

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

**DETERMINAÇÃO DA CARGA ELETROSTÁTICA EM
AEROSSÓIS E SEU EFEITO NA FILTRAÇÃO DE GASES**

Marcos Vinícius Rodrigues

São Carlos - SP

2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

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

**DETERMINAÇÃO DA CARGA ELETROSTÁTICA EM
AEROSSÓIS E SEU EFEITO NA FILTRAÇÃO DE GASES**

Marcos Vinícius Rodrigues

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

São Carlos - SP

2005

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

R696dc

Rodrigues, Marcos Vinícius.

Determinação da carga eletrostática em aerossóis e seu efeito na filtração de gases / Marcos Vinícius Rodrigues. -- São Carlos : UFSCar, 2005.

163 p.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2005.

1. Aerossóis. 2. Filtração. 3. Carga eletrostática em partículas. 4. Filtros fibrosos. I. Título.

CDD: 660.294515 (20^a)

À
Giselle e
aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ninguém foi ou será capaz de pesquisar ou até mesmo realizar qualquer trabalho ou atividade sem ajuda. As conquistas são alcançadas com muito trabalho, dedicação e sobretudo com auxílio daqueles que convivemos. São nessas horas que realmente nos damos conta da importância da nossa família, amigos e colegas. Desta forma agradeço:

Primeiramente a Deus a oportunidade de estar aqui, aprendendo mais a cada dia.

Ao Professor José Renato Coury, Zezão, pela orientação, confiança, incentivo e oportunidade de realizar este trabalho. Pelos ensinamentos e por ter me mostrado com seu exemplo lições pra toda vida.

A Giselle, pelo amor, paciência e companheirismo durante estes anos. Obrigado pelo incentivo e por estar sempre perto em todos os momentos.

Aos meus pais, José Marcos e Nilse o incentivo e por nunca terem medido esforços para me ajudar. Ao meu irmão, Bruno, por acreditar em mim.

Ao Nilson Sancinetti e Ângela o carinho e ajuda constante.

Ao técnico Oscar por estar sempre disponível para ajudar com os equipamentos, conexões e qualquer outra coisa necessária durante todo doutorado.

Ao Renato Gomes e Talita por me acolher em São Carlos.

Aos colegas que estiveram presentes a maior parte do tempo Carol, Ricardo, Edmundo, Juliana, Felicetti, Roger, Vádila e Lissandra.

Aos colegas de laboratório da velha guarda Angélica, Seleude, Edinalda e Normanda.

Aos amigos Leonardo e Jaqueline pela companhia e amizade.

Aos amigos Olímpio Gomes e Marcos Palhares pelos conselhos.

Aos alunos de iniciação científica, Marathaizes Rosana e Patrícia.

Ao Celso Boni e Celso Thomazi pela execução dos equipamentos projetados.

Ao Felipe, Fernando e Paulo da T&S Equipamentos Eletrônicos.

A família Constante, em especial ao Fábio, pela amizade e companhia.

Ao Dorival pelos desenhos.

A Duratex de Botucatu, Companhia Brasileira de Minérios e Minerais (CBMM) de Araxá e ao Shinobo da Fosfértil de Patos de Minas, o material cedido.

Gostaria, também, de agradecer o apoio financeiro e de infra-estrutura, à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, processo 01/03675-1, CNPq e ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	iv
Lista de tabelas	ix
Simbologia	x
Resumo	xiii
Abstract	xiv
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E DEFINIÇÕES FUNDAMENTAIS	4
2.1. Filtração de gases: conceitos gerais	4
2.2. Fundamentos básicos da filtração	4
2.3. Filtros	5
2.4. Eficiência do coletor, penetração e penetração global	6
2.5. Mecanismos de coleta	10
2.5.1. Mecanismo difusional	10
2.5.2. Mecanismo de interceptação direta	13
2.5.3. Mecanismo inercial	14
2.5.4. Mecanismo gravitacional	15
2.5.5. Mecanismo eletroforético	16
2.5.5.1. Forças “Coulombicas”	17
2.5.5.2. Forças de dipolo-imagem	18
2.6. Coleta simultânea por vários mecanismos	21
2.7. Queda de pressão no filtro	22
2.8. Mecanismo de carregamento por corrente corona	23
2.8.1. Ionização do gás	23
2.8.2. Carregamento elétrico das partículas	25
2.8.3. Intensidade do campo elétrico	27
2.9. Efeito de cargas eletrostática nos processos de limpeza de gases	27
2.10. Métodos para determinação de cargas eletrostáticas em partículas	32
2.10.1. Classificador de cargas eletrostáticas	35
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1. Materiais pulverulentos	40

3.1.1. Materiais pulverulentos utilizados antes da automação do CCE	40
3.1.2. Concentrado fosfático	41
3.2. Sistema de dispersão do aerossol	43
3.3. Sistema fornecedor de ar	45
3.4. Carregador de partículas tipo corona	45
3.5. Contador de partículas (APS)	46
3.5.1. Determinação dos diâmetros médios	48
3.6. Sistema de determinação do nível de cargas eletrostáticas em partículas	49
3.6.1. Classificador de cargas eletrostáticas (CCE)	49
3.6.2. Unidade de determinação do nível de cargas antes da automação	53
3.6.2.1. Metodologia experimental antes da automação	55
3.6.3. Automação do CCE	56
3.6.3.1 Sistema de sucção principal	58
3.6.3.2. Sistema de sucção da coleta isocinética	59
3.6.3.3 Sensores de velocidade	60
3.6.3.4 Sistema de varredura da sonda coletora	62
3.6.3.5. Metodologia experimental de determinação do nível de cargas após a automação	62
3.6.4. Tratamento dos dados	63
3.6.5. Determinação da posição inicial das partículas	63
3.6.6. Determinação do desvio sofrido pela partícula	64
3.6.7. Cálculo da carga da partícula	65
3.7. Sistema de filtração	65
3.7.1. Unidade de filtração	65
3.7.2. Suporte de filtração	65
3.7.3. Feltro de polipropileno	68
3.7.4. Equipamentos de medida	70
3.7.5. Procedimento experimental para a filtração	70
3.7.6. Condições experimentais	71

3.7.7. Determinação da penetração (P) e da massa total retida (MTR)	72
3.7.8. Determinação da porosidade do tecido de polipropileno	72
3.7.8.1. Metodologia para determinação da porosidade	72
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1. Testes de medida de carga com o CCE antes da automação	76
4.1.1. Sinal da carga medida para as diferentes suspensões	76
4.1.2. Nível de cargas	81
4.2. Testes de medida de carga com o CCE automatizado	87
4.3. Ajuste inicial do nível de carga das partículas induzido pelo carregador tipo corona	90
4.4. Determinação do nível de carga das partículas por carregamento corona	94
4.4.1. Testes de determinação da posição x_0 das partículas	95
4.4.2. Verificação da posição x_c das partículas carregadas	95
4.4.3. Nível de carga das partículas induzido por carregamento corona	97
4.5. Determinação experimental da porosidade do feltro de polipropileno	99
4.6. Testes de filtração envolvendo a eletrização das partículas	100
4.6.1. Comparação entre os valores de penetração experimental e teórico para partículas com tensão corona de 0 kV	100
4.6.2. Determinação experimental da penetração inicial	103
4.6.3. Cálculo da penetração teórica considerando atuação do mecanismo eletroforético de dipolo-imagem para tensão corona 0 kV	108
4.6.4. Ajuste da equação para predição da penetração teórica.	110
4.6.5. Queda de pressão na filtração	114
5. CAPÍTULO 5	118
5.1. Conclusões	118
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
APÊNDICES	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mecanismos físicos de coleta	10
Figura 2.2 - O mecanismo eletroforético de dipolo-imagem	18
Figura 2.3 - Atuação dos mecanismos de coleta na eficiência de um único coletor em função do diâmetro de partícula (COURY, 1983)	21
Figura 2.4 - Esquema ilustrativo da descarga corona negativa	24
Figura 2.5 - Filtro eletrostático com um eletrodo de bloqueio	28
Figura 2.6 - Resultados obtidos por Coury (1983), para penetração inicial das partículas de cinza leve num leito de areia ($d_c = 325 \mu\text{m}$, comparada com a penetração previstas pelos mecanismos puramente mecânicos. ($U_0 = 0,122 \text{ m/s}$; $H = 0,01 \text{ m}$; $\epsilon = 0,41$)	32
Figura 2.7 - Esquema do classificador de cargas eletrostáticas (COURY, 1983)	35
Figura 2.8 - Deflexão de uma partícula carregada com carga Q submetida a um campo elétrico	36
Figura 3.1 - Histograma do número de partículas de rocha fosfática em função do diâmetro aerodinâmico	43
Figura 3.2 - Imagem do concentrado fosfático obtida no MEV com ampliação de 3500 vezes	44
Figura 3.3 - Esquema do dispersor de pó TSI 3433	44
Figura 3.4 - Detalhe do carregador tipo corona (dimensões em cm)	46
Figura 3.5 - Vista esquemática do APS	47
Figura 3.6 - Vista expandida do classificador de cargas eletrostáticas	50
Figura 3.7 - Dimensões do classificador de cargas eletrostáticas	50
Figura 3.8 - Vista geral do classificador de cargas eletrostáticas	51
Figura 3.9 - Trajetória de uma partícula eletricamente neutra	52
Figura 3.10 - Detalhe da sonda isocinética piramidal	53
Figura 3.11 - Esquema do aparato experimental antes da automação	54
Figura 3.12 - Esquema da unidade de determinação do nível de cargas automatizada	57
Figura 3.13 - Vista geral do CCE após automação	58

Figura 3.14 – Esquema dos controladores de fluxo, motores de sucção e sistema de controle contendo a placa de aquisição de dados	59
Figura 3.15 - Sistema de sucção da sonda de coleta	60
Figura 3.16 - Sensores de velocidade no classificador	61
Figura 3.17 - Vista geral dos transdutores	61
Figura 3.18 - O sistema de varredura da sonda coletora	62
Figura 3.19 - Número de partículas em função da posição x – determinação de X	64
Figura 3.20 - Esquema da unidade de filtração	66
Figura 3.21 - Esquema do suporte de filtração	67
Figura 3.22 - Fotografia do suporte de filtração	68
Figura 3.23 - Fotografia do feltro de polipropileno obtida no microscópio eletrônico de varredura, ampliação de 250 vezes	69
Figura 3.24 - Fotografia do feltro de polipropileno após teste de filtração	69
Figura 3.25 - Fotografia das amostras do feltro de polipropileno embutidas	73
Figura 3.26 - (a) Fotografia do filtro de polipropileno; (b) Fotografia do filtro de polipropileno onde as fibras foram marcadas pelo software (aumento de 20x)	74
Figura 4.1 - Total de partículas de pirocloro em função da posição x, para $d_{ps} = 1,93 \mu\text{m}$	77
Figura 4.2 - Total de partículas de diatomito em função da posição x, para $d_{ps} = 2,30 \mu\text{m}$	78
Figura 4.3 - Total de partículas de pó de madeira em função da posição x, para $d_{ps} = 2,62 \mu\text{m}$	78
Figura 4.4 - Total de partículas de concentrado fosfático em função da posição x, para $d_{ps} = 1,95 \mu\text{m}$ (ALMEIDA 2000)	79
Figura 4.5 - Total de partículas de alumina em função da posição x, para $d_{ps} = 4,71 \mu\text{m}$ (ALMEIDA 2000)	79
Figura 4.6 - Total de partículas de clara de ovo em função da posição x, para $d_{ps} = 7,31 \mu\text{m}$ (ALMEIDA 2000)	80
Figura 4.7 - Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para o pirocloro	81
Figura 4.8 - Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para o diatomito	81

Figura 4.9 - Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para a madeira	82
Figura 4.10 - Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para o concentrado fosfático (ALMEIDA 2000)	82
Figura 4.11 - Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para a alumina (ALMEIDA 2000)	83
Figura 4.12 - Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para a clara de ovo (ALMEIDA 2000)	83
Figura 4.13 - Valores em módulo da carga da partícula para $d_{ps} = 4 \mu\text{m}$	85
Figura 4.14 - Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para o concentrado fosfático	88
Figura 4.15 - Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para o pirocloro	88
Figura 4.16 - Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para o diatomito	89
Figura 4.17 - Carga da partícula em função do diâmetro para tensões no carregador tipo corona de 0 kV e -15 kV	91
Figura 4.18 - Carga da partícula em função do diâmetro mediante tensão na placa do CCE de -5 kV	92
Figura 4.19 - Carga da partícula em função do diâmetro para diferentes métodos de eletrização das partículas	93
Figura 4.20 - Número de partículas de concentrado fosfático em função da posição x , para $d_{ps} = 3,26 \mu\text{m}$	95
Figura 4.21 - Número de partículas de rocha fosfática em função da posição x , para $d_{ps} = 3,26 \mu\text{m}$, tensão no CCE -5 kV	96
Figura 4.22 - Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para partículas de concentrado fosfático com tensão no CCE -5 kV	97
Figura 4.23 - Penetração em função do diâmetro de partícula para velocidade de filtração de 5 cm/s	101
Figura 4.24 - Penetração em função do diâmetro de partícula para velocidade de filtração de 8 cm/s	101
Figura 4.25 - Penetração em função do diâmetro de partícula para velocidade de filtração de 12 cm/s	102

Figura 4.26 - Penetração inicial das partículas em função do diâmetro para velocidade de filtração de 5 cm/s	103
Figura 4.27 - Penetração inicial das partículas em função do diâmetro para velocidade de filtração de 8 cm/s	104
Figura 4.28 - Penetração inicial das partículas em função do diâmetro para velocidade de filtração de 12 cm/s	104
Figura 4.29 - Penetração inicial das partículas em função do diâmetro para tensão no carregador tipo corona de 0 kV	106
Figura 4.30 - Penetração inicial das partículas em função do diâmetro para tensão no carregador tipo corona de -3 kV	106
Figura 4.31 - Penetração inicial das partículas em função do diâmetro para tensão no carregador tipo corona de -6 kV	107
Figura 4.32 - Penetração inicial das partículas em função do diâmetro para tensão no carregador tipo corona de -9 kV	107
Figura 4.33 - Penetração em função do diâmetro de partícula para velocidade de filtração de 5 cm/s	108
Figura 4.34 - Penetração em função do diâmetro de partícula para velocidade de filtração de 8 cm/s	109
Figura 4.35 - Penetração em função do diâmetro de partícula para velocidade de filtração de 12 cm/s	109
Figura 4.36 - Valores de penetração teóricos versus penetração experimental	112
Figura 4.37 - Penetração em função do diâmetro para velocidade de filtração de 8 cm/s e tensão corona de 0 kV	113
Figura 4.38 - Penetração em função do diâmetro para velocidade de filtração de 8 cm/s e tensão corona de -3 kV	113
Figura 4.39 - Penetração em função do diâmetro para velocidade de filtração de 8 cm/s e tensão corona de -6 kV	114
Figura 4.40 - Variação da queda de pressão em função do tempo para velocidade de filtração de 5 cm/s	115
Figura 4.41 - Variação da queda de pressão em função do tempo para velocidade de filtração de 8 cm/s	115

Figura 4.42 - Variação da queda de pressão em função do tempo para velocidade de filtração de 12 cm/s

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros de projeto mais utilizados na filtração de gases	5
Tabela 2.2 - Parâmetro adimensionais para os mecanismos eletroforéticos	20
Tabela 3.1 - Propriedades dos aerossóis testados	41
Tabela 3.2 - Análise química quantitativa do concentrado fosfático em % de óxidos antes e depois do processo de peneiramento	42
Tabela 3.3 - Dados de caracterização do concentrado fosfático	49
Tabela 4.1 - Equações obtidas da carga da partícula em função do diâmetro para os pós analisados	84
Tabela 4.2 - Distribuição de cargas em aerossol $ q/e = A^* d_p^B$	86
Tabela 4.3 - Equações obtidas da carga da partícula em função do diâmetro	89
Tabela 4.4 - Equações da carga da partícula em função do diâmetro	98
Tabela 4.5 - Dados de porosidade experimental do feltro de polipropileno	99
Tabela 4.6 - Valores experimentais e teóricos (ajustadas pelo modelo proposto) de penetração	112

SIMBOLOGIA

A	Área de filtração	[L ²]
A _P	Área projetada pelos coletores Eq.(2.2)	[L ²]
C	Número de partículas por unidade de volume do gás	[L ⁻³]
C _D	coeficiente de arraste da partícula	[]
dC	Variação na concentração de partículas	[]
d _c	Diâmetro do coletor	[L]
dH	espessura de uma matriz fibrosa	[L]
d _{pA}	Diâmetro aerodinâmico da partícula	[L]
d _p	Diâmetro da partícula	[L]
d _{pS}	Diâmetro de Stokes	[L]
D	Coeficiente de difusividade	[L ² t ⁻¹]
e	Carga fundamental do eletron	[C]
E	Eficiência de coleta do filtro	[]
E ₀	Campo elétrico necessário para o início da corona	[MLt ⁻² C ⁻¹]
E _x	Intensidade do campo elétrico na direção x	[MLt ⁻² C ⁻¹]
f _C	Força coulômbica	[MLt ⁻²]
F _d	Força de arraste na partícula	[MLt ⁻²]
F _e	Força elétrica	[MLt ⁻²]
f _{EI}	Força dipolo-imagem no coletor	[MLt ⁻²]
f _M	Força de dipolo-imagem	[MLt ⁻²]
f _S	Efeito espacial de carga	[MLt ⁻²]
F _S	Fator de Cunningham	[]
g	Aceleração da gravidade	[Lt ⁻²]
H	Espessura do meio filtrante	[L]
h _S	Espessura da camada de pó depositada sobre as fibras	[L]
K _B	Constante de Boltzmann	[ML ² t ⁻² T ⁻¹]
K _M	Parâmetro adimensional do mecanismo dipolo-imagem	[]
Kn	Número de Knudsen	[]

L	Distância entre os eletrodos	[L]
L_f	Comprimento da fibra por unidade de volume	[L ⁻²]
m_s	Massa de sólidos sobre o filtro	[M]
N_R	Parâmetro de interceptação	[]
P	Penetração	[]
Pe	Número de Peclet	[]
P_G	Penetração Global	[]
q	Carga da partícula	[C]
Q	Carga da fibra	[C]
Q_p^∞	Carga da partícula em um determinado tempo	[C]
r	Distância entre o coletor e a partícula	[L]
r_0	Raio da zona ativa da corona	[L]
r_{se}	Raio do eletrodo de descarga	[L]
R	Coefficiente de correlação linear	[]
Re_C	Número de Reynolds do coletor	[]
Re_p	Número de Reynolds da partícula	[]
St	Número de Stokes	[]
T	Temperatura absoluta	[T]
v	Velocidade intersticial do gás	[Lt ⁻¹]
U	Velocidade de filtração	[Lt ⁻¹]
U_0	Velocidade do gás	[Lt ⁻¹]
v_t	Velocidade terminal de uma partícula	[Lt ⁻¹]
U_x	Velocidade da partícula na direção x	[Lt ⁻¹]
X	Deflexão da partícula	[L]
x_0	Ponto de máximo da curva de Gauss para tensão na placa do CCE de 0 kV	[L]
x_C	Ponto de máximo da curva de Gauss para tensão na placa do CCE \neq 0 kV	[L]
Z	Comprimento dos eletrodos	[L]
Z_p	Eletromobilidade da partícula	[L ² Mt ⁻³ C]

Letras Gregas

α	Coeficiente de resistência viscosa	[]
β	Volume ocupado pelas fibras	[]
ΔP	Queda de pressão no filtro	$[Mt^{-2}L^{-1}]$
ΔV	Diferença de voltagem	$[ML^2C^{-1}t^{-2}]$
ε	Porosidade	[]
ε_0	Permissividade do vácuo	$[t^2C^2M^{-1}L^{-3}]$
ε_C	Constante dielétrica da partícula	[]
ε_D	Constante dielétrica da fibra	[]
ε_f	Constante dielétrica do fluido	[]
ε_r	Constante dielétrica do material	[]
δ	Densidade relativa do gás	[]
ϕ^*	Razão entre Re_p e St	[]
λ	Livre caminho médio molecular	[L]
μ	Viscosidade do gás	$[ML^{-1}t^{-1}]$
ρ_g	Densidade do gás	$[ML^{-3}]$
ρ_0	Densidade unitária	$[ML^{-3}]$
ρ_p	Densidade da partícula	$[ML^{-3}]$
η_T	Eficiência total de coleta	[%]
ν	Coeficiente de resistência inercial	[]

Subscritos

D	Difusional
DI	Interceptação direta
E	Eletroforética
G	Gravitacional
I	Inercial
0	Estágio inicial

RESUMO

A presença de cargas eletrostáticas em partículas a serem removidas tem se mostrado um fator que contribui sensivelmente para o desempenho do meio filtrante, tanto no aumento da eficiência de coleta quanto na diminuição de perda de carga do filtro. O presente trabalho tem como objetivo verificar a influência do nível de cargas eletrostáticas das partículas na eficiência de coleta do filtro durante os estágios iniciais da filtração. Para a medição do nível de cargas, foi utilizado o classificador de cargas eletrostáticas, equipamento capaz de medir o nível de cargas elétricas de um aerossol em função do diâmetro da partícula. A unidade de filtração utilizada apresentava 0,047 m de diâmetro. Como meio filtrante, foi utilizado tecido de polipropileno de 0,0026 m de espessura e gramatura 600 g/m². O sólido utilizado foi um concentrado fosfático (densidade: 2940 Kg/m³ e diâmetro de Stokes médio de 3,40 µm). O aerossol foi disperso por um gerador tipo venturi marca TSI modelo SSPD 3433, e a eletrização das partículas feita através de um carregamento tipo corona. Em todos os testes de determinação do nível de carga das partículas foi observado comportamento linear entre o nível de carga adquirida pela partícula e o diâmetro. Houve aumento gradativo do nível de carregamento das partículas com o aumento da tensão no carregador tipo corona (0, -3, -6 kV). Os resultados de filtração indicaram que a eficiência global de coleta do filtro apresentou-se muito sensível à variação do nível de cargas das partículas. Houve um aumento da eficiência e um decréscimo da queda de pressão mediante a eletrização das partículas. Durante a realização dos testes houve um aumento muito pequeno da queda de pressão evidenciando a não formação de torta de filtração.

Palavras-chave: Aerossol, Filtração, Cargas Eletrostáticas, Filtros Fibrosos.

ABSTRACT

It has been shown that the presence of electrostatic charges in particles affects significantly the performance of a filter, both increasing collection efficiency and reducing pressure drop. The aim of the present work is to verify the influence of the charge level on collection efficiency during the first stages of filtration. A charge classifier was used to measure the charge level of the aerosol as a function of particle diameter. The filtration unit was made of polypropylene with 600 g/m^2 weighing, and had a diameter of 0.047 m and a thickness of 0.0026 m. The solid used was a phosphate rock (density 2940 kg/m^3 and average Stokes diameter of $3.40 \text{ }\mu\text{m}$). The aerosol was dispersed by a TSI Venturi type generator, model SSPD 3433. The particle charging was achieved by a corona. In all the tests a linear relation between the particles acquired charge and their diameter was observed. A gradual increase of the charge level was observed with an increase of the tension in the corona charger (0, -3, -6 kV). The filtration results indicated that the global collection efficiency of the filter was very sensitive to the variation of the charge level of the particles. Both efficiency and pressure drop increased when the charge level increased. During the tests, the small increase in pressure drop was evidence that the cake had not yet been formed.

Keywords: Aerosol, Filtration, Electrostatic Forces, Fibrous Filters.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A remoção de partículas sólidas de correntes gasosas tem se tornado uma operação cada vez mais importante na medida em que cresce a preocupação mundial pela qualidade do ar que respiramos.

Grande esforço científico e tecnológico tem sido dedicado ao desenvolvimento de técnicas, principalmente, para a retenção de partículas do ar. Uma grande variedade de equipamentos, baseados em princípios físicos distintos, está sendo empregada na limpeza do ar industrial (DULLIEN, 1989; STRAUSS, 1975): filtros tipo barreira, filtros de manga, filtros granulares; precipitadores eletrostáticos, ciclones, lavadores, etc.

No entanto, devido à crescente sofisticação do setor industrial, juntamente com o aumento no rigor da legislação referente à emissão de poluentes, cresce cada vez mais a demanda por equipamentos para utilizações especializadas, nas quais aqueles disponíveis apresentam sérias limitações. Tal é o caso da limpeza secundária de gases (remoção de partículas com $dp < 10 \mu\text{m}$) ou limpeza de gases a altas temperaturas, cujos mecanismos de remoção atuantes necessitam ser mais bem explorados.

Em particular, a presença de cargas eletrostáticas nas partículas a serem removidas tem-se mostrado um fator que contribui, sensivelmente, para o desempenho do meio filtrante, aumentando a eficiência de coleta e, diminuindo a perda de carga no filtro (COURY, 1983; SHAPIRO ET AL., 1988; TARDOS ET AL., 1990). No entanto, esse é um fenômeno ainda pouco estudado e que precisa ser mais bem entendido (SAXENA E SWIFT, 1978; CLIFT, 1983; COURY, 1986; TIEN, 1989; DUARTE F^o., 1995).

O melhor conhecimento deste fenômeno tornará possível a combinação das vantagens dos filtros de leito fixo (fibrosos, granulares, etc.) com as vantagens dos filtros eletrostáticos, o que poderá levar à construção de equipamentos compactos e com baixa perda de carga.

Estudos sobre filtração de gases em leitos granulares, com ênfase nos efeitos da introdução de cargas eletrostáticas nas partículas vêm, há algum tempo, sendo desenvolvidos pelo Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos: Coury et al., (1988), Coury e Duarte F^o. (1990), Duarte F^o. et al. (1992, 1994, 1995, 2000) e Duarte F^o. (1995).

Duarte F^o. (1995) estudou os efeitos da variação do nível de carga eletrostática nas partículas, eletrizadas por impactação, no comportamento de um filtro granular. O autor observou que o aumento no nível de carga nas partículas, provocou diminuição na diferença de pressão no leito e aumento na eficiência global do filtro. Foi também constatado pelo autor que o aumento da carga eletrostática nas partículas induziu à formação de estruturas de deposição menos resistentes ao escoamento do fluido. No entanto, as cargas introduzidas nas partículas só puderam ser medidas de forma global, através da gaiola de Faraday que envolvia o filtro.

Estudos preliminares relacionaram tais efeitos à distribuição da polaridade das cargas nas partículas. Embora a carga global medida na gaiola de Faraday tivesse polaridade positiva, ensaios qualitativos detectaram que parte das partículas adquiriu carga positiva e parte negativa.

Combinações de polaridades e distribuição de cargas eletrostáticas entre as partículas parecem ser responsáveis pelo comportamento observado na eficiência inicial de coleta do leito, formação da torta de filtração e estrutura da torta formada.

O trabalho de Duarte F^o (1995) envolveu aspecto experimental bastante complexo e pouco estudado, apresentando uma série de resultados que, potencialmente, mereciam ser aprofundados. Os efeitos das cargas eletrostáticas na formação da torta de filtração e na estrutura da camada formada são exemplos de pontos que, melhor entendidos, podem ter aplicação prática de grande interesse. No entanto, acima de tudo, ficou patente em seu trabalho a necessidade de melhor caracterização da distribuição de cargas eletrostáticas entre as partículas.

No sentido de obter dados sobre a distribuição de cargas nas partículas, Marra Jr. (2000), desenvolveu, com sucesso, um equipamento para tal fim, o Classificador de Cargas Eletrostáticas (CCE). Equipamento capaz de fornecer a carga da partícula em função do seu deslocamento ao adentrar uma região sob ação de um campo elétrico. O equipamento foi também testado com partículas carregadas em diversas condições experimentais por Almeida (2000), que comprovou sua aplicabilidade no estudo de cargas eletrostáticas em aerossóis.

A fim de dar continuidade ao estudo mencionado, o presente trabalho teve como objetivos:

- automação do CCE para a medir o nível de cargas eletrostáticas nas partículas;

- construção de sistema de eletrização de partículas por carregamento corona para ajuste do nível de cargas nas partículas de aerossol;
- montagem de unidade experimental para filtração de gases em filtros de tecido;
- verificar o efeito do nível de cargas das partículas na eficiência total de coleta e na queda de pressão na filtração de gases em filtros de tecido;
- propor correlação, relacionando o nível de carga nas partículas com a eficiência de coleta do filtro.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E DEFINIÇÕES FUNDAMENTAIS

Por se tratar de estudo de interface com outros ramos do conhecimento tais como Física, Engenharia Elétrica e Ciência dos Materiais, serão apresentados a seguir, algumas definições e conceitos de termos fundamentais, com o intuito de facilitar o entendimento deste trabalho.

