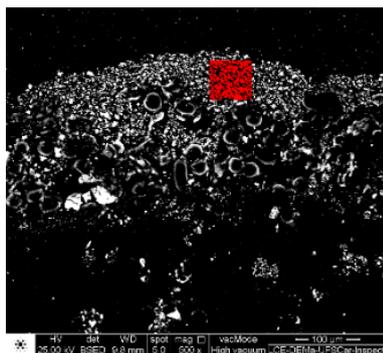
Figura 4. 10- Imagens obtidas pelo MEV, usadas para cálculos (após filtração) no software Image-Pro Plus 7 com ampliação de 500X.



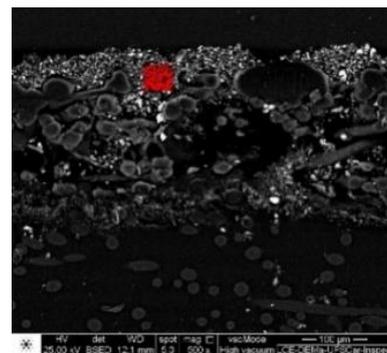
(a) 0 kV



(b) -1 kV



(c) -2 kV



(d) -4 kV

De acordo com estes resultados, também foram investigados o comportamento das partículas na formação da torta. A partir disto, calculou-se a porosidade da torta de filtração, a área de espaços vazios (AEV) em cada torta de filtração em relação à descarga eletrostática

aplicada e os diâmetros superficiais das partículas (DEP) antes e depois da filtração, calculados pelo Image-Pro Plus 7. Todos os resultados estão apresentados na Tabela 4.5.

Os valores dos diâmetros experimentais após a filtração estão apresentados na Tabela 4.5. Observa-se que os valores dos diâmetros obtidos para cada condição experimental foram diferentes. O menor diâmetro mediano obtido foi de 5,68  $\mu\text{m}$  para a carga aplicada de -1 kV e o maior diâmetro mediano foi de 9,28  $\mu\text{m}$  para a carga de -4 kV. Estes valores estão relacionados aos valores de porosidade visto que para a maior porosidade (-1 kV) conseguiu-se o menor diâmetro e para menor porosidade (-4 kV) o maior diâmetro no final da filtração (torta de filtração).

Tabela 4. 4- Resultados de todos os parâmetros estudados na filtração de gases

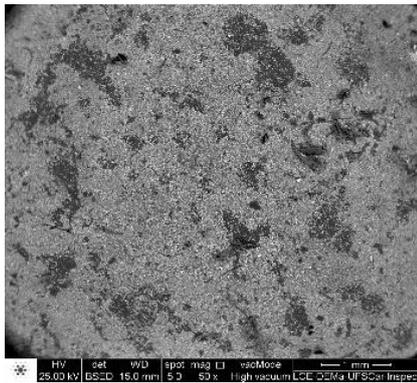
Tensão (kV)	Massa Retida ( $10^{-3}$ ) (Kg)	Diâmetro Dp ( $\mu\text{m}$ ) filtração)	Ergun	Porosidade Experimental	Área de Espaços Vazios ( $\text{mm}^2$ )
0	2,71	7,35	0,42	0,41	7,27
-1	3,12	5,68	0,45	0,42	13,4
-2	2,83	8,41	0,42	0,37	11. 6
-4	3,17	9,27	0,40	0,36	11,9

Ao analisar os valores de porosidades verifica-se que os melhores resultados encontrados foram para carga de -1 kV, onde foi possível obter a maior quantidade de massa coletada do material particulado e sendo o valor da porosidade da torta maior, conseqüentemente menor valor de resistência específica da torta. G. Tu et al., (2016) e Marques (2017) reportaram resultados similares, onde a média da porosidade da torta aumentou quando as partículas estavam carregadas.

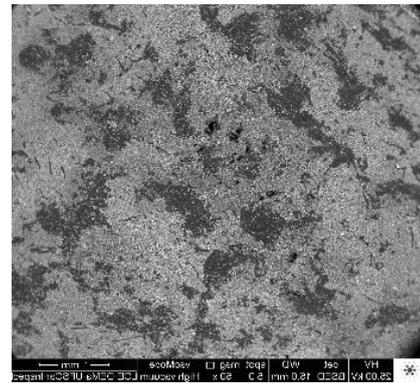
Para verificar a alteração nas tortas de filtração vistas a partir da Figura 4.10, foram tiradas microfotografias da superfície das tortas após o embutimento das mesmas, no microscópio eletrônico de varredura (MEV) em seguida foram realizadas as análises deste programa software Image-Pro Plus 7, para obter os valores da área de espaços vazios na torta de filtração.

A deposição superficial das partículas no filtro está apresentada nas Figuras 4.11 (a); (b); (c); (d). Onde os espaços vazios podem ser visualizados nas imagens obtidas pelo MEV, como pontos escuros de acordo com cada tensão aplicada nas partículas. As imagens foram geradas para verificar melhor o comportamento da deposição das partículas no tecido (torta de filtração). Analisando as imagens, observa-se uma diferença entre as curvas de filtração com a carga eletrostática aplicada nas partículas, chegando a uma variação de 13% maior de área de espaços vazios, quando uma carga de -1 kV foi aplicada, como pode ser visto na Figura 4.11 (b), em que o valor encontrado para a área de espaços vazios foi de 13,4 mm<sup>2</sup>, o que confirma que para estas condições a carga de -1kV, obteve a torta de filtração mais porosa, onde mais partículas foram depositadas no meio filtrante com valor equivalente a 31% a mais de massa retida quando comparado a carga de 0 kV, com uma redução na queda de pressão. Foi observado também o maior ponto de colmatção, onde se iniciou a filtração de superfície com 0,98. 10<sup>-3</sup>kg,

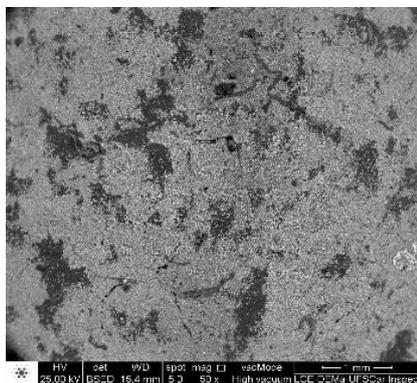
Figura 4. 11- Imagens da superfície superior da torta obtidas pelo MEV com ampliação de 200X.



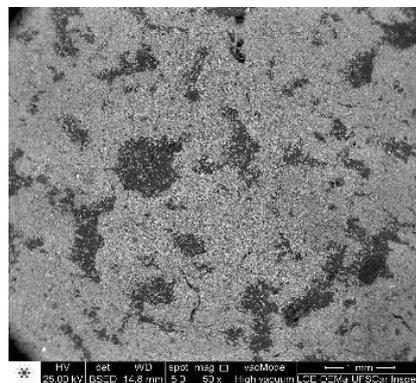
(a) Sem Cargas



(b) -1 kV



(c) -2 kV



(d) -4 kV

Nestas condições, houve uma maior abertura da passagem de ar devido a mudanças na estrutura do tecido, tornando-o mais permeável e facilitando a passagem do ar. Como observado por Silva et al. (1999), que atribuíram esse comportamento ao aumento da porosidade entre a interface do filtro-torta e a interface torta-ar, diminuindo a resistência específica da torta.

Este comportamento, em alguns pontos, foi semelhante ao trabalho de Tu et al. (2016) et al. em que segundo outros autores, para filtros de membrana e fibras, a porosidade média da torta aumentou, com a carga eletrostática aplicada nas partículas, o que foi atribuído à força de repulsão Coulomb entre o carregamento das partículas no ar e as partículas coletadas, que carregam as cargas do mesmo sinal. Essas partículas foram desaceleradas pela força de repulsão de Coulomb quando se aproximam da superfície da torta. As partículas se depositaram a uma velocidade mais baixa e tiveram um número de adesão menor (W. Liu et al. 2015; M.M. Yang et al. 2013).

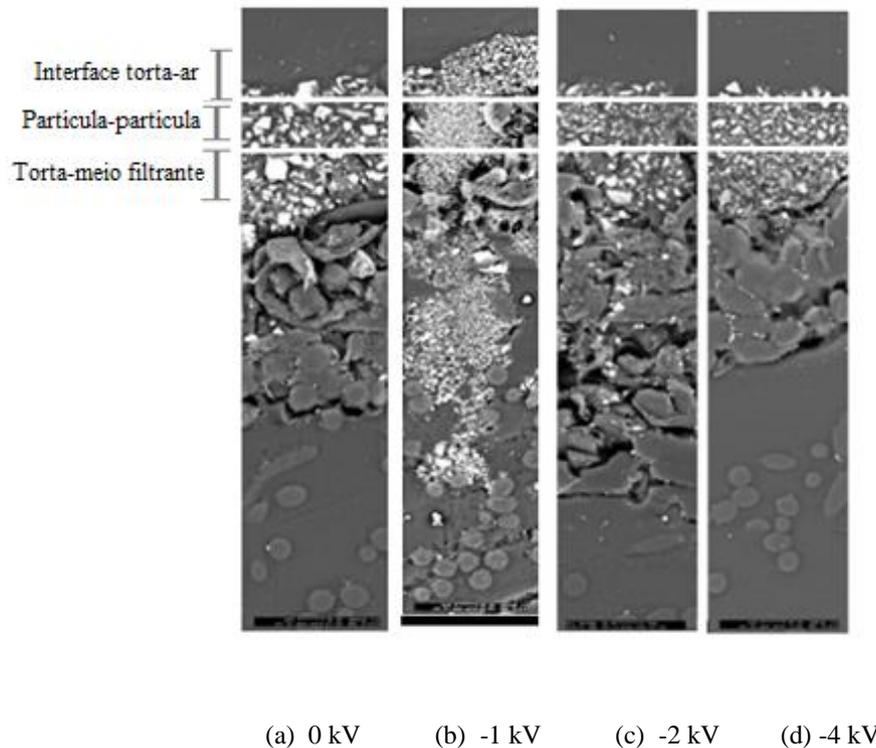
Também é válido ressaltar que o método de geração de carga empregado exerce influência direta na intensidade de carga adquirida pela partícula, ou seja, um mesmo aerossol pode apresentar comportamento diferente em relação ao seu carregamento em função do método de geração (JOHNSTON et al. 1987). Isto pode ser visto para o cimento, na curva de -1 kV, as partículas parecem ter obtido um maior grau de carregamento.

Adicionalmente, foram analisadas as Figuras 4.12 (a); (b); (c); (d) que demonstraram as interfaces torta-ar; partícula-partícula; torta-meio filtrante para todas as cargas eletrostáticas aplicadas nas partículas. Observou-se a diferença entre cada carga aplicada, onde obteve-se um comportamento diferente para cada curva. Foi possível observar a penetração das partículas através destas imagens.

Na Figura 4.12 (b) pode-se notar a maior quantidade de partículas que penetraram no tecido passando pelas etapas de filtração. Este resultado confirma os dados de colmatação obtidos através da Figura 4.8, Observa-se nesta figura que para a carga aplicada de -1 kV obteve-se a maior penetração de partículas no meio filtrante, e o menor diâmetro médio das partículas, o que confirma os dados obtidos através da Figura 4.11, onde o maior ponto de colmatação encontrado foi de  $1,2 \cdot 10^{-3}$  Kg.

Comportamento oposto foi observado para a carga aplicada de -4 kV, onde foi obtido o maior diâmetro médio das partículas no final da filtração de 9,27  $\mu\text{m}$ , com a menor penetração de acordo com a imagem 4.12(d), menores valores de porosidade.

Figura 4. 12- Imagens da filtração de profundidade obtidas através do MEV com ampliações de 1000X.



O comportamento observado para carga de -4kV (Fig. 4.12(d)) já foi encontrado nos trabalhos de Coury (1983) e Fenara (2011) os pesquisadores obtiveram uma diminuição na penetração das partículas, quando se aplicou uma carga eletrostática nas mesmas durante a filtração. Fenara alcançou uma diminuição na penetração de 2,5% aplicando uma carga de -3kV.

Foi observado por muitos autores, um aumento na eficiência de coleta dos filtros eletrostáticos híbridos com um pré-carregador, quando comparados aos filtros fibrosos convencionais, isto pode ser causado pela precipitação de partículas no pré-carregador e na tubulação que conecta os dois estágios (DONOVAN, (1982).

De acordo com os resultados apresentados, foi possível provar a teoria da otimização do processo de filtração usando o sistema de filtração eletrostática híbrido (HEFS), com o carregador eletrostático apenas para eletrizar as partículas, foi visto que, para as curvas de -1kV e -2 kV, a descarga eletrostática nas partículas de cimento modificou a formação da torta de filtração obtendo uma otimização nos resultados.

#### 4.3. ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DE GASES COM PARTÍCULAS DE CIMENTO PARA CARREGAMENTO ELETROSTÁTICO DAS PARTÍCULAS COM O EFEITO CORONA.

Visando verificar o comportamento das curvas de filtração, com o carregamento das partículas próximo ao ponto de corrente corona, de -10 e -12 kV (a partir de -10 kV), foram realizados novos experimentos de filtração, para caracterização das tortas de filtração, que serão apresentados a seguir. Para a comparação com as curvas de filtração antes e após o efeito corona foi utilizado a voltagem de -4 kV, o valor de -1 kV não foi utilizado devido a sua maior penetração no filtro de tecido apresentado anteriormente, portanto optou-se pela voltagem de -4 kV que está abaixo do valor do efeito corona (-10kV), e as voltagens de -10 e -12 kV que estão acima do ponto de efeito corona. Não se excedeu estes valores pois o equipamento utilizado como fonte de tensão não estava apropriado para altas tensão sem atingir o rompimento dielétrico do gás (faíscas), devido as dimensões do precipitador eletrostático utilizado.

##### 4.3.1. Análise do Precipitador Eletrostático

O precipitador eletrostático utilizado neste trabalho está descrito no capítulo 3 de Materiais e Métodos na seção 3.1.3. O equipamento foi utilizado nos testes de filtração como um precipitador de partículas, coletando as partículas de cimento.

A seguir está apresentada a Tabela 4.5, seus dados foram adquiridos a partir da dos testes experimentais realizados no Laboratório de Controle Ambiental do DEQ-UFSCar, com intuito de compreender melhor o comportamento das partículas de cimento em todo o processo de filtração. Foram obtidos os valores do tempo total de filtração, da massa retida no precipitador eletrostático e no filtro de tecido.

Tabela 4. 5- Resultados obtidos através da Figura 4.14.