2.1. Filtração de gases: conceitos gerais

A filtração ocorre pela passagem do aerossol através do meio filtrante, aonde as partículas vão se depositando sobre a superfície do filtro. A coleta ocorre devido o contato físico entre as partículas e o elemento coletor, sendo descrita na forma de mecanismos de captura. Além do contato, é necessário que a partícula permaneça retida no coletor, isto é, que ocorra aderência. Como a coleta é contínua, as partículas chocam-se com as partículas previamente coletadas, sendo formado um depósito denominado torta de filtração, o qual pode se tornar o principal elemento coletor. Este processo continua até que a queda de pressão através do sistema exceda valores de operação estável (DONOVAN, 1985). O material coletado deve, eventualmente, ser removido de algum modo ou ele irá reduzir, consideravelmente, o fluxo de gás. Dentre as várias técnicas de limpeza dos filtros, as mais utilizadas são: vibração mecânica, fluxo de ar reverso e pulso de ar reverso (MATTESON, 1987). A filtração é, portanto, um processo cíclico constituído por etapas de coleta e limpeza do filtro.

2.2. Fundamentos básicos da filtração

Os parâmetros de projeto mais importantes na filtração são: velocidade superficial do gás, queda de pressão no filtro, concentração de pó e eficiência de coleta. Os valores mais comuns encontrados para estes parâmetros estão apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Parâmetros de projeto mais utilizados na filtração de gases.

Velocidade do gás (U)	0,8 a 10 cm/s
Queda de pressão do tecido limpo (ΔP_0)	60 a 200 Pa
Queda de pressão máxima de operação (ΔP)	500 a 2500 Pa
Concentração de pó (C)	0,1 a 100 g/m ³
Massa de pó depositada por unidade de área (W)	200 a 2000 g/m ²
Eficiência de coleta (η)	99,90 a 99,99 %

Fonte: MATTESON (1987).

Existem dois tipos de filtração: estacionária e não estacionária. Na primeira, a eficiência de colisão da partícula com a superfície coletora é única, isto é, uma vez que a partícula toca a fibra, ela permanece retida, e as novas partículas que se depositam não são influenciadas pelo processo anterior. Neste caso a eficiência de coleta e a queda de pressão do filtro independem do tempo e o processo é dito estacionário. Isto pode ocorrer nos estágios iniciais da filtração e para baixas concentrações de partículas que chegam no coletor.

Na realidade o processo de filtração é muito mais complexo. As partículas, uma vez depositadas, podem ficar bem separadas das fibras devido à ação de diferentes forças que atuam durante a filtração. As partículas retidas também podem modificar a forma geométrica do coletor, produzindo, desta forma, modificações estruturais no filtro. Como consequência, a eficiência e a queda de pressão no filtro tornam-se dependentes do tempo e o processo é dito transiente.

2.3. Filtros

Um aspecto característico da operação unitária da filtração é a variedade de equipamentos disponíveis para a separação das partículas sólidas do fluido. Esta variedade tem sido consequência da multiplicidade dos problemas de filtração, em que suspensões de alta ou baixa concentração de partículas devem ser separadas de gases ou líquidos, o qual podem ser corrosivos ou até altamente viscosos. Apesar desta complexidade, as informações sobre as

partículas e o fluido podem ser usadas para racionalizar os métodos de separação. Existem basicamente três tipos de arranjos de alvos coletores na filtração de gases:

- a) fibras individuais emaranhadas frouxamente dentro de um enchimento;
- b) material granular em leito fixo ou fluidizado;
- c) fibras, tecidas ou feltradas dentro de uma estrutura, sendo utilizadas no formato cilíndrico (manga).

Todos os arranjos são capazes de obter altos valores de eficiência de coleta com razoáveis valores de queda de pressão e tempo de limpeza. A principal limitação para a escolha do filtro está relacionada com a natureza de seu material constituinte. É necessário selecionar um meio filtrante que apresente baixo custo e que tenha uma vida longa sob as condições de operação.

Para bom funcionamento do filtro, este deve ter as seguintes características (CAVASENO, 1980):

- Ser suficientemente poroso para permitir satisfatória vazão de ar a uma queda de pressão compatível com o processo;
- Resistir às forças de tensão causadas pela pressão diferencial, por perturbações mecânicas e por pulsação durante o processo de limpeza; devem também resistir à abrasão com o material com que é preso a tubos metálicos;
- Resistir ao ataque e à ação química entre as fibras e o material filtrado, especialmente se houver umidade presente devido à condensação;
- Resistir às altas temperaturas da exaustão de gases; cada filtro tem uma temperatura limite definida, além da qual tenderá a uma deterioração acelerada;
- Apresentar textura de superfície que favoreça rápida liberação da torta durante a limpeza. Isto pode ser aparentemente contraditório, pois a superfície tem que reter a torta durante a filtração.

2.4. Eficiência do coletor, penetração e penetração global

Considere uma corrente de aerossol a uma velocidade U e concentração C_0 , escoando perpendicularmente a uma fina seção fibrosa de espessura dH e área A . dH deve ser muito

maior que o diâmetro da fibra, porém fino o suficiente para se aproximar de uma simples camada de fibras no plano da seção, ou seja, é negligenciada a sobreposição das fibras (DULLIEN, 1989).

Seja o parâmetro, L_f , definido segundo a Equação 2.1:

$$L_f = \frac{\text{comprimento da fibra}}{\text{unidade de volume}} \quad (2.1)$$

Neste caso, a área projetada pelas fibras cilíndricas desordenadas no plano da seção pode ser representada pela multiplicação entre o diâmetro da fibra e seu comprimento:

$$A_p = d_c \cdot L_f \cdot A \cdot dH \quad (2.2)$$

onde: d_c é o diâmetro das fibras.

A eficiência total de coleta de cada elemento filtrante, incluindo todos os mecanismos de coleta, para fibra embutida do filtro, pode ser representada por:

$$\eta_T = \frac{\text{número de partículas depositadas por unidade de tempo}}{\text{número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo}} = \frac{N_p}{N_c} \quad (2.3)$$

O número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo pode ser expresso por:

$$N_p = C \cdot v \cdot d_c \cdot L_f \cdot A \cdot dH \quad (2.4)$$

onde: C é a concentração (número de partículas por unidade de volume do gás) e v é a velocidade intersticial do gás dada por:

$$v = \frac{U}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

onde: U é a vazão da suspensão por unidade de área, ou velocidade superficial e ε a porosidade da seção.

Um balanço de massa para o número de partículas depositadas na seção por unidade de tempo N_C pode ser expresso por (DULLIEN, 1989):

$$N_C = -dC.U.A \quad (2.6)$$

onde: $-dC$, representa a mudança nas concentrações das suspensões que entram e deixam a seção e $U.A$ a vazão de gás.

Substituindo (2.4) e (2.6) em (2.3) tem-se que:

$$-\frac{dC}{C} = \frac{\eta_T \cdot d_C \cdot L_f \cdot dH}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

Considerando $C = C_0$ para $H = 0$ e $C = C_E$ para $H = H$, e integrando-se a Equação 2.7, tem-se:

$$\ln \frac{C_E}{C_0} = -\frac{\eta_T L_f d_C H}{\varepsilon} \quad (2.8)$$

O volume ocupado pelas fibras, β , pode ser descrito por:

$$\beta = \frac{\pi d_C^2}{4} L_f \quad (2.9)$$

O volume total da seção é constituído pela soma do volume ocupado pelas fibras mais o volume de vazios, ε , portanto:

$$\varepsilon = (1 - \beta) \quad (2.10)$$

Substituindo as Equações (2.9) e (2.10) em (2.8) tem-se:

$$P = \frac{C_E}{C_0} = \exp\left[-\frac{4H(1-\varepsilon)\eta_T}{\pi\varepsilon d_c}\right] \quad (2.11)$$

onde P, é a penetração, que representa a fração de partículas que não é coletada pela seção.

Complementar a esta grandeza define-se E, a eficiência total do filtro como sendo a fração de partículas que é coletada pela seção filtrante, portanto:

$$E = 1 - P = 1 - \exp\left[-\frac{4H(1-\varepsilon)\eta_T}{\pi\varepsilon d_c}\right] \quad (2.12)$$

onde, H é a espessura do meio filtrante e ε a sua porosidade, η_T é a eficiência individual de coleta de cada elemento filtrante.

De acordo com a Equação 2.12 a concentração de partículas na corrente gasosa que atravessa o filtro decai exponencialmente com o aumento da espessura do filtro H, com o aumento da eficiência individual de coleta η_T e com a redução no diâmetro do coletor, desde que ε se mantenha constante.

Nota-se que para o cálculo de P, é necessário estimar a eficiência de um coletor, η_T . Este parâmetro é estimado em função dos mecanismos de coleta atuantes, conforme será apresentado a seguir, sendo função do tamanho da partícula (DUARTE F^o, 1995). Portanto, P é função das características do aerossol a ser filtrado. Para aerossóis com ampla faixa de distribuição granulométrica, torna-se útil definir a penetração global, PG, que independe do tamanho da partícula, como sendo:

$$PG = \frac{\text{Massa total de partículas que penetram através do leito}}{\text{Massa total de partículas entrantes no leito}} \quad (2.13)$$

2.5. Mecanismos de coleta

Nos estágios iniciais de filtração, as partículas penetram no meio filtrante e depositam-se nas fibras do tecido. Esta deposição inicial do material particulado ocorre em virtude de uma combinação de vários mecanismos de coleta. Os mais importantes são: difusional, interceptação direta, inercial, gravitacional e eletroforético, ilustrados na Figura 2.1.

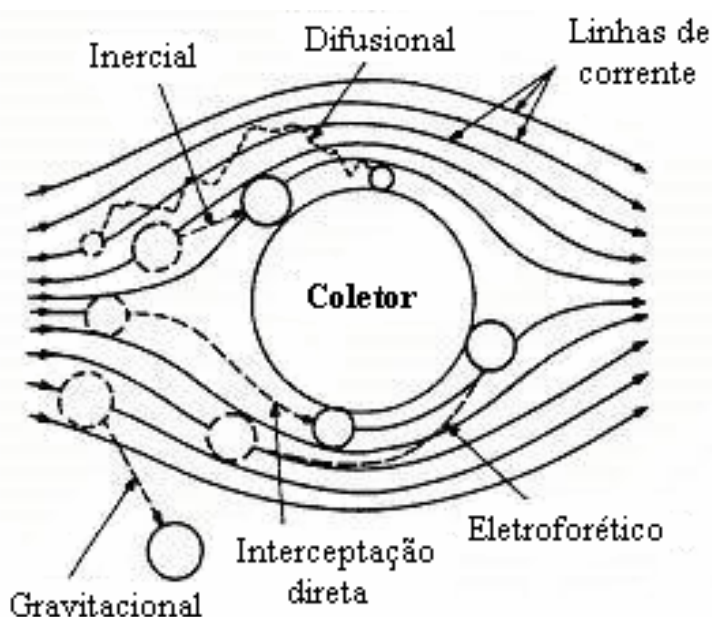


Figura 2.1 – Mecanismos físicos de coleta

2.5.1. Mecanismo difusional

O mecanismo difusional resulta do movimento aleatório (*browniano*) a que partículas de pequeno diâmetro estão sujeitas em um gás. Ocorre, predominantemente, em partículas submicrônicas e/ou em baixas velocidades de filtração. O coeficiente de difusividade D , associado ao movimento Browniano, pode ser estimado a partir da equação de Stokes-Einstein. Para partícula esférica de diâmetro d_p , o mesmo vale:

$$D = \frac{K_B \cdot T \cdot F_S}{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p} \quad (2.14)$$

onde K_B é a constante de Boltzmann, T a temperatura absoluta, μ a viscosidade do gás e F_s o fator de escorregamento de Cunningham, que corrige a força de arraste nas partículas cujo tamanho se aproxima do livre caminho médio das moléculas do gás (CLIFT ET AL., 1978).

O fator de escorregamento de Cunningham descrito por Davies⁽¹⁾ (1945) apud Coury, (1983) é dado por:

$$F_s = 1 + Kn \left[2,514 + 0,8 \exp\left(\frac{-0,55}{Kn}\right) \right] \quad (2.15)$$

onde Kn , o número de Knudsen, é definido como a razão entre o livre caminho médio molecular no gás e o diâmetro da partícula de acordo com a Equação 2.16:

$$Kn = \frac{\lambda}{d_p} \quad (2.16)$$

No caso do fluido ser o ar:

$$\lambda = 2,15 \cdot 10^{-4} \mu \cdot P \cdot T^{0,5} \quad (2.17)$$

onde P é a pressão em bar, μ a viscosidade do ar em kg/m.s e T a temperatura absoluta em Kelvin.

Pela própria natureza, fica evidente que o mecanismo difusional é significativo somente para partículas pequenas ($d_p < 3 \mu\text{m}$). Geralmente a deposição Browniana de partículas em meio fibroso pode ser considerada como processo de transferência de massa. Para condições de baixos números de Reynolds e $d_p < 1 \mu\text{m}$ existe uma boa aderência entre partícula e coletor (STENHOUSE, 1975), e o processo pode ser considerado análogo à difusão molecular de um gás para um sólido. Torna-se, portanto, possível aplicar as correlações de transferência de massa convencionais, utilizando-se D ao invés da difusividade molecular.

(1) Davies, C.N. **Proc. Phys. Soc.**, London, v. 57, p. 259, 1945.

De acordo com Dullien (1989), as expressões existentes para o cálculo da eficiência de coleta para um coletor cilíndrico, foram definidas para três regiões distintas, em função do regime de escoamento, Reynolds (Re_C) e do número de Peclet (Pe), representados pelas Equações 2.18 e 2.19.

$$Re_C = \frac{U \cdot \rho_g \cdot d_C}{\mu} \quad (2.18)$$

$$Pe = \frac{U \cdot d_C}{D} \quad (2.19)$$

onde U é a velocidade de escoamento do gás, ρ_g e μ a densidade e viscosidade do gás, d_C o diâmetro do coletor e D o coeficiente de difusividade.

Apesar de existirem mais de uma expressão para o cálculo da eficiência de coleta, para cada uma das três regiões, serão aqui apresentadas somente as mais citadas na literatura.

Região 1 – $Pe \ll 1$, $Re_C < 1$ (STECHKINA⁽²⁾, 1964 APUD DULLIEN, 1989):

$$\eta_D = \frac{2\pi}{Pe \cdot (1,502 - \ln(Pe))} \quad (2.20)$$

Região 2 – $Pe \gg 1$, $Re_C < 1$ (JOHNSTONE E ROBERTS⁽³⁾, 1949 APUD DULLIEN, 1989):

$$\eta_D = \frac{1}{Pe} + 1,727 \frac{Re_C^{1/6}}{Pe^{2/3}} \quad (2.21)$$

(2) Stechkina, I.B. (1964). *Inzh. Fiz.* 7, 128 (in Russian).

(3) Johnstone, H.F., and Roberts, M.H.(1949). Deposition of aerosol particles from moving gás streams. *Ind. Eng. Chem.* 41, 2417-2423.

Região 3 – $Pe \gg 1$, $Re_C \gg 1$ (BOSANQUET⁽⁴⁾, 1950 APUD DULLIEN 1989):

$$\eta_D = C \frac{1}{Pe^{1/2}} \quad (2.22)$$

onde: $C = 2,83$.

2.5.2. Mecanismo de interceptação direta

Interceptação direta resulta do tamanho relativo entre partícula e coletor no filtro. Uma partícula que segue as linhas de corrente do gás pode ser capturada quando seu centro passa pela superfície do coletor a uma distância menor ou igual ao seu raio. Este mecanismo é geralmente significativo para partículas grandes ($d_p > 10 \mu m$), ou seja, com diâmetro pouco abaixo do diâmetro do coletor. A coleta irá depender das propriedades de transporte no fluido e da razão entre diâmetro da partícula e diâmetro do coletor ($N_R = d_p/d_C$).

Portanto, o mecanismo de interceptação direta, η_{DI} , é função direta deste parâmetro $\eta_{ID} = f(N_R)$. A determinação desta função é relativamente simples para dois casos extremos, (MATTESON, 1987). No primeiro caso, altas velocidades de escoamento, a inércia das partículas faz com que estas colidam diretamente com o coletor, isto é: $\eta_{DI} = N_R$. No segundo caso, para baixas velocidades de escoamento, as partículas deslocam-se segundo as linhas de escoamento do fluido, tornando desprezível este mecanismo de coleta.

Para coletores cilíndricos com diâmetros bem maiores que o diâmetro das partículas, a eficiência deste mecanismo pode ser descrita como mostra a Equação 2.23 (MATTESON, 1987):

$$\eta_{ID} = \frac{N_R^2}{2 - \ln(Re_C)} \quad (2.23)$$

(4) Bosanquet, C.H. (1950). *Trans. Inst. Chem. Eng. (London)* **28**, 130.

2.5.3. Mecanismo inercial

Este mecanismo é resultante da inércia da partícula que está sendo carregada pela corrente gasosa. As linhas de corrente de gás se curvam ao passar ao redor do coletor e a capacidade de uma partícula acompanhar estas linhas de corrente decresce com o aumento de sua massa, devido à inércia. Este mecanismo é dominante para altas velocidades do gás. Contudo, nesta região (altos Re), a hipótese de perfeita aderência da partícula ao coletor torna-se bastante questionável, principalmente no que diz respeito a aerossóis sólidos. Neste caso, existe grande possibilidade da partícula chocar-se com o coletor (havendo a coleta) e, em seguida retornar a corrente gasosa por choque elástico. Esta é, provavelmente, uma das razões de porque os dados encontrados na literatura para eficiência de coleta inicial serem tão discrepantes entre si.

Para o caso de coletores cilíndricos, segundo Matteson (1987), a análise dimensional indica que a eficiência individual de coleta seja função de 4 parâmetros como mostra a Equação 2.24.

$$\eta_I = f(Re_C, N_R, St, \phi^*) \quad (2.24)$$

O primeiro parâmetro é o número de Reynolds do coletor, dado pela Equação 2.18, o segundo é o parâmetro de interceptação, ($N_R = d_p/d_C$), que representa o tamanho finito das partículas. O terceiro parâmetro é o número de Stokes ou parâmetro de inércia dado pela Equação 2.25.

$$St = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot U \cdot F_s}{18 \cdot \mu \cdot d_C} \quad (2.25)$$

O último parâmetro, ϕ^* é dado por:

$$\phi^* = \frac{Re_p}{St} = 18 \frac{\rho_g}{\rho_p} Re_p \quad (2.26)$$

onde Re_p é o número de Reynolds da partícula:

$$Re_p = \frac{d_p \cdot U \cdot \rho_g}{\mu} \quad (2.27)$$

O parâmetro ϕ^* é importante somente para partículas muito grandes. Para partículas pequenas que obedecem à lei de Stokes, $\phi^* \cong 0$.

Subramanyam e Kullor⁽⁵⁾, (1969) apud Matteson (1987), considerando escoamento laminar e $N_R = 0$, obtiveram a seguinte correlação para $Re_C < 20$:

$$\eta_I = \frac{100 \cdot St}{St + 1,5} \quad (2.28)$$

Segundo Davies⁽⁶⁾ (1952) apud Matteson (1987) os mecanismos de coleta inercial e interceptação direta não são independentes um do outro. Considerando os dois efeitos simultaneamente para escoamento de uma suspensão sobre coletores cilíndricos ($Re_C = 0,2$) o autor obteve a seguinte expressão analítica:

$$\eta_{I,ID} = 0,16 \cdot [N_R + (0,5 + 0,8N_R)St - 0,105N_R St^2] \quad (2.29)$$

2.5.4. Mecanismo gravitacional

A coleta gravitacional é resultante da ação da gravidade sobre a partícula, que causa desvio de sua trajetória. Este mecanismo pode ser dominante na filtração com velocidade do gás muito baixa e com partículas grandes o suficiente para ter velocidade terminal, v_t , significativa e pequena difusão Browniana.

(5) Subramanyam, M.V. e Kullor, N.R. **Ann. Occup. Hyg.**, v. 12, n. 9., 1969.

(6) Davies, C.N. **Proc. Inst. Mech. Eng.** v. 1B, p. 185, 1952.

Ranz e Wong⁽⁷⁾ (1952) apud Matteson (1987) concluíram que em caso de escoamento vertical descendente em filtro fibroso, a equação para o cálculo da eficiência pode ser dada por:

$$\eta_G = \frac{d_p^2 \cdot \rho_p \cdot g}{18 \cdot \mu \cdot U} = \frac{v_t}{U} \quad (2.30)$$

2.5.5. Mecanismo eletroforético

Estudos experimentais realizados com filtros fibrosos (SHAPIRO ET AL, 1983), filtros em leito fluidizado e filtros em leito fixo têm demonstrado que forças eletrostáticas podem ser de grande importância no processo de filtração. A presença de carga nas fibras e/ou nas partículas podem influenciar no processo de filtração, alterando a trajetória das partículas e sua aderência à superfície da fibra (MATTESON, 1987).

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; TARDOS ET AL., 1990).

A presença de forças elétricas num filtro pode ser devido à presença de cargas eletrostáticas nas partículas e/ou coletores ou pode ser induzida por campo elétrico externo. Somente o primeiro caso será aqui discutido.

A geração de cargas eletrostáticas nas partículas e/ou coletores de um filtro podem ocorrer normalmente por atrito (triboeletrificação) inerentes ao processo, ou podem ser deliberadamente introduzidas ao sistema (por corrente corona). Uma vez presente, estas cargas elétricas podem causar atração entre as partículas e os coletores, aumentando a eficiência de coleta.

A atração entre partícula e coletor ocorre através de vários mecanismos, classificados por Ranz e Wong⁽⁷⁾ (1952) apud Matteson (1987).

(7) Hanz, W. e Wong, J. **Ind. Eng. Chem.**, v. 44, p. 1371, 1952.

Para que este processo seja bem descrito, o conhecimento de como estas forças eletrostáticas atuam entre partículas e fibras é indispensável. Os seguintes casos serão considerados na ausência de campo elétrico externo.

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

2.5.5.1. Força “Coulômbica”

É a força de atração entre coletor carregado e partícula carregada com sinais opostos. Para o caso de coletores cilíndricos esta força é dada por (LICHT, 1988):

$$f_c = -\frac{2.Q.q}{\epsilon_0.r^2} \quad (2.31)$$

onde, ϵ_0 é a permissividade do vácuo, r a distância entre partícula e coletor, q a carga da partícula e Q a carga da fibra.

Quando um coletor carregado está cercado por uma nuvem de partículas, cada uma destas partículas está sujeita a uma distribuição desigual de carga. O resultado é uma força repulsiva, atuando sobre cada partícula da nuvem. Este efeito é chamado de efeito espacial de carga e, é representado por (STRAUSS, 1975):

$$f_s = \frac{q.d_c.n}{24.\epsilon_0.r^2} \quad (2.32)$$

onde, d_c é o diâmetro da fibra coletora e n o número de partículas por unidade de volume.

2.5.5.2. Força de dipolo-imagem

É a força de interação entre partículas de raio r_p , carregadas e um coletor neutro no qual cargas surgem de sua polarização. Ao passar nas proximidades da superfície do elemento filtrante, a partícula carregada (positivamente, no exemplo dado pela Figura 2.2) gera, por efeito dipolo uma região levemente negativa, causando a atração da partícula na direção do elemento filtrante.

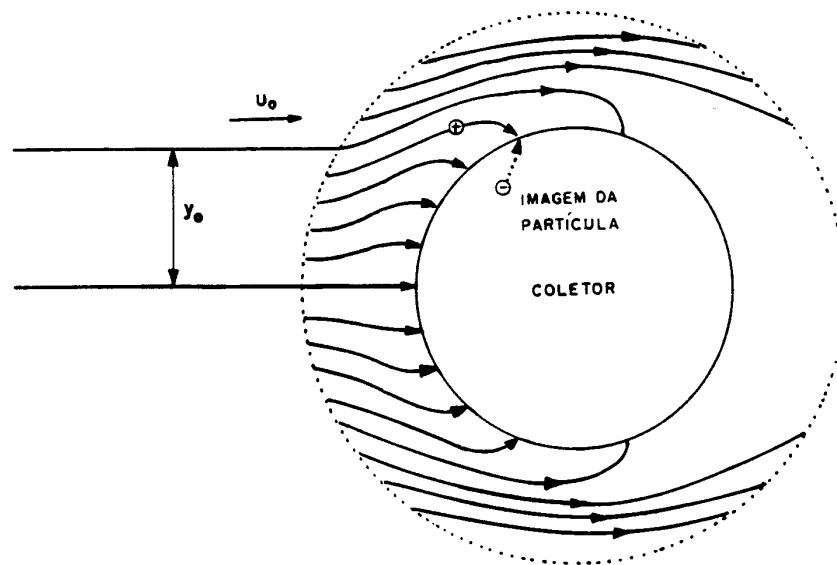


Figura 2.2 – O mecanismo eletroforético de dipolo-imagem.

A expressão para a força dipolo-imagem para coletores cilíndricos neutros e partículas carregadas pode ser escrita da seguinte forma (LICHT, 1988):

$$f_M = \left(\frac{\epsilon_D - 1}{\epsilon_D + 1} \right) \frac{q^2}{4 \cdot \epsilon_0 \left(r - \frac{d_C^2}{2} \right)} \quad (2.33)$$

onde, ϵ_D é a constante dielétrica do coletor, ϵ_0 a permissividade do vácuo.

No caso de forças de dipolo-imagem do coletor carregado em partículas neutras a expressão fica (LICHT, 1988):

$$f_{EI} = \frac{4Q^2}{\epsilon_0} \left(\frac{\epsilon_D - 1}{\epsilon_C + 2} \right) \frac{\left(\frac{d_p}{2} \right)^3}{r^3} \quad (2.34)$$

onde ϵ_c é a constante dielétrica da partícula.

Embora reconhecido como importante há muito tempo, o efeito eletroforético tem sido pouco investigado, provavelmente devido às dificuldades experimentais inerentes. Tal efeito pode ser encontrado em quatro mecanismos distintos (COURY, 1983), mas somente o mecanismo dipolo-imagem será aqui tratado, por ser o mais relevante no estudo proposto.

A maioria das correlações propostas para os mecanismos eletroforéticos é teórica, desenvolvidas a partir da adoção de um modelo de campo eletrostático e do cálculo da trajetória crítica da partícula. Os parâmetros são interpretados em termos da razão entre forças eletrostáticas e a força de arraste (HANZ E WONG⁽⁷⁾, 1952 APUD MATTESON, 1987). Os grupos adimensionais para os quatro mecanismos descritos estão apresentados na Tabela 2.2.

Coury (1983) calculou teoricamente a eficiência de coleta para o mecanismo (ii) a partir da trajetória da partícula carregada com carga Q . A expressão proposta para $10^{-4} < K_M < 10^{-6}$ e $St < 5 \times 10^{-3}$ teve a seguinte forma:

$$\eta_E = 8,24.K_M^{0,5} \quad (2.38)$$

A fim de se determinar o efeito das cargas eletrostáticas em coletores cilíndricos, Yoshida e Tien (1985), estudando experimentalmente o efeito de cargas eletrostáticas em filtros fibrosos, obtiveram a seguinte correlação:

$$\eta_E = 2,3.K_M^{0,5} \quad (2.39)$$

(7) Hanz, W. e Wong, J. **Ind. Eng. Chem.**, v. 44, p. 1371, 1952.

Tabela 2.2 – Parâmetros adimensionais para os mecanismos eletroforéticos.

Mecanismo	Parâmetro adimensional
(i)	$K_c = \frac{F_s \cdot Q \cdot q}{3 \cdot \pi \cdot d_c \cdot d_p^2 \cdot \mu \cdot U} \quad (2.35)$
(ii)	$K_M = \frac{\gamma_c \cdot F_s \cdot q^2}{3 \cdot \pi^2 \cdot \epsilon_0 \cdot d_p \cdot d_c^2 \cdot \mu \cdot U} \quad (2.36)$
(iii)	$K_I = \frac{2 \cdot \gamma_p \cdot F_s \cdot Q^2 \cdot d_p^2}{3 \cdot \pi^2 \cdot \epsilon_0 \cdot d_c^5 \cdot \mu \cdot U} \quad (2.37)$
(iv)	$K_S = \frac{F_s \cdot q^2 \cdot d_c \cdot n}{18 \cdot \pi \cdot \mu \cdot U \cdot d_p \cdot \epsilon_0} \quad (2.38)$
<p>Em que:</p> <p>$\gamma_C = (\epsilon_c - \epsilon_f)/(\epsilon_c + 2\epsilon_f)$ = coeficiente de polarização do coletor;</p> <p>$\gamma_D = (\epsilon_D - \epsilon_f)/(\epsilon_D + 2\epsilon_f)$ = coeficiente de polarização da partícula;</p> <p>ϵ_D = constante dielétrica do coletor;</p> <p>ϵ_c = constante dielétrica da partícula;</p> <p>ϵ_f = constante dielétrica do fluido;</p> <p>ϵ_0 = permissividade do vácuo = $8,855 \times 10^{-12}$ As/Vm</p> <p>n = número de partículas por unidade de volume.</p>	

Fonte: Kraemer e Johnstone, (1955).

Coury et al. (1991) e Duarte F^o (1995), trabalhando com filtração em leito fixo granular, verificaram, experimentalmente, que a eficiência de coleta devido o mecanismo de dipolo-imagem no coletor pode ser expressa por:

$$\eta_E = \Phi \cdot K_M^{0,5} \quad (2.40)$$

onde, Φ é um parâmetro que depende do nível de carregamento e do material particulado.

2.6. Coleta simultânea por vários mecanismos

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. A Figura 2.3 apresenta a eficiência de coleta de um único coletor com o diâmetro de partícula para filtração em leito granular com velocidade de filtração de 0,11 m/s (COURY, 1983).

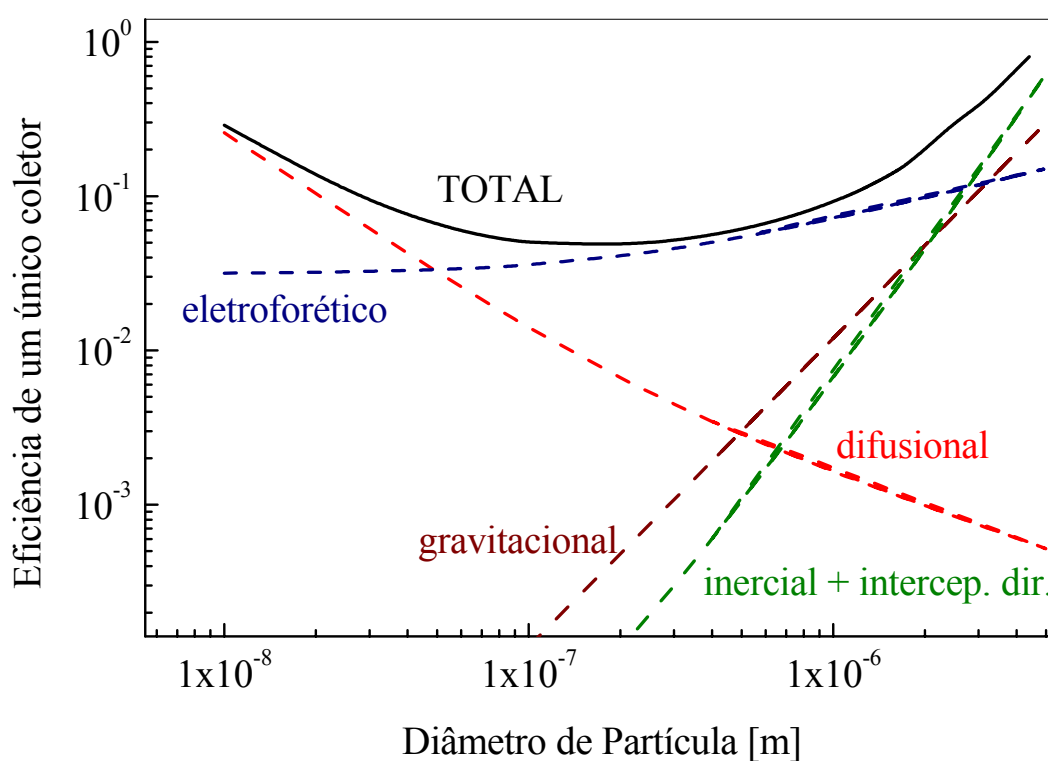


Figura 2.3 – Atuação dos mecanismos de coleta na eficiência de um único coletor em função do diâmetro de partícula (COURY, 1983).

De acordo com a Figura 2.3, pode-se observar que o mecanismo difusional é mais atuante em partículas pequenas ($d_p < 0,3 \mu m$) enquanto os mecanismos gravitacional, inercial e de interceptação direta são mais atuantes para partículas maiores que $2 \mu m$. Já o mecanismo eletroforético atua de maneira uniforme em ampla faixa de diâmetro de partícula. Deste modo,

na competição entre os mecanismos, o eletroforético exerce maior influência na região de diâmetros entre as faixas de atuação dos mecanismos mecânicos de coleta ($0,1 < d_p < 2 \mu\text{m}$).

Deste modo, a eficiência total de coleta pode ser obtida pela soma de todos os mecanismos atuantes, portanto:

$$\eta_T = \eta_D + \eta_I + \eta_{DI} + \eta_G + \eta_E \quad (2.41)$$

e para a penetração:

$$P = P_D * P_I * P_{DI} * P_G * P_E \quad (2.42)$$

2.7. Queda de pressão no filtro

A queda de pressão em um filtro é tão importante quanto a eficiência, e às vezes, até mesmo mais importante. Não é difícil obter elevados valores de eficiências (acima de 99,9 %) para a filtração em filtros de tecido, mas altos valores de queda de pressão inviabilizam completamente este processo (MATTESON, 1987).

O escoamento através de meios porosos consolidados é semelhante ao escoamento através de leitos sólidos granulares (TARDOS *et al*, 1978). Conseqüentemente, o comportamento geral da queda de pressão (ΔP) em função da velocidade de escoamento do gás (U) é de forma similar à função correspondente nos sólidos granulares, isto é, a transição do escoamento laminar a turbulento é gradual (AGUIAR, 1995). Por esta razão a função deve incluir um termo viscoso e outro termo inercial, e a forma para o escoamento de fluido incompressível ocorre conforme mostra a Equação 2.43:

$$\frac{\Delta P}{H} = \alpha \cdot \mu \cdot U + v \cdot \alpha \cdot U^2 \quad (2.43)$$

onde, H é a espessura do meio filtrante, α o coeficiente de resistência viscosa e v o coeficiente de resistência inercial.

Para o caso de escoamento puramente viscoso, o segundo termo da Equação 2.41 torna-se desprezível e a expressão resultante é conhecida como a equação de Darcy para escoamento em meios porosos:

$$\frac{\Delta P}{H} = \alpha \cdot \mu \cdot U \quad (2.44)$$

A queda de pressão na filtração pode ser afetada devido à presença de cargas eletrostáticas nas partículas. As partículas podem adquirir carga espontaneamente, por triboeletrificação, ou podem ser induzidas, por impactação ou por carregamento corona. O mecanismo de carregamento de partículas por corrente corona é apresentado a seguir.

2.8. Mecanismo de carregamento por corrente corona

A eletrização de partículas pode ser efetuada através dos seguintes mecanismos: carregamento por contato ou atrito, carregamento por indução ou carregamento por corrente corona.

O carregamento por corrente corona é decorrente de duas etapas. A primeira onde ocorre o processo de ionização do gás e o decorrente carregamento das partículas.

2.8.1. Ionização do gás

Um campo elétrico de alta intensidade é necessário para que ocorra produção de grande quantidade de íons em fase gasosa. Este campo é obtido através do uso de altos potenciais aplicados a um eletrodo de descarga, podendo-se observar a passagem de corrente elétrica pelo gás isolante.

A ionização é produzida por elétrons livres, que são acelerados pelo alto campo elétrico existente perto do eletrodo de descarga, devido a sua grande mobilidade elétrica. A energia cinética desses elétrons é suficiente para retirar, através do impacto, novos elétrons das moléculas neutras de gás e formar íons positivos, produzindo, assim, uma avalanche de

elétrons. A região próxima ao eletrodo, na qual ocorre a ionização, é denominada zona ativa e é caracterizada por uma luminescência. A energia necessária para retirar um elétron varia, dependendo das espécies químicas presentes no gás, estando compreendida entre 10 e 25 volts.

A descarga corona pode ser tanto positiva quanto negativa. No entanto, a corona negativa apresenta maior estabilidade, o que faz com que seja utilizada quase sem exceção na precipitação industrial (OGAWA, 1984). Esta estabilidade é decorrente da grande porcentagem de gases eletronegativos presentes nas emissões industriais e no ar, além da possibilidade de se trabalhar em potencial mais elevado. Para a limpeza do ar em ambientes confinados, entretanto, a polaridade positiva é preferida devido a menor geração de ozônio (MIZUNO, 2000).

Na corona negativa os íons positivos se movem em direção ao eletrodo de descarga, que agora possui um importante papel, devido sua participação no processo inicial de ionização (Figura 2.4). Este pode ocorrer de duas formas: a primeira consiste na liberação de elétrons do eletrodo por colisão de íons positivos gerados na zona ativa e a segunda por efeito fotoelétrico devido à radiação ultravioleta. A aparência da corona negativa é muito diferente da positiva, possuindo vários pontos de luminescência, que, no eletrodo limpo, apresentam movimento rápido e alternado por toda a superfície. Outra característica deste tipo de descarga é que ela emite barulho semelhante a um assovio.

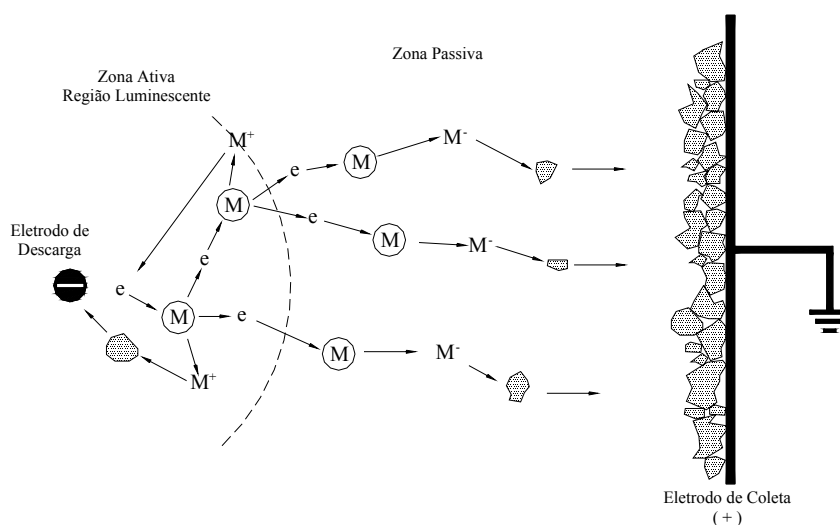


Figura 2.4 – Esquema ilustrativo da descarga corona negativa.

O raio da zona ativa na corona (r_0) é definido, segundo Khare e Sinha (1996), como a distância do centro do eletrodo de descarga ao ponto onde ocorre rápido decréscimo na intensidade do campo elétrico.

A Equação 2.45, proposta por Crawford⁽⁸⁾, (1980) apud Khare e Sinha (1996) para o cálculo do raio da zona ativa, foi obtida inicialmente para precipitadores eletrostáticos cilíndricos, sendo também válida para precipitadores do tipo placa-fio.

$$r_0 = r_{se} + 0,03 \cdot \sqrt{r_{se}} \quad (2.45)$$

onde:

r_0 – raio da zona ativa da corona;

r_{se} – é o raio do eletrodo de descarga.

2.8.2. Carregamento elétrico das partículas

As partículas, ao passarem pela região do eletrodo de descarga, são carregadas pelos íons e elétrons livres ainda existentes. Oglesby e Nichols (1978) afirmaram que o mecanismo de carregamento pode ocorrer por dois métodos, o carregamento por campo e por difusão. O carregamento por campo é predominante para partículas com diâmetro acima de 1,0 μm e o carregamento por difusão, para partículas menores que 0,4 μm . Na faixa compreendida entre estes valores, ambos os mecanismos apresentam efeitos significativos.

O mecanismo de carregamento por campo está relacionado com o movimento ordenado dos íons sob a influência de um campo elétrico, que resulta na colisão destes com as partículas em suspensão na corrente gasosa, e ali depositam suas cargas (DULLIEN, 1989). As cargas obtidas durante a colisão são mantidas na superfície das partículas pela força dipolo-imagem (ver item 2.5.5.2), criada através da aproximação do íon carregado e do campo elétrico aplicado.

(8) Crawford, M. *Air pollution control*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1980.

No processo de carregamento por difusão, de acordo com White (1963), íons presentes no gás compartilham a energia térmica das moléculas gasosas e obedece a teoria cinética dos gases. O movimento térmico dos íons provoca a difusão deles através do gás, e em particular, a colisão com partículas ali presentes. Estes íons aderem às partículas devido às forças atrativas que surgem quando os íons se aproximam das partículas. O processo de carregamento por difusão, portanto, não depende do campo elétrico.

A equação analítica de Cochet descreve o processo de carregamento elétrico das partículas, simultaneamente, pelas duas teorias já descritas e, segundo Riehle (1997), é alternativa razoável aos métodos de solução numérica. A Equação 2.46 representa a carga de saturação da partícula:

$$q_p^\infty = \left\{ \left(1 + \frac{2\lambda}{d_p} \right)^2 + \frac{2}{1 + \frac{2\lambda}{d_p}} \cdot \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right) \right\} \pi \epsilon_0 d_p^2 E \quad (2.46)$$

onde:

Q_p^2 é a carga da partícula em determinado tempo;

E é o campo elétrico aplicado;

λ é o caminho livre médio do gás;

ϵ_r é a constante dielétrica do material.

É importante ressaltar que quando a concentração de partículas for muito elevada, pode haver a diminuição do campo elétrico e da corrente corona, impedindo um carregamento normal. Outro fator importante é a descarga elétrica que pode ocorrer na placa coletora, causada pelo efeito da corona reversa. É importante ressaltar que este efeito ocorre somente em precipitadores eletrostáticos, na placa onde as partículas são coletadas.

2.8.3. Intensidade do campo elétrico

Quando a diferença de potencial entre os eletrodos é aumentada, o campo elétrico nas proximidades do fio aumenta, até que a descarga corona seja iniciada. Peek⁽⁹⁾ (1929) apud White (1963), propuseram a Equação 2.47, empírica, para a determinação do campo em questão para eletrodo de fio liso, que depende da densidade do gás e do raio do eletrodo utilizado, r_{se} .

$$E_0 = 30.\delta + 9.\sqrt{\frac{\delta}{r_{se}}} \quad (2.47)$$

onde: E_0 é o campo elétrico necessário para o início da corona em kV/cm e δ é a densidade relativa do gás a $T_1=193^\circ\text{C}$ e $P_1=1\text{ atm}$, dada por:

$$\delta = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} \quad (2.48)$$

2.9. Efeito de cargas eletrostática nos processos de limpeza de gases

Determinações experimentais da coleta eletroforética são escassas em virtude das dificuldades experimentais inerentes: é necessário medir não só a penetração e tamanho de partículas, como também a sua carga eletrostática (DUARTE F^o, 1995). Estudos experimentais sobre os efeitos das cargas eletrostáticas na filtração, com coletores cilíndricos ou leitos fibrosos na forma de tecido ou não, são os mais freqüentes na literatura. (BROWN, 1993; LUNDGREN E WHITBY, 1965; BAUMGARTNER E LOFFLER, 1987). Nestes estudos quando ocorre o carregamento das partículas, ele é feito geralmente por bombardeamento de íons (corona) e os aerossóis utilizados são monodispersos.

(9) F.W. Peek, Jr., Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1929.

Wang (2001) apresentou uma revisão teórica e experimental de estudos da aplicação de forças eletrostáticas na filtração e discute a necessidade de mais estudos do efeito de partículas carregadas. O autor conclui que as forças eletrostáticas têm provado serem úteis para o aumento da eficiência de coleta em filtros fibrosos. Estudos passados têm conduzido a um bom entendimento de forças elétricas e mecânicas em filtros limpos. No entanto, há ainda uma lacuna entre teoria e experimentos sobre o efeito de carregamento de partículas na eficiência de coleta.

Pnuelli et al. (2000) estudaram experimentalmente o efeito da instalação de um eletrodo bloqueador permeável a um filtro eletrostático. O filtro comercial utilizado era constituído de fios cilindros de aço inox ($d_C = 1 \text{ mm}$) em multicamadas, enquanto o eletrodo era constituído de tela de fios de cobre instalado do lado externo a filtração, conforme a Figura 2.5.

O eletrofiltro e o eletrodo de bloqueio eram separados por uma grade dielétrica que não contribuía para o processo de filtração das partículas de cinza com diâmetro médio de $0,3 \text{ }\mu\text{m}$. Foi aplicada uma voltagem de $1,6 \times 10^6 \text{ V/m}$ entre o filtro e o eletrodo de bloqueio, de modo que este último ficava carregado com cargas de mesmo sinal que as partículas.

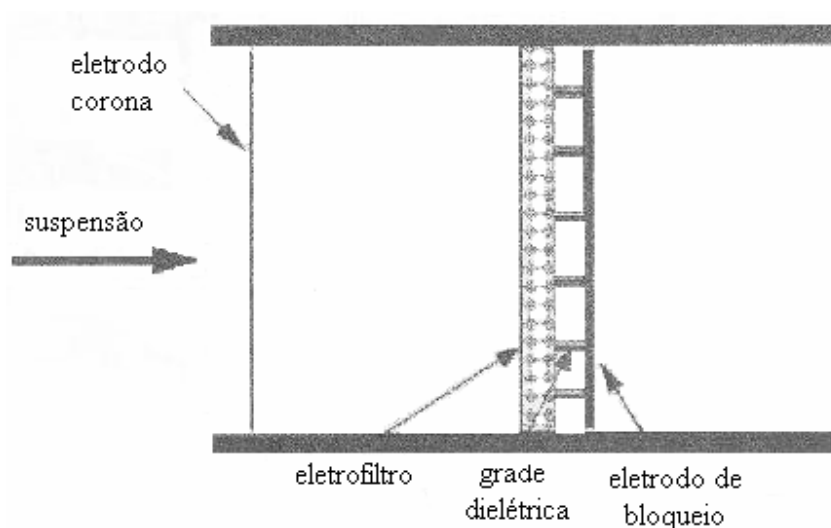


Figura 2.5 - Filtro eletrostático com um eletrodo de bloqueio.

Deste modo, a força eletrostática, gerada pelo eletrodo de bloqueio atuava sobre as partículas na direção oposta a seu escoamento, alterando sua trajetória e aumentando a

eficiência de coleta. Os autores observaram que a eficiência de coleta dobrou quando o eletrodo de bloqueio era ligado.

Romay et al. (1998) realizaram estudos experimentais dos mecanismos de captura eletrostáticos em filtros elétricos comerciais. Foram utilizados 3 tipos de filtros fibrosos comerciais, 2 carregados por corona e 1 carregado triboeletricamente de acordo com Brown (1993). Foram utilizadas partículas neutras e carregadas de cloreto de sódio de diâmetros (0,05 a 0,5 μm) e duas diferentes velocidades de filtração. Os autores concluíram que: os mecanismos eletrostáticos aumentaram a eficiência de filtração sem aumento na queda de pressão do sistema; a presença de carga e o tamanho das partículas afetaram fortemente a penetração no filtro; o mecanismo Coulombico somente atuou em partículas menores de 0,3 μm enquanto o mecanismo dipolo-imagem atuou em partículas maiores que 0,3 μm .

Estudos sobre os efeitos da carga eletrostática em leitos granulares são menos freqüentes que os desenvolvidos em leitos fibrosos. Muitos dos estudos experimentais sobre os efeitos da presença de cargas eletrostáticas nos coletores de filtro granular são desenvolvidos em leitos fluidizados, porque grânulos de materiais dielétricos, fluidizados por ar com baixa umidade, carrega-se naturalmente por triboeletrificação.

Walsh e Stenhouse (1997) estudaram o efeito das cargas elétricas no processo de filtração de gases. Foram utilizadas partículas monodispersas de ácido esteárico de diâmetros entre 0,46 e 1,40 μm . Os autores observaram para partículas de mesmo tamanho, menores valores de penetração e de queda de pressão para partículas carregadas do que para partículas no estado neutro. Foi observado também que o fenômeno de obstrução completa do filtro ocorre mais rápido quando partículas neutras foram utilizadas.

Duarte F^o (1995) estudou o efeito da variação do nível de cargas eletrostáticas das partículas no desempenho de filtro granular. A geração de cargas nas partículas foi feita por triboeletrificação e impacto. As cargas introduzidas nas partículas foram medidas de forma global, através de gaiola de Faraday que envolvia o filtro. Foram analisados os efeitos da variação do nível global de carga no estágio inicial da filtração, medindo a eficiência de coleta inicial das partículas com diâmetro médio de 0,4; 0,75; 2,0; 4,0; 7,5 e 15 μm e no estágio da filtração não estacionária, acompanhando a penetração global das partículas e a queda de pressão no leito. As principais conclusões do autor foram:

(a) a eficiência inicial de coleta das partículas de $d_p < 2 \mu\text{m}$ mostrou-se sensível à variação do nível da carga eletrostática global: diminuiu com o aumento da carga nas partículas, atingiu um valor mínimo e depois aumentou. Não se encontrou, na literatura específica sobre efeitos da carga eletrostática na filtração de gases, qualquer menção a esse tipo de comportamento;

(b) ocorreu a formação de torta de filtração somente para alguns níveis de carga nas partículas;

(c) o crescimento no nível de carga nas partículas, no geral, provocou uma diminuição na diferença de pressão no leito e na eficiência global do filtro, que passou por um valor mínimo, para em seguida aumentar novamente;

(d) foi observado que o aumento da carga eletrostática nas partículas induz à formação de estruturas de deposição menos resistente ao escoamento do fluido;

(e) combinações de polaridades e distribuição de cargas eletrostáticas entre as partículas pareceram ser responsáveis pelo comportamento observado na eficiência inicial de coleta do leito, formação da torta de filtração e estrutura da torta formada.

Brown (1993) também estudou os efeitos da carga eletrostática em materiais fibrosos. Foram utilizadas partículas monodispersas de NaCl ($1,5 \mu\text{m} < d_p < 6\mu\text{m}$) em máscaras de proteção feitas com fibras carregadas eletrostaticamente e neutralizadas (cargas em equilíbrio). As cargas foram introduzidas no sistema por eletrificação corona ou durante a extrusão dos filtros (o material foi forçado a passar por orifícios, fazendo com que estes adquirissem uma forma particular). Os autores observaram redução na penetração com a introdução de cargas no filtro (reduziu de 90% para 1% com $d_p = 1,5 \mu\text{m}$ e de 40% para 0,6% com $d_p = 6 \mu\text{m}$). Foi observado ainda que na filtração de NaCl ($d_p = 0,6 \mu\text{m}$), quanto menor a velocidade de filtração, menor a penetração, consequência do maior tempo para atuação das forças elétricas sobre o sistema.

Baumgartner e Loffler (1987), mediram a eficiência inicial e o comportamento dinâmico de filtros constituídos de fibras de eletretos. Utilizaram como partículas monodispersas o cloreto de parafina ($10 \text{ nm} < d_p < 5 \mu\text{m}$) e partículas polidispersas de quartzo, com e sem cargas elétricas. Os autores observaram para os vários filtros testados (na forma de lâ e de fibras fracionadas) que para o uso de eletretos foi obtido maiores valores de eficiência

inicial de coleta para partículas menores de 1 μm . Foi também observado que a eficiência inicial de coleta para partículas carregadas foi bem superior que para as partículas sem cargas.

Jodeit e Loffler (1987) analisaram experimentalmente os efeitos das cargas elétricas na eficiência de filtração para partículas de quartzo em filtros de pliacetato e de eletreto. Os testes foram realizados para fibras sem cargas, partículas carregadas e 3 diferentes valores de velocidade de filtração. Os autores verificaram redução na eficiência inicial de coleta com o aumento da velocidade de filtração para partículas menores que 1 μm . Este comportamento foi atribuído ao fato destas partículas, sofrerem menor ação das forças eletrostáticas, devido diminuição do tempo de residência das partículas no filtro. Foi verificado também que, para partículas de diâmetros entre 1 μm e 2 μm , houve aumento na eficiência com o aumento da velocidade de filtração, decorrente de maior ação do mecanismo de coleta inercial. Já para partículas maiores de 2 μm o aumento da velocidade de filtração acarretou redução na eficiência, fator atribuído à falta de adesão das partículas na fibra coletora.

Coury (1983) 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 μm 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 μm e velocidade de filtração de 0,062 e 0,122 m/s. Observou-se diminuição na penetração inicial das partículas, de diâmetro menor que 2 μm , quando comparada com a penetração das partículas neutralizadas por fonte radioativa de Polônio-210. A Figura 2.6 apresenta os resultados obtidos para a penetração inicial das partículas carregadas e sem carga e penetração esperada se todas as partículas fossem capturadas somente pelos mecanismos mecânicos de coleta.

A maior penetração das partículas neutralizadas com $d_p > 1 \mu\text{m}$, em relação à prevista pelos mecanismos foi atribuída à reentrada das partículas na corrente gasosa por “ricochete”, devido a sua energia cinética, ou ao “arrancamento” da partícula coletada, pela força de arraste do gás. Através da Figura 2.6, fica evidente a melhoria na eficiência inicial de coleta das partículas carregadas, atribuída pelo autor à atuação das forças de dipolo-imagem.

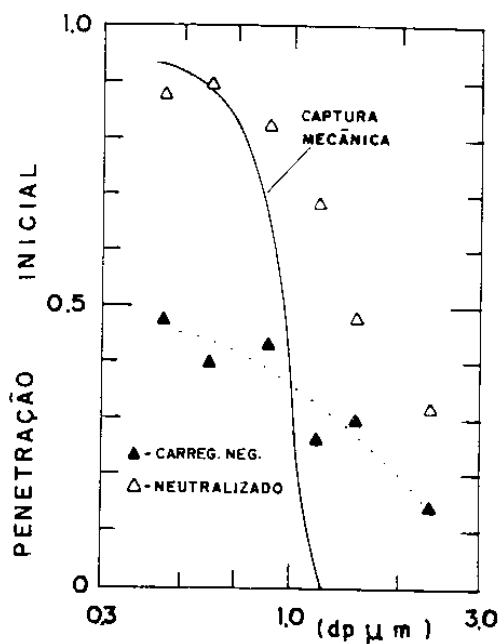


Figura 2.6 – Resultados obtidos por Coury (1983), para penetração inicial das partículas de cinza leve num leito de areia ($d_c = 325 \mu m$, comparada com a penetração prevista pelos mecanismos puramente mecânicos. ($U_0 = 0,122 \text{ m/s}$; $H = 0,01 \text{ m}$; $\epsilon = 0,41$)

Tardos e Pfeffer (1981), estudaram os efeitos da umidade relativa do ar de filtração. Neste trabalho foram utilizados como grânulos esferas de poliestireno e cilindros de polietileno e como aerossol, esferas de látex ($d_p = 1 \mu m$). Foi observado que a carga eletrostática dos grânulos diminuiu com o aumento da umidade, chegando praticamente a zero para umidade de 80%. Os autores também observaram que quando a carga eletrostática dos grânulos coletores e das partículas tinham o mesmo sinal, a eficiência do leito poderia ser menor do que no caso de ausência total de forças eletrostáticas.

2.10. Métodos para determinação de cargas eletrostáticas em partículas

Existem vários equipamentos para medir cargas eletrostáticas em partículas de aerossóis. Uma boa revisão sobre o assunto pode ser encontrada em Cross (1987), Flagan (1998) e Marra Jr. (2000).

Inúmeros equipamentos foram desenvolvidos para a determinação de cargas elétricas em partículas, com as mais variadas características estruturais, sensibilidades e possibilidades de aplicação. Quando a carga é o parâmetro a ser medido, apenas duas definições razoáveis são possíveis: carga absoluta e mobilidade elétrica, e os métodos de medida são referidos como sendo estático e dinâmico, respectivamente.

A gaiola de Faraday é um dispositivo clássico, do método estático, para a medida de cargas elétricas de qualquer objeto carregado. Este dispositivo consiste basicamente de um recipiente de dupla parede, geralmente cobre, isoladas entre si. A parede externa é aterrada e a interna é ligada a um eletrômetro, equipamento capaz de medir cargas elétricas pela detecção de pequenas voltagens. Se um objeto, de qualquer forma ou condutividade, é colocado dentro da gaiola, uma carga igual e de sinal contrário é induzida na parede interna e indicada pelo eletrômetro (CROSS, 1987).

Partículas dispersas em um gás, podem ser levadas a passar através de uma gaiola de Faraday parcial, na forma de um anel condutor e induzir uma carga a qual pode ser sentida por um eletrômetro. Apenas uma gaiola de Faraday completa é capaz de desenvolver carga induzida igual à carga das partículas nela contida. A aplicação dos métodos estáticos de medida de carga à população de partículas apresenta o inconveniente de apenas a carga média ser medida.

De uso mais geral, estão os métodos de análise que compreendem medidas da resposta dinâmica de uma partícula a um campo elétrico. Estes métodos fundamentam-se na medida da eletromobilidade ou mobilidade elétrica da partícula, Z_p , definida como a razão entre a velocidade da partícula devido à atuação de forças elétricas e a intensidade do campo elétrico ao qual está submetida, Brown (1997). A mobilidade elétrica descreve a forma como a partícula se move em um campo elétrico, sendo decorrente do fato que a trajetória de uma partícula carregada eletrostaticamente pode ser alterada pela presença de um campo elétrico.

Estudos sobre a classificação eletrostática de aerossóis de acordo com o tamanho das partículas, baseados no conceito da eletromobilidade foram apresentados por Langer e Radnik (1961), Whitby e Peterson (1965) e Megaw e Wells (1969). Segundo Langer e Radnik (1961), a idéia da classificação eletrostática foi originalmente concebida por Rohmann (1923). O equipamento utilizado nestes estudos era constituído basicamente de um conduto de seção retangular, possuindo duas placas coletoras de metal paralelas, nas quais aplicava-se uma

diferença de potencial de até ± 10 kV e, por entre as quais o aerossol era injetado. A partícula deslocava-se em direção a uma das placas, de acordo com sua carga, ficando aí depositada. As condições de operação do equipamento garantiam regime de escoamento laminar do gás e as partículas estudadas possuíam diâmetros inferiores a $1 \mu\text{m}$.