<b>Tensão (kV)</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Alimentação de pó (10<sup>-3</sup> Kg)</b>	<b>Massa Retida no Precipitador (10<sup>-3</sup> Kg)</b>	<b>TUBULAÇÕES (10<sup>-3</sup> Kg)</b>	<b>Massa Retida no Filtro (g)</b>
<b>0</b>	450	5,83	2,01	1,3	2,52
<b>-4</b>	410	8,92	4,54	1,24	3,17
<b>-10</b>	510	55,74	47,55	5,88	2,31
<b>-12</b>	1485	69,16	62,00	6,08	1,08

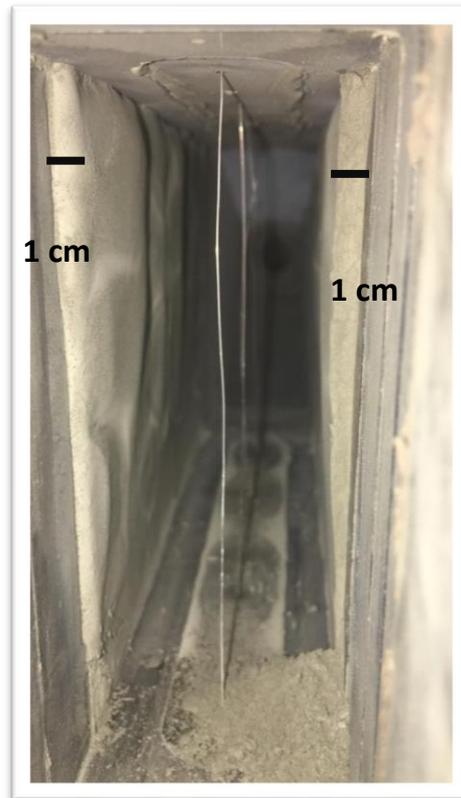
A partir da Tabela 4.5 pode se verificar a quantidade de massa que fica retida no precipitador eletrostático, de acordo com a carga aplicada. Verifica-se que à medida que a carga aumentou uma quantidade maior de partículas foi coletada no precipitador eletrostático. A eficiência de coleta do precipitador eletrostático foi aproximadamente de 89% para carga de -12 kV, deixando passar somente 10% do material particulado alimentado. Para carga de -10 kV o precipitador eletrostático obteve uma eficiência de 86% de coleta do material particulado alimentado no processo, sendo que a menor eficiência de 50% foi para carga de -4kV.

Pode ser visto que para carga de 0 kV apesar de não utilizar voltagem no teste de filtração, foi coletado uma massa de  $2,01 \cdot 10^{-3}$  Kg no precipitador eletrostático, este valor é referente as partículas que se depositaram por gravidade ou choque nas paredes do equipamento, interrompendo o fluxo de ar normal que as conduzia para o filtro de tecido. Para os outros dados o valor do material particulado coletado foi obtido pelas placas coletoras do precipitador eletrostático.

Outro item apresentado na Tabela 4.5 foram as massas retidas nas tubulações do equipamento, estas massas também foram quantificadas para apresentar o valor real de massa coletada no precipitador eletrostático e no filtro de tecido. Pode se dizer que o valor de massa perdido entre as tubulações não ultrapassa 10% da massa alimentada, e isto ocorreu devido à disposição dos filtros no equipamento. O precipitador eletrostático não é ligado diretamente ao filtro de mangas, eles estão conectados por um tubo de aproximadamente 1,5m de comprimento e 2,5cm de diâmetro, isto é necessário pois a filtração no filtro de tecido ocorre verticalmente, dificultando a conexão direta dos equipamentos.

Estes resultados demonstraram a eficiência do precipitador eletrostático e analisando o efeito corona atuante, a coleta do material particulado para a carga aplicada de -12 kV foi mais efetiva. A quantidade de material particulado coletado nas placas coletoras foi significativamente maior que para as outras condições investigadas, vide Figura 4.13.

Figura 4. 13– Imagem interna do precipitador eletrostático após o teste de -12kV.



Pode-se observar na Figura 4.15 a massa retida pelo precipitador eletrostático para o teste de -12kV, a espessura da torta formada nas paredes verticais do equipamento chega a 1cm, e sua massa coletada foi de 62g, 3% a mais que a massa coletada para curva de -10 kV em relação a alimentação.

Embora, a maioria do material particulado alimentado, foi retido no precipitador eletrostático, um dos objetivos do trabalho foi investigar a formação da torta de filtração, portanto foram analisados todos os parâmetros relacionados as curvas de filtração.

### 4.3.2. Análise das Curvas de Filtração

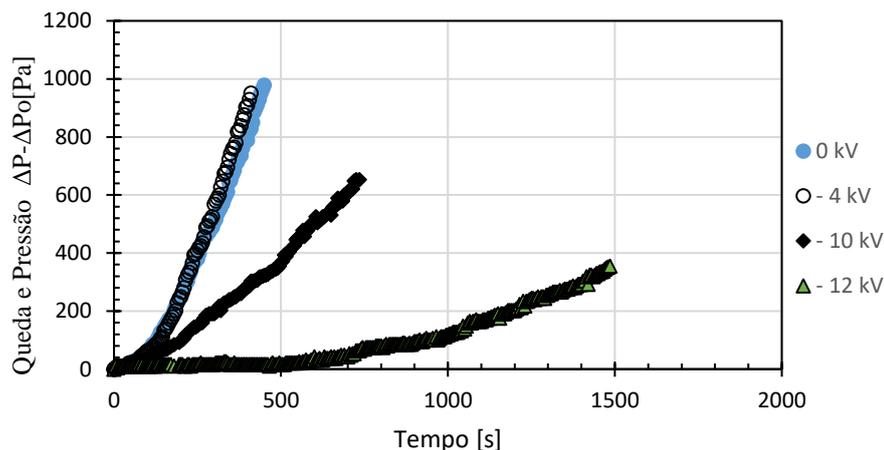
A Figura 4.14 apresenta as curvas de filtração, de queda de pressão em função do tempo, para as partículas com cargas eletrostáticas aplicadas antes e depois do ponto de corrente corona -10 kV, obtida a partir do teste de corrente-tensão apresentado na Figura 4.1. Pode-se observar uma diferença na queda de pressão quando comparadas as curvas de 0kV e -4kV com -10kV e -12kV, onde há o efeito corona atuante (-10kV e -12kV) a queda de pressão foi significativamente menor.

Para esta etapa de ensaios, os valores de corrente corona (-10 e -12 kV) aplicados nas partículas, o aumento da queda de pressão foi mais lento, devido a isso, optou-se por interromper a filtração antes de chegar no valor de queda de pressão máxima (1000 Pa) pré estipulada inicialmente, porque o precipitador eletrostático coletou maior quantidade de partículas antes de passar pelo filtro.

O tempo de filtração é um parâmetro muito importante no processo de filtração de gases, quanto maior o tempo de filtração para um ciclo, menor o desgaste das mangas ao longo de todo o processo. Carvalho (2018) investigou a penetração das partículas (provindas da indústria siderúrgica) em filtros de mangas, ele conseguiu aumentar em 16% o tempo de filtração, em uma filtração convencional, comparando os resultados de Carvalho com os obtidos neste estudo, pode-se dizer que a utilização do filtro híbrido também é eficaz neste processo.

Observa-se na Figura 4.14, que as curvas de filtração que possuem o efeito corona atuantes (-10 e -12kV), apresentaram o maior tempo de filtração, devido ao uso do precipitador eletrostático, houve uma redução na quantidade de partículas que iam para o filtro, e isso fez com que a filtração se tornasse mais lenta, sendo que para a carga de -12 kV, para o tempo de 1500s a queda de pressão máxima foi apenas de 380 Pa, já para carga de -10 kV o tempo foi de 750s e a queda de pressão máxima ficou 680 Pa, bem abaixo da queda de pressão máxima para carga de -4kV, abaixo do efeito corona, que teve um tempo de 385s.

Figura 4. 14- Curvas de filtração de queda de pressão por tempo para 0, - 4, -10 e -12 kV.



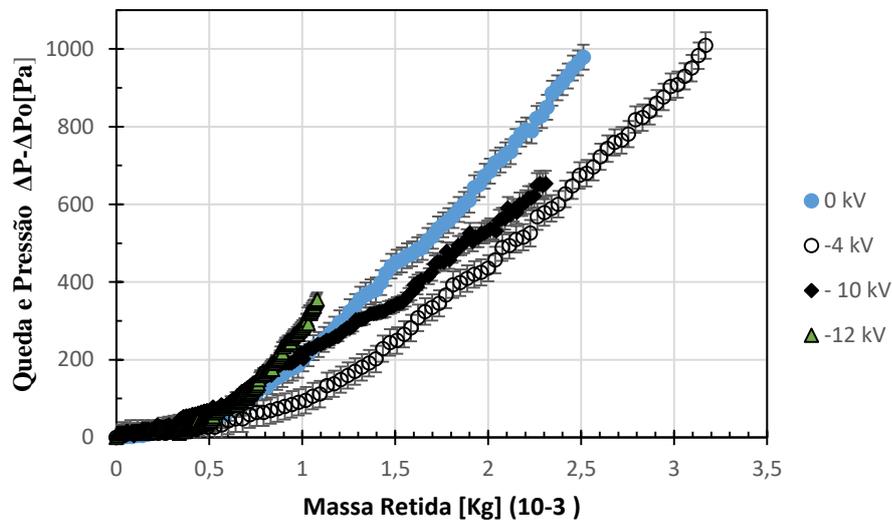
Experimentos de longo prazo com um filtro eletrostático híbrido foram realizados por Shi e Eckberg (2015), a fim de investigar a degradação do filtro após 200 dias de operação. Um filtro sintético da classe M6, operando com e sem um pré-carregador de partículas, foi testado em laboratório e foi instalado em um sistema de ventilação em um escritório. Os resultados mostraram que a eficiência de filtração foi maior cerca de 40% durante quase todo o tempo da operação do sistema, quando o pré-carregador de partículas foi usado (JAWORK et al. 2019).

Apesar do tempo de filtração ser um parâmetro importante na filtração de gases existem também outros parâmetros relevantes, como por exemplo a massa retida nos filtros de tecido. Neste aspecto, está plotado na Figura 4.15 o gráfico de queda de pressão em função da massa retida nomeio filtrante.

Observa-se nessa Figura que o comportamento das curvas de filtrações se altera. Verifica-se também a ocorrência da filtração de profundidade sendo que no início da filtração as curvas apresentaram um comportamento similar com o observado anteriormente, para as curvas de filtração antes do efeito corona.

Observa-se também na Figura 4.15 que a maior quantidade de massa retida foi obtida para a curva de filtração com a carga eletrostática aplicada nas partículas de -4kV, antes de atingir o ponto de corrente corona, coletando uma massa de pó de  $3,17 \cdot 10^{-3}$  Kg, em seguida foi a curva de filtração sem nenhuma carga aplicada nas partículas (0kV), com a massa coletada de  $2,52 \cdot 10^{-3}$  Kg mantendo o mesmo desempenho das curvas apresentadas no item anterior.

Figura 4. 15- Curvas de filtração de queda de pressão por massa retida para 0, - 4, -10 e -12 kV.



Verifica-se também que a quantidade de massa coletada para estas condições foi bem maior em relação às partículas carregadas após o ponto de corrente corona, para a carga eletrostática de -10 kV a massa retida foi de  $2,31 \cdot 10^{-3}$  Kg e para carga de -12 kV a quantidade de massa foi ainda menor,  $1,08 \cdot 10^{-3}$  Kg. Outra observação que merece destaque é em relação à queda de pressão, que foi menor para a maior massa retida, quando as partículas estavam com a carga aplicada de -4 kV, pode-se observar que para a carga de -4 kV a redução no aumento de queda de pressão, chegou a 32% comparando com a carga de 0 kV, para uma maior massa retida ( $\sim 3,2 \cdot 10^{-3}$  Kg para -4 kV e  $\sim 2,5 \cdot 10^{-3}$  Kg para 0kV), o que significou um aumento de  $\sim 25\%$  em relação a filtração com as partículas sem nenhuma carga aplicada (0kV).

Por outro lado, verifica-se que para a filtração com as partículas carregadas com cargas de -10kV e de -12kV, o efeito corona foi atuante, a queda de pressão para as partículas carregadas com -12 kV, foi maior, para uma mesma quantidade de massa coletada, em relação as partículas carregadas de -10 kV, que por sua vez foi maior em relação a curva sem carga aplicada (0kV).

Para as partículas com carga de -10kV, até o ponto de 210 Pa de queda de pressão, não houve alteração na queda de pressão em relação a curva de 0 kV, porém conforme ocorreu

a filtração, a curva de filtração para a carga de -10 kV demonstrou-se uma menor queda de pressão ao final da filtração obtendo uma diminuição de 21%.

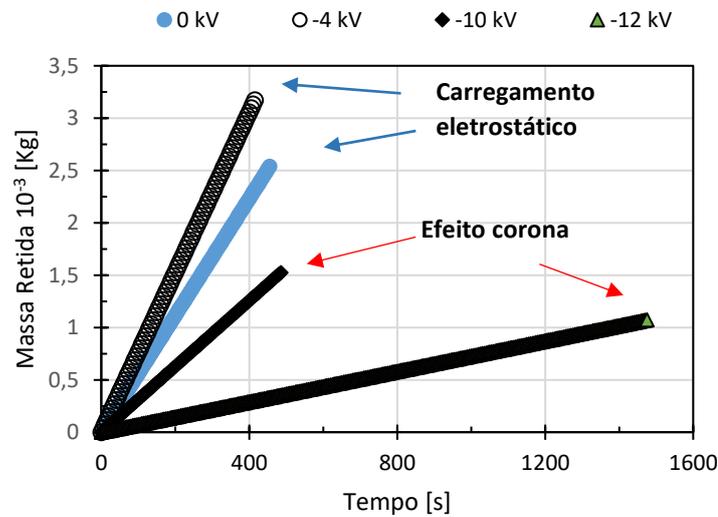
Já as partículas com carga de -12kV o aumento foi de 22%, em relação as partículas sem nenhuma carga para a mesma quantidade de massa retida. Este comportamento pode parecer controverso, visto que a quantidade de partículas retidas no filtro foi inferior as curvas sem o efeito corona (0 e -4 kV), porém isto pode ser explicado, quando o precipitador eletrostático atua como coletor de partículas, somente as partículas mais finas chegam ao filtro de tecido, formando uma torta mais compactada, portanto mais resistente ao fluxo de ar. Isso fica mais evidente quando a curva de filtração foi plotada em relação ao tempo de filtração, como mostra a Figura 4.14.

Entretanto, está apresentado na Figura 4.16 as curvas de filtração de massa retida em função do tempo para o carregamento eletrostático das partículas e para o efeito corona atuante. A figura demonstra a tendência das curvas de filtração em reter o material particulado, para cada voltagem no precipitador.

O perfil referente a tensão de 0 e -4 kV apresentado na Figura 4.16, demonstrou que, apesar de haver uma maior queda de pressão em função do tempo (Fig. 4.14), nesta condição há uma maior taxa de retenção mássica. Este resultado sendo analisado em conjunto com o gráfico de queda de pressão por tempo, permite sugerir que houve um melhor carregamento das partículas na condição de -4 kV, nas quais o precipitador eletrostático funcionou como um carregador de partículas.

Observando o comportamento das curvas de filtração nas quais o efeito corona foi atuante (-10 e -12 kV), pode-se verificar o aumento no tempo de filtração para uma mesma quantidade de massa retida. Analisando todas as curvas em geral, para a massa retida de  $1 \cdot 10^{-3}$  Kg, o tempo de filtração para a curva com carregamento eletrostático foi de 150 s, já para as curvas com efeito corona atuante na filtração o tempo foi de 290 s para -10 kV e 1315 s para -12 kV.

Figura 4. 16- Curvas de filtração de massa retida por tempo para 0, - 4, -10 e -12 kV.



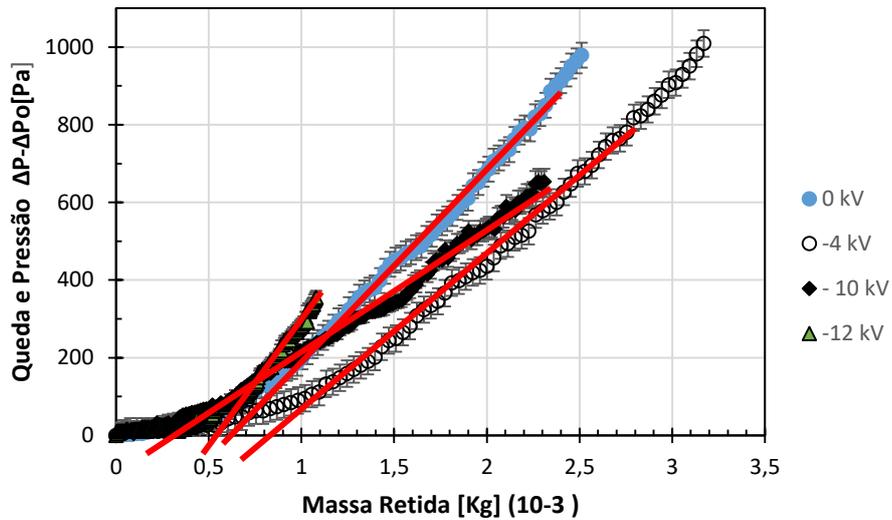
Apesar da curva de filtração com carga eletrostática de -12 Kg obter o maior tempo de filtração, sua queda de pressão foi maior em relação as outras curvas, o que não é interessante do ponto de vista do custo benefício para o processo de filtração de gases. Porém, para a carga aplicada de -10 kV obteve-se um acréscimo no tempo de filtração e uma diminuição da queda de pressão, tornando este resultado mais adequado para o processo.

### 4.3.3. Determinação do Ponto de Colmatação

Sabe-se que o ponto de colmatação é o lugar geométrico onde a assíntota da curva cruza com o eixo das abscissas. Para melhor visualização do ponto de colmatação a Figura 4.17 apresenta o gráfico de queda de pressão por massa retida para as cargas aplicadas de 0, -4, -10 e -12 kV com o ponto de colmatação demarcado em vermelho.

Foi observado na Figura 4.17 que à medida que se aplicou a carga eletrostática acima do ponto de efeito corona (-10 kV) o ponto de colmatação diminuiu em relação a curva de filtração com 0 kV. E para a carga de -4 kV onde utilizou se somente o carregamento das partículas o maior ponto de colmatação foi encontrado com o valor de massa retida de  $0,87 \cdot 10^{-3}$  Kg.

Figura 4. 17– Determinação do Ponto de colmatação nas curvas de filtração.



Observa-se na Figura 4.17 que para a carga de -10 kV obteve-se uma curva mais linear podendo se dizer que, a filtração ocorreu mais na superfície do tecido e o ponto de colmatação foi menor em relação as outras curvas realizadas. Segundo Mermelstein, (2002) o carregamento eletrostático das partículas durante a filtração pode diminuir a penetração das mesmas no meio filtrante.

A Tabela 4.6 apresenta os valores do ponto de colmatação obtidos para cada curva de filtração. Verificou-se que o ponto de colmatação diminuiu 57% para curva de -10 kV em relação a curva de 0 kV e 21% para curva de -12 kV. Estes resultados estão diretamente relacionados a carga eletrostática aplicada e ao tamanho das partículas coletadas no meio filtrante.

Quando se aumenta o ponto de colmatação supõe-se que aumenta também a filtração de profundidade, onde as partículas podem penetrar mais nas fibras do tecido, este comportamento foi visto para carga aplicada de -4 kV.

Tabela 4. 6– Resultados do ponto de colmatação e massa retida de acordo com a carga eletrostática aplicada nas partículas.

Tensão (kV)	Ponto de Colmatação (Kg 10 <sup>-3</sup> )	Massa Retida (Kg 10 <sup>3</sup> )
0	0,70	2,71
-4	0,87	3,17
-10	0,30	2,31
-12	0,55	1,08

Walsh et al., (1996) relatou que a colmatação é mais rápida para partículas menores. Acredita-se que este possa ser um dos fatores envolvidos neste trabalho, pois para curvas com efeito corona atuante (-10 e -12 kV) o precipitador eletrostático atuou como coletor onde as partículas maiores foram coletadas, assim a maioria do material particulado que chegou ao filtro de tecido apresentou uma granulometria menor (este fator será analisado nos próximos itens).

O menor ponto de colmatação foi encontrado para curva de -10 kV, este resultado pode ser positivo visto que uma menor penetração das partículas no meio filtrante pode facilitar o processo de limpeza das mangas.

#### 4.3.4. Determinação Resistência específica da Torta K<sub>2</sub>

Analisando os valores da resistência específica da torta calculados com os dados obtidos pela Figura 4.7 e a Equação 2.13, verifica-se na Tabela 4.7, que o valor de K<sub>2</sub> para carga de -10 kV diminuiu 55% em relação ao valor de k<sub>2</sub> quando nenhuma carga foi aplicada, e para carga de -12 kV ocorreu uma diminuição de 23%. Já para carga de -4 kV sem o efeito corona atuante a resistência específica da torta reduziu em 37%.

Tabela 4. 7- Valores de resistência específica da torta

<b>Tensão (kV)</b>	<b>Massa Retida no Filtro (g)</b>	<b>K2 (10<sup>-3</sup>) (s<sup>-1</sup>)</b>
<b>0</b>	2,52	168,7
<b>-4</b>	3,17	105,8
<b>-10</b>	2,31	75,3
<b>-12</b>	1,08	128,7

Os valores de resistência específica da torta apresentados na Tabela 4.7 estão relacionados ao comportamento das curvas de filtração apresentados na Figura 4.7. A resistência específica da torta aumentou de acordo com a inclinação da curva, relacionando os resultados encontrados pode se verificar que para a carga de -12 kV curva de filtração obteve-se uma maior inclinação, assim observou-se o maior valor de queda de pressão e o maior valor de resistência específica da torta ( $128,7 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) indicando que a torta pode estar mais compactada. Para a carga de -10 kV (-5,0kV/cm) obteve-se a menor valor de resistência específica da torta de  $75,3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , apesar da quantidade de massa retida ser menor, este resultado também apresentou menor queda de pressão.

Acredita-se que o precipitador coletou as partículas maiores deixando apenas as partículas menores no escoamento de ar dirigindo se para o filtro, fazendo com que ocorresse um rearranjo das partículas, facilitando a passagem do ar entre as fibras. Toda via, a quantidade de partículas encontradas no meio filtrante para estes testes foi muito inferior de quando foi aplicado a carga de -4 kV(-2,0 kV/cm) e sem carga (vide Tabela 4.7), mesmo assim o valor da resistência específica da torta para a curva de -12 kV (-6,0kV/cm) foi maior, e estes resultados foram atribuídos ao campo elétrico aplicado.

#### **4.3.5. Determinação da porosidade da torta de filtração**

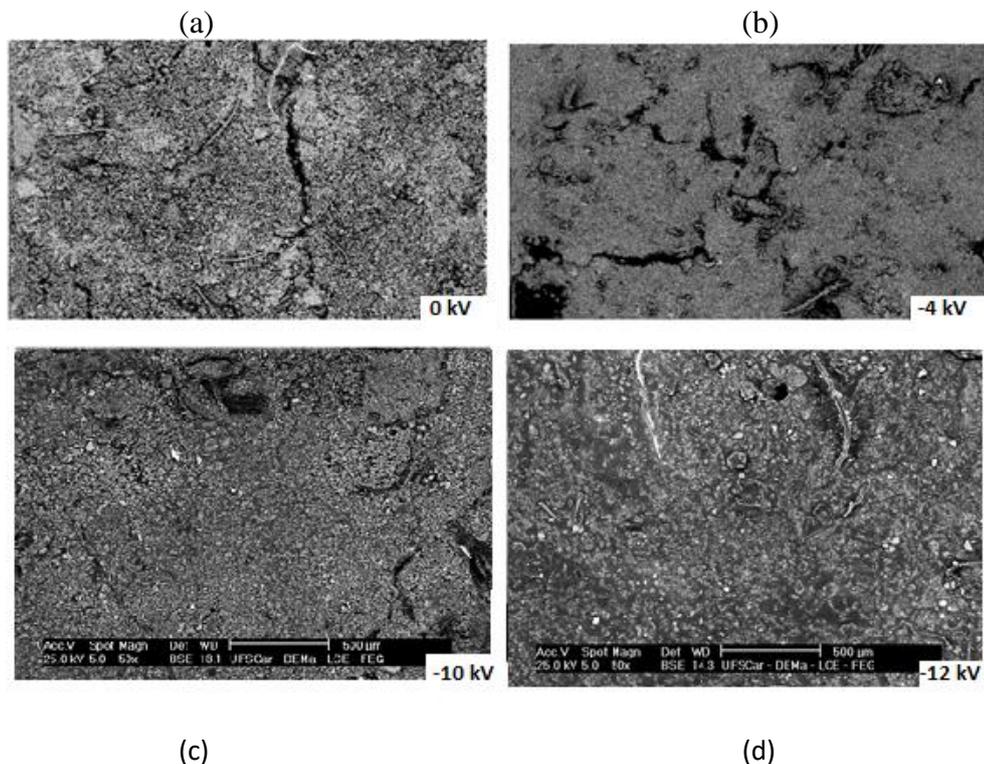
Novamente, com o auxílio do MEV como descrito no item 4.2.3, foram feitas imagens da torta de filtração após os ensaios, a Figura 4.18 apresenta a vista superior das tortas.

Desta forma, as imagens foram obtidas para cada torta de filtração formada com diferentes voltagens aplicadas nas partículas, pode-se notar que à medida que a voltagem aplicada aumentou, a torta superficial do filtro diminuiu. Na Fig. 4.18, as partículas estão na parte superior do meio filtrante, podendo ser claramente observadas.

Adicionalmente, para a tensão de -4 kV (vide Figura 4.18 (b)) pode-se observar uma maior quantidade de partículas na superfície do filtro. Já para as cargas de -10 e -12 kV as quantidades de partículas depositadas no meio filtrante foram menores em relação a carga aplicada de -4kV. Verifica-se que algumas fibras do filtro começam a aparecer, (Figura 4.18(d)), este comportamento é devido ao carregamento das partículas, que altera o comportamento de deposição das partículas durante a formação da torta.

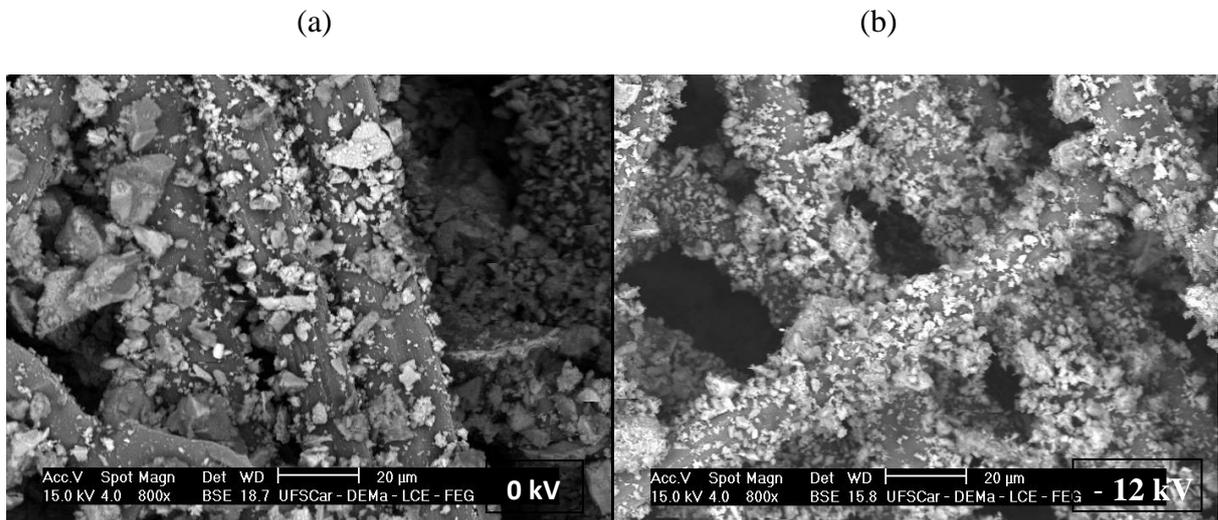
A fim de obter melhor entendimento deste comportamento, foram realizadas imagens com uma maior ampliação para os testes sem e com carga aplicada, respectivamente de 0 e -12 kV. As imagens apresentadas na Figura 4.19, representam a deposição das partículas nas fibras internas do filtro, em uma análise transversal do filtro após o embutimento do mesmo.

Figura 4. 18- Imagens da torta de filtração com o embutimento da torta, vista superior obtidas através do MEV com ampliação de 35 X, para a carga aplicada de 0kV (a), -4kV (b), -10kV (c) e -12kV (d).



|| As imagens da Figura 4.19 foram obtidas com uma ampliação de 800 X para os filtros de (a) 0kV e (b) -12 kV. Verifica-se que para a torta de filtração sem carga eletrostática aplicada, é possível observar uma maior quantidade de partículas de cimento com diâmetros maiores depositados na superfície das fibras, já para a torta de filtração com a carga aplicada de -12 kV, o tamanho das partículas pareceu ser bem menor comparada a torta de filtração com 0 kV. Isto está de acordo com a Tabela 4.9 onde obteve-se um diâmetro mediano de 6,8  $\mu\text{m}$  para 0 kV, e 2,98  $\mu\text{m}$  para -12 kV a partir do equipamento MASTERSIZER MALVERN v.2.19, na próxima seção será apresentado o diâmetro mediano das partículas obtido através da análise de imagens da Figura 4.19.

Figura 4. 19- Imagens da torta de filtração (0 kV) vista do interior da torta de filtração através do MEV com ampliação de 1000 X, carga aplicada 0kV (a) e com carga aplicada de -12kV (b).



Pode-se verificar na Figura 4.19(a) que para a torta de filtração sem carga aplicada 0 kV as partículas se depositaram sobre as fibras e entre os espaços vazios das fibras ou seja a deposição foi entre partícula fibra e partícula-partícula formando dendritos, resultando em uma camada de pó entre os poros do meio filtrante. Para a carga aplicada de -12 kV (Figura 4.19(b)) pode-se observar claramente que as partículas se depositaram sobre as fibras do tecido, e não se aglomeraram entre os espaços vazios das fibras, a deposição das partículas foram predominantemente partícula-fibra.

Huang et al (2006) estudaram a deposição das partículas de cinzas voláteis sobre as fibras de tecido durante a filtração de gases utilizando carregamento corona e polarização

induzida. Foram analisados a deposição das partículas na filtração inicial, e o resultado obtido demonstrou que as partículas carregadas se depositavam nas fibras do tecido e iam formando cadeias curtas e retas, com distâncias uniformes. O mesmo comportamento pode ser observado na Figura 4.17 (b) para carga de -12 kV, as partículas estão distribuídas em sua maioria uniformemente e pode-se notar que o tamanho das partículas distribuídas pelas fibras é aparentemente homogêneo.