Biermann e Bergman (1984) e Emets et al. (1991) descreveram a análise em dois estágios de processo no qual um aerossol classificado era passado através de um equipamento de medida seletiva de tamanhos na forma de um contador de diâmetro de espalhamento óptico. O resultado foi uma análise do aerossol em termos de uma função bidimensional, uma variável sendo a mobilidade elétrica e a outra, o diâmetro de espalhamento óptico. Os autores limitaram suas análises a uma faixa de tamanho de partícula relativamente pequena, diâmetros de aproximadamente $0,1$ a $3,0 \mu\text{m}$, mas números de cargas elementares entre -1000 e $+1000$ foram computados. Um classificador eletrostático disponível comercialmente foi posteriormente utilizado, com uma modificação que permitiu a reversão do campo elétrico a fim de que partículas com cargas de ambos os sinais pudessem ser contadas separadamente.

Um classificador de cargas eletrostáticas que aplicava o princípio da eletromobilidade da partícula foi construído por Coury (1983). A corrente de gás contendo as partículas era submetida a um campo elétrico, provocando desvio na trajetória das partículas de acordo com a carga intrínseca das mesmas.

A Figura 2.7 exibe um esquema do classificador de cargas eletrostáticas projetado por Coury (1983).

O aerossol é introduzido no classificador através de uma fenda central, envolvido entre duas correntes de ar limpo, com mesma velocidade, em um conduto de seção retangular. As três correntes atingem uma região cujas paredes laterais são placas de cobre submetidas a uma diferença de potencial e, então entram na região de placas paralelas coletoras, onde as partículas são expostas a corrente corona negativa e se depositam nas placas. Esta última região constitui um precipitador eletrostático de placas paralelas. A eletromobilidade da partícula estabelece o seu deslocamento e a classificação das partículas era feita de acordo com a placa coletora em que eram depositadas.

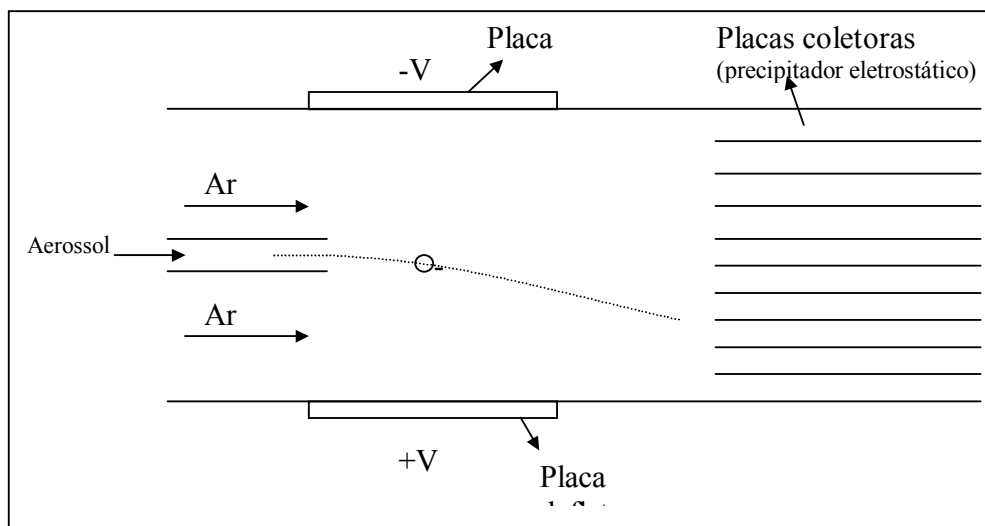


Figura 2.7 – Esquema do classificador de cargas eletrostáticas (COURY, 1983)

Guang (1991) e Coury et al. (1991) apresentaram equipamento para a medida “in loco” de cargas eletrostáticas de partículas resultantes da queima de carvão de quatro usinas termelétricas. O equipamento era semelhante ao desenvolvido por Coury (1983), Figura 2.7, com algumas modificações.

2.10.1. Classificador de cargas eletrostáticas

A eletromobilidade vem do fato que a trajetória de uma partícula carregada pode ser alterada pela presença de um campo elétrico. Uma partícula com carga q em um campo elétrico \vec{E} , está sujeita a uma força elétrica, $\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$, paralela às linhas de força. Como resultado desta força elétrica, a partícula move-se com velocidade U_x na direção das linhas de força, conforme pode ser observado na Figura 2.8.

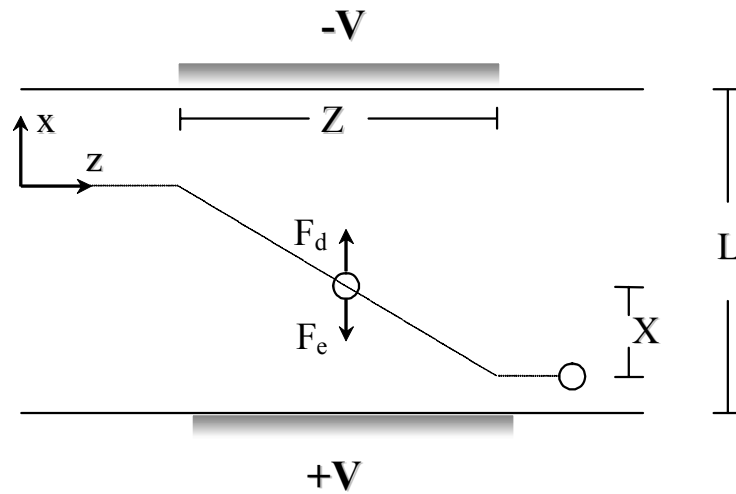


Figura 2.8 – Deflexão de uma partícula carregada com carga q submetida a um campo elétrico.

A força de arraste, \overline{F}_d , que irá contrabalançar a força elétrica é dada por:

$$\overline{F}_d = \frac{C_D \rho_g U_x^2 d_p^2 \pi}{8F_s} \quad (2.49)$$

onde C_D é o coeficiente de arraste da partícula.

A força de empuxo e o peso podem ser desprezados frente à força elétrica e a força de arraste. Assumindo equilíbrio entre a força elétrica e a força de arraste, $\overline{F}_e = \overline{F}_d$, pode-se escrever:

$$\frac{C_D \rho_g U_x^2 d_p^2 \pi}{8F_s} = q \overline{E} \quad (2.50)$$

Para o caso de placas paralelas colocadas a uma distância L , com diferença de potencial ΔV aplicada entre elas, o campo elétrico na direção x pode ser calculado pela equação:

$$E_x = \frac{\Delta V}{L} \quad (2.51)$$

A velocidade da partícula na direção x , U_x , pode ser determinada em função da velocidade do gás, U_0 , do comprimento das placas de deflexão, Z , e da distância percorrida pela partícula, X , medida a partir do centro, representada pela Equação 2.52.

$$U_x = \frac{U_0 X}{Z} \quad (2.52)$$

Substituindo-se as Equações 2.51 e 2.52 na Equação 2.50, obtém-se:

$$q = \frac{C_D \rho_g \pi L U_0^2 X^2 d_p^2}{8 F_s \Delta V Z^2} \quad (2.53)$$

De acordo com a Equação 2.53, a carga da partícula é função do coeficiente de arraste da partícula. A correlação clássica para a determinação do coeficiente de arraste para partícula de diâmetro d_p , movendo-se com velocidade relativa U_x , em um gás estagnado (regime de Stokes) é dada por:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} = \frac{24\mu}{\rho_g d_p U_x} \quad (2.54)$$

onde: Re_p é o número de Reynolds da partícula. A Equação 2.54 é válida para $Re_p < 0,1$.

Como o número de Reynolds da partícula é normalmente pequeno e os tempos de relaxação da partícula e do fluido são, também, suficientemente pequenos, a força de arraste \overline{F}_d , que irá contrabalançar a força elétrica pode ser dada por:

$$\overline{F}_d = \frac{3\mu\pi d_{pS} U_x}{F_s} \quad (2.55)$$

onde d_{pS} é o diâmetro de Stokes da partícula.

Logo:

$$\frac{3\mu\pi d_p S U_x}{F_s} = q \bar{E} \quad (2.56)$$

Rearranjando a Equação 2.56, tem-se:

$$U_x = \frac{qF_s}{3\mu\pi d_p} \bar{E} = Z_p \bar{E} \quad (2.57)$$

onde Z_p é a eletromobilidade da partícula dada pela seguinte equação:

$$Z_p = \frac{qF_s}{3\mu\pi d_p} \quad (2.58)$$

Combinando-se as Equações 2.51 e 2.52 com a Equação 2.57 tem-se:

$$Z_p = \frac{U_0 XL}{Z \Delta V} \quad (2.59)$$

Igualando-se e ordenando-se as Equações 2.58 e 2.59, tem-se:

$$q = \frac{3\mu\pi d_p S U_0 XL}{F_s Z \Delta V} \quad (2.60)$$

A Equação 2.60 é válida para as partículas que cruzam todas as linhas de força do campo elétrico, na direção z , e para perfil estabelecido de velocidades. Uma restrição do uso do classificador está relacionada com as condições do fluido, ou seja, no equacionamento desenvolvido considerou-se que a partícula move-se na direção x contra um fluido estagnado e, conseqüentemente, a força de arraste da partícula foi considerada como sendo a obtida pela aplicação da lei de Stokes.

A equação 2.36 mostra que para o cálculo de K_M , há necessidade de se obter relação entre a carga da partícula com o seu respectivo diâmetro. Esta relação não era obtida quando a carga da partícula foi determinada de forma global por gaiola da Faraday. Portanto, com a utilização do CCE foi possível avaliar, de modo inédito, o nível e a distribuição de cargas nas partículas, o seu tamanho e concentração, além de medir a perda de carga no filtro ao longo dos testes de filtração.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo encontram-se descritos os principais componentes do aparato experimental utilizado para execução do trabalho experimental. Esta descrição envolve a caracterização dos materiais particulados e do tecido filtrante, automação do sistema de medida de cargas e desenvolvimento do sistema de carregamento de partículas e do suporte de filtração. Serão mostrados, em detalhe, todos os procedimentos adotados na realização dos testes de filtração e de determinação do nível de carga eletrostática das partículas, envolvendo a eletrização das mesmas.

3.1. Materiais pulverulentos

A utilização dos materiais pulverulentos pode ser dividida em duas partes. A primeira, em que foram realizados testes iniciais de determinação do nível de cargas eletrostáticas nas partículas antes da automação do Classificador de Cargas Eletrostáticas, CCE, na qual foram utilizados três diferentes materiais: pirocloro, diatomito e pó de madeira. E a segunda parte, de ajuste do nível de cargas gerada pelo carregador tipo corona e ensaios de filtração, onde somente o concentrado fosfático foi utilizado.

3.1.1. Materiais pulverulentos utilizados antes da automação do CCE

Para a realização dos testes iniciais foram escolhidos 3 sólidos: pirocloro (óxido de nióbio) fornecido pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) de Araxá-MG, diatomito e pó de madeira fornecido pela Duratex de Botucatu-SP. Estes materiais foram escolhidos devido às propriedades físicas e químicas, caráter orgânico ou inorgânico, e por possuírem granulometria adequada ao equipamento de geração do aerossol (SSPD) e às dimensões do CCE. Os resultados dos testes de medida do nível de cargas foram comparados com os resultados obtidos por Almeida (2000), que utilizou outros três sólidos, dentre eles:

concentrado de rocha fosfática fornecido pela Fosfértil de Patos de Minas-MG, clara de ovo seca no centro de secagem do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da UFSCar e alumina fornecida pelo Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA) da UFSCar.

A caracterização dos materiais particulados, densidade e granulometria, foram feitas em picnômetro a gás Hélio, Accupyc, Modelo 1330 da Micromeritics e em contador APS modelo 3320 da TSI, respectivamente. A Tabela 3.1 apresenta os valores de densidade e diâmetro médio de Stokes dos materiais utilizados. As distribuições granulométricas dos materiais empregados encontram-se no Apêndice A.

Tabela 3.1 – Propriedades dos aerossóis testados.

Material	Densidade [Kg/m³]	Diâmetro médio de Stokes, d_{ps} [μm]
Rocha fosfática	3030 ± 3	1,95
Alumina	3698 ± 3	1,84
Clara de ovo	1043 ± 4	3,15
Madeira	1443 ± 1	3,13
Pirocloro	4112 ± 2	1,89
Diatomito	2866 ± 2	2,26

3.1.2. Concentrado fosfático

O concentrado de rocha fosfática empregada nos experimentos de medida do nível de carga após a automação do CCE e nos testes de filtração foi fornecido pela Fosfértil S.A de Patos de Minas (MG). O material depois de recebido passou por etapas de preparação antes de ser utilizado nos experimentos. Por apresentar partículas em uma grande faixa de tamanhos, o pó de rocha foi peneirado a úmido em peneira de 400 mesh. Esta etapa consistiu em passar o material com água através da peneira, sendo aproveitada a fração passante. Em seguida esperava-se 24 horas, tempo necessário para que houvesse a sedimentação completa do material, para a retirada do excesso água com o uso de um sifão. O material foi colocado em estufa a 100 °C por 24 horas até que toda água fosse retirada. Os blocos secos do pó de rocha foram colocados em moinho de bolas por período de 8 horas.

O concentrado fosfático apresentou valores de densidade e granulometria diferentes do concentrado fosfático utilizado por Almeida (2000). Estas diferenças foram decorrentes das etapas de peneiramento a úmido e de moagem do material.

O pó de rocha fosfática foi submetido a análise química quantitativa por Fluorescência de Raios-X no Laboratório de Caracterização Tecnológica – LCT, do Departamento de Engenharia de Minas/USP. Os resultados em % de óxidos do material utilizado nos experimentos encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Análise química quantitativa do concentrado fosfático em % de óxidos antes e depois do processo de peneiramento a úmido.

Amostra	(% de óxidos)	
	Antes	Depois
P ₂ O ₅	35,8	24,6
CaO	51,4	31,2
S _i O ₂	2,34	28,9
Al ₂ O ₃	0,44	6,07
Fe ₂ O ₃	1,42	2,83
MgO	0,57	0,48
TiO ₂	1,12	0,31
BaO	0,28	0,08
PF	4,36	4,46

Após passar por todos os procedimentos citados, foram efetuadas as medidas de densidade através da análise em picnômetro a gás Hélio AccuPyc 1330 da Micromeritics, sendo o valor obtido de $2940 \pm 32 \text{ Kg/m}^3$. A distribuição granulométrica deste material polidisperso foi determinada através do contador APS 3320 da TSI, que fornece o número de partículas em função do diâmetro aerodinâmico das mesmas. Uma análise granulométrica do concentrado fosfático feita no APS pode ser vista na Figura 3.1. Neste caso, o valor do diâmetro aerodinâmico mediano do concentrado fosfático foi de $4,37 \mu\text{m}$.

A conversão de diâmetro aerodinâmico em diâmetro de Stokes para uma determinada partícula pode ser feita conhecendo-se a densidade da mesma, como mostra a Equação 3.1.

$$d_{pS} = \left(\frac{\rho_0}{\rho_p} \right)^{0,5} * d_{pA} \quad (3.1)$$

onde ρ_p é a densidade da partícula e ρ_0 a densidade unitária: 1 g/cm³.

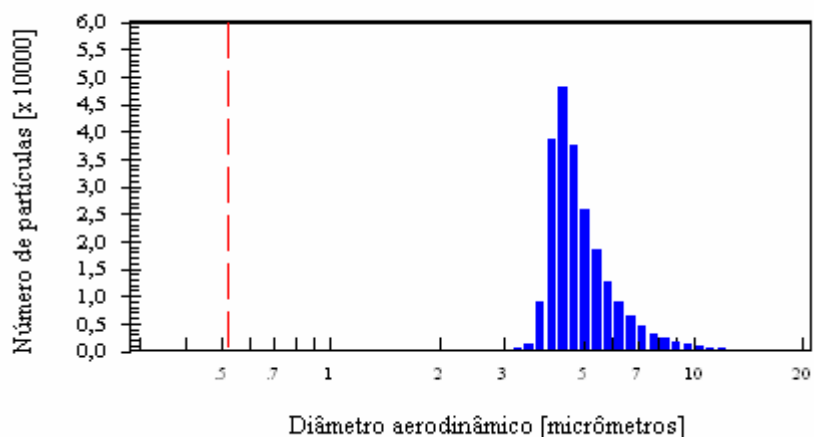


Figura 3.1 - Histograma do número de partículas de rocha fosfática em função do diâmetro aerodinâmico.

Deste modo o diâmetro de Stokes mediano do concentrado fosfático foi de 2,55 μm .

O concentrado fosfático era constituído por partículas com formas irregulares, apresentando esfericidade igual a 0,60. A Figura 3.2 apresenta a imagem do material pulverulento obtida em Microscópio Eletrônico de Varredura com ampliação de 3500 vezes.

3.2. Sistema de dispersão do aerossol

O gerador de pó de pequena escala (SSPD) da TSI modelo 3433 é um equipamento indicado para dispersar eficientemente pequenas quantidades de pó seco com diâmetros entre 1 e 50 μm , usando a técnica de aspiração por um Venturi. A Figura 3.3 mostra o esquema simplificado do equipamento.

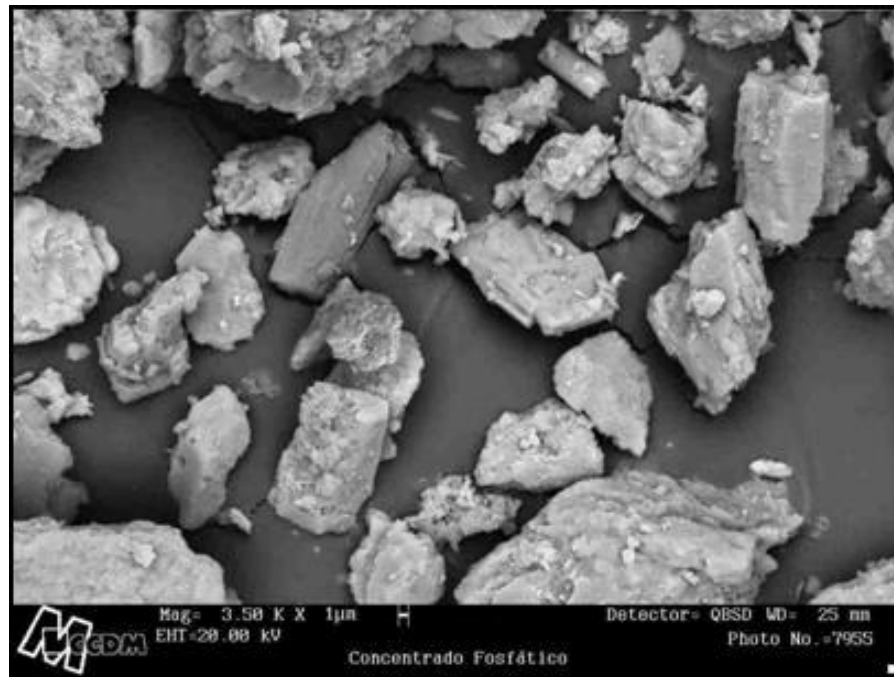


Figura 3.2 – Imagem do concentrado fosfático obtida no MEV com ampliação de 3500 vezes.

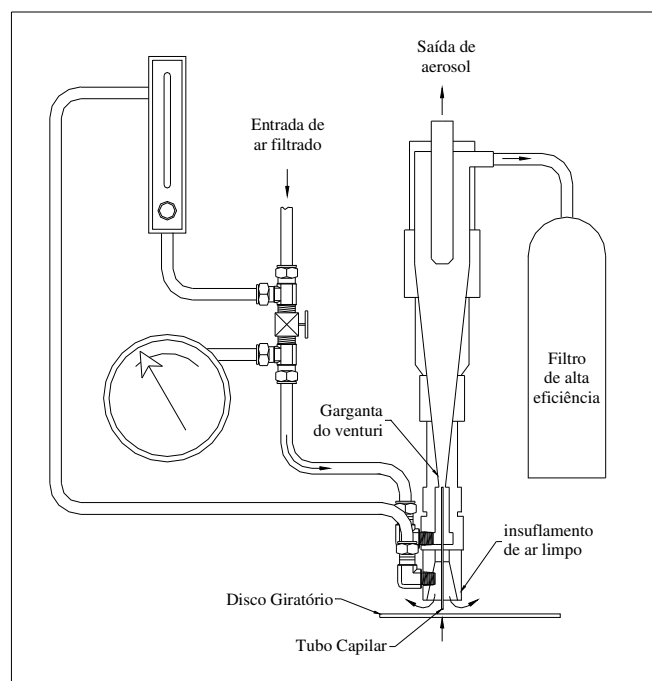


Figura 3.3 - Esquema do dispersor de pó TSI 3433.

O pó foi depositado sobre a superfície de um disco giratório e com o auxílio de um pincel foi espalhado de maneira a formar uma camada uniforme, sendo então, aspirado por um Venturi através de tubo capilar.

O aumento da velocidade do ar através da garganta do Venturi gera uma região de baixa pressão que direciona o fluxo de partículas de forma ascendente no tubo capilar. O tubo capilar atua portanto como um pequeno aspirador à medida que o disco gira lentamente abaixo dele.

Na garganta do Venturi, as partículas do aerossol que entram são desaglomeradas pelas forças cisalhantes geradas entre a alta velocidade do gás passante através da garganta e a baixa velocidade da corrente gás-partículas que deixa o tubo capilar.

A vazão de ar no rotâmetro foi ajustada em 5 l/min e a pressão de sucção em 155 polegadas de água. Tais condições geraram aproximadamente 5 l/min de aerossol com taxa mássica média de $0,52 \pm 0,11$ mg de pó/min.

3.3. Sistema fornecedor de ar

O sistema fornecedor de ar TSI, modelo 3070, conectado ao dispersor de aerossol serviu para filtrar, secar e regular a pressão do ar na linha de ar comprimido. O sistema era composto de um filtro de entrada, para retirada de partículas muito grandes e gotas de água da corrente de ar de entrada, regulador de pressão, para o ajuste e constância da pressão do ar, coluna dessecadora com sílica gel, para retirada da umidade do ar, e um filtro de saída em fibra de vidro, com eficiência de coleta maior que 99,99%.

3.4. Carregador de partículas tipo corona

A necessidade de geração controlada de cargas eletrostáticas neste trabalho resultou no projeto e construção de um sistema de geração de cargas, detalhado a seguir. O sistema de geração de cargas consistiu de um carregador tipo corona, cilíndrico, confeccionado em PVC, com diâmetro interno de 5,10 cm e comprimento de 14 cm. As reduções nos diâmetros na

entrada e saída do carregador (de 5,1 cm para 1,0 cm) foram efetuadas em virtude de conectar o carregador ao gerador de aerossol e conectar o carregador ao CCE ou ao suporte de filtração, dependendo do teste a ser realizado.

O eletrodo de descarga consistiu de um fio de aço inox cilíndrico de 0,25 mm de diâmetro. Como pode ser visto na Figura 3.4 o fio foi longitudinalmente esticado na região central do carregador através de dois suportes localizados nas extremidades do carregador. Estes suportes foram projetados de forma a evitar turbulência no fluxo de ar no carregador e de maneira a acumular a menor quantidade possível do material particulado eletricamente carregado. Em uma das extremidades, o eletrodo foi conectado a uma fonte de alta tensão da marca EXACTUS modelo EAT 22 2012-B. A fonte de alta tensão permitiu a aplicação de potencial que podia ser variado de 0 a 20 kV em uma corrente elétrica de 0 a 10 mA, podendo produzir corrente corona positiva e negativa.

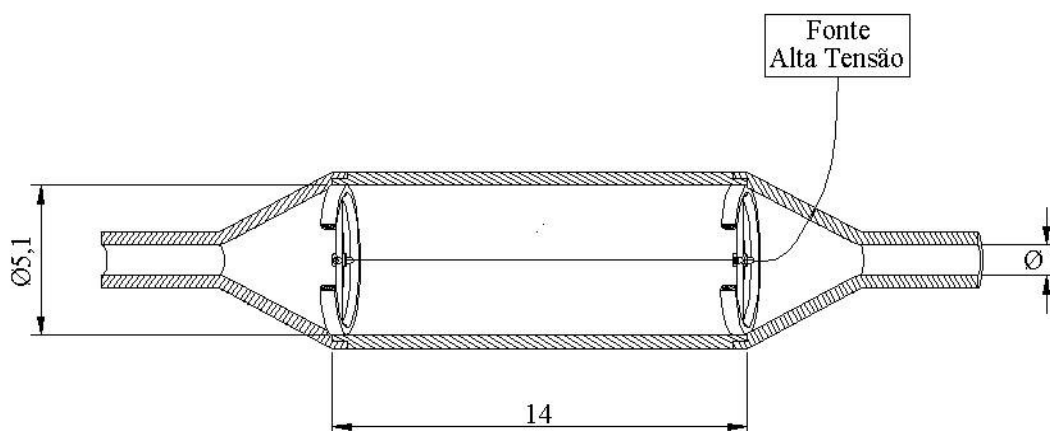


Figura 3.4 – Detalhe do carregador tipo corona (dimensões em cm).

3.5. Contador de partículas (APS)

A contagem do número de partículas, tanto nos testes de medida de carga, quanto nos ensaios de filtração, foram efetuados pelo contador (APS), Aerodynamic Particle Sizer, modelo 3320. O equipamento consiste de um espectrômetro de alto desempenho capaz de medir, com precisão, o número e o diâmetro aerodinâmico de partículas de uma corrente

gasosa, fornecendo distribuições por tamanho de partículas com diâmetros aerodinâmicos entre 0,5 a 20,5 μm .

Um esquema geral do equipamento é mostrado na Figura 3.5.

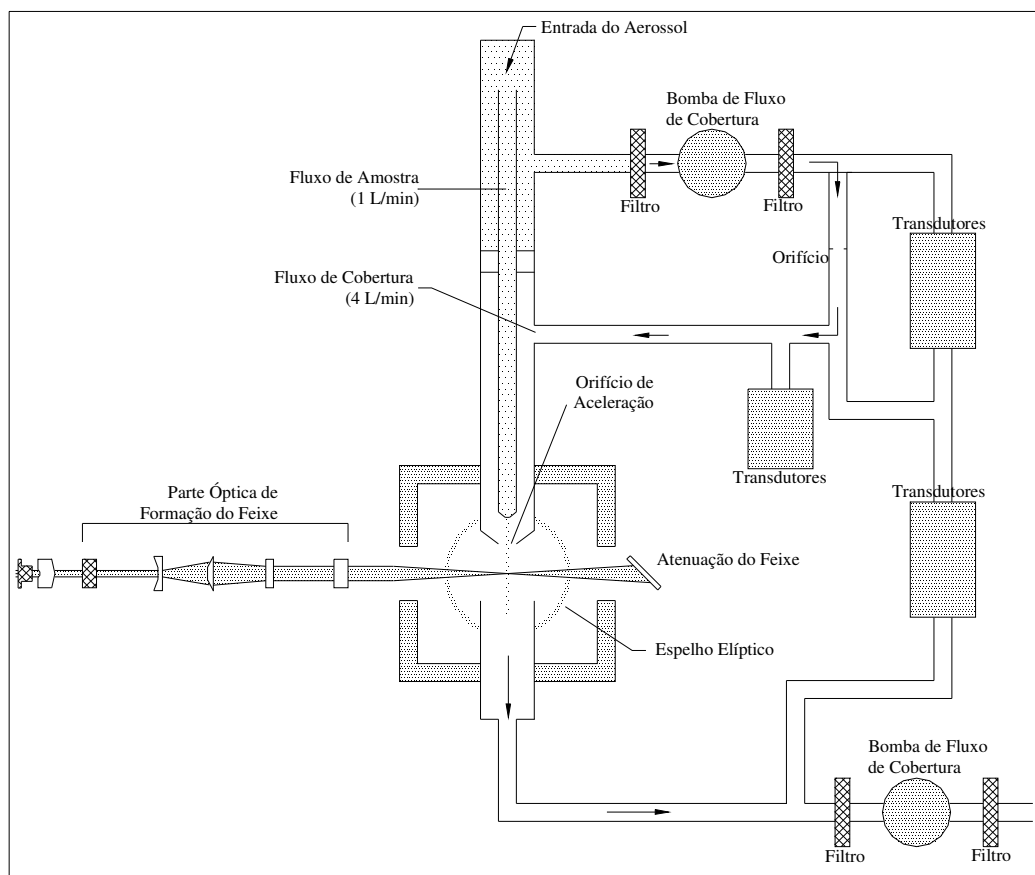


Figura 3.5 – Vista esquemática do APS.

Após passar pelas sondas de coleta isocinéticas (ver Figuras 3.7 e 3.21), o aerossol era direcionado para a entrada do contador onde era imediatamente separado em um fluxo de amostra, através do canal interno, e um fluxo de revestimento, através do canal externo.

O controle do fluxo de revestimento era feito pela medida da queda de pressão através de orifício de safira. Esta queda de pressão era convertida para fluxo volumétrico com compensação para pressão atmosférica absoluta.

Após passar pelo orifício, o fluxo de revestimento se juntava ao fluxo de amostra no orifício de aceleração. Este fluxo confinava as partículas da amostra a uma corrente central e acelerava o fluxo de ar ao redor das partículas. Deste modo, pequenas partículas (as quais

podiam acelerar com o fluxo) alcançavam velocidades mais elevadas que as partículas maiores (as quais, devido à inércia, ficavam atrás da corrente de ar).