Alguns pesquisadores descreveram o comportamento da deposição das partículas no filtro:

Yao et al. (2008; 2009), explicaram que as forças que ligam uma partícula com a fibra são mais fortes para partículas carregadas em uma descarga corona do que as forças de polarização produzidas por um campo elétrico externo.

O efeito da carga eletrostática na deposição de partículas sobre uma única fibra foi investigado por Penney, (1977). O autor explicou que o campo elétrico produzido pela deposição das partículas na fibra concentra-se nas protuberâncias das fibras. A superfície de uma fibra nunca é lisa, e as partículas carregadas se movem em direção a essas saliências.

Feng et al. 2016 e Liu et al. 2016, ressaltaram o aumento na eficiência de coleta no precipitador eletrostático híbrido, onde as partículas maiores foram retidas e as partículas finas carregadas pelo efeito corona foram levadas pelo escoamento de ar até o filtro de mangas. A carga elétrica das partículas que sai do precipitador eletrostático facilitou a formação de dendritos mais porosos na superfície do filtro de mangas o que facilita a sua limpeza.

Entretanto, há uma desvantagem no precipitador eletrostático híbrido, quando as partículas finas carregadas deixam o precipitador, elas podem formar tortas mais compactas no filtro de mangas do que as partículas grossas. Gutierrez- Ortiz et al. (2007) demonstraram que a concentração de partículas maiores que 10 micras depositadas no filtro de mangas diminuiu de 85% a 20% (em massa), enquanto a concentração de partículas menores que 2.5 micras aumentam de 2 para 26% (em massa), com o carregamento eletrostático ligado, (JAWOREK ET AL. 2019).

Em contra partida, uma das vantagens dos precipitadores eletrostáticos híbridos é a diminuição na penetração das partículas no filtro, o que pode facilitar o processo de limpeza das mangas.

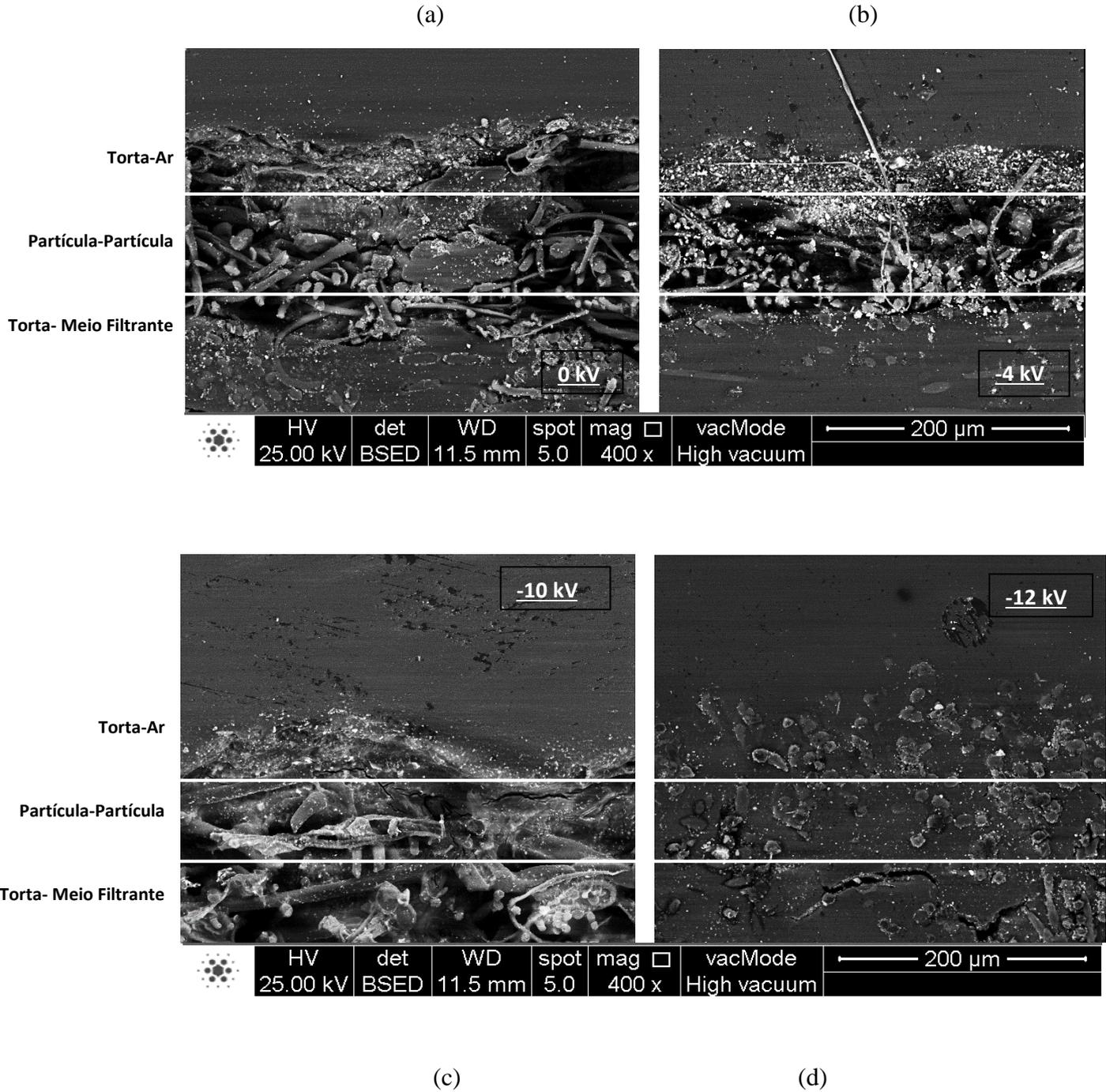
A penetração das partículas em um filtro de tecido diminui com o carregamento eletrostático durante a filtração e depende de parâmetros como distribuição de tamanho de partículas, concentração de partículas, velocidade superficial do gás e temperatura. (LAMB E CONSTANZA (1980); J. MERMELSTEIN, (2002); G.TU et al. (2016); G. TU. et al. (2018).

Com o auxílio do processo de embutimento das tortas de M. L. Aguiar e Coury (1996), deixou-se as tortas intactas foi possível obter as imagens da Figura 4.19. Através dessas imagens verifica-se a penetração inicial das partículas no meio filtrante de fibra de vidro.

A Figura 4.20 demonstra a penetração das partículas no meio filtrante, em cada teste realizado. Pode-se observar que os testes com as cargas aplicadas de 0kV e -4kV obtiveram maior quantidade de partículas, na superfície do filtro quanto na filtração de profundidade, já os testes com -10kV e -12kV a quantidade de partículas foi aparentemente inferior. A Figura 4.20 apresenta a etapa de transição e a filtração de superfície para todos os testes. Pode ser visto cada etapa separadamente (filtração torta-ar; partícula-partícula e torta-meio filtrante) a partir das imagens obtidas pelo MEV.

Para a carga de referência de 0kV foram encontradas partículas nas 3 etapas de filtração, filtração de superfície, partícula-partícula e filtração de profundidade (vide Figura 4.20). Para carga com -4kV pode ser visto as partículas na filtração de superfície, partícula-partícula, porém com uma quantidade menor encontrada e algumas partículas na filtração de profundidade.

Figura 4. 20- Imagens da torta de filtração com vista transversal obtidas através do MEV com ampliações de 400X das tortas embutidas, para a carga aplicada de 0kV (a), -4kV (b), -10kV (c) e -12kV (d).

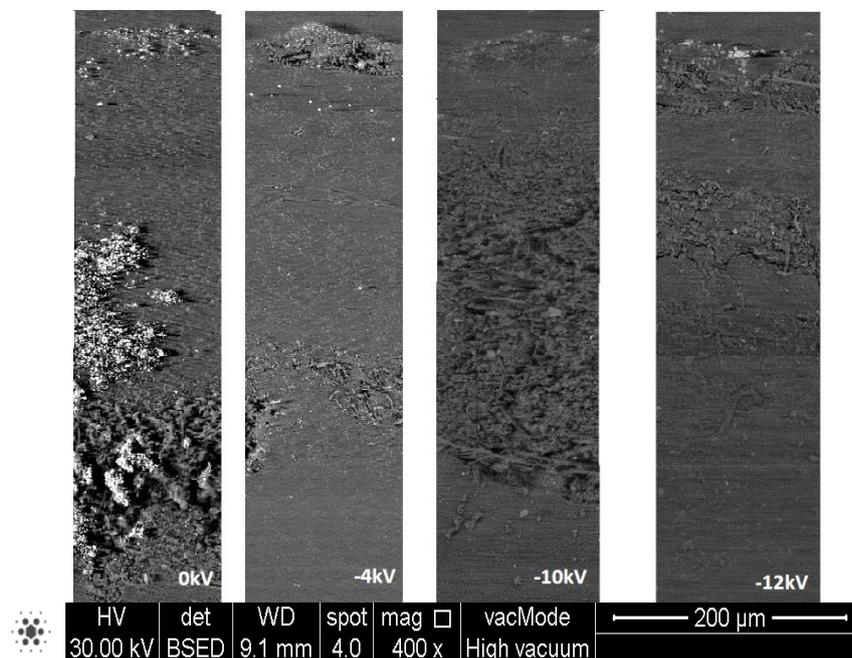


Para os testes com as cargas de -10kV e -12kV as partículas foram encontradas nas etapas partícula-partícula, e a torta de filtração formada se manteve apenas na filtração de superfície não alcançando uma penetração dentre as fibras do tecido. Isto pode ser uma das explicações para os valores de resistência específicos da torta ter aumentado, alcançando um

aumento médio de aproximadamente 68,25% para as cargas de -10 e -12 kV, em relação a curva de 0kV.

Para uma melhor visualização dos resultados a Figura 4.21 apresenta a torta de filtração na transversal, assim foi possível observar o comportamento das partículas após a filtração.

Figura 4. 21 - Imagens da torta de filtração vista transversal obtidas através do MEV com ampliações de 400X das tortas embutidas.



A partir das imagens obtidas pelo MEV e apresentadas nas Figuras 4.(18-20) foi possível calcular os valores da porosidade utilizando a Equação de Ergun, da porosidade média das tortas de filtração pelo método direto e as áreas de espaços vazios, para todos os experimentos de filtração obtidos para as diferentes cargas aplicadas, os resultados alcançados estão apresentados na Tabela 8.

Os valores de porosidade das tortas de filtração aumentaram para as partículas carregadas com efeito corona (-10 e 12 kV), como pode ser visto na Tabela 4.8 a porosidade obtida pela Equação de Ergun para carga de -10 kV foi 0,62 e a porosidade experimental foi de 0,65 a diferença em porcentagem entre os dois resultados foi de aproximadamente 5%.

Para a carga de -12 kV obteve porosidades de 0,51 e 0,53 pela equação de Ergun e pelo método direto, respectivamente, o valor da diferença entre estes resultados foi de 4%.

Tabela 4. 8– Valores das porosidade de Ergun, porosidade experimental e área de espaços vazios.

<b>Tensão (kV)</b>	<b>Massa Retida no Filtro (g)</b>	<b>Porosidade de Ergun</b>	<b>Porosidade Experimental</b>	<b>Área de espaço vazio (mm<sup>2</sup>)</b>
<b>0</b>	2,52	0,42	0,41	7,27
<b>-4</b>	3,17	0,40	0,49	11,9
<b>-10</b>	2,31	0,62	0,65	14,9
<b>-12</b>	1,08	0,51	0,53	13,8

As áreas de espaços vazios foram calculadas a partir das Figuras 4.18 e os resultados estão demonstrados na Tabela 4.8, verificou-se que à medida que se aplicou a carga eletrostática nas partículas a área de espaços vazios aumentou. O melhor resultado foi obtido para carga de -10 kV com valor de 14,9 mm<sup>2</sup> isto está relacionado aos maiores valores de porosidades entre 0,62 e 0,65 e ao valor da resistência específica da torta que diminuiu para carga de -10 kV obtendo um valor de  $75,3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ .

Para Frederick (1980) há uma falta de uma correlação significativa entre a penetração de partículas e o tamanho das partículas, independentemente da velocidade superficial do gás. Sabe-se que é possível diminuir a penetração das partículas utilizando uma carga eletrostática maior na filtração de gases, pois quando se utiliza o precipitador eletrostático como pré-filtro as partículas maiores ficam retidas no precipitador.

A redução na penetração das partículas no tecido, foi devido ao aumento do nível de carga das partículas, comprovando a relevância do mecanismo eletroforético de dipolo-imagem presente na filtração inicial. Este mesmo comportamento foi observado por outros autores que trabalharam com leitos fibrosos (GOYER ET AL.,1954; DONOVAN ET AL;

1982; BROWN, 1989; WASH E STENHOUSE, 1997; ROMAY ET AL., 1998; RODRIGUES; 2005; COURRY, 1983 e DUARTE F<sup>o</sup>., 1995).

Segundo Brow (1989) a presença de cargas nas partículas reduz a penetração das partículas, principalmente para partículas menores de 10 $\mu$ m e para velocidades de filtração baixas.

Neste trabalho será apresentado o diâmetro mediano das partículas no precipitador e no filtro de tecido, assim serão investigados a formação da torta de filtração e sua penetração, para uma possível correlação entre a penetração e o diâmetro das partículas.

#### **4.3.5.1. Determinação do Diâmetro Mediano das Partículas**

Na tentativa de explicar o comportamento da filtração de gases durante a formação da torta, foram obtidas as distribuições granulométricas mediana das partículas de cimento retiradas durante a alimentação de pó no sistema, no precipitador eletrostático e no meio filtrante, para os testes com cargas aplicadas de 0, -4, -10 e -12 kV, no equipamento MASTERSIZER MALVERN v.2.19 e pelo método de análise de imagens utilizando um software Image Pro Plus 7.

Os resultados estão apresentados na Tabela 4.9, onde demonstraram que, à medida que ocorre a filtração o diâmetro mediano das partículas diminui, exceto para curva sem carregamento eletrostático (0 kV). Este comportamento pode ter ocorrido devido a aglomeração das partículas durante a deposição das mesmas no filtro de tecido, visto que o teste foi realizado com as partículas retiradas da superfície do meio filtrante.

Tabela 4. 9– Diâmetro mediano das partículas em cada parte do processo, obtido através do equipamento MASTERSIZER MALVERN v.2.19 e do método de análise de imagens pelo Image Pro Plus 7 para 0,1 m/s.

<b>Tensão (kV)</b>	<b>Diâmetro da partícula na alimentação (µm) Malvern</b>	<b>Diâmetro da partícula no precipitador (µm) Malvern</b>	<b>Diâmetro na superfície da torta (µm) Malvern</b>	<b>Diâmetro da partícula na superfície da torta- MEV (µm)</b>
0	18,03± 0,90	-----	20,98 ± 0,79	11,08
-4	18,03± 0,90	15,85± 0,84	5,50± 14,2	9,27
-10	18,03± 0,90	14,12± 0,94	4,45± 24,6	7,54
-12	18,03± 0,90	13,00± 0,94	2,98± 26,7	2,06

As partículas analisadas nas imagens apresentadas na Figura 4.20, foram maiores sem a carga aplicada (0 kV) em relação as partículas observadas na imagem com a carga aplicada de -12 kV, isto está relatado na Tabela 4.9 onde o diâmetro mediano das partículas no meio filtrante para 0 kV foi de 20,87µm determinada no mastersizer malvern e 11,08 µm pelo método de análise de imagens, este foi o maior desvio entre os resultados obtidos com os dois métodos. Já para a carga aplicada de -12 kV o valor encontrado no mastersizer malvern e por análise de imagens foram de 2,98 e 2,06 µm, respectivamente.

O resultado mais expressivo foi obtido nos testes onde existia o efeito corona (-10 e -12kV). As partículas coletadas no meio filtrante para o teste com a carga de -12kV obtiveram um diâmetro mediano menor, chegando a diminuir 56% em comparação com o teste sem carga eletrostática (0kV), quando o determinado no mastersizer malvern. A redução no diâmetro mediano das partículas encontradas no filtro de tecido, também foi verificada para os testes com cargas aplicadas de -4kV e -10kV, com uma percentagem de redução de 19% e 34,5%, respectivamente. Isto ocorre devido à disposição em série que se encontra os dois equipamentos de filtração, à medida que o precipitador eletrostático é utilizado como um coletor de partículas, ele consegue reter as partículas com diâmetros maiores, deixando passar somente as partículas com um diâmetro menor que se direcionam para o filtro de tecido.

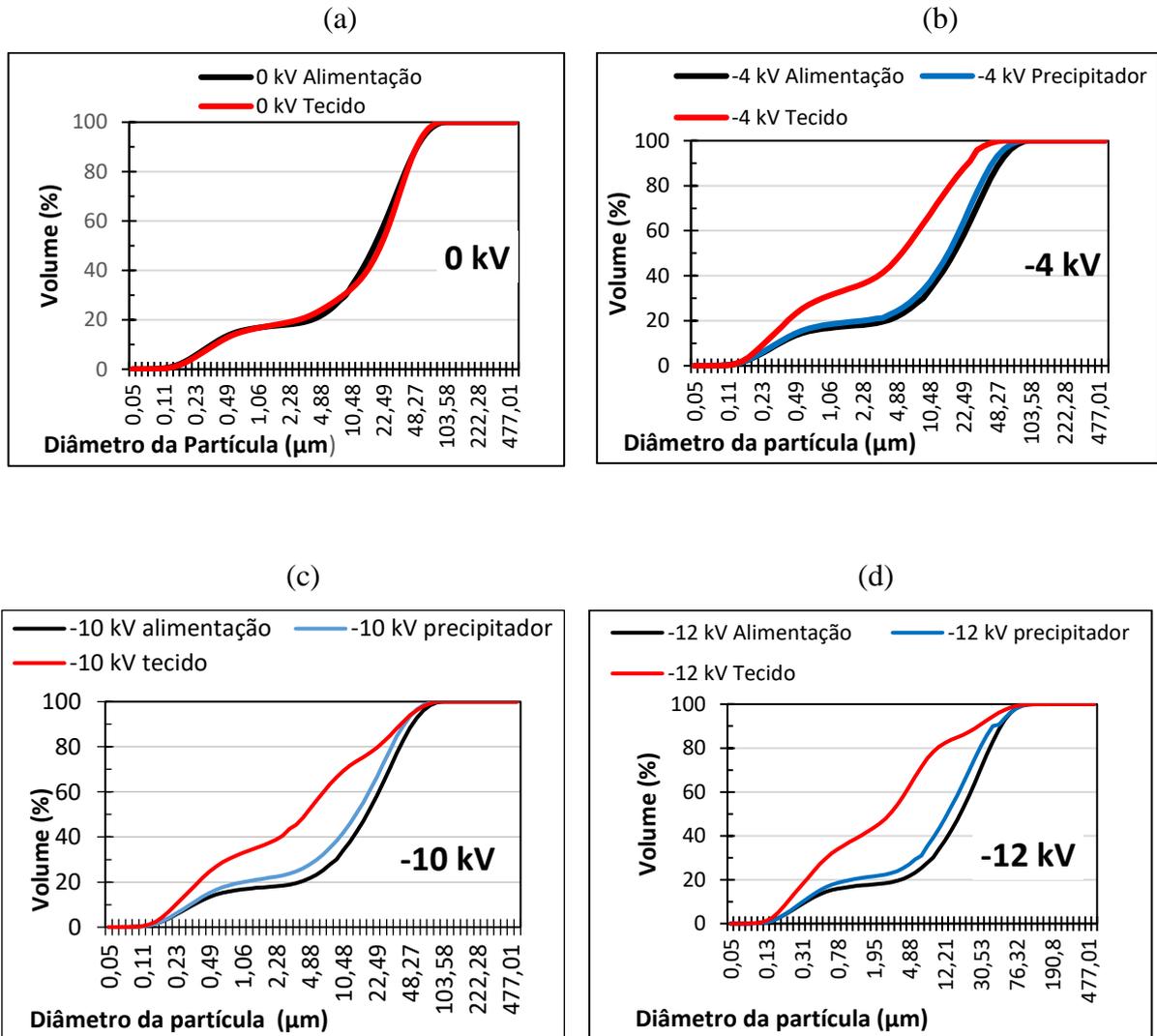
Os resultados apresentados demonstraram que a granulometria das partículas modificou à medida que ocorreu a filtração de gases com o carregador de partículas ligado, variando as voltagens aplicadas nas partículas. A diferença entre os valores obtidos para o diâmetro mediano das partículas nas tortas de filtração com os diferentes métodos de análises, foi de 54%. Isto ocorre devido a diferença de análise dos dois métodos, visto que, o Malvern expressa os resultados do diâmetro volumétrico das partículas e a análise de imagens pelo software Image ProPlus 7 é feita baseada no diâmetro em 2D, considerando a distância entre dois pontos na imagem.

De acordo com os dados da Tabela 4.9, a Figura 4.22 apresenta os gráficos representativos dos valores dos diâmetros medianos das partículas em cada etapa do processo, obtidos através do equipamento MASTERSIZER MALVERN v.2.19.

A Figura 4.22 (a) apresenta a distribuição cumulativa da granulometria das partículas de cimento sem carga aplicada, como não foi utilizado o carregador de partículas, não foi apresentada a curva do diâmetro mediano das partículas para o precipitador eletrostático, pois ele não reteve partículas nas suas placas coletoras. As curvas apresentadas foram da alimentação e do diâmetro das partículas no meio filtrante após a filtração. Como pode ser verificado, na alimentação o mesmo diâmetro mediano de 18,03  $\mu\text{m}$  foi obtido em todas as curvas neste caso em específico as partículas coletadas na superfície da torta obtiveram um diâmetro mediano maior que o diâmetro da alimentação 20,98  $\mu\text{m}$ , acredita-se que este comportamento foi devido à aglomeração das partículas durante a filtração.

Toda via, para as outras curvas apresentadas nas Figuras 4.22 (b-d) à medida que ocorria filtração os diâmetros medianos foram diminuindo, isto ficou claro na Figura 4.22 (b), em que os valores dos diâmetros medianos obtidos foram de 18,03; 15,85 e 5,50  $\mu\text{m}$ , para a alimentação, o precipitador eletrostático e o meio filtrante, respectivamente. Para Figura 4.22 (c) com carga aplicada de -10 kV e para Figura 4.22 (d) com carga aplicada de -12 kV, isto também ocorreu e foi ainda mais visível, pois o deslocamento das curvas foi maior, sendo que, para o efeito corona atuante, 55% das partículas que chegaram no meio filtrante o diâmetro mediano detectado ficou entre 0,1 - 5  $\mu\text{m}$ .

Figura 4. 22– Curvas cumulativas em percentagem da distribuição granulométrica em cada parte do processo de filtração: (a) para testes com 0 kV, (b) para testes com -4 kV, (c) para testes com -10 kV e (d) para os testes com -12 kV.



#### 4.4. INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE NA FILTRAÇÃO DE GASES COM O EFEITO CORONA

Optou-se por averiguar o comportamento da formação de tortas de filtração de gases para duas velocidades superficiais de filtração de 10 cm/s e de 6 cm/s, para valores de tensão acima do efeito corona de -10 e -12 kV, e abaixo do efeito corona de -4 kV. Os parâmetros experimentais como: material particulado, meio filtrante, concentração de pó e tamanho de partículas não foram alterados. A Figura 4.23(a-d) apresenta as curvas de filtração

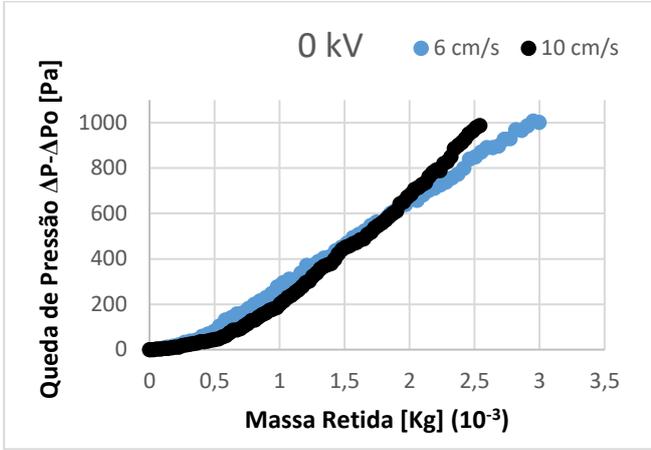
de queda de pressão em função da massa retida no meio filtrante, para as duas velocidades investigadas.

Tentou-se atingir, durante a filtração, o valor máximo de queda de pressão pré-estabelecido de 1000 Pa e tempo de filtração de aproximadamente 500 segundos, que foram os valores aproximados utilizados na filtração para as menores tensões aplicadas de 0 e -4 kV. Porém, para as curvas de filtração com as tensões aplicadas nas partículas acima do efeito corona o tempo se estendeu ultrapassando os 1500 segundos e a filtração foi interrompida antes de chegar ao valor da queda de pressão máxima pré-estabelecido.

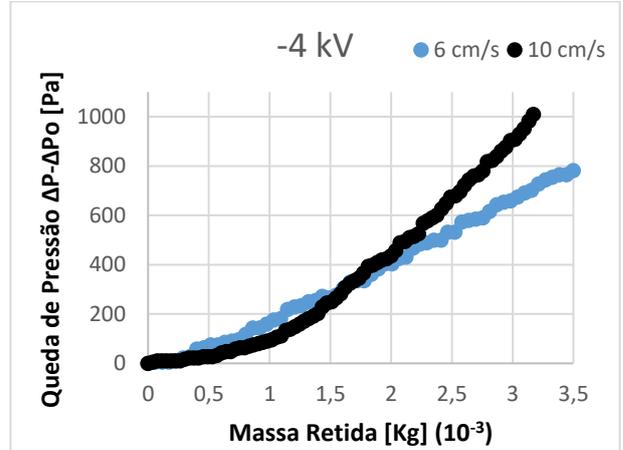
Analisando as Figuras 4.23 (a-d), para a curva de filtração sem o efeito corona (0 kV) houve uma pequena alteração no comportamento das curvas de filtração, para a velocidade de filtração de 6,0 cm/s a queda de pressão foi sutilmente maior, para uma faixa de massa de pó coletado no meio filtrante de aproximadamente  $0,25 \cdot 10^{-3}$  Kg a  $2,0 \cdot 10^{-3}$  Kg, do que para a velocidade superficial de 10,0 cm/s, sendo que a partir desse ponto a queda de pressão para a velocidade superficial de 6,0 cm/s passou a diminuir no decorrer da filtração em relação à velocidade superficial de 10,0 cm/s. A mesma tendência foi observada quando as partículas foram submetidas a uma tensão de -4 kV, abaixo do efeito corona, porém para estas condições a curva de queda de pressão alterou seu comportamento quando a massa de pó coletada alcançou um valor de aproximadamente  $1,5 \cdot 10^{-3}$  Kg e o efeito da velocidade superficial na queda de pressão durante a filtração foi mais visível. Comparando agora o comportamento da filtração quando o efeito corona estava atuante (-10 e -12 kV), a queda de pressão foi maior para a velocidade superficial de filtração de 6 cm/s, praticamente durante toda a filtração, sendo que esse comportamento foi mais visível quando a tensão de -10kV foi aplicada nas partículas.

Figura 4. 23 - Gráficos de queda de pressão por tempo com velocidades de filtração diferentes 6 cm/s e 10 cm/s: (a) para 0 kV; (b) para -4 kV; (c) para -10 kV; (d) para -12 kV e (e) uma comparação de todas as curvas.

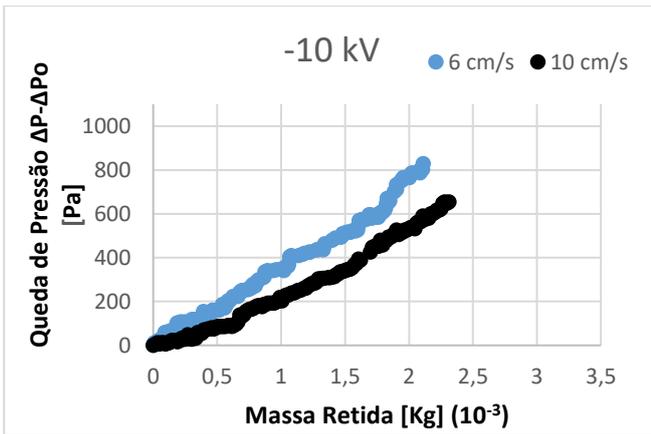
(a)



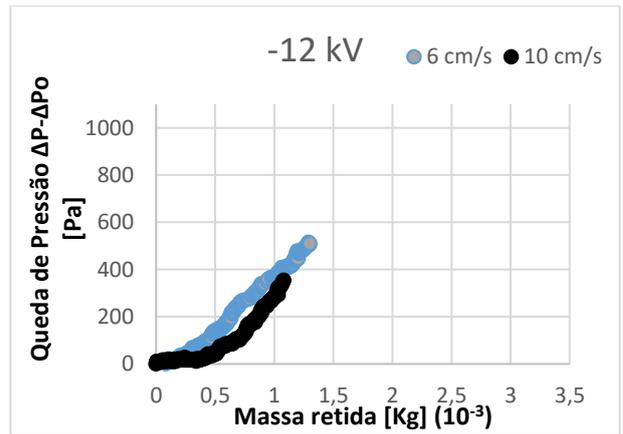
(b)



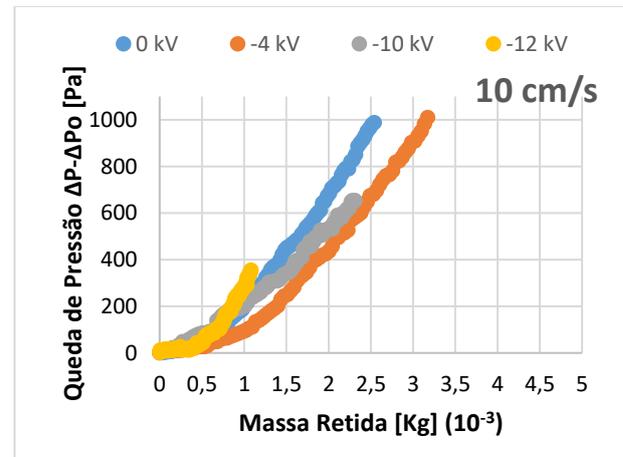
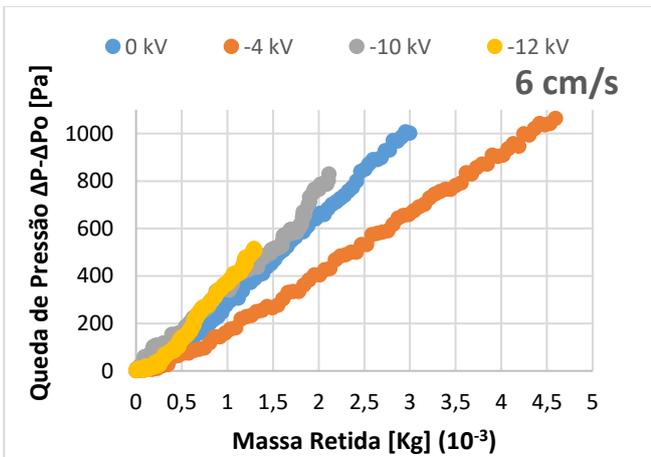
(c)



(d)



(e)



Nas Figuras 4.23 (e) e (f) verifica-se que as curvas de filtração apresentaram comportamento bem diferente em relação à velocidade superficial, apresentado uma filtração de profundidade mais evidente para a velocidade superficial de 10 cm/s, para todas as tensões aplicadas, sem e com o efeito corona. Já para a velocidade superficial de 6 cm/s a filtração de profundidade foi mais tênue, sendo um pouco mais evidente quando a tensão de -12 kV foi aplicada.