Em seguida, as partículas passavam através de dois feixes de lasers amplamente focados, dispersando a luz à medida que as partículas passam. A luz dispersada lateralmente era coletada por um espelho elíptico que focava a luz coletada para um fotodetector sólido, o qual convertia os pulsos luminosos em pulsos elétricos. Pela contagem eletrônica do tempo entre os picos dos pulsos, a velocidade pode ser calculada para cada partícula individual.

O software que acompanha o contador APS foi usado para coletar dados a partir de um sensor e armazená-los em arquivos. Durante os testes, o software foi repetidamente utilizado para exibir dados na forma de gráficos e tabelas e mesmo para fornecer informações estatísticas. Nos testes de filtração e determinação do nível de cargas eletrostáticas, cada arquivo armazenava dados correspondentes a um minuto de coleta. O software gerenciador do APS permitia o armazenamento dos dados coletados em arquivos. Depois de salvos, os arquivos, exibindo os dados na forma de gráficos, tabelas e informações estatísticas, eram posteriormente utilizados para a determinação da penetração e nível de cargas das partículas.

3.5.1. Determinação dos diâmetros médios

As faixas de distribuição de tamanhos foram obtidas a partir dos dados de avaliação do aerossol gerado, denominados dados de entrada. Esses dados correspondem àqueles obtidos com a conexão direta entre o gerador e o contador APS. Os dados capturados do contador fornecem uma distribuição de tamanhos que vai de 0,525 a 20,535 μm distribuídas em 52 canais sendo que foram determinadas 5 faixas representativas com base na contagem de cada um dos 52 canais fornecidos. O diâmetro médio de Sauter de cada uma das faixas corresponde ao diâmetro usado no cálculo da carga da partícula e na determinação da penetração nos testes de filtração.

A Tabela 3.3 mostra o resultado para suspensão de concentrado fosfático, exibindo o número total de partículas para cada faixa de diâmetro, com o respectivo diâmetro mediano da faixa adotada.

Tabela 3.3 - Dados de caracterização do concentrado fosfático.

Faixa de diâmetro (μm)						
N_p	0,52 – 4,22	4,22 - 5,23	5,23 – 6,04	6,04 - 8,06	8,06- 20,52	total
	58.100	159.000	58.100	48.900	20.100	344.200
%	0,19	0,48	0,15	0,12	0,05	1,00
Diâmetro aerodinâmico médio (μm)						
D_{pa}	3,96	4,67	5,60	6,81	10,34	
Densidade do concentrado fosfático: 2,94 g/cm ³						
Diâmetro Stokes médio(μm)						
D_{ps}	2,32	2,71	3,26	3,98	5,98	

3.6. Sistema de determinação do nível de cargas eletrostáticas em partículas

3.6.1. Classificador de cargas eletrostáticas (CCE)

O CCE usado nos testes assemelha-se ao classificador desenvolvido por Coury (1983), aperfeiçoado por Marra Jr. (2000) e utilizado por Almeida (2000).

Os detalhes de construção e dimensões podem ser vistos nas Figuras 3.6 a 3.8.

O CCE foi construído todo em acrílico transparente com espessura de 10 mm e tinha como característica importante o fato de ser inteiramente desmontável, facilitando sua limpeza e transporte. O equipamento pode ser dividido em quatro regiões de acordo com a Figura 3.7.

- A - Região de inserção do aerossol;
- B - Região de estabilização do fluxo de gás;
- C - Região de deflexão das partículas;
- D - Região de coleta das partículas.

O aerossol era introduzido no CCE através de uma fenda central paralela ao eixo longitudinal do classificador e atingia o conduto de seção retangular (região B) envolvido entre duas correntes de gás filtrado na mesma velocidade.

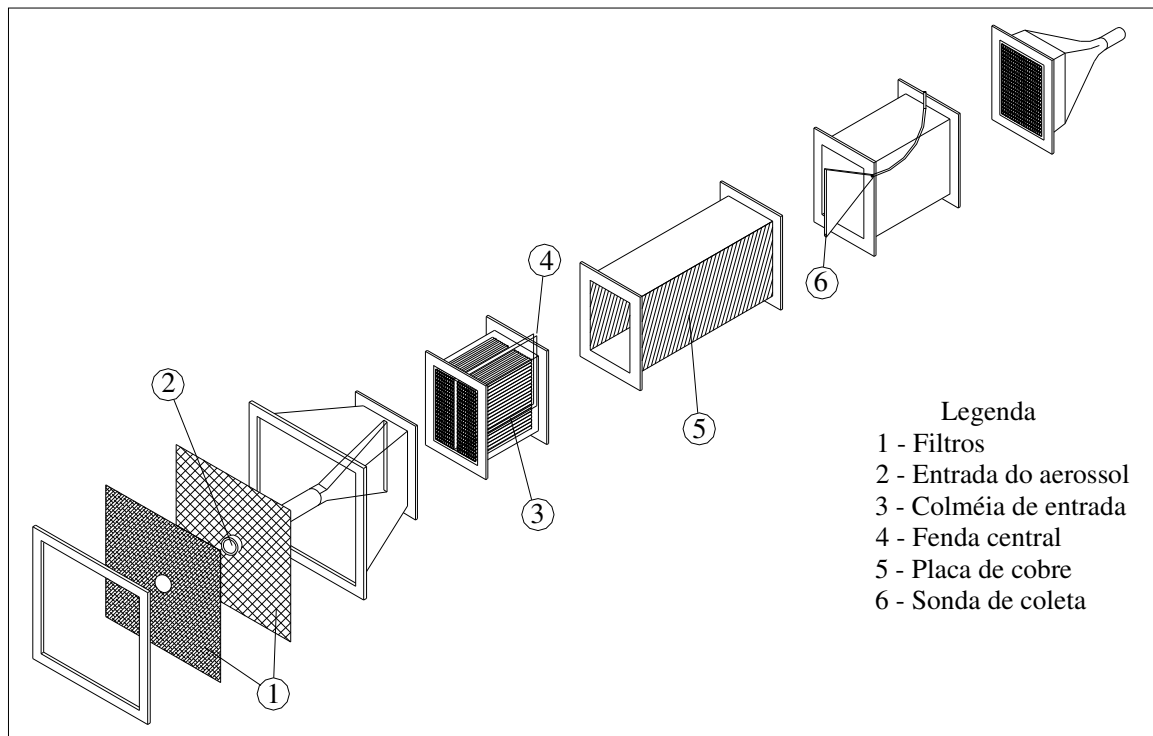


Figura 3.6 - Vista expandida do classificador de cargas eletrostáticas (ALMEIDA, 2000).

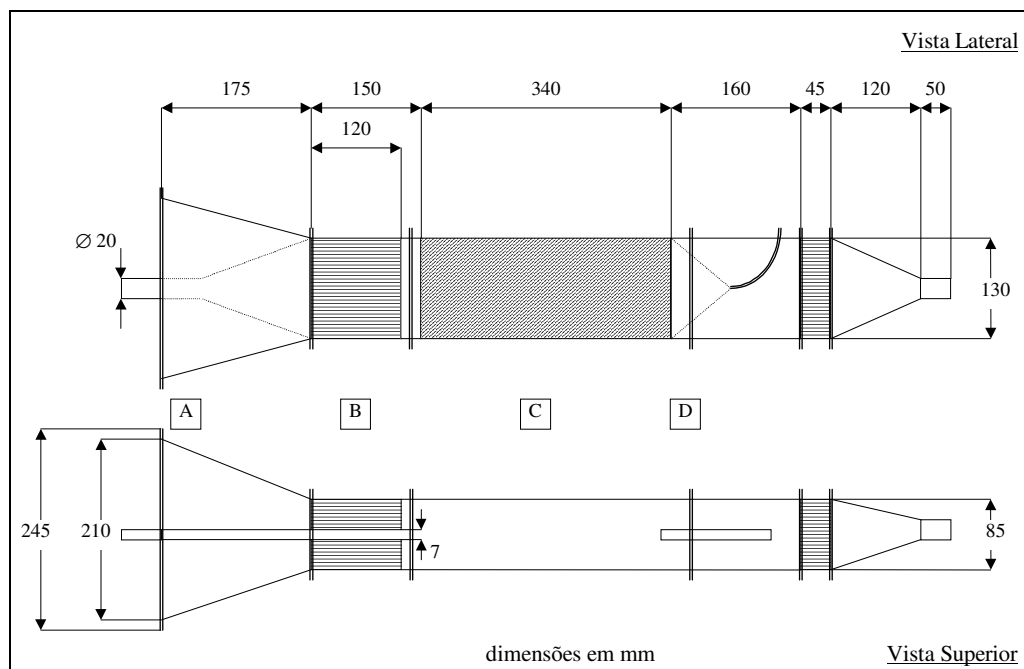


Figura 3.7 - Dimensões do classificador de cargas eletrostáticas (ALMEIDA, 2000).

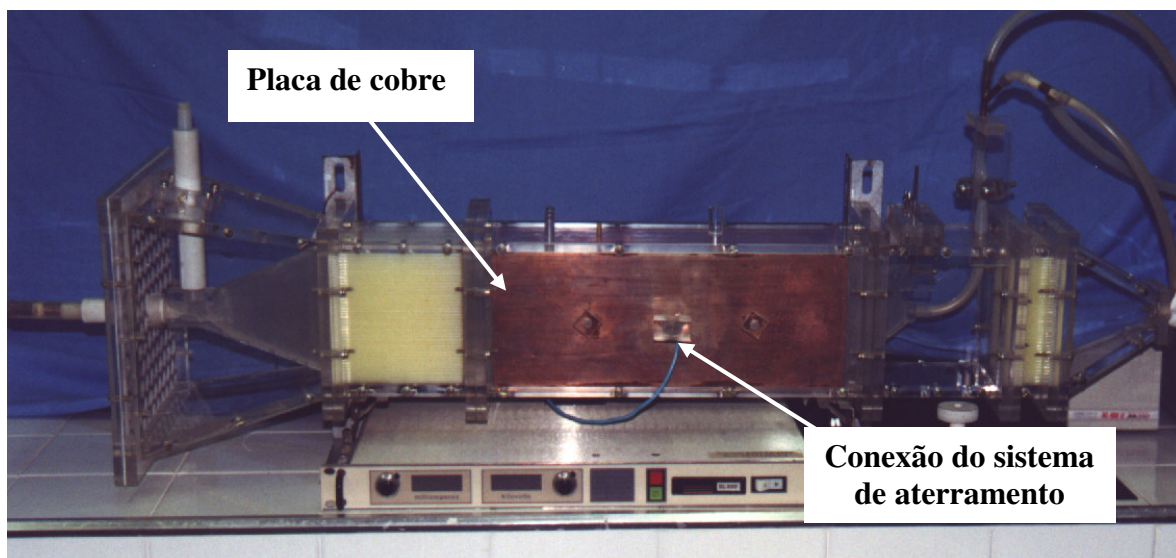


Figura 3.8 - Vista geral do classificador de cargas eletrostáticas.

Portanto, três camadas de ar se desenvolviam no interior do classificador. Uma camada de ar central, proveniente da fenda na colméia de entrada, que carrega as partículas e outras duas adjacentes com ar limpo, provenientes das regiões laterais da colméia de entrada.

A fenda central de entrada possuía 0,7 cm e era envolvida por uma colméia formada por tubos plásticos com diâmetros de 0,3 cm e 12 cm de comprimento, colados entre si com adesivo à base de silicone. No final do conduto retangular, existia uma colméia de saída com tubos de mesmo diâmetro e 4,5 cm de comprimento. As duas colméias tinham a finalidade de estabilização do perfil de velocidade do gás, deixando o escoamento laminar no interior do CCE com perfil de velocidade plano (MARRA Jr, 2000).

A região de deflexão das partículas (Região C) possuía, nas duas paredes verticais, chapas de cobre embutidas, de 13,5 cm de comprimento e 0,2 cm de espessura. Uma das chapas possuía, no centro, um pino com rosca soldado em seu lado externo, que atravessa a parede de acrílico e era usado para a conexão ao sistema de aterramento. A outra chapa de cobre possuía, na mesma posição, um conector tipo coaxial, permitindo ligação com uma fonte de alta tensão.

Perfil de velocidade plano, sem turbilhonamento, no interior do classificador, é importante para que as partículas sofram o mínimo de dispersão em sua trajetória durante o percurso na região de deflexão do CCE. Para partícula que deixa a fenda central na colméia de

entrada, o desvio na direção x , de acordo com a Figura 3.9, deve ser causado somente pela atuação do campo elétrico externo na partícula eletricamente carregada, e a partícula de carga nula deve seguir sem alteração na sua trajetória.

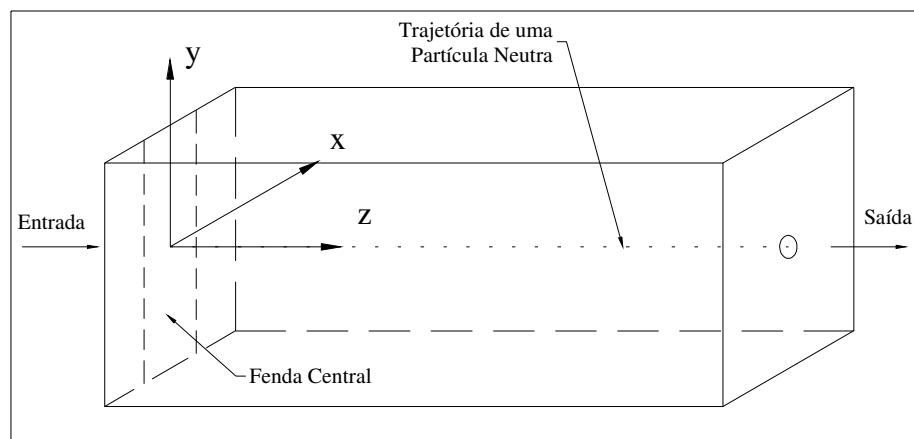


Figura 3.9 - Trajetória de uma partícula eletricamente neutra.

O efeito do campo gravitacional na direção y é muito pequeno devido à pequena massa da partícula e curto tempo de residência da mesma no interior do classificador.

Na parede superior da região C, três orifícios tampados com pinos de acrílico, de 0,9 cm de diâmetro, estão posicionados a 6 cm da borda de saída da fenda central. Os três orifícios estão alinhados sendo que o orifício central está posicionado na mesma linha da fenda central e os outros dois se localizam nas posições centrais entre o orifício central e a parede da região.

Na região D, as partículas são coletadas por meio de sonda isocinética cuja configuração é mostrada na Figura 3.10.

A sonda apresentava formato piramidal, possuindo a parte frontal dimensões de 12,5 cm de altura por 0,5 cm de largura o que resulta em área de $6,25 \text{ cm}^2$. Um sistema para variação da posição com uma haste corredeira possibilitava o posicionamento da sonda em qualquer posição x (ver Figura 2.8) e uma mangueira flexível de silicone conectada na saída da sonda acompanhava este deslocamento. O aerossol coletado isocineticamente na sonda de coleta seguia para um contador de partículas.

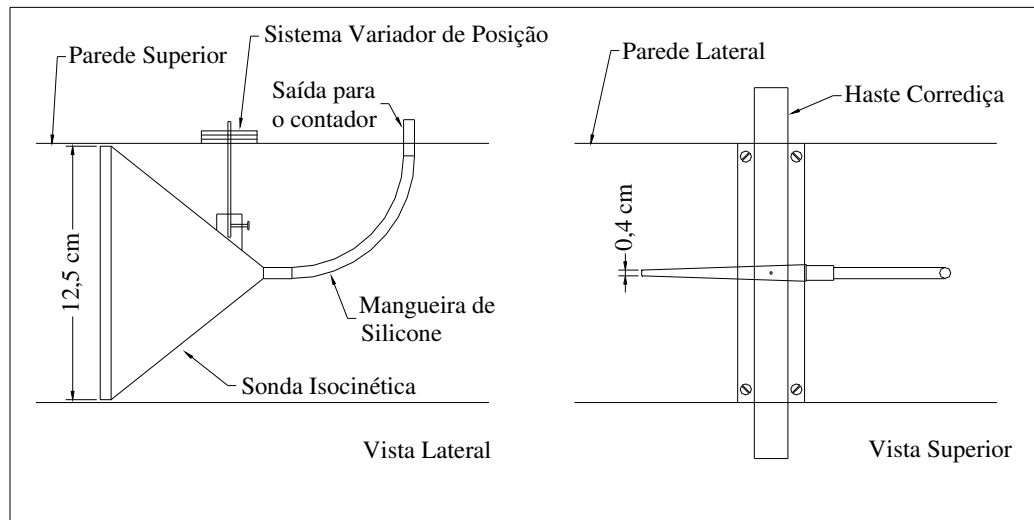


Figura 3.10 - Detalhe da sonda isocinética piramidal.

3.6.2. Unidade de determinação do nível de cargas antes da automação

O aparato experimental completo necessário para avaliação do comportamento das partículas antes da automação, está mostrado na Figura 3.11.

A entrada do classificador foi conectada ao gerador de pó. No esquema, o dispersor apresentado corresponde ao dispersor SSPD. Neste caso, o pó usado como material pulverulento foi previamente espalhado de forma homogênea sobre a superfície rugosa do disco giratório do SSPD. Todo o ar que entrava no dispersor passava por válvulas para controle da pressão, seguidas de uma coluna de silicagel que permitia o controle da umidade do ar, além de um filtro absoluto para retenção de óleo e da umidade na linha.

O aerossol era injetado no classificador através da fenda central.

Conectou-se à saída do classificador uma bomba de sucção, marca Eletrolux modelo 1300, para promover a vazão do ar no interior do equipamento. Um anemômetro de fio quente marca Cole-Parmer, modelo Tri-Sense 37000-00 foi utilizado para a medida direta da velocidade e temperatura. Para tal, a sonda foi introduzida no classificador, no início da região de deflexão, em três orifícios alinhados na direção x. O ajuste da velocidade era obtido alterando-se as vazões da bomba de sucção e do gerador respectivamente.

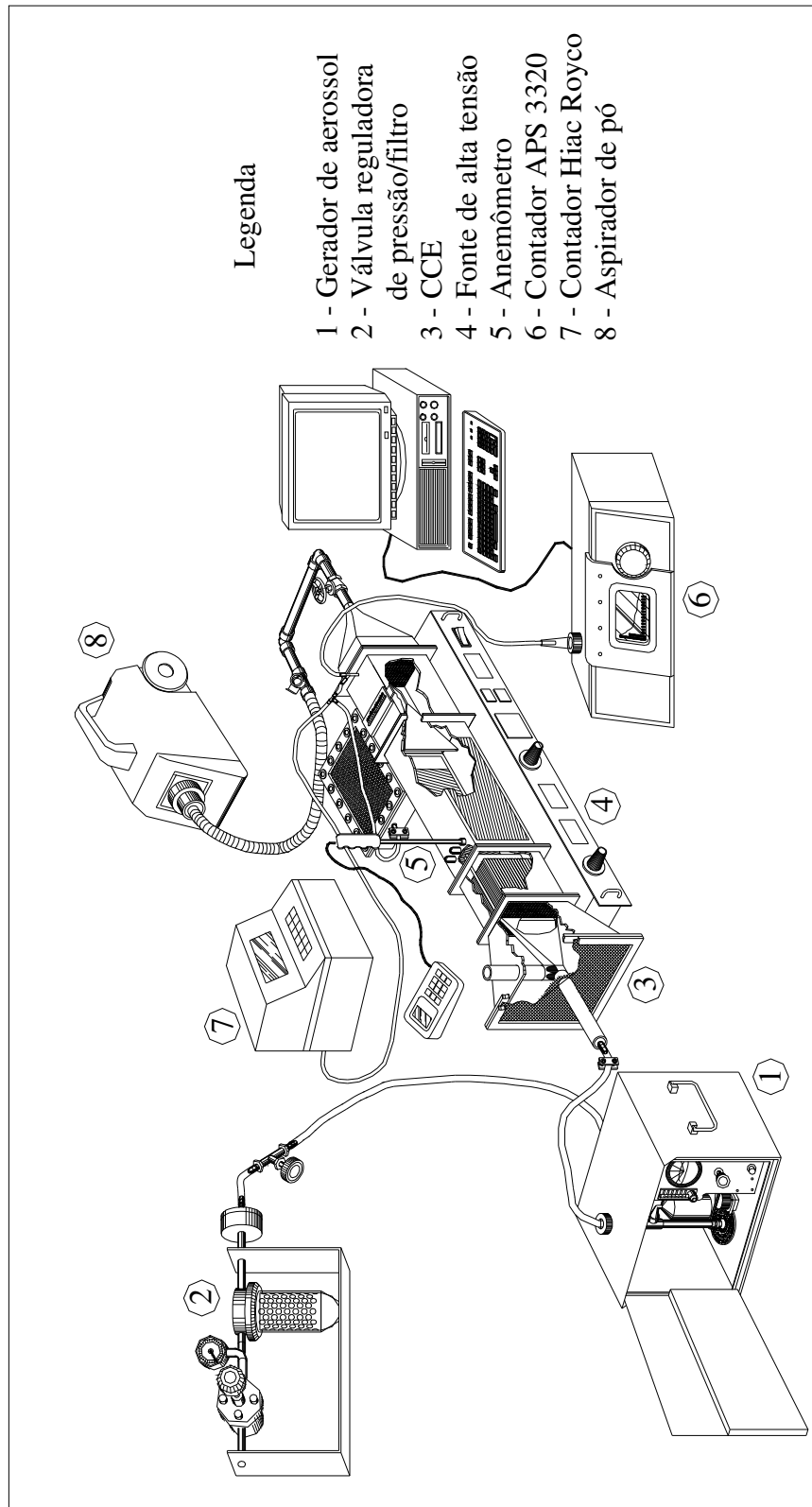


Figura 3.11 – Esquema do aparato experimental antes da automação

O contador de partículas APS-3320 foi usado na contagem das partículas coletadas isocineticamente pela sonda piramidal localizada no interior do classificador. Um segundo contador, Royco, foi utilizado somente como aspirador para assegurar a isocineticidade na sonda. O APS operava com vazão de sucção fixa de apenas 5 l/min, enquanto, para velocidade no interior do CCE de 0,28 m/s era necessária vazão na sonda de 10,5 l/min. Portanto, o Royco neste caso operou a uma vazão de sucção de 5,5 l/min, podendo ser variada de acordo com a velocidade do gás no interior do CCE. A coleta era feita variando-se a posição da sonda entre as placas de cobre da região de deflexão do CCE. O contador estava diretamente ligado ao microcomputador, sendo a interface feita através de um software gerenciador que recebia a contagem em tempo real, armazenando os dados em arquivos individuais.

Utilizou-se uma fonte de alta tensão, marca Spellman modelo SL30PN300, conectada a uma das placas de cobre do classificador, para promover o campo elétrico necessário na região de deflexão do CCE. A outra placa de cobre foi conectada a um sistema de aterramento composto por barras de cobre aterradas.

3.6.2.1. Metodologia experimental antes da automação

Os testes foram realizados de acordo com o seguinte procedimento:

- ar filtrado e seco alimentava o dispersor que era ligado juntamente com a bomba de sucção do classificador;
- ajustava-se a velocidade no interior do classificador: para isso, a sonda do anemômetro era inserida nos três pontos de verificação da velocidade, ajustando-a até que se conseguisse um valor comum nos três pontos;
- conectava-se a saída do dispersor diretamente ao contador para a caracterização do material;
- o dispersor era novamente conectado ao classificador e eram feitas coletas de um minuto para cada posição da sonda de coleta;
- este último procedimento era repetido, alterando-se a voltagem da fonte de alta tensão ligada à placa de cobre do CCE para -10 kV.

Os ensaios foram realizados com velocidades entre 0,26 e 0,28 m/s. Velocidades maiores implicariam na extrapolação da faixa de validade da lei de Stokes.

Nos testes, buscou-se obter o maior número de posições da sonda possível, sendo que a coleta era feita a partir do centro ($x = 0$), variando-se a posição da sonda em 0,5 cm entre duas coletas subsequentes. As posições da sonda variavam de $x = -3,5$ a $x = +3,5$ cm da placa de cobre conectada a fonte à placa de cobre aterrada na região de deflexão do CCE. A temperatura era medida logo no início do ensaio ao mesmo tempo em que se regulava a velocidade no interior do classificador.

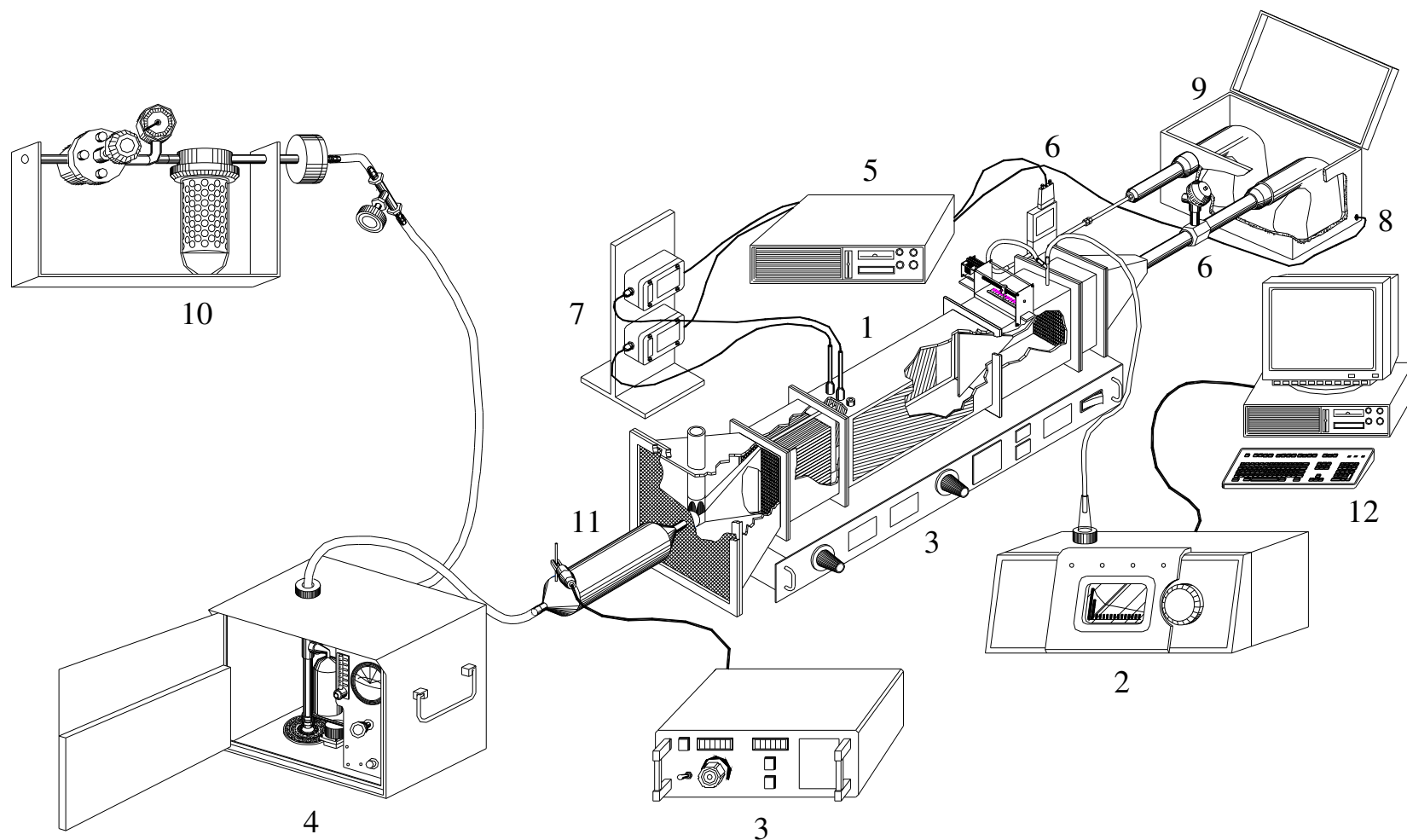
3.6.3. Automação do CCE

Como já foi mostrado no item 3.6.2, na configuração anterior, o classificador apresentava operação relativamente complexa. A implantação de um sistema de varredura programável na sonda de coleta e a introdução de medidores e controladores de fluxo, tanto na entrada do aerossol quanto na sucção, após a zona de deflexão, tornaram o CCE um equipamento mais preciso e com operação simplificada.

Esta automação foi realizada com recursos do CNPq. Um esquema da unidade automatizada e uma foto da mesma podem ser vistos nas Figuras 3.12 e 3.13, respectivamente.

O sistema de controle consta de dois transdutores, dois medidores de vazão, dois aspiradores, motor de passo e placa de aquisição de dados. Todos estes equipamentos foram escolhidos considerando-se critérios: financeiros, limitação de espaço, acoplamento ao CCE e compatibilidade entre os itens.