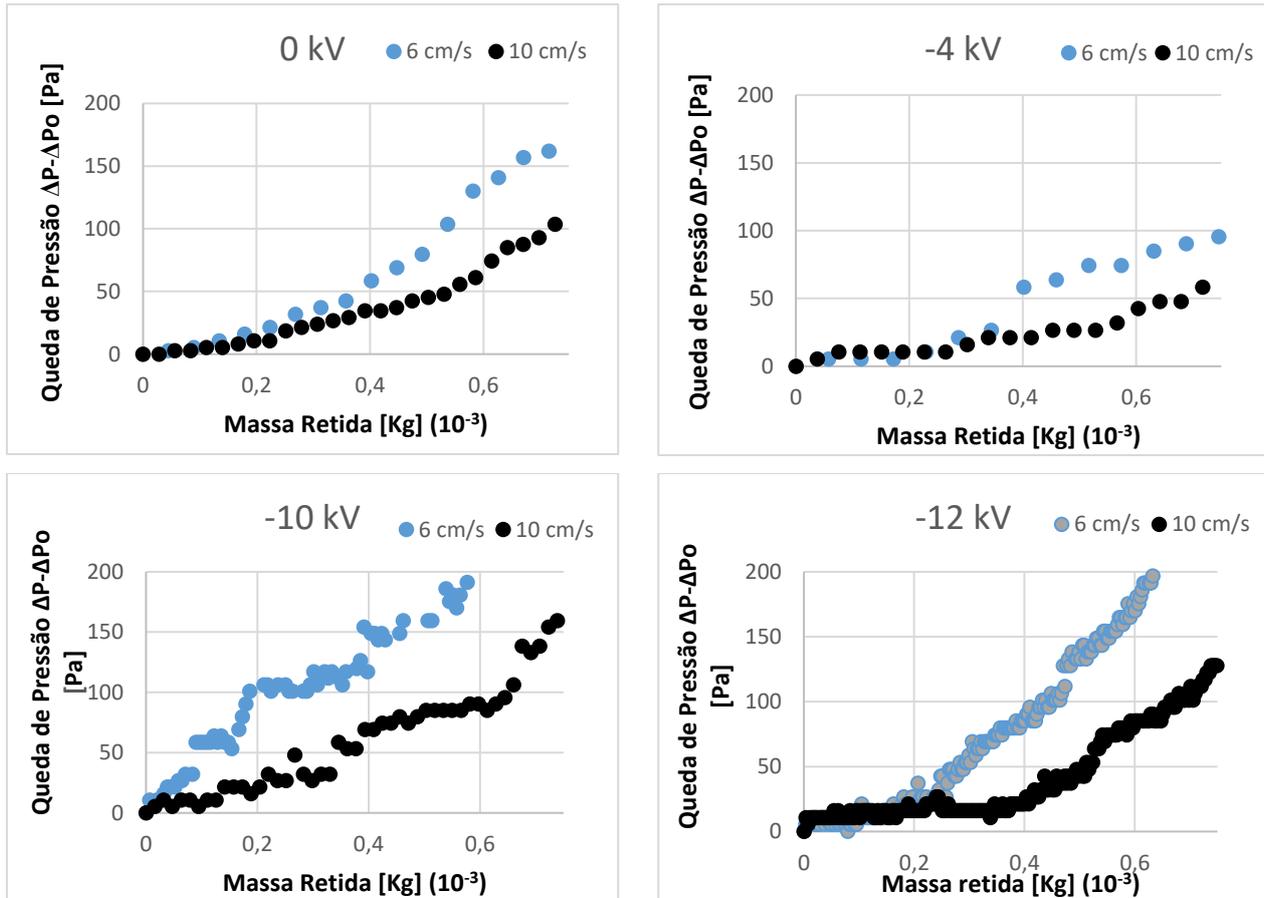
Esse comportamento pode ser melhor averiguado na Figura 4.24(a-d), que apresenta as mesmas curvas de filtração expostas na Figura 4.23(a-d) porém no início da filtração, limitando-se a queda de pressão máxima a 200 Pa e massa retida de  $0,75 \cdot 10^{-3}$  Kg. Nestas figuras verifica-se com maior clareza a influência da velocidade superficial de filtração no início da formação da torta de filtração. Para a velocidade de 10 cm/s a filtração de profundidade foi obtida para todas as condições analisadas, sem e com tensões aplicadas nas partículas, sendo um pouco menos evidente para a carga de -10kV. Para a velocidade superficial de 6,0 cm/s verificam-se também curvas com comportamento da filtração de profundidade, com exceção quando a carga de -10 kV foi aplicada, nesse caso a filtração apresentou um desempenho típico de filtração de superfície. Este comportamento pode estar relacionado ao fato que, para velocidades maiores a força com que as partículas se depositam entre as fibras é maior devido ao arraste destas partículas, já para curva de menor velocidade isto não ocorre com a mesma intensidade, facilitando a deposição das partículas na superfície das fibras.

Verifica-se também na Figura 4.24(a-d) que bem no início da filtração, até a massa de pó coletada no meio filtrante alcançar o valor de aproximadamente  $0,25 \cdot 10^{-3}$  Kg, a queda de pressão aumentou sutilmente, apresentando praticamente os mesmos valores (curvas sobrepondo-se), para as duas velocidades investigadas, com exceção para a carga aplicada de -10 kV, praticamente desde o início da filtração a queda de pressão para a velocidade superficial de 6,0 cm/s foi sempre maior do que para a velocidade superficial de 10cm/s. A medida que a massa de pó coletada no meio filtrante foi aumentando a queda de pressão para a velocidade superficial de 6,0 cm/s foi aumentado em maior proporção.

O diâmetro das partículas foi modificado para as tensões maiores de -10 e -12 kV devido ao uso do precipitador eletrostático, portanto as partículas que chegaram ao filtro de tecido obtiveram um diâmetro mediano menor, os valores estão apresentados na Tabela 4.10.

Para a curva sem carga eletrostática e com tensão de -4 kV a formação da torta ocorreu com diâmetros de partículas maiores.

Figura 4. 24 - Gráficos de queda de pressão por tempo com ampliação da filtração inicial para velocidades de filtração diferentes 6 cm/s e 10 cm/s: (a) para 0 kV; (b) para -4 kV; (c) para -10 kV; (d) para -12 kV.



A concentração de material particulado que chegava ao filtro de tecido também se alterou, a quantidade de massa retida obtida para as cargas de 0 e -4 kV foi maior do que a massa retida obtida para as curvas de -10 e -12 kV. Devido a diferença de tensões aplicadas para cada curva o carregamento das partículas conseguiu alterar o resultado no final da filtração para cada tensão aplicada.

Portanto, analisando a Figura 4.24(a-d), no início da filtração, a trajetória das partículas no escoamento altera com a variação da velocidade superficial de filtração e com a aplicação da carga eletrostática após um determinado instante de tempo e quantidade de massa coletada no meio filtrante e depois segue uma trajetória linear com o tempo de filtração podendo alterar novamente dependendo da quantidade de massa coletada.

A Tabela 4.10 apresenta os dados de tensão, queda de pressão, tempo, massa retida no meio filtrante e resistência específica da torta (K2), obtidos utilizando os dados apresentados na Figura 4.23 (a-e).

Para o teste de 0kV o precipitador eletrostático não reteve partículas nas placas de cobre, portanto a quantidade de material particulado que chegou no filtro foi maior. No entanto, para as condições de tensões de -4kV, -10kV e -12kV foram coletadas uma maior quantidade de partículas no precipitador eletrostático, chegando ao filtro de tecido uma quantidade de partículas bem menor para curva de -12 kV, de 3 vezes menos partículas que a curva referência de 0 kV, para as duas velocidades estudadas (veja Tabela 4.10).

A variação dos resultados apresentada na Tabela 4.10 foi atribuída exclusivamente ao tempo de residência das partículas dentro do precipitador eletrostático. Estudos anteriores (ZHUANG ET AL. (2000); MORAWSKA ET AL. (2002); HUANG E CHEN (2002); YANG ET AL. (2018)) demonstraram a influência do tempo de residência das partículas em precipitadores eletrostáticos e concluíram que o tempo em que a partícula atravessa o precipitador eletrostático é muito importante para a eficiência de coleta das partículas.

Nas condições experimentais do presente trabalho, é possível que o tempo de residência das partículas para a velocidade de 6 cm/s tenha sido suficiente para que as partículas fossem carregadas e coletadas pelas placas, ocasionando a alteração dos resultados.

**Tabela 4. 10 - Parâmetros dos ensaios com diferentes velocidades 6 cm/s e 10 cm/s.**

VELOCIDADE cm/s	Tensão (kV)	Queda de Pressão máxima (Pa)	Tempo (s)	Massa Retida ( $10^{-3}$ Kg)	K2 ( $10^3$ ) ( $s^{-1}$ )	Diâmetro na superfície da torta ( $\mu\text{m}$ )	Porosidade de Ergun
<b>6</b>	0	1001	405	3,65	99,2	11,72	0,59
	-4	1041	400	4,59	65,8	9,73	0,75
	-10	829	1645	2,11	88,7	6,81	0,70
	-12	510	2045	1,3	154,5	4,27	0,65
<b>10</b>	0	998	450	2,52	168,7	20,98	0,42
	-4	1009	410	3,17	105,8	5,50	0,40
	-10	653	510	2,31	75,3	4,45	0,62
	-12	345	1485	1,08	128,7	2,98	0,51

A velocidade de filtração interferiu diretamente nos valores de queda de pressão por tempo. A partir da Tabela 4.10, pode se notar que, à medida que se aumentou a tensão aplicada nas partículas a queda de pressão diminuiu, juntamente com a massa retida. As maiores massas retidas foram obtidas para carga aplicada de -4 kV, para as duas velocidades estudadas, com valor de  $4,59 \cdot 10^{-3}$  Kg e  $3,17 \cdot 10^{-3}$  Kg. E as menores massas retidas, devido ao uso do precipitador eletrostático foram para carga aplicada de -12 kV com  $1,3 \cdot 10^{-3}$  Kg e  $1,08 \cdot 10^{-3}$  Kg para -10 kV e -12 kV, respectivamente.

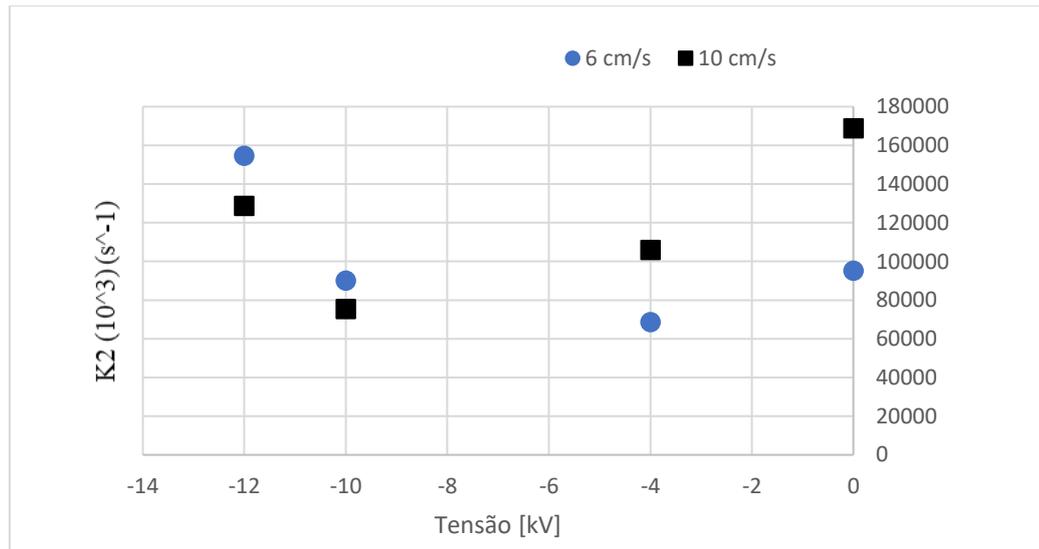
A resistência específica da torta, diminuiu para a maioria dos testes exceto para carga de -12 kV, com uma velocidade de 6 cm/s que teve sua massa retida aumentada.

Os testes de velocidade foram importantes, pois com estes dados pode-se verificar a influência da velocidade de filtração na formação da torta. Assim conseguiu-se obter resultados, sobre os parâmetros da velocidade de filtração com o carregamento eletrostático e o efeito corona na filtração. Obteve-se com o carregamento das partículas o menor valor de resistência específica da torta para carga aplicada de -4 kV e velocidade superficial de 6 cm/s, para velocidade de 10 cm/s e a carga aplicada de -10 kV a menor resistência específica da torta foi menor. Pode-se notar que, as perdas com a alteração destes parâmetros são maiores que os

ganhos com o aumento do tempo de filtração, como por exemplo o aumento da resistência específica da torta para carga de -12 kV (vide Figura 4.23) e velocidade superficial de 6 cm/s.

De acordo com a Tabela 4.10 foi plotado o gráfico de resistência específica da torta por voltagem aplicada nas partículas, como mostra a Figura 4.25.

Figura 4. 25– Resistência específica da torta por tensão, para velocidades de filtração de 6 cm/s e 10 cm/s.



A Figura 4.25 demonstra que, com o aumento da velocidade superficial de filtração de 6 cm/s para 10 cm/s, os valores da resistência específica da torta alteraram, sendo que para 0 kV a resistência específica da torta ( $k_2$ ) aumentou 70%, o mesmo ocorreu quando as partículas foram submetidas a uma carga de -4 kV agora com um aumento de aproximadamente 60,1%. No entanto, quando as partículas passaram pelo o precipitador com as tensões de -10 e -12 kV, com o efeito conona atuante, o valor de  $k_2$  diminuiu de 15% e 17%, respectivamente. Esta diferença é devido a quantidade de partículas que chegaram no meio filtrante, porque com as tensões de -10 e -12 kV a quantidade de partículas que sai do precipitador foi consideravelmente inferior ao das tensões de 0 e -4 kV, por isso ocorreu esta diferença nos valores de  $k_2$ .

O tempo de residência das partículas dentro do precipitador eletrostático também foi modificado à medida que se alterou a velocidade superficial de filtração. Pode-se observar que, para a velocidade superficial de filtração de 6 cm/s e sem e com tensão aplicada nas

partículas no precipitador abaixo do efeito corona, o tempo de residência das partículas no precipitador foi maior, no entanto as tensões eram zero ou menores, as partículas que saíram do precipitador estavam sem o carregamento ou carregadas com menor intensidade e conseqüentemente a resistência específica da torta diminuiu comparando com os valores de  $k_2$  obtidos para a velocidade superficial de 10 cm/s, como era o esperado, devido a menor força aplicada no meio filtrante e na torta, formando tortas de filtração mais porosas, mesmo com as massas de pó coletadas no meio filtrante sendo maiores.

Porém, para as curvas de filtração com 6 cm/s e tensões aplicadas acima do efeito corona (-10 e -12 kV), a resistência específica da torta aumentou quando comparadas com a velocidade superficial de 10 cm/s. Nesse caso, o efeito das cargas elétricas pode ter alterado o comportamento da formação da torta, mas também deve ser considerado a quantidade de massa coletada no meio filtrante. Nesse caso, o tempo de residência no precipitador foi menor para a velocidade superficial de 10 cm/s, no entanto as cargas aplicadas nas partículas eram maiores.

Verifica-se na Tabela 10, que para a carga aplicada de -12 kV e velocidade superficial de 10 cm/s a quantidade de partículas no meio filtrante foi menor comparado com a velocidade superficial de 6 cm/s, nesse caso mesmo diminuindo a o tempo de residência com a maior velocidade a tensão aplicada foi suficiente para aumentar a eficiência do precipitador deixando passar uma quantidade menor de massa de pó com partículas mais finas (2,98  $\mu\text{m}$ ). Entretanto, devido ao tamanho menor das partículas, isso aumenta a penetração das partículas no meio filtrante, prolongando a filtração de profundidade, preenchendo os poros de partículas até que a primeira camada de pó no meio filtrante seja formada, e a filtração de superfície se inicie (deposição partícula-partícula), mudando a inclinação da curva de filtração, que se torna mais íngreme, nesse ponto a queda de pressão começa a aumentar mais rapidamente. Com os poros do meio filtrante mais fechados aumenta a resistência ao escoamento do ar e a torta de filtração vai se tornando mais compactada, com menor porosidade (veja Tabela 4.10).

Jaworek et al., (2019) também observou, quando analisou um precipitador eletrostático híbrido, que o material particulado fino que chega nos meios filtrantes pode-se rearranjar de uma maneira mais compactada aumentando a resistência do ar ao passar pelo filtro. Toda via, alguns pesquisadores com Tu (2016-2018) e Lamb e Constanza (1980)

relataram que este comportamento pode se tornar um benefício ao processo, porque pode facilitar a limpeza dos meios filtrantes durante os ciclos de filtração e limpeza.

Quando a tensão de -10kV foi utilizada para a velocidade de 10 cm/s, o tempo de residência no precipitador para carregar as partículas não foi completamente suficiente, modificando o desempenho do precipitador, tornando-o menos eficiente comparado com a tensão de -12 kV, para a mesma velocidade superficial. Nestas condições, uma maior quantidade de partículas, não tão finas (4,45  $\mu\text{m}$ ) como nas condições anteriores (-12kV e 10 cm/s) saiu do precipitador. Deve-se ressaltar aqui que a quantidade de massa que saiu do precipitador, para a carga aplicada de -10 kV e velocidade de 10 cm/s, também foi maior quando a mesma carga foi aplicada para velocidades menores (6 cm/s), nesse caso o tempo de residência das partículas no precipitador, que foi um pouco maior, foi mais eficiente na coleta das partículas, porém as partículas que saíram do precipitador foram maiores (6,81 $\mu\text{m}$ ), tornando a filtração com características mais visíveis de filtração de superfície (Figura 4.23 (c)) quando comparado com a mesma carga aplicada e velocidade maior (10 cm/s), em que se observa uma maior penetração de partículas no meio filtrante, devido ao menor tamanho de partículas e a maior força aplicada.

Analisando a tabela 4.10 pode-se dizer que, para os ensaios com velocidade superficial de 6 cm/s o melhor carga aplicada foi de -4 kV, mesmo sendo abaixo do efeito corona obteve uma alta retenção de material particulado, a maior porosidade encontrada e a menor resistência específica da torta, analisando o custo benefício para o processo, esta carga seria a mais viável para utilização. Já para velocidade superficial de 10 cm/s a melhor carga encontrada foi de -10 kV, com o efeito corona atuante, obteve uma boa retenção do material particulado, a maior porosidade da torta e menor resistência específica da torta, estes parâmetros foram suficientes para concluir que -10 kV é uma carga ótima para esta operação, visando o custo benefício da empresa, onde pode-se prolongar a vida útil das mangas diminuindo os gastos com manutenção.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os testes realizados e as discussões dos resultados permitiram concluir que, para as condições experimentais estudadas, a utilização do carregador eletrostático juntamente com o filtro de mangas, obteve um resultado positivo na filtração de gases, como também na quantidade de massa retida do material particulado no meio filtrante e na redução da taxa de queda de pressão.

Para analisar o comportamento do filtro híbrido na filtração de gases, o precipitador eletrostático foi testado em duas performances:

- Com a tensão abaixo do efeito corona: onde foi possível ionizar as partículas e observar o efeito do carregamento das partículas de cimento na formação da torta, obteve-se bons resultados como a diminuição da queda de pressão e o aumento da porosidade da torta, para as curvas de -1 kV e -4 kV estes resultados foram mais relevantes, fazendo com que o material particulado retido no processo também aumentasse.
- Com tensões acima do efeito corona: foi possível alcançar o efeito corona nos testes com tensões de -10 e -12kV, diminuiu-se a penetração das partículas no meio filtrante, mantendo a queda de pressão constante por um período maior de tempo, isso pode facilitar a operação de limpeza das mangas reduzindo os custos com manutenção.

Utilizando as técnicas de análises de imagens pelo MEV, conseguiu-se fundamentar os resultados. Foi possível observar a mudança no comportamento das partículas ao se depositarem no interior do filtro, durante a formação da torta de filtração, demonstrando que, a descarga eletrostática melhora o processo de filtração tornando-o mais eficiente, obtendo uma torta de filtração mais porosa quando comparada com a de filtração sem a carga eletrostática aplicada nas partículas.

Avaliando a falta de correlação entre o diâmetro da partícula e a penetração das mesmas no tecido, este trabalho demonstrou resultados concretos, onde foi possível comprovar que o carregamento eletrostático das partículas durante a filtração de gases é mais eficiente que a filtração de gases convencional, visto que, conseguiu-se reter as partículas maiores deixando somente as partículas menores chegarem ao tecido, e por sua vez, estas partículas quando carregadas eletrostaticamente alteram sua deposição nas fibras dos meios filtrantes, diminuindo a penetração podendo levar a uma limpeza dos filtros de mangas, mais eficientes.

Com os resultados do presente trabalho, foi possível provar que a utilização de dois equipamentos de filtração de gases em paralelo (filtro híbrido) é mais eficiente que a filtração convencional. Trazendo muitos benefícios para o processo, como prolongar o ciclo de filtração, mantendo o sistema funcionando por um período maior, isto pode gerar um excelente ganho no custo benefício do processo.

A variação da velocidade de filtração do sistema, demonstrou que, este parâmetro afeta diretamente os resultados dos experimentos, aumentando a queda de pressão para as curvas com efeito corona atuante (-10 e -12 kV), como também aumenta o tempo de filtração. De acordo com os resultados apresentados, para as velocidades superficiais estudadas, uma condição experimental ótima foi obtida com a carga de -4 kV (- 2 kV/cm) para a velocidade de 6 cm/s, e para a velocidade superficial de 10 cm/s a carga ótima encontrada foi de -10 kV (- 5kV/cm).

## 6. SUGESTÕES

Para os estudos com filtros híbridos, visto que se trata de um estudo de caráter exploratório e cujos resultados deste trabalho obtiveram aspectos relevantes, há a possibilidade de uma série de novos estudos: como o estudo do ciclo de limpeza dos meios filtrantes, analisando a eficiência de limpeza com a utilização dos filtros híbridos; estudar a eficiência de filtração utilizando um contador de partículas e um filtro absoluto; estudar a penetração das partículas carregadas em diferentes meios filtrantes; avaliar as forças eletrostáticas aplicadas nas partículas devido ao efeito corona e as forças adesivas nos aglomerados de partículas; avaliar as forças de adesão das partículas nos filtros com o carregamento eletrostático nas partículas.

## 7. REFERÊNCIAS

ADAMIÁK, K.; ATTEN, P. **Numerical simulation of the 2-D gas flow modified by the action of charged fine particles in a single-wire ESP**, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 16 (3) (2009) 608–614.

ADAMIÁK, K. **Numerical models in simulating wire-plate electrostatic precipitators: a review**, J. Electrostat. 71 (2013) 673–680, <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2013.03.001>.

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 Chemical Engineering Research 35, 3673-3679, 1996.

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

ALONSO, M.; ALGUACIL, F.J. **Electrostatic precipitation of ultrafine particles enhanced by simultaneous diffusional deposition on wire screens**, J. Air Waste Manage. Assoc. 52 (2002) 1342–1347.

AZEVEDO, S. G. R. **Estudo da influência do formato das partículas na operação de filtração de gases**. Dissertação de mestrado em engenharia química. Universidade Federal de São Carlos, 2009.

BARROS P.M.; AGUIAR M. L. **Characterization and efficiency evaluation of regenerated filter media**. **Materials Science Forum** (online) 727-728, 1643-1647, 2012. Doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.727-728.1643

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

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

BILLINGS, C.E.; WILDER, J. **Handbook of fabric filter technology – Fabric filter system study**. Vol I. GCA Corporation, Bedford, Massachusetts, Dec, 1970.

A.C.C.BORTOLASSI; V.G.GUERRA; M.L.AGUIAR **Characterization and evaluate the efficiency of different filter media in removing nanoparticles**. Separation and Purification Technology Vol. 175 (2017), pp 79-86.

BOSKOVIC, L.; ALTMAN IS, AGRANOVSKI, I.E, ET AL. **Influence of particle shape on filtration processes**. Aerosol Sci Technol 39:11 84-90, 2005.

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, 271-294, 1988.

BROWN, R.C. AND WAKE, D. **Loading filters with monodisperse aerosols: macroscopic treatment**. Journal of Aerosol Science, v.30, n. 02, p. 227-234, 1999.

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

CARVALHO, M.V.A. **Avaliação de meios filtrantes para filtro de mangas com sistema de limpeza de jato de ar pulsante do processo de despoeiramento secundário da aciaria de uma indústria siderúrgica**. Dissertação de mestrado em engenharia química. Universidade Federal de São Carlos, 2018.

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

CERDA, E. E. **Estudo do perfil de concentração em um precipitador eletrostático do tipo placa-fio**. Universidade Federal de São Carlos Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, 2004.

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.

CHENG, Y. TSAI, C. **Factors influencing pressure drop through a dust cake during filtration**. Aerosol Science and Technology, 29:4, 315-328, 1998.

CHEREMESINOFF, 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.

COURYJ. R. **Electrostatic effects in granular bed filtration of gases**. Phd thesis, University of Cambridge, 1983.

CROWE, C. T. et al. **Multiphase flows with droplets and particles**. Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.

DAVIS, W.T.; KIM, G.D. **Effect of prefilters on the performance of HEPA filter**. Filtration and Separation, p. 51-56, 1999.

DENNIS, R. WILDER, J.E. HARMON, D.L. **Predicting pressure loss for pulse jet filter**. Journal of the air pollution control association, v. 31. N. 9, p. 987-992, 1981.

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

DUARTE FILHO, O. B. KACHAN, G. C., COURRY, J. R. **Granular bed filtration of solid particles electrified by impact**. PARTEC, Alemanha. 1995.

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

EMI, H. **Fundamentals of particle separation and air filters**, J. Aerosol Sci. 22 (Suppl. 1) (1991) 727–730.

FALAGUASTA, M. C. R. **Estudo do desempenho de um precipitador eletrostático operando na captura de partículas submicrométricas e nanométricas**. 2005. 305 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

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.

FENG Z.; LONGA Z.; YUB T. Filtration characteristics of fibrous filter following an electrostatic precipitator. **Journal of Electrostatic** 83 52-62, 2016.

Z. FENG, W. PAN, H. ZHANG, X. CHENG, Z. LONG, J. MO. **Evaluation of the performance of an electrostatic enhanced air filter (EEAF) by a numerical method**. Powder Technology 327 (2018) 201–214.

FREDERICK. E. R. Some Effects of Electrostatic Charges In Fabric Filtration. **Journal of the Air Pollution Control Association**, 24:12, 1164-1168 1974. DOI: 10.1080/00022470.1974.10470030

FUCHS, N.A. **The mechanics of Aerosol** Pergamon Press, 1064.

G. TU; Q. SONG, Q YAO. Relationship between particle charge and electrostatic enhancement of filter performance. **Powder technology** 301, 665-673, 2016.

G. TU, Q. SONG, Q. YAO, **Experimental and numerical study of particle deposition on perforated plates in a hybrid electrostatic filter precipitator**, Powder Technol. 321 (2017) 143–153, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.08.021>.

G. TU ; Q. SONG, Q YAO, Mechanism study of electrostatic precipitation in a compact hybrid particulate collector Original Research Article **Powder Technology**, Volume 328, 1, pages 84-94, April 2018.

GIVEHCHI R.; LI Q.; TAN Z.; The effect of electrostatic forces on filtration efficiency of granular filters. **Powder Technology** 277, 135-140, 2015. Doi: 10.1016/j.powtec.2015.01.074J. U.

GILLESPIE, T. **Electric charge effects in aerosol particle collision phenomena**, Int. J. Air Pollut. 3 (1-3) (1960) 44–49.

GOUVEIA, R. F. et al. **Eletrização de dielétricos: novas propostas para resolver velhos problemas**. Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, Brasil Quim. Nova, Vol. 33, No. 10, 2103-2107, 2010.

GRAEF, A.; STENHOUSE, J.T.I.; WALSH D.C. **The effect of solid aerosol on prefilter material performance**. Journal of Aerosol Science, v. 26, suppl 01, p. S741-S742, 1995.

GUTIERREZ-ORTIZ, F.J.; NAVARRETE, B.; CAÑADAS, SALVADOR, L. **A technical assessment of a particle hybrid collector in a pilot plant**, Chem. Eng. J. 127 (2007) 131–142.