Todos elementos foram instalados de maneira a não causar distúrbio no fluxo de ar no interior do classificador, o que comprometeria o princípio de medida do nível de cargas das partículas. Todo o sistema de controle foi gerenciado por um *software* desenvolvido com o auxílio da empresa T&S Equipamentos Eletrônicos. Desta forma, o controle da posição da sonda, da vazão no sistema de sucção principal do CCE, da vazão de controle de isocineticidade da sonda de coleta e das medidas de velocidade foram gerenciados por computador. Para tal foi utilizada uma placa de aquisição de dados de alta performance AQB11/12 onde chegavam os dados operacionais que, eram comparados aos valores de *setpoint* ajustados e posteriormente tomadas ações do controle.



Legenda

1-CCE; 2-APS (Contador); 3-Fontes de tensão; 4-Gerador; 5-Sistema de controle; 6-Medidores de vazão;
 7-Transdutores; 8-Sucção principal; 9-Sucção isocinética; 10-Filtro de ar; 11-Carregador corona; 12-Computador

Figura 3.12 - Esquema da unidade de determinação do nível de cargas automatizada



Figura 3.13 – Vista geral do CCE após automação.

O sistema de controle utilizado foi o PID (Proporcional, Integral e Derivativo) e os parâmetros de sintonia do controlador foram ajustados no decorrer dos testes. A descrição completa da automação realizada e seus componentes encontram-se descritos a seguir. A fonte de alta tensão, responsável pela geração do campo elétrico no CCE, utilizada nos testes após a automação foi a mesma fonte, Spellman modelo SL30PN300 utilizada antes da automação.

3.6.3.1 Sistema de sucção principal

O fluxo de gás no interior do classificador que anteriormente era promovido por bomba de sucção da marca Eletrolux modelo 1300, foi substituído por um motor de corrente contínua, marca Bosch de 90 Watts de potência. A medida contínua desta vazão foi realizada por medidor volumétrico tipo turbina marca Contech modelo SVTG de $\frac{3}{4}$ ", cuja capacidade era de 0 a 300 l/min. Um controlador de velocidade relacionado à tensão do motor (de 0 à 12 Volts) era o responsável pela alteração da rotação do motor. Este fazia com que o motor aumentasse

ou diminuísse sua rotação baseado no valor da vazão fornecido pelo medidor e o valor estipulado no *setpoint*.

3.6.3.2. Sistema de sucção da coleta isocinética

A Figura 3.14 mostra os dois motores de sucção, os dois medidores de vazão e o sistema que gerenciava todas as ações de controle.

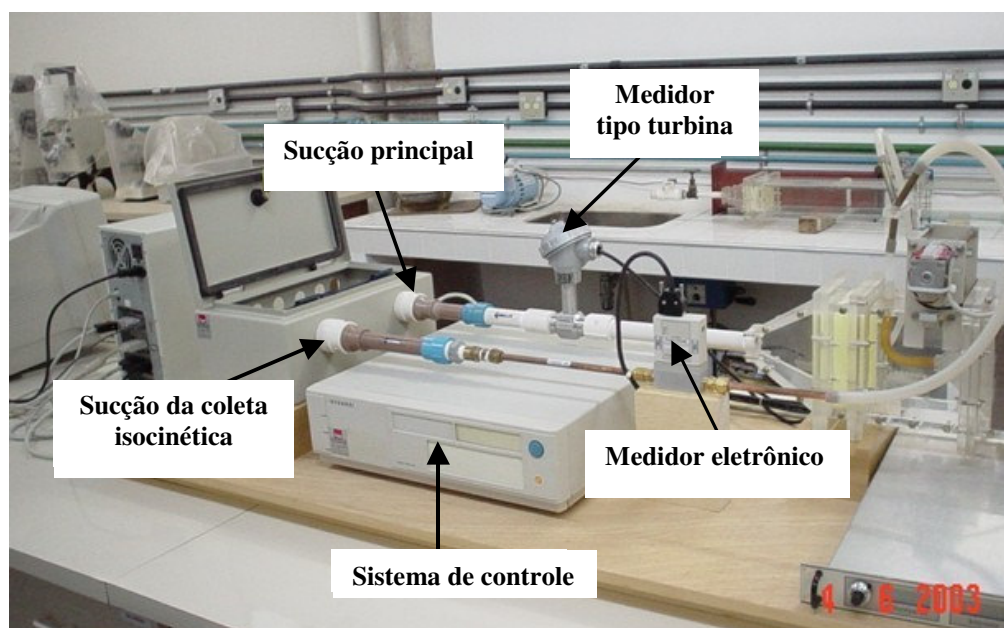


Figura 3.14 - Esquema dos controladores de fluxo, motores de sucção e sistema de controle contendo a placa de aquisição de dados.

Neste sistema o segundo contador, Royco, utilizado na versão anterior do sistema para promover a amostragem isocinética, foi também substituído por um motor de corrente contínua Bosch idêntico ao motor utilizado no sistema de sucção principal. A medida contínua desta vazão foi realizada por medidor volumétrico eletrônico marca Key Instruments modelo PV 9000, cuja capacidade era de 0 a 20 l/min. Do mesmo modo que no sistema de sucção principal, um controlador de velocidade relacionado à tensão do motor (de 0 a 12 Volts) foi o responsável pela alteração da rotação do motor.

A necessidade deste sistema decorreu do fato de que para uma velocidade isocinética de 26 cm/s na sonda de coleta, era necessária uma vazão de sucção na mesma de 10,5 l/min, lembrando que a área da sonda era de 6,25 cm². O contador de partículas APS, ligado diretamente à sonda, possuía vazão de sucção de apenas 5 l/min, sendo necessário uma derivação de mais 6,5 l/min. A Figura 3.15 apresenta o esquema de coleta do material particulado após passar pela sonda.

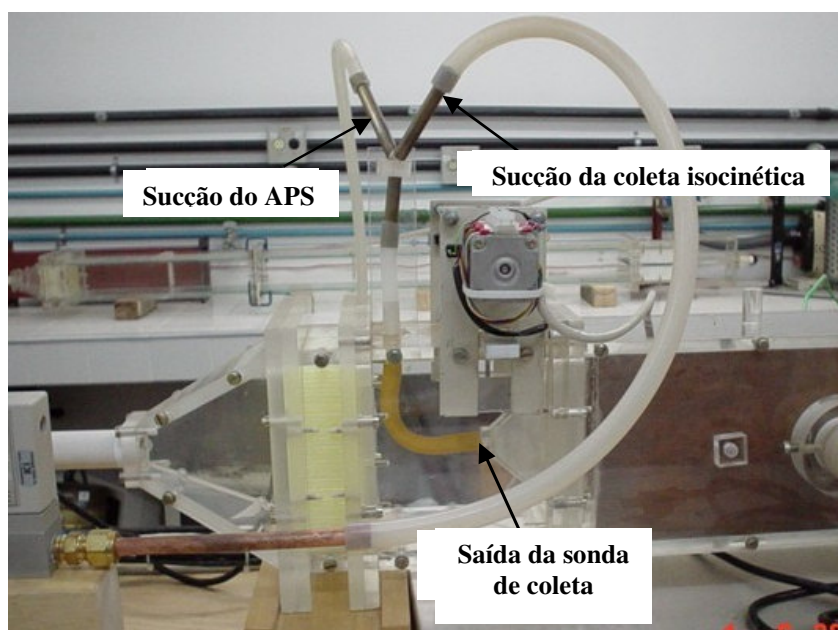


Figura 3.15 – Sistema de sucção da sonda de coleta

3.6.3.3 Sensores de velocidade

Dois sensores de medida de velocidade do ar foram instalados no classificador através da parede superior como mostra a Figura 3.16. Um deles foi instalado na mesma linha do orifício central de alimentação do aerossol enquanto o outro foi instalado em uma das posições intermediárias entre o orifício central de alimentação e a parede lateral do classificador. Deste modo foi possível monitorar a velocidade do gás no interior do CCE.

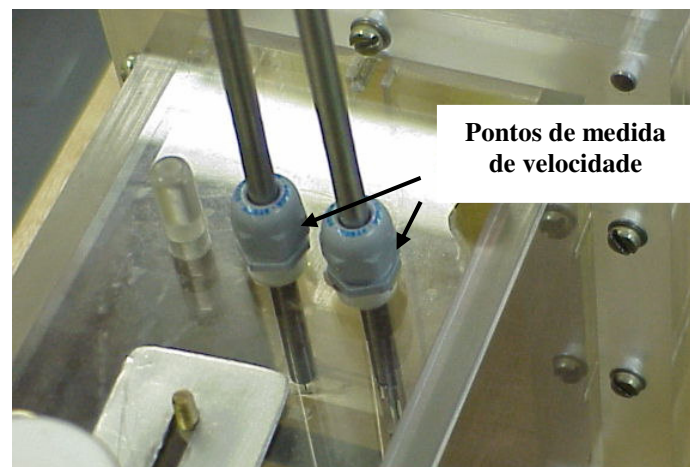


Figura 3.16 – Sensores de velocidade no classificador

Os sensores consistiam de dois transdutores de velocidade de fio quente, marca Cole-Parmer, modelos 10560-12 e 10561-12. Foi necessária a instalação de dois transdutores de modelos diferentes devido ao fato de que somente um deles, o modelo 10561-12, suportou a presença de material particulado na corrente gasosa. Estes transdutores podem ser vistos na Figura 3.17.

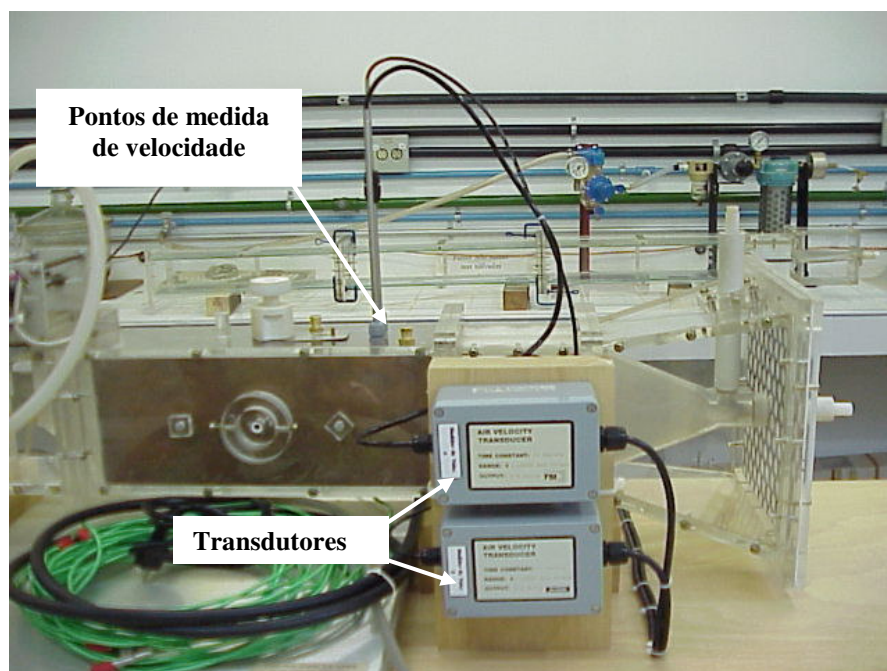


Figura 3.17 – Vista geral dos transdutores

3.6.3.4 Sistema de varredura da sonda coletora

O sistema de varredura da sonda, que antes era deslocado manualmente, foi substituído por um sistema automatizado. Este sistema consistiu de um parafuso de rosca sem-fim ao qual estava presa a sonda que se deslocava acionada por um motor de passo Astrosyn 23 PM-C406. Através do *software* de interface, escolhia-se a posição desejada da sonda, o motor de passo recebia o sinal e este se movia até a posição desejada. O sistema de varredura acoplado ao CCE pode ser visto na Figura 3.18.

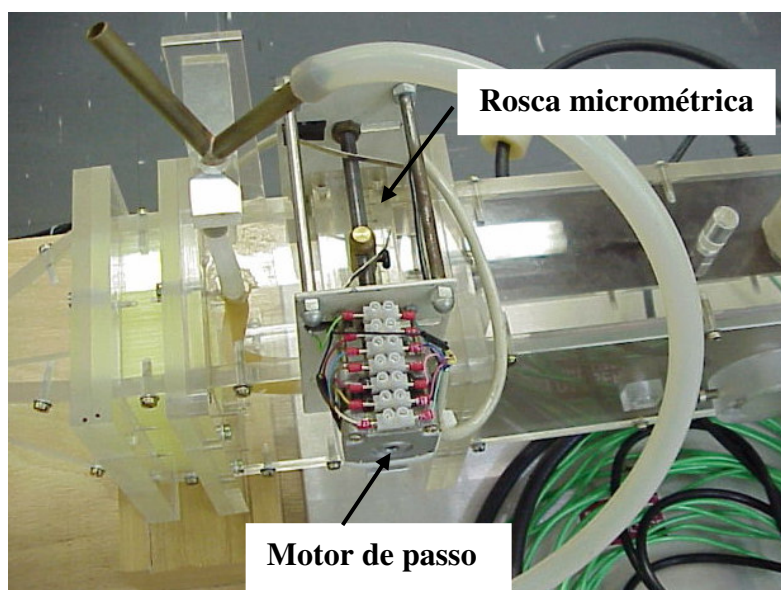


Figura 3.18 – O sistema de varredura da sonda coletora.

3.6.3.5. Metodologia experimental de determinação do nível de cargas após a automação

O procedimento para realização dos testes de determinação do nível de cargas foi o seguinte:

- ar filtrado e seco alimentava o dispersor;
- conectava-se a saída do gerador diretamente ao contador APS para a caracterização do material;

- conectava-se, em série, o gerador de aerossol, o carregador corona e o classificador;
- ajustava-se a velocidade no interior do classificador, alterando-se a vazão principal e a vazão de alimentação do gerador, até que as velocidades dos dois transdutores fossem iguais entre si: $0,27 \pm 0,01$ m/s;
- ligava-se a fonte de alta tensão na placa defletora no nível desejado;
- ligava-se a fonte de alta tensão do carregador corona no nível desejado;
- acionava-se o disco giratório do gerador que alimentava partículas ao sistema;
- realizava-se a contagem de partículas coletas pela sonda na região de coleta do CCE, as coletas tinham 1 minuto de duração e eram feitas variando-se a posição da sonda de -3,5 a 3,5;
- este último procedimento era repetido alterando-se a voltagem da fonte de alta tensão para o nível desejado;

3.6.4. Tratamento dos dados

A metodologia para o cálculo da carga da partícula pelo CCE envolveu a determinação dos diâmetros médios das faixas de distribuição de tamanhos, a determinação da posição das partículas quando estas não estavam sujeitas à ação de um campo elétrico e, por fim, na determinação do desvio sofrido pelas partículas devido à atuação de um campo elétrico. A determinação dos diâmetros médios pode ser vista no item 3.5.1., enquanto as demais determinações são mostradas a seguir.

3.6.5. Determinação da posição inicial das partículas

O conhecimento da posição das partículas permitiu determinar o seu comportamento no interior do CCE, ou seja, o espalhamento das partículas na região de deflexão do classificador quando nenhuma voltagem era aplicada.

A posição das partículas de cada uma das 5 faixas determinadas era fornecida pelo ajuste para modelo de Gauss de curvas que representavam o número total de partículas coletadas, para diâmetro de Stokes específico, em função da posição entre as placas de cobre

da região de deflexão do CCE (Figura 3.19). O ponto de máximo de cada uma das curvas, denominado x_0 , correspondia à posição inicial da partícula.

3.6.6. Determinação do desvio sofrido pela partícula

A medida do desvio sofrido pelas partículas de cada uma das faixas de tamanho (X) envolveu a construção das curvas ajustadas para o modelo de Gauss que representavam o número total de partículas coletadas em função da posição x para cada valor de voltagem aplicado. A diferença entre os pontos de máximo dessas curvas, x_c , e x_0 respectivamente, fornecia o desvio da partícula, X , quando esta atingia a região de deflexão do CCE sob ação de um campo elétrico.

A Figura 3.19 mostra as curvas ajustadas para o modelo de Gauss evidenciando o ponto de máximo de cada uma das curvas.

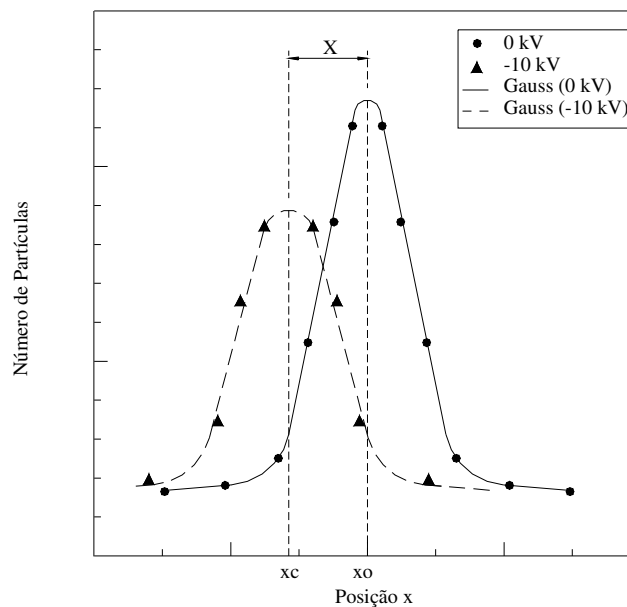


Figura 3.19 - Número de partículas em função da posição x – determinação de X .

3.6.7. Cálculo da carga da partícula

Uma vez determinado o deslocamento, X , das partículas para cada tensão aplicada, determinou-se a carga da partícula conforme a equação:

$$Q = \frac{3\mu\pi d_{ps}U_0XL}{F_sZ\Delta V} \quad (2.61)$$

Nesta equação os valores das grandezas envolvidas devem possuir unidades coerentes para que o valor da carga da partícula possa ser expresso em Coulomb (C). Deste modo, d_{ps} deve ser expresso em m, U_0 em m/s, as grandezas X , L e Z em m, μ em Kg/m.s e ΔV em volts.

3.7. Sistema de filtração

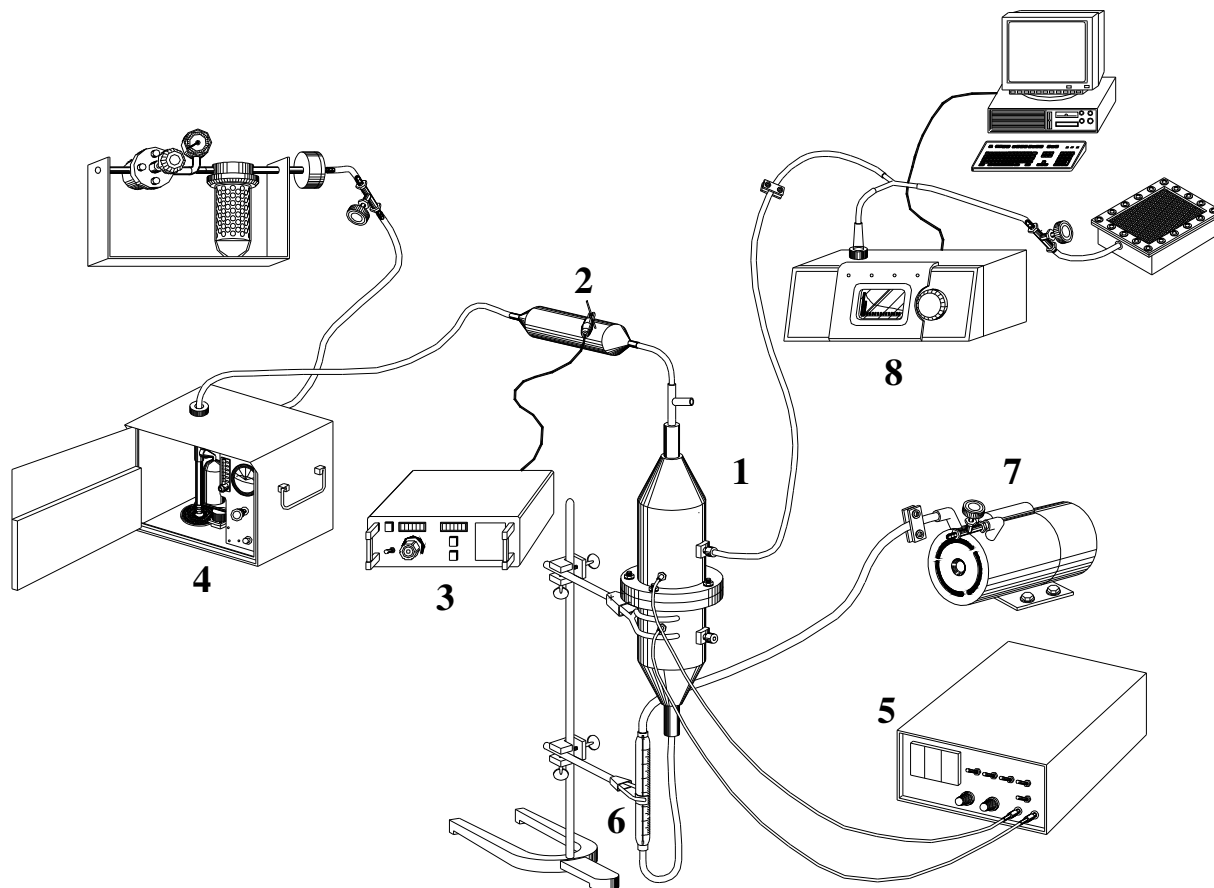
3.7.1. Unidade de filtração

A Figura 3.20 mostra o esquema geral da unidade de filtração desenvolvida.

A unidade consistia de um sistema de geração e controle de umidade do ar, sistema de dispersão, carregador e contador de partículas, suporte de filtração, tecido filtrante e equipamentos de medida. Os sistemas de dispersão do aerossol, carregamento e contagem de partículas utilizados encontram-se descritos nos itens 3.2, 3.3 e 3.4, respectivamente. O suporte de filtração, tecido filtrante utilizado e demais equipamentos de medida são descritos a seguir.

3.7.2. Suporte de filtração

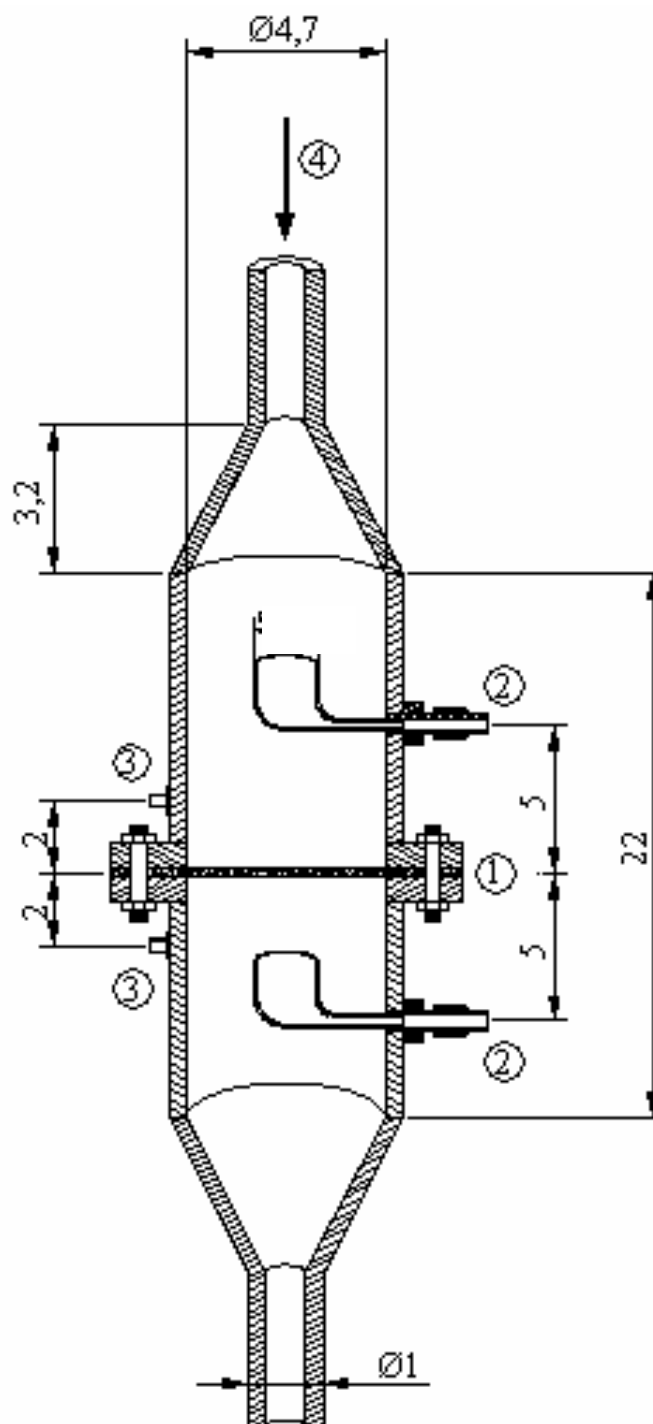
O suporte de filtração construído possuía um duto cilíndrico de 4,70 cm de diâmetro e comprimento total de 22,0 cm. As Figuras 3.21 e 3.22 apresentam, respectivamente, o esquema e a fotografia do suporte de filtração.



Legenda: 1-Suporte de filtração; 2-Carregador corona; 3-Fonte; 4-Dispersor tipo venturi; 5-Micromanômetro; 6-Rotâmetro; 7-Bomba; 8-APS (contador);

Figura 3.20– Esquema da unidade de filtração

O meio filtrante de tecido era fixado no suporte por flange situado a 10,0 cm da base do mesmo. As medidas de queda de pressão foram efetuadas entre dois pontos equidistantes 2,0 cm do filtro de tecido. A contagem de partículas na entrada e saída do filtro foi efetuada isocineticamente, através de duas sondas móveis de cobre, equidistantes 5,0 cm do tecido filtrante. As sondas circulares apresentavam 6,4 mm de diâmetro. No instante da coleta as sondas eram colocadas no centro do suporte de filtração e as partículas coletadas para o interior do contador APS. Após a coleta das partículas a sonda era deslocada até a parede do suporte.



Legenda: ① - Flange para fixação do tecido; ② - Pontos de amostragem isocinética;
③ - Pontos de medida de queda de pressão; ④ - Entrada do aerossol
Dimensões em cm

Figura 3.21 – Esquema do suporte de filtração.



Figura 3.22 – Fotografia do suporte de filtração.

3.7.3. Feltro de polipropileno

O tecido filtrante utilizado consistiu de feltro de polipropileno da marca Gino Caciari. Este feltro apresentava gramatura de 660 g/cm^2 , 2,6 mm de espessura e constante dielétrica de 2,4 (WEAST 1983). A Figura 3.23 apresenta fotografia do feltro de polipropileno obtida no microscópio eletrônico de varredura com ampliações de 250 vezes. As fotografias do tecido foram analisadas pelo software Image Pro-Plus 3.0 e o diâmetro médio de fibra do tecido foi de $23,0 \pm 1,8 \text{ }\mu\text{m}$.

A Figura 3.24 apresenta fotografia do feltro de polipropileno utilizado após teste de filtração. A parte branca da foto representa o tecido limpo enquanto, a região central bege que corresponde à área de filtração, representa partículas de rocha aderidas sobre o feltro. A determinação da porosidade do feltro é mostrada a seguir.



Figura 3.23 – Fotografia do feltro de polipropileno obtida no microscópio eletrônico de varredura, ampliação de 250x.

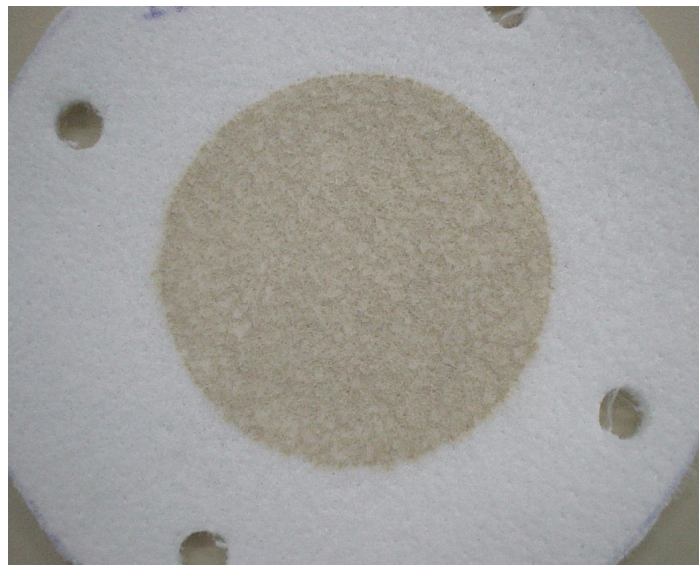


Figura 3.24 – Fotografia do feltro de polipropileno após teste de filtração.

3.7.4. Equipamentos de medida

O fluxo de ar na filtração foi promovido por uma bomba a vácuo marca GE modelo 5KH35HNA522X cuja potência era de 1/3 HP. Esta bomba permitia vazão máxima de 60 l/min.

A velocidade de filtração foi monitorada através de rotâmetro (Gilmont Instruments nº 3) capaz de medir vazões entre 2 e 20 l/min. O rotâmetro ficava acoplado entre a base do suporte de filtração e a entrada da bomba a vácuo.

A queda de pressão do filtro era monitorada continuamente por micromanômetro digital (Furness Controls, modelo FC012), que permitia leituras de 0 a 200 mm de coluna de água com precisão de 0,01.

O ar com partículas suspensas era sugado através de amostradores isocinéticos localizados na posição anterior e posterior ao filtro de tecido (ver Figura 3.21), para que fosse feita a contagem do número de partículas. A contagem de partículas foi feita através do contador APS.

3.7.5. Procedimento experimental para a filtração

Os testes de filtração foram realizados observando-se o seguinte procedimento:

- a massa do tecido filtrante limpo era medida;
- colocava-se o meio filtrante de tecido sobre o suporte de filtração;
- o manômetro digital era ligado e ajustado na posição 0,00 mm c.a.;
- abria-se a válvula de ar comprimido (filtrado e seco) que alimentava o gerador, ajustando-se a vazão alimentação do mesmo em 5 l/min;
- ligava-se a bomba a vácuo ajustando-se a velocidade de filtração desejada (a velocidade de filtração era monitorada através da vazão indicada no rotâmetro);
- espalhava-se o material particulado a ser filtrado (anteriormente seco em estufa) de maneira uniforme sobre o disco do gerador;
- a filtração iniciava-se com o acionamento da rotação do disco do gerador;

- media-se a temperatura e umidade do ar utilizado na filtração;
- iniciava-se então a medida de queda de pressão do filtro e penetração das partículas em 5 faixas de diâmetros pré-estabelecidas ao longo do tempo;
- a massa do tecido filtrante contendo partículas era novamente medida;

Este procedimento foi repetido para as todas as condições experimentais. É importante ressaltar que em cada teste de filtração, foram realizadas médias de 20 amostragens das partículas, das quais, 6 coletas anteriores ao filtro e 14 posteriores ao filtro. As amostragens foram feitas em tempos igualmente espaçados ao longo dos 90 minutos de filtração.

3.7.6. Condições experimentais

Cada teste de filtração teve duração de 90 minutos. Para a contagem do número de partículas que chegavam e que penetravam o filtro, foi adotado o tempo de amostragem de 1 minuto. Em cada amostragem, do número total de partículas, foi obtido o número de partículas em cada uma das 5 faixas de diâmetros de partículas determinados, como pode ser visto no item 3.5.1.

Os ensaios foram realizados para as velocidades de filtração de 5, 8 e 12 cm/s. O ar que alimentava o gerador de aerossol e carregava as partículas até o carregador tipo corona manteve umidade controlada na faixa de 20 a 25%.

Foram utilizados quatro níveis de carga eletrostática nas partículas, decorrente do valor da tensão aplicada no carregador tipo corona. Quanto maior a tensão aplicada ao carregador, maior o nível de carga nas partículas. As tensões aplicadas ao carregador foram de 0, -3, -6 e -9 kV. No nível de carga para tensão de 0 kV as cargas das partículas foram provenientes somente do sistema do qual o aerossol foi gerado. Para as tensões corona de -3, -6 e -9 kV as partículas sofreram carregamento adicional, em relação ao método de geração, e apresentou maior nível de carga.

3.7.7. Determinação da penetração (P) e da massa total retida (MTR)

A penetração para cada tamanho de partícula (P) foi determinada pela relação entre o número de partículas de um determinado diâmetro, que penetra através do leito e o número de partículas com o mesmo diâmetro que chegam ao filtro. Para o cálculo da penetração experimental, foi considerada média das amostragens do número de partículas que chegavam ao filtro.

A massa total retida foi obtida pela medida direta da diferença de massa do filtro limpo e massa do filtro após 90 minutos de filtração. Admitiu-se que o dispersor de pó SSPD gerava aerossol com concentração uniforme. Deste modo, o cálculo da MTR para os diferentes instantes de filtração, $0 < t < 90$ minutos, foi proporcional a massa total do filtro medida após os 90 minutos de filtração.

3.7.8. Determinação da porosidade do tecido de polipropileno

Devido à porosidade ser um parâmetro de fundamental importância no cálculo teórico da eficiência e da queda de pressão do filtro, foi feita a determinação experimental deste parâmetro por dois métodos. O primeiro consistiu em medir a porosidade do feltro de polipropileno através do porosímetro a mercúrio, POREMASTER modelo 33. O segundo método utilizado foi baseado na metodologia desenvolvida por Aguiar (1995) que consistiu em preparar o filtro para que sua estrutura pudesse ser examinada em microscópio. Uma descrição simplificada deste método é apresentada a seguir. Maiores detalhes podem ser encontrados em Aguiar (1995).

3.7.8.1. Metodologia para determinação da porosidade

Primeiramente foi feito o pré-endurecimento do filtro através da passagem de vapor de um adesivo instantâneo (LOCTITE-416) arrastado por fluxo de ar úmido, pelo meio filtrante.

Em seguida, foi feito o embutimento do filtro, através da imersão do mesmo em resina (PSM-10) da LOCTITE. Logo após, este filtro foi colocado em estufa a 60 °C por aproximadamente 4 dias até que ficasse completamente seco. Depois de seco as amostras foram seccionadas em pedaços quadrados de 1 cm² de área. Posteriormente estes pedaços foram embutidos em moldes cilíndricos, com a resina, RESAPOL-208. Depois de secas, as amostras eram esmeriladas e polidas. A Figura 3.25 apresenta fotografia de três amostras do feltro de polipropileno embutidas.

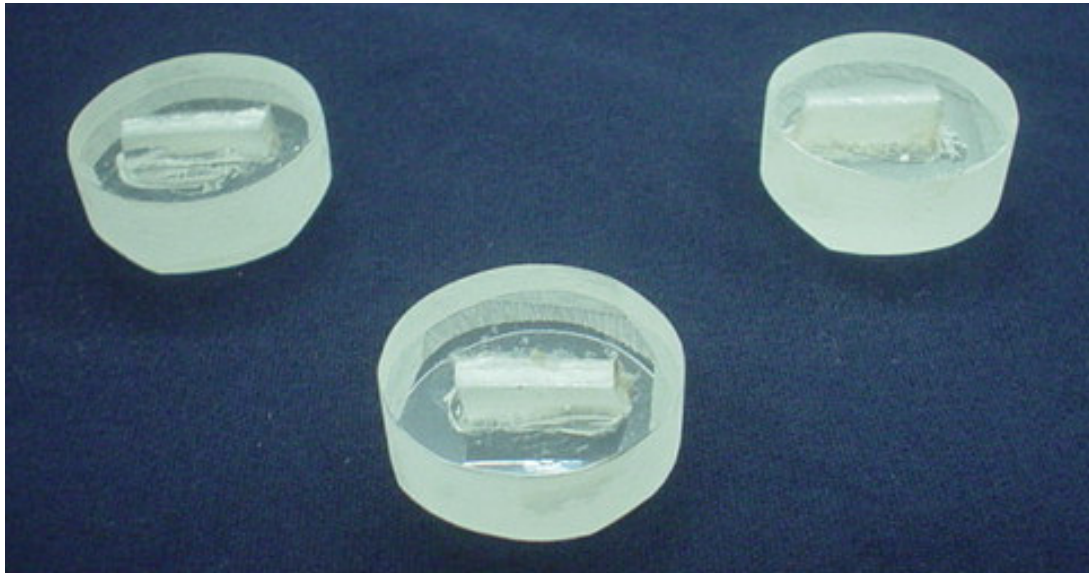


Figura 3.25 - Fotografia das amostras do feltro de polipropileno embutidas.

Posteriormente, as amostras embutidas eram observadas em microscópio ótico onde eram obtidas fotografias com ampliação de 20 vezes como mostra a Figura 3.26 (a). As fotografias foram analisadas pelo software, Image-Pro Plus 3.0.

As fibras foram manualmente selecionadas, de acordo com a Figura 3.26 (b) para posteriormente ser calculada a área ocupada pelas mesmas. A porosidade foi determinada pela razão entre a área ocupada por vazios (área total menos área ocupada pelas fibras) e a área total.

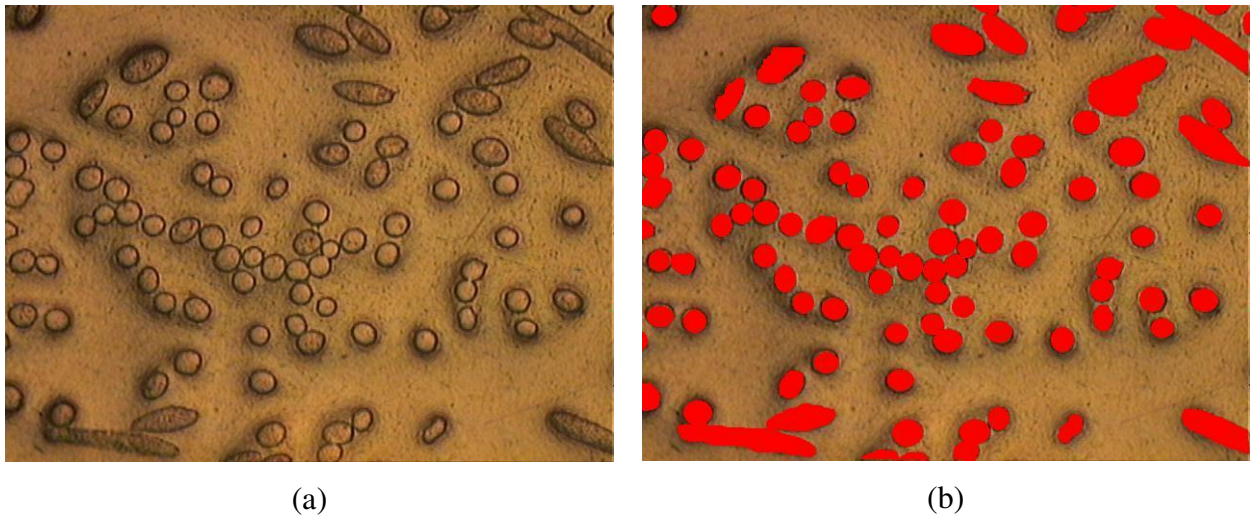


Figura 3.26 - (a) Fotografia do filtro de polipropileno; (b) Fotografia do filtro de polipropileno onde as fibras foram marcadas pelo software (aumento de 20x).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo foram analisados e discutidos os resultados do nível de carga nas partículas de pirocloro, pó de madeira e diatomito realizados antes da automação do CCE. Os resultados destes testes foram comparados aos trabalhos de Almeida (2000), Forsyth et al. (1998), Coury et al. (1991) e Johnston et al. (1987).

Em seguida, são apresentados testes de determinação do nível de carga em partículas com o CCE automatizado. Nestes testes foram utilizados aerossóis de concentrado fosfático, pirocloro e diatomito. Os valores de carga da partícula foram comparados aos testes anteriores.

Na seqüência, é apresentado o ajuste inicial do nível de cargas induzidas nas partículas em função do aumento da tensão aplicada no carregador tipo corona. A partir deste teste, somente o concentrado fosfático foi utilizado como material particulado. O nível de carga induzido pelo carregador tipo corona foi comparado com carregamento por impactação obtido por Almeida (2000).

Foi efetuado, o ajuste de quatro níveis distintos de carga induzida sobre partículas de concentrado fosfático, mediante variação da tensão aplicada sobre o carregador tipo corona. Estes níveis de carga ajustados foram posteriormente aplicados nos testes de filtração.

Em seguida, são apresentados os valores experimentais de porosidade obtidos para o feltro de polipropileno, utilizado nos testes de filtração.

E, finalmente, são apresentados os testes de filtração, envolvendo a eletrização do aerossol. Neste último item, são avaliados os efeitos do nível de carga eletrostática nas partículas na penetração do filtro e na variação da queda de pressão, para a filtração estacionária. Foi também obtida uma correlação para a penetração em função do diâmetro de partículas, no qual foi considerada a atuação do mecanismo eletroforético na deposição das partículas sobre as fibras do tecido.

4.1. Testes de medida de carga com o CCE antes da automação

Os testes de medida de carga com o CCE antes da automação foram realizados com o objetivo de verificar a polaridade da carga presente em partículas de diferentes suspensões. É importante ressaltar que as cargas presentes nas partículas não foram introduzidas por carregamento adicional (corona, impactação). As cargas foram decorrentes do processo de geração do aerossol e do contato do mesmo com os dutos por qual passou até chegar à zona de deflexão do CCE (triboeletrificação).

Serão apresentados os resultados de polaridade e quantidade de carga eletrostática para os três tipos de sólidos analisados, pirocloro (óxido de nióbio) fornecido pela CBMM de Araxá-MG, diatomito e pó de madeira fornecido pela Duratex de Botucatu. Estes valores foram comparados com os resultados obtidos por Almeida (2000), que utilizou outros três sólidos, dentre eles, um concentrado de rocha fosfática fornecido pela Fosfértil de Patos de Minas-MG, clara de ovo seca no centro de secagem do DEQ/UFSCar e alumina fornecida pelo DEMA/UFSCar.

Será abordada primeiramente a polaridade da carga adquirida pelos sólidos analisados e, em seguida será discutido o nível de carregamento na distribuição de cargas entre as partículas.

4.1.1. Polaridade da carga medida para as diferentes suspensões

Nas Figuras 4.1 a 4.6 são apresentados alguns resultados típicos dos desvios sofridos pela partícula ao entrar na região de deflexão do classificador sujeita à ação de campo elétrico. Cada curva apresenta o número total de partículas coletadas para determinado diâmetro de Stokes específico, d_{ps} , em função da posição x , entre as placas de cobre na região de deflexão do CCE. Estas curvas foram ajustadas pelo modelo de curva de Gauss para obtenção dos valores de x_0 e x_C dos pontos de máximo. Os testes foram realizados a temperatura entre 21 e 28 °C e a velocidade no interior do CCE de $0,270 \pm 0,005$ m/s.

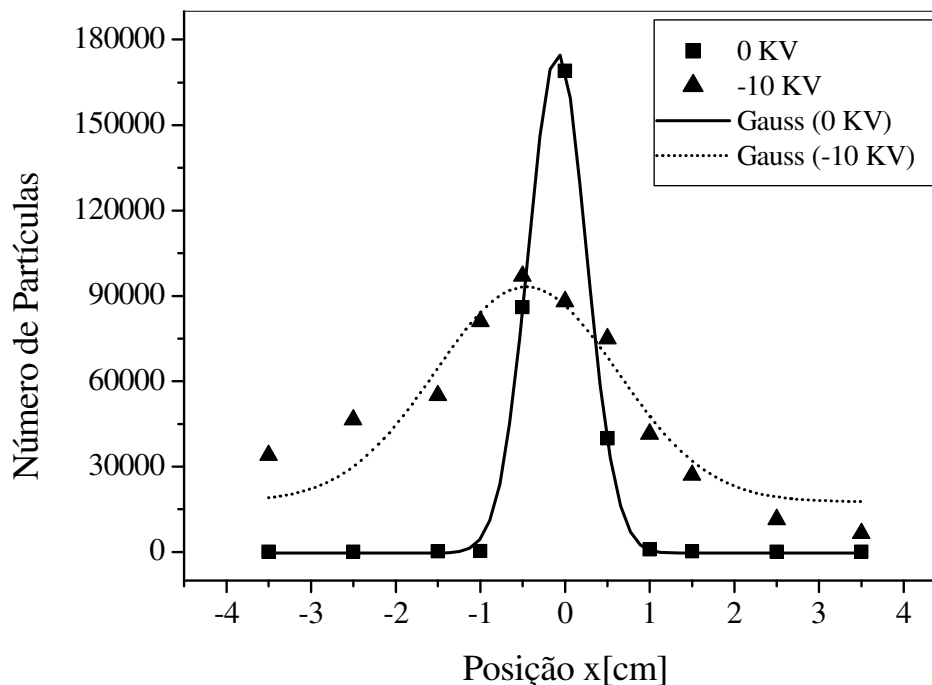


Figura 4.1 – Total de partículas de pirocloro em função da posição x , para $d_{pS} = 1,93 \mu\text{m}$.

Os desvios medidos entre os pontos de máximo das curvas de Gauss, x_0 para tensão na placa do CCE de 0 kV e x_C para tensão na placa do CCE de -10 kV estão diretamente ligados ao grau de carregamento da partícula durante o processo de geração do aerossol, bem como a intensidade do campo elétrico na região de deflexão do CCE. Cada uma das curvas corresponde a cada um dos aerossóis analisados. Tendo cada um deles uma carga inerente ao próprio processo de dispersão, é plausível afirmar que o aerossol analisado, assim como a carga da partícula, influenciou o seu comportamento com relação ao número de partículas coletadas pela sonda isocinética. Este fato, aparentemente, não provocou alterações na posição x , do ponto de máximo da curva obtida quando não houve diferença de potencial aplicada, ou seja, durante ausência de campo elétrico, x_c ficou bem próximo do ponto $x = 0$.

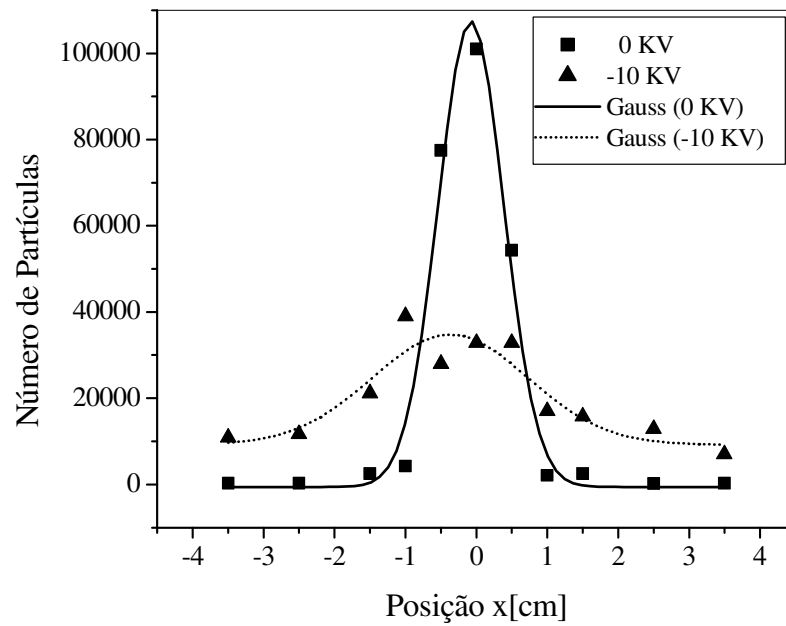


Figura 4.2 – Total de partículas de diatomito em função da posição x , para $d_{pS} = 2,30 \mu\text{m}$.

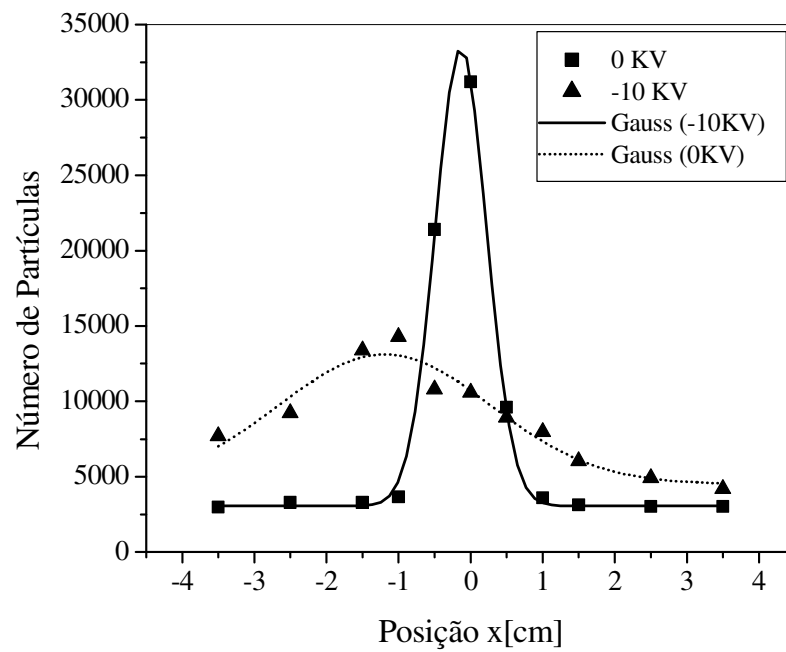


Figura 4.3 – Total de partículas de pó de madeira em função da posição x , para $d_{pS} = 2,62 \mu\text{m}$.

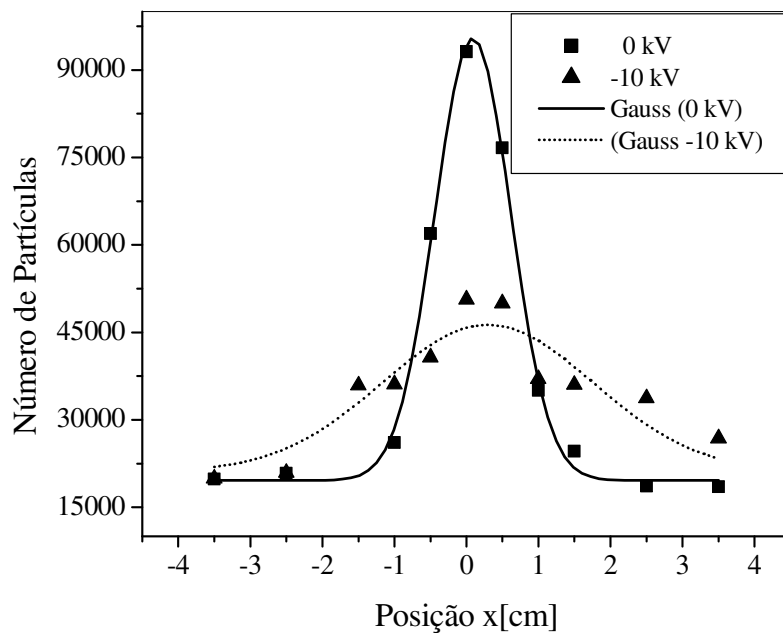


Figura 4.4 – Total de partículas de concentrado fosfático em função da posição x, para $d_{ps} = 1,95 \mu\text{m}$ (ALMEIDA, 2000).

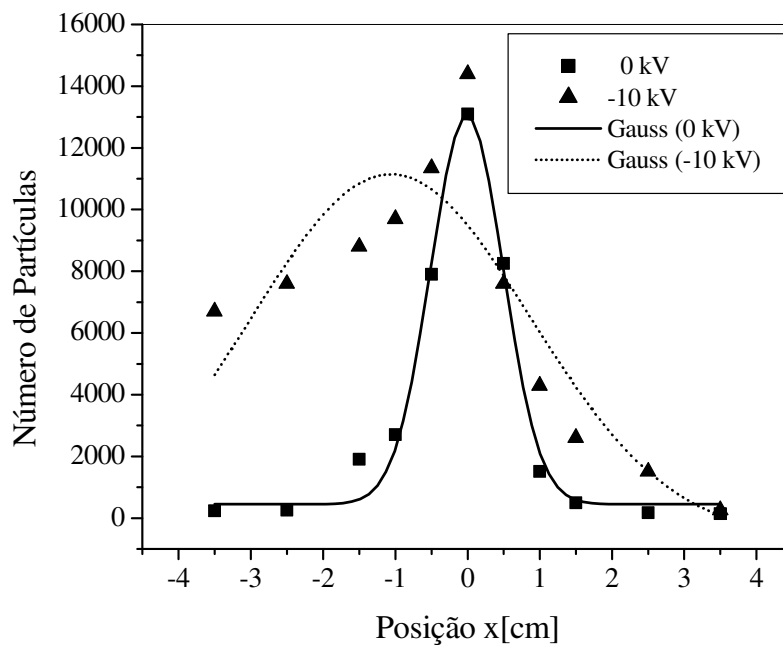


Figura 4.5 – Total de partículas de alumina em função da posição x, para $d_{ps} = 4,71 \mu\text{m}$ (ALMEIDA, 2000).

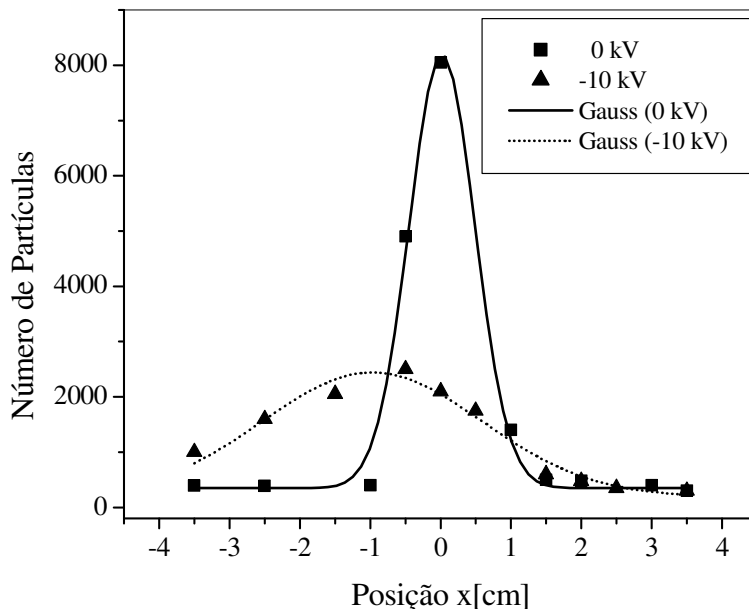


Figura 4.6 – Total de partículas de clara de ovo em função da posição x, para $d_{pS} = 7,31 \mu\text{m}$ (ALMEIDA, 2000).

De acordo com a Figura 4.1 uma fração de partículas de pirocloro ($d_{pS} = 1,93 \mu\text{m}$) foi desviada para a esquerda em direção a placa de cobre ligada à fonte de alta tensão (-10 kV), evidenciando carga positiva. Este mesmo comportamento foi observado para o diatomito ($d_{pS} = 2,30 \mu\text{m}$), pó de madeira ($d_{pS} = 2,62 \mu\text{m}$), alumina ($d_{pS} = 4,71 \mu\text{m}$) e clara de ovo ($d_{pS} = 7,31 \mu\text{m}$), representados pelas Figuras 4.2, 4.3, 4.5 e 4.6, respectivamente.

Comportamento contrário ocorreu para as partículas de concentrado fosfático ($d_{pS} = 1,95 \mu\text{m}$) que foram atraídas em direção à placa de cobre aterrada, evidenciando, portanto, carga negativa, como mostra a Figura 4.4.

A carga das partículas foi adquirida por triboeletrificação, isto é, devido à troca de elétrons ocorrida durante o contato do material pulverulento com os dutos do dispersor, na geração do aerossol. Neste caso, sabe-se que a troca de elétrons depende dos materiais envolvidos, de suas polaridades, e de suas posições relativas na série triboelétrica (HINDS, 1982).

4.1.2. Nível de cargas

As Figuras 4.7 a 4.12 apresentam alguns resultados da carga média da partícula em função do diâmetro de Stokes. Os testes foram realizados para faixa de velocidade no interior do classificador de $0,270 \pm 0,005$ m/s e para temperatura entre 21 e 28 °C.

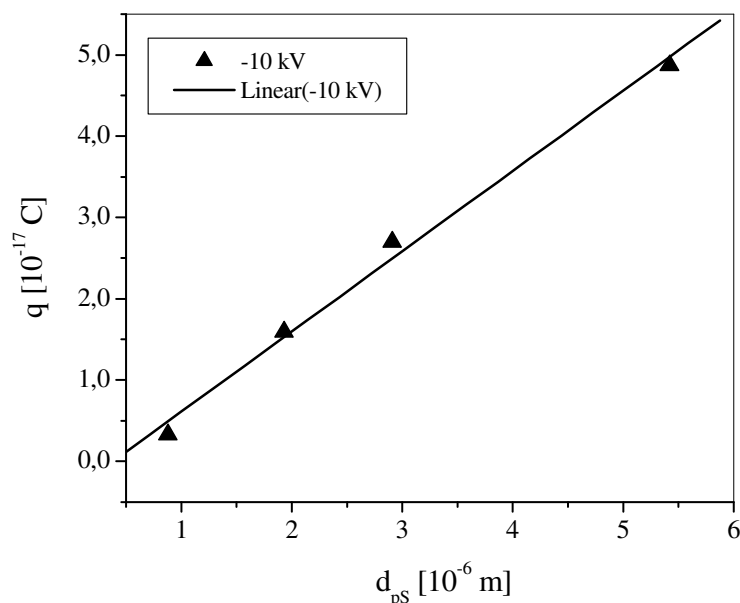


Figura 4.7 – Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para o pirocloro.

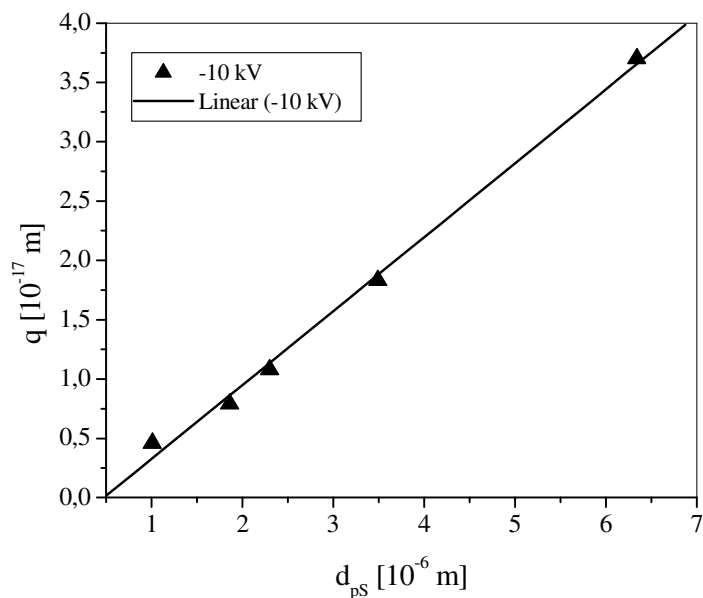


Figura 4.8 – Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para o diatomito.