HANZ, W. WONG, J. **Ind. gm**, v 44, p. 1371, 1952.

HAWKINS, A.E. **Principles of powder technology** (M.J. Rhodes, ed) Wiley, Chichester.

HENRY, R.F. PODOLSKI, W.F. SAXENA, S.C. **A review of electrostatically augmented gas cleaning devices for particulate removal**, IEEE Trans. Ind. Appl. 21 (4) (1985) 939–949.

HELFRITCH, D.J. **Performance of an electrostatically aided fabric filter**, Chem. Eng. Prog. 73 (8) (1977) 54–57.

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

**Hitachi sistemas de infraestrutura**, [www.hitachi-infra.com.sg/services/energy/bagfilter/system/electrostatic.html](http://www.hitachi-infra.com.sg/services/energy/bagfilter/system/electrostatic.html)) acesso em 15/06/2015 as 17:30 p.m.

HUANG, S.H. CHEN, C.C., Ultrafine aerosol penetration through electrostatic precipitators, Environ. Sci. Technol. 36 (21) (2002) 4625–4632

HUANG, B. YAO, Q. LI, S.-Q. ZHAO, H.-L. SONG, Q. YU, C.-F. **Experimental investigation on the particle capture by a single fiber using microscopic image technique**, Powder Technol. 163 (2006) 125–133, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.01.014>

HUGHES, J.F. **Electrostatic particle charging industrial and health care applications**. Jonh Wiley and sons, Nova York, 1997.

C. HUNG, W.W. LEUNG. **Filtration of nano-aerosol using nanofiber filter under low Peclet number and transitional flow regime**. Sep. Purif. Technol., 79 (2011), pp. 34-42

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 Bullrin, November, 1999.

INNOCENTINI M. D M. ; TANABE E.; AGUIAR M. L.; COURY J. R. Filtration of gases at high pressures: Permeation behavior of fiber based media used for natural gas cleaning. **Chemical Engineering Science**, vol. 74, 38-48 2012. DOI: [doi.org/10.1016/j.ces.2012.01.050](https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.01.050)

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

JAPUNTICH, D. A.; STENHOUSE, J. I. T.; LIU, B. Y. H. **Experimental results of solids monodisperse particle clogging of fibrous filters.** Journal of aerosol Science, v.25, n. 02, pp. 385-393, 1994.

JAWOREK, A.; KRUPA, A.; CZECH, T. **Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: a brief review,** J. Electrostat. 65 (3) (2007) 133–155, <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2006.07.012>.

JAWOREK, A.; KRUPA, A.; CZECH, T. A.T. SOBCZYKA, , A. MARCHEWICZA, L. ŚLIWIŃSKI. **Hybrid electrostatic filtration systems for fly ash particles emission control. Areview,** Separation and Purification Technology, 213 283-302, 2019.

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

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** 34, 1493-1504, 2003. Doi: 10.1016/S0021-8501(03)00103-4

KANAOKA, C.; HIRAGI. S. **Pressure drop of air filter with dust load.** Journal of Aerosol Science. V. 21, n. 1, p. 127-137, 1990.

KANAOKA, C.; MAO, N.; OTANI, Y.; YAO, Y. Modeling the filtration process with a flat-type fabric filter.Original paper. **AdvancedPowderTechnol.**, vol. 17, n° 3, p. 237 – 256, 2006.

KARMAKAR, M.KR. PRABHANSU, P. CHANDRA, P.KR. CHATTERJEE, **A review on the fuel gas cleaning technologies in gasification process,** J. Environ. Chem. Eng. 3 (2015) 689–702, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.02.011>.

KIM, S. SIOUTAS, C. CHANG, M. **Electrostatic enhancement of the collection efficiency of stainless steel fiber filters,** Aerosol Sci. Technol. 32 (3) (2000) 197-213.

KIM, Y.S. LEE, J.B. HWANG, J. PARK, K.S. **An experimental study of electrical agglomeration of fine particles in an alternating electric field**, 7th Int. Conf. Electrostatic Precipitation. 20-25 Sept., Kyongju, Korea, 1998, pp. 179-187.

KOCH, D.; SEVILLE, J.; CLIFT, R. **Dust cake detachment from gas filters**, Powder Technology. N.86, p.21-29, 1996.

KRIGMONT, H.V.; MUZIO, L.J.; SMITH, R.A. **Multi-stage collector (MSC(TM)) proof-of-concept pilot design and evaluation**, 9th International Conference on Electrostatic Precipitation, Pretoria, South Africa, 17-21 May, 2004, (2006).

KYUNG J. C. **Morfologia e Eficiência de Filtragem de Ar por Materiais Não Trançados Carregados**. Presented at 18th ICCCS - International Symposium on Contamination Control, 2008.

KWETKUS, B.A. **Particle precharging and fabric filtration – experimental results of a corona precharger**, J. Electrostat. 41-42 (1997) 657-662.

LAMB, G.E.R. ; CONSTANZA, P.A. ; O'MEARA, D.J. **Electrical stimulation of fabric filtration. Part II. Mechanism of particle capture and trials with a laboratory** 213 (2019) 283-302 baghouse, Text. Res. J. 10 (10) (1978) 566-573.

LAMB, G.E.; CONSTANZA, P.A. **A low energy electrified filter system**, Filtr. Sep. 17 (1980) 319-322.

LEE, K. W.; LIU, B. Y. H. **Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters**. Aerosol Science and technology, v. 1, 147-166, 1982. <http://dx.doi.org/10.1080/02786828208958584>

LEITH D.; R. W. K. ALLEN, **Dust filtration by fabric filters**. Progress in Filtration and Separation 4, 1-55, 1986.

LIMA, B. **Análise do desempenho de meios filtrantes na filtração de nanopartículas durante o aumento de sua queda de pressão**. Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos BR, 2019.

LIU W.; BAULE S. LI, A.; MAKSE H.A., **Adhesive loose packings of small dry particles**, Soft Matter 11 (32) (2015) 6492-6498.

LUCAS, R.D. **Influência das variáveis operacionais e do tipo de material pulverulento na formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos**. Dissertação de mestrado em engenharia química. Universidade Federal de São Carlos, 2000.

B. A. MAHER, IMAD A. M. AHMED, VASSIL KARLOUKOVSKI, DONALD A. MACLAREN, PENELOPE G. FOULDS, DAVID ALLSOP, DAVID M. A. MANN, RICARDO TORRES-JARDÓN, AND LILIAN CALDERON-GARCIDUENAS. **Magnetite pollution nanoparticles in the human brain**. PNAS September 27, 2016 113 (39) 10797-10801; <https://doi.org/10.1073/pnas.1605941113>

MARQUES, G. Z.R, **Estudo do efeito eletrostático em filtros de mangas para aplicação na indústria siderúrgica**. Trabalho de conclusão de curso Engenharia Química. UFSCar, São Carlos, 2017.

MAUSCHITZ, G; KOSCHUTNIG, W; HOFLINGER, W. **Analysis of the clogging behavior of thermally finished nonwoven dust filter media by optically detected porosity parameters**. Anais, V. II, p II-20-II-28, FILTECH, 2005.

MATESON, M. J.; ORR, C. **Filtration: principles and practices**. 2<sup>a</sup> 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.

MERMELSTEIN, J. KIM, S. SIOUTAS, C. **Electrostatically enhanced stainless steel filters: effect of filter structure and pore size on particle removal**, Aerosol Sci. Technol. 36 (1) (2002) 62–75.

MCCAIN, J.D.; GOOCH, J.P.; Smith, W.B. **Results of field measurements of industrial particulate sources and electrostatic precipitator performance**, J. Air Pollut. Contr. Assoc. 25 (2) (1975) 117–121.

NI, M. ; YANG, G.; WANG, S. ; WANG, X.; XIAO, G.; ZHENG, C. ; GAO, X.; LUO, Z. ; CEN, K. **Experimental investigation on the characteristics of ash layers in a high-temperature wire-cylinder electrostatic precipitator**, Sep. Purif. Technol. 159 (2016). 135–146, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.01.011>.

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.

OAK, M.J. ; SAVILLE, D.A. **The buildup dendrite structures on fibers in the presence of strong electrostatic fields**, J. Colloid Interface Sci. 76 (1) (1980) 259–262.

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

OLIVEIRA F. M. ; CIRQUEIRA S. S. R; AGUIAR M. L. **Effect of electrostatic charging in filtration of cement particles using bag filters**. Proceedings, FILTECH, February 24-26 2015, Cologne, Germany.

- OLIVEIRA, Q. E. **Precipitação eletrostática de nanopartículas: desenvolvimento de metodologias e investigações de fenômenos.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2019.
- PASTORE, O. A. **A influência da temperatura na eficiência de filtros com carga eletrostática usados na proteção respiratória.** Dissertação de Mestrado 2009.
- PAYATAKES, A.C. **Model of transient aerosol particles deposition in fibrous media with dendritic pattern.** AIChE Journal, v.23, n.2, 1977.
- PENNEY, G.W. **Using electrostatic forces to reduce pressure drop in fabric filters,** Powder Technol. 18 (1977) 111–116.
- G.W. Penney, J.G. Uber, **Movement of dust between electrodes in an electrostatically augmented fabric filter,** IEEE Trans. Ind. Appl. 21 (2) (1985) 523–526.
- PEUKERT, W.; WADENPOHL, C. **Industrial separation of fine particles with difficult dust properties,** Powder Technol. 118 (1–2) (2001) 136–148.
- PURCHAS, D.B. **Handbook of filter media.** 2 ed. Kidlington Elsevier science & technology books, 2002.
- 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.
- REMBOR, H. J.; KASPER, G. **Fibrous filter – measurements of spacial distribution of deposited particle mass, pressure drop and filtration efficiency.** III World Congress on Particle Technology, 1996.
- ROCHA S. M. S.; BACELOS M. S.; DAMASCENO J. J. R.; VIEIRA L. G. M.; AGUIAR M. L. **The effect of the dust cake resistance on fluid flow passing through the filter media.** **Materials Science Forum** (online) 727-728, 758-763, 2012. Doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.727-728.758
- RODRIGUES M.V.; BARROZO M.A.S.; GONÇALVES J.A.S.; COURRY J.R. **Effect of particle electrostatic charge on aerosol filtration by a fibrous filter.** **Powder Technology** 313, 323–331, 2017.
- 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.
- 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.
- ROMAY, F. J. et al. **Experimental study of electrostatic capture mechanisms in commercial electret filters.** Aerosol Science and Technology, United States, v. 28, n. 3, p. 224-234, Jan. 1998.

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

Y. ROY, M. LEFSRUD, V. ORSAT, F. FILION, J. BOUCHARD, Q. NGUYEN, L.M. DION, A. GLOVER, E. MADADIAN, C.P. LEE, **Biomass combustion for greenhouse carbon dioxide enrichment,** Biomass Bioenergy 66 (2014) 186–196, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.001>.

SCHMIDT E.; LÖFFLER F. Preparation of dust cakes for microscopic examination, **Powder Technology** 60, 173-177, 1990. Doi: 10.1016/0032-5910(90)80141-K

SEVILLE, J.P.K.; DUO, W.; KIRKBY, N. F.; BUNCHELE, H.; CHEUNG, C. K. **Pactchy cleaning of rigid gas filters.** Chemical engineering Science, v.52, n. 1, p. 153-164, 1997.

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.

SILVA, G.B., LUCAS, R.D., OLIVEIRA, W. P., AGUIAR, M. L. COURY, J. R. **Effect of parameters on cake formation and removal during gas-solid filtration in fabric filters.** XXVII ENEMP, p 135-142, 1999B.

SILVA NETO, O. G. S. **Desempenho de um filtro de manga operando na remoção de partículas de ar.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 1996.

SILVA NETO, O. G. S. **Estudo da porosidade de tortas de filtros de manga operando na filtração de gases.** Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos, 2002.

SHI, B. EKBERG, L. **Ionizer assisted air filtration for filtration of submicron and ultrafine particles-evaluation of long-term performance and influencing factors,** Environ. Sci. Technol. 49 (11) (2015) 6891–6898.

STOCKMAYER, CH., HOFLINGER W. **Simulation of the long-term behavior of referable dust filters.** Filtration and separation. V. 35, n. 04,p. 373-377, 1998a

SVAROVSKY, L. **Solid-Gas separation.** Elsevier scientific publishing company, Amsterdam oxford NY, 1981.

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

TANABE E. H; BARROS K. B.; RODRIGUES M. V.; AGUIAR M. L. Experimental investigation of deposition and removal of particles during gas filtration with various fabric filters. **Separation and Purification Technology** 80 (2), 187-195, 2011. Doi: 10.1016/j.seppur.2011.04.031

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

THOMAS, D.; PENICOT, P.; CONSTAL, P.; LECLERC, D.; VENDEL, J. **Clogging of**

**fibrous filter by solid aerosol particles. Experimental and modeling study.** Chemical Engineering Science, v.56, p. 3549-3561, 2001.

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

TURNER, J. H. et al. **Particulate Matter Controls.** Disponível em: Acesso em: 5 fev. 2019.

VOTORANTIM CIMENTO S.A. Disponível em : [www.votorantimcimentos.com.br](http://www.votorantimcimentos.com.br) acesso em 10/02/2019.

WAKEMAN, R. **The influence of particle properties on filtration.** Separation and purification technology. 58(2):234-241. Dec 2007.

WANG, Q. SONG, G. TU, H. WANG, Y. YUE, Q. YAO, **Influence of flue gas cleaning system on characteristics of PM2.5 emission from coal-fired power plants,** Int. J. Coal Sci. Technol. 1 (1) (2014) 4–12, <https://doi.org/10.1007/s40789-014-0001-x>.

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

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

WHITE, H. J. **Industrial electrostatic precipitation.** Reading: Addison-Wesley, 1963

WOODHEAD S. R.; ARMOUR-CHELU 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.

YANG M. M; LI S.Q.; LIU G.Q.; YAO Q. **Electrically-Enhanced Deposition of Fine Particles on a Fiber: A Numerical Study Using DEM,** AIP Conference Proceedings, Amer Inst Physics, Melville 2013, pp. 943–946.

Q. YAO, S.-Q. LI, H.-W. XU, J.-K. ZHUO, Q. SONG, **Studies on formation and control of combustion particulate matter in China: a review,** Energy 34 (2009) 1296–1309, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.03.013>.

Q. YAO, S. LI, Q. SONG, B. HUANG, H. XU, G. LIU, **Research progress of the control technology of the PM10 from combustion sources,** 11th International Conference on Electrostatic precipitation, 20-24 Oct. 2008, Hangzhou, China, 2008, pp. 201-205.

YLITUOMI, T.; STENHOUSE, J.I.T.; WALSH, D.C. **The effects of filter packing density on aerosol particle bounce.** Journal of Aerosol Science, v.26, Suppl.1 p.S917-S918, 1995.

J. ZHU, Q. ZHAO, Y. YAO, S. LUO, X. GOU, X. ZHANG, Y. ZENG, K. YAN, **Effects of highvoltage power sources on fine particle collection efficiency with an industrial electrostatic precipitator**, J. Electrostat. 70 (2012) 285–291, <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2012.03.009>.