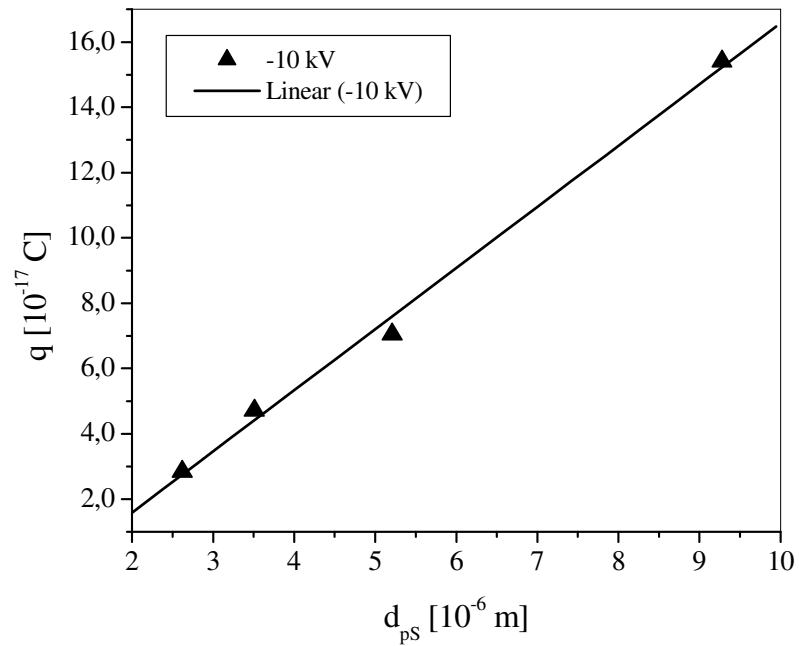


Figura 4.9 – Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para a madeira.

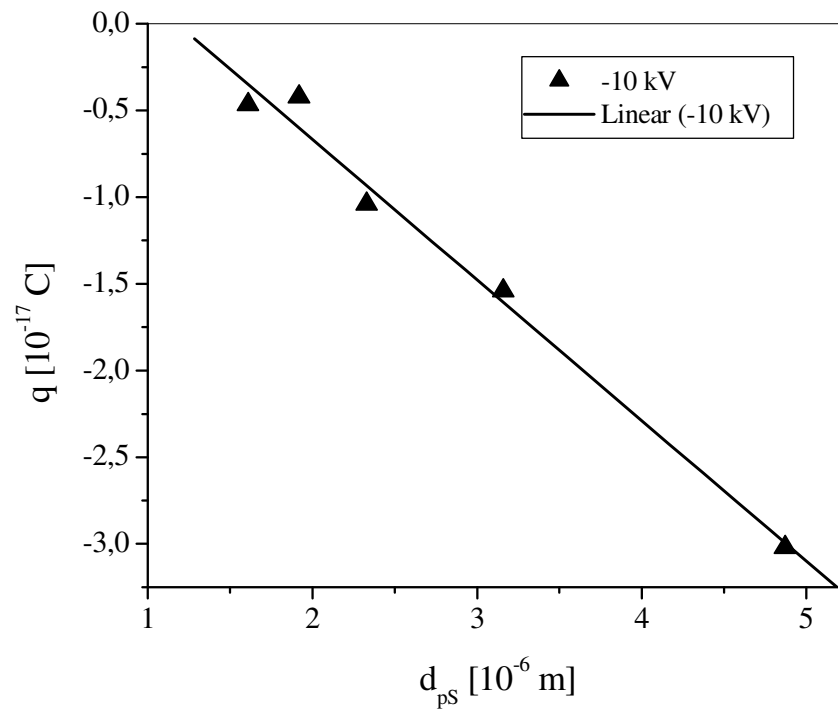


Figura 4.10 – Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para o concentrado fosfático (ALMEIDA 2000).

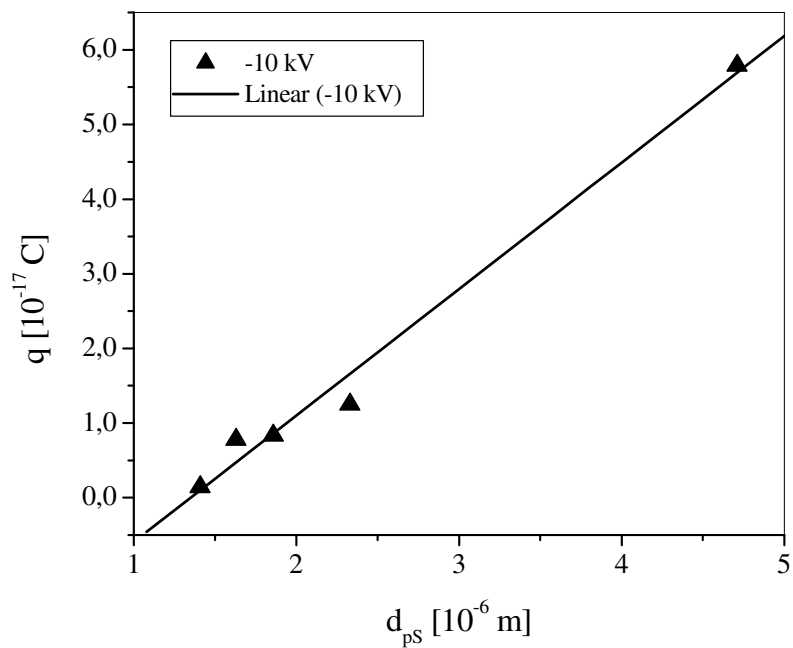


Figura 4.11 – Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para a alumina (ALMEIDA 2000).

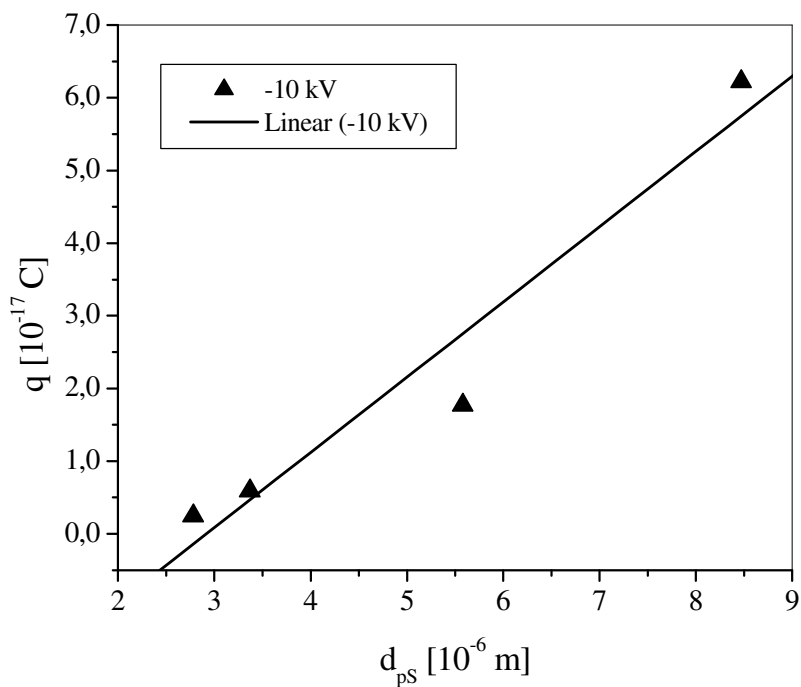


Figura 4.12 – Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para a clara de ovo (ALMEIDA 2000).

A análise dos resultados evidenciou relação linear de dependência entre o diâmetro da partícula e a quantidade de carga adquirida. Esta relação se verificou para todos os aerossóis polidispersos estudados. Coury (1983) e Coury et al (1991), ao trabalharem com a filtração de partículas de cinza leve, também relataram relações lineares de dependência entre a carga da partícula e diâmetro. Esta dependência linear entre carga e diâmetro pode ser expressa analiticamente como mostra a Tabela 4.1.

Os coeficientes de correlação linear (R^2) obtidos para as todas as equações apresentaram valores próximos à unidade, indicando que a variabilidade dos dados foi bem representada pelos modelos das equações propostas.

Tabela 4.1 – Equações obtidas da carga da partícula em função do diâmetro para os pós analisados.

Material	Carga (q)	R²
pirocloro	$1,02 \cdot 10^{-11} d_{pS} - 0,54 \cdot 10^{-17}$	0,985
diatomito	$0,62 \cdot 10^{-11} d_{pS} - 0,29 \cdot 10^{-17}$	0,996
pó de Madeira	$2,01 \cdot 10^{-11} d_{pS} - 3,14 \cdot 10^{-17}$	0,982
Concentrado fosfático	$-0,81 \cdot 10^{-11} d_{pS} + 0,95 \cdot 10^{-17}$	0,986
alumina	$1,69 \cdot 10^{-11} d_{pS} - 2,28 \cdot 10^{-17}$	0,993
clara de ovo	$1,03 \cdot 10^{-11} d_{pS} - 3,01 \cdot 10^{-17}$	0,949

A Figura 4.13 apresenta os valores, em módulo, das cargas adquiridas por partículas de 4 μm de diâmetro para: pirocloro, rocha fosfática, pó de madeira, diatomito, alumina e clara de ovo.

Ao se comparar partículas de 4 μm de diâmetro, pode-se observar através da Figura 4.13 que a madeira foi o material que apresentou os maiores níveis de carga ($4,92 \cdot 10^{-17}$ C) enquanto a clara de ovo foi o que apresentou os menores níveis de carga ($1,11 \cdot 10^{-17}$ C).

Embora a carga medida para o pirocloro, pó de madeira, diatomito, alumina e clara de ovo possuíssem a mesma polaridade (positiva), o nível de cargas dessas partículas era bem distinto. Embora o concentrado fosfático ter sido o único material a apresentar polaridade negativa, este apresentou nível de carga semelhante ao diatomito ($2,18 \cdot 10^{-17}$ C). Estas diferenças reforçam a afirmação de que a carga é função da natureza da partícula.

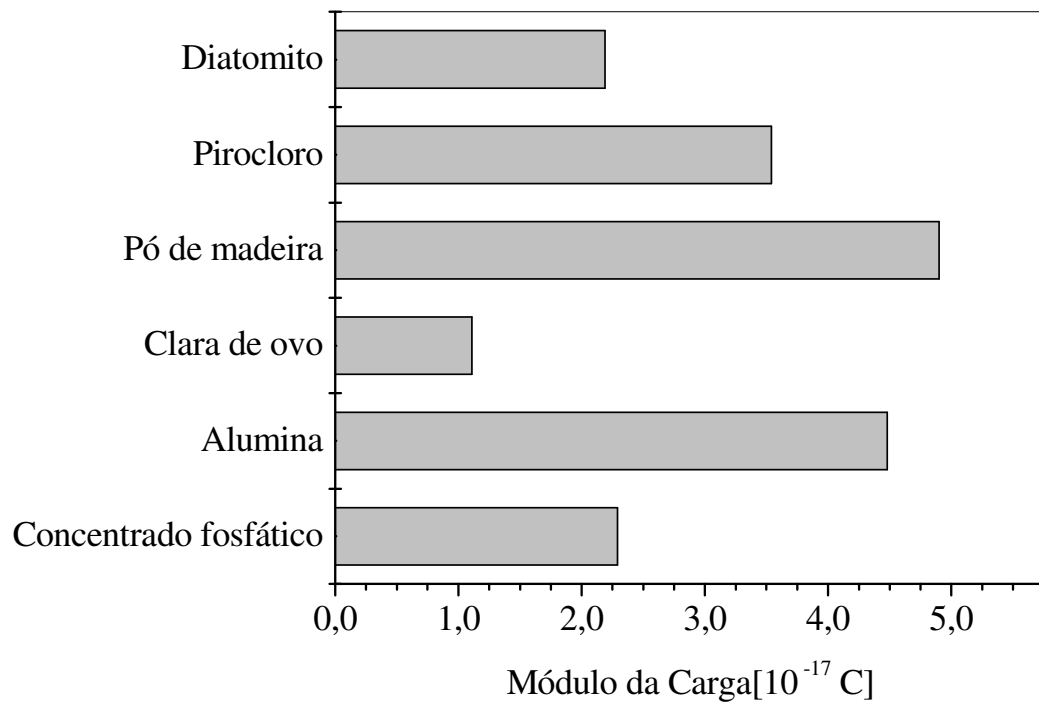


Figura 4.13 – Valores, em módulo, da carga da partícula para $d_{pS} = 4 \mu\text{m}$.

Neste caso, acredita-se que a triboeletrificação e eletrificação por contato sejam os grandes responsáveis pelo maior ou menor grau da carga adquirida.

A carga da particular pode também ser relacionada com o diâmetro através da expressão de potência mostrada pela Equação 4.1 (JOHNSTON et al. 1985):

$$|q/e| = A^* \cdot d_p^B \quad (4.1)$$

onde, e , é a carga elementar do elétron, A^* é o número médio de cargas elementares de magnitude $|e|$ em uma partícula de $1 \mu\text{m}$ e B , o parâmetro de potência.

A Tabela 4.2 apresenta comparação entre os resultados do nível de carga das partículas, segundo a Equação 4.1, obtidos neste trabalho com resultados obtidos por Almeida (2000), Johnston (1987), Coury et al. (1991) e Forsyth et al. (1998).

Tabela 4.2 – Distribuição de cargas em aerossol $|q/e| = A^* d_p^B$.

Aerossol (Dispersor)	A*	B	R²	Faixa d_p (µm)	Autor
Pirocloro (disco giratório)	29,79	1,48	0,96	0,9-5,4	Este trabalho
Diatomito (disco giratório)	26,45	1,15	0,99	1,0-6,3	Este trabalho
Madeira (disco giratório)	53,1	1,30	0,99	2,6-9,3	Este trabalho
Concentrado fosfático (disco giratório)	48,6	1,06	0,97	0,15-8,0	Almeida (2000)
Alumina (disco giratório)	7,83	2,58	0,85	1,4-4,7	Almeida (2000)
Clara de ovo (disco giratório)	1,07	2,74	0,98	2,8-8,5	Almeida (2000)
Carvão (disco giratório)	36,8	1,17	0,99	0,6-7,5	Johnston et al. (1987)
Quartzo (disco giratório)	27,8	1,48	0,99	0,6-7,5	Johnston et al. (1987)
Mica (disco giratório)	30,3	1,18	0,99	0,6-7,5	Johnston et al. (1987)
Cinza (alimentador de pó <i>Wright</i>)	175,8	1,05	0,99	0,7-12	Coury et al. (1991)
Alumina (Leito fluidizado)	44,2	1,00	0,97	0,15-0,3	Forsyth et al. (1998)
<i>Road dust fine</i> (Leito fluidizado)	67,8	1,05	0,96	0,26-2,6	Forsyth et al. (1998)

A quantidade de carga encontrada em todos os casos foi bastante similar quando comparada a trabalhos de outros autores, indicando a consistência dos equipamentos e da metodologia empregados. Pode-se notar que os métodos de dispersão do aerossol empregados envolveram, principalmente, o contato entre o sólido e o dispersor (triboeletrificação), produzindo aerossóis com características eletrostáticas similares.

De acordo com os resultados obtidos por Johnston et al. (1987) para carvão, quartzo e mica, as distribuições de cargas dos aerossóis foram muito semelhantes, com A* apresentando valores próximos a 30 e B valores em torno de 1,2.

A cinza estudada por Coury et al. (1991) foi o material que apresentou o maior nível de carga dentre todos os outros, enquanto a clara de ovo foi o material que apresentou o menor

nível de carga. Os valores de carga obtidos por Forsyth et al. (1998) foram inferiores somente aos valores obtidos por Coury et al. (1991).

Também é válido ressaltar que o método de geração empregado exerce influência direta na intensidade da carga adquirida, ou seja, um mesmo aerossol pode apresentar comportamento diferente em relação à sua carga em função do método de geração (JOHNSTON et al. 1987). Isto pode ser observado para a alumina. As esferas de aço presentes no gerador de leito fluidizado pareceram ser as responsáveis pelo maior grau de carregamento das partículas de alumina.

4.2. Testes de medida de carga com o CCE automatizado

Com a finalidade de validar a automação da unidade de medida de carga eletrostáticas em partículas (CCE), foram realizados testes com os mesmos sólidos utilizados no início deste trabalho, concentrado fosfático, pirocloro e diatomito. É importante lembrar que, assim como nos testes anteriores, antes da automação, as cargas das partículas foram originadas somente do processo de dispersão do aerossol, nenhum carregamento adicional foi utilizado.

As Figuras 4.14 a 4.16 apresentam alguns resultados da carga média da partícula em função do diâmetro de Stokes. Os testes foram realizados para uma faixa de velocidade no interior do classificador de $0,270 \pm 0,005$ m/s e para temperatura entre 21 e 28 °C.

Nos testes realizados com o classificador automatizado pode-se perceber que a polaridade da carga adquirida por estes sólidos foi a mesma dos testes realizados antes da automação do CCE. O processo de automação simplificou muito o procedimento experimental em determinadas etapas do experimento, como no ajuste de velocidade no interior do equipamento e ajuste da posição da sonda de coleta das partículas.

A velocidade no interior do CCE, agora monitorada por transdutores e controladores de vazão, se manteve constante durante a realização de todo o experimento. Esta estabilidade no perfil de escoamento do classificador permite afirmar que o desvio na trajetória das partículas em direção das placas se deveu somente à atuação das forças elétricas.

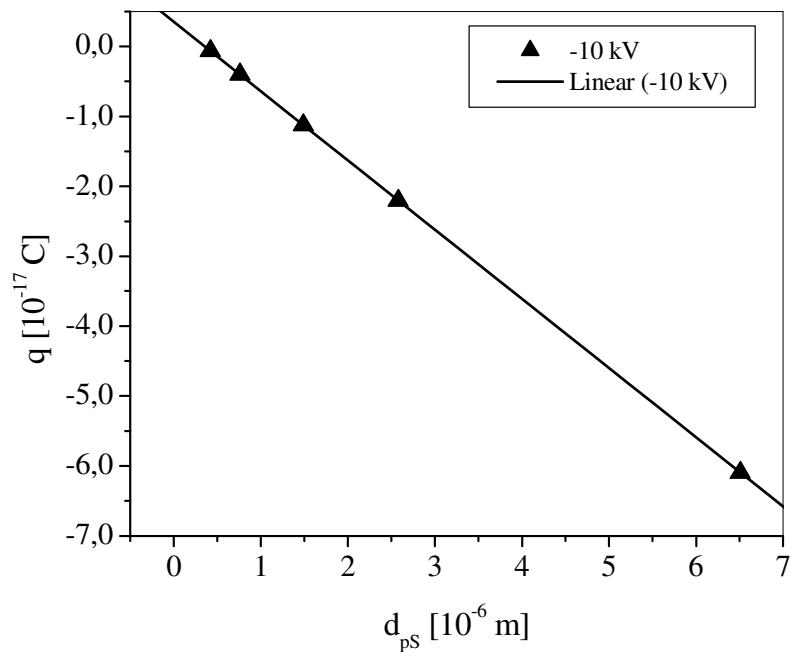


Figura 4.14 – Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para o concentrado fosfático.

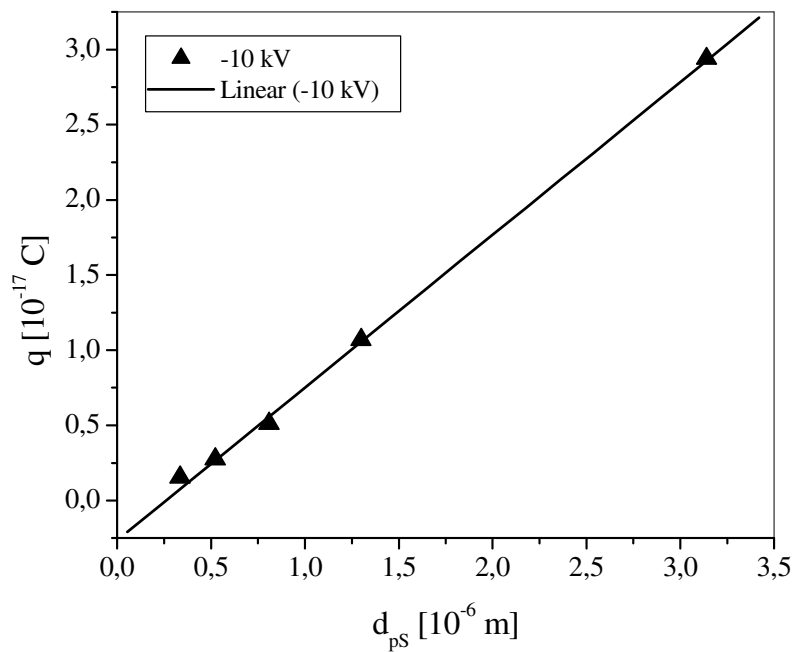


Figura 4.15 – Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para o pirocloro.

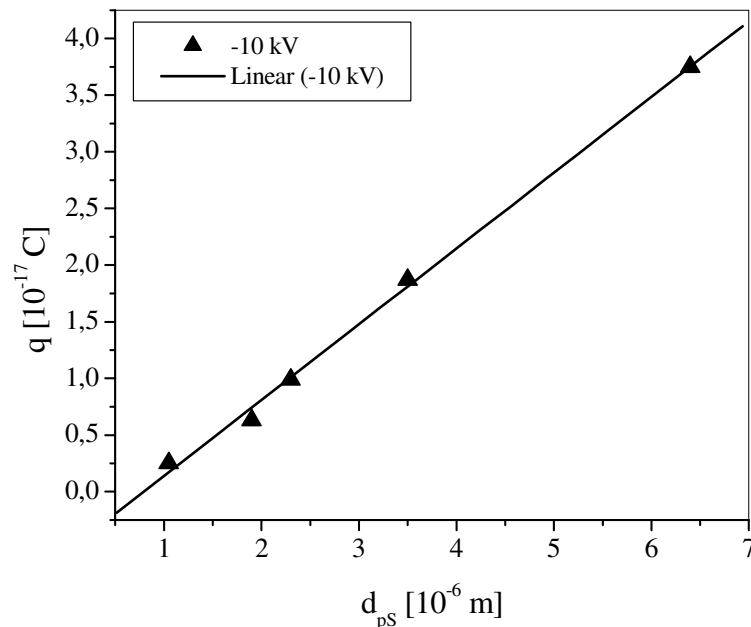


Figura 4.16 Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para o diatomito.

A análise dos resultados evidenciou relação linear de dependência entre o diâmetro da partícula e a quantidade de carga adquirida, como mostra a Tabela 4.3. Os coeficientes de correlação linear (R^2) obtidos para as todas as equações acima apresentaram valores próximos à unidade, indicando que a variabilidade dos dados foi bem representada pelos modelos das equações propostas.

Tabela 4.3 – Equações obtidas da carga da partícula em função do diâmetro.

Material	Carga (q)	R^2
Pirocloro	$1,01 \times 10^{-11} d_{pS} - 0,25 \times 10^{-17}$	0,996
Concentrado fosfático	$-0,97 \times 10^{-11} d_{pS} + 0,21 \times 10^{-17}$	0,999
Diatomito	$0,67 \times 10^{-11} d_{pS} - 0,53 \times 10^{-17}$	0,997

Comparando as Tabelas 4.1 e 4.3 pode-se observar o nível de carga das partículas em função do diâmetro foi semelhante ao nível de carga obtido com o CCE antes da automação. Houve pequeno aumento no coeficiente de correlação linear das equações que relaciona a carga versus o diâmetro da partícula.

4.3. Ajuste inicial do nível de carga das partículas induzido pelo carregador tipo corona

Para o ajuste do nível de cargas induzido nas partículas o carregador tipo corona foi acoplado entre a saída do dispersor de pó de disco giratório (SSPD) e a entrada do CCE, como mostra a Figura 3.12. Nos testes procurou-se induzir nível de carga nas partículas adicional aos níveis originados devido o processo de dispersão do aerossol (triboeletrificação). Apenas o concentrado fosfático foi utilizado nestes testes.

O carregador tipo corona, em sua configuração inicial, possuía como eletrodo de descarga, um fio de aço inoxidável rígido de 1 mm de diâmetro.

O primeiro teste realizado foi um comparativo entre os níveis de carga adquirida pelas partículas mediante a não aplicação de tensão no carregador corona ($\Delta V = 0$ kV) e para tensão aplicada de -3 kV. A tensão na placa defletora do CCE foi de -10 kV. Os resultados indicaram que nos dois casos os níveis de carga adquirida pelas partículas foram iguais. Ou seja, a carga das partículas foi decorrente do método de geração do aerossol. Não ocorreu a eletrização das partículas pelos íons corona.

Considerou-se, na ocasião, que a tensão aplicada não foi suficiente para causar a ionização do ar e posterior carregamento das partículas. Os testes seguintes foram caracterizados por aumentos gradativos da tensão aplicada ao carregador tipo corona. A tensão na placa do CCE de -10 kV foi mantida. Foram realizados testes com tensões corona de -6, -9, -12, -15 e -20 kV, limite máximo de tensão que a fonte podia aplicar. A Figura 4.17 apresenta os resultados da carga média da partícula em função do diâmetro de Stokes quando não houve aplicação de tensão corona e para tensão corona de -15 kV.

Ficou evidente comportamento linear entre a carga da partícula e diâmetro. Essa dependência entre a carga da partícula em Coulomb e o diâmetro da partícula em metros pode ser expressa por:

$$q = -0,97 \cdot 10^{-11} \cdot d_{ps} + 2,11 \cdot 10^{-18} \quad R^2 = 0,999 \quad \text{para } 0 \text{ kV} \quad (4.2)$$

$$q = -1,03 \cdot 10^{-11} \cdot d_{ps} + 2,19 \cdot 10^{-18} \quad R^2 = 0,999 \quad \text{para } -15 \text{ kV} \quad (4.3)$$

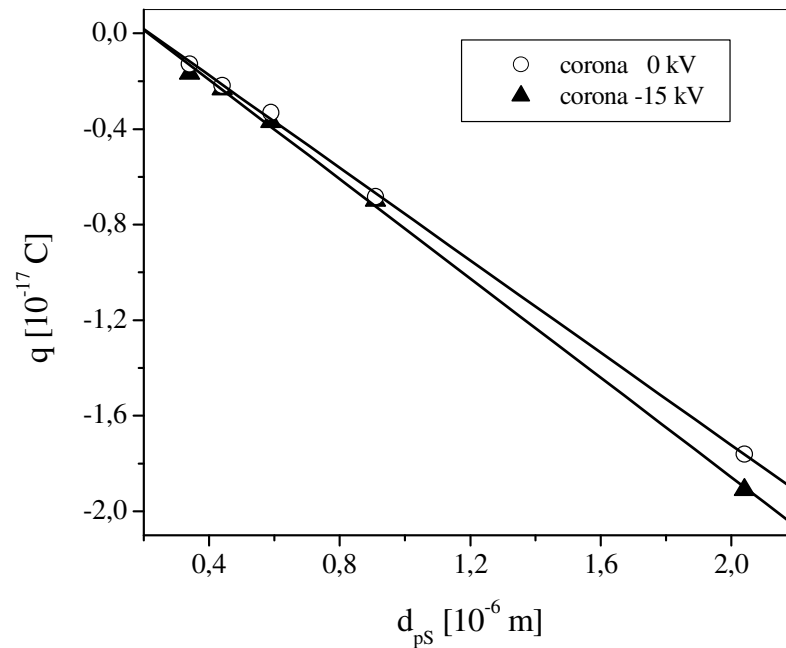


Figura 4.17 – Carga da partícula em função do diâmetro para tensões no carregador tipo corona de 0 kV e -15 kV.

Nos testes realizados com tensão corona de -6, -9, -12 e -20 kV foi observado o mesmo comportamento, o nível de carga adquirida pelas partículas de concentrado fosfático foi sempre o mesmo, independente da tensão aplicada ao eletrodo corona. Portanto, não houve carregamento das partículas mediante o efeito corona.

Peek (1929) apud White (1963) propôs equação empírica que relacionava o campo mínimo necessário para que ocorresse a descarga corona, depende da densidade do gás e do raio do eletrodo utilizado. De acordo com a equação proposta quanto menor o raio do eletrodo de descarga maior a intensidade do campo gerado quando mesma tensão é aplicada. Para os testes posteriores o eletrodo corona (fio rígido de aço inox de 1 mm de diâmetro) foi substituído por um fio também de aço inoxidável de 0,25mm de diâmetro.

No primeiro teste utilizando o fio de 0,25 mm foi aplicada tensão corona de -15 kV e tensão na placa defletora do CCE de -10 kV. Neste caso o equipamento se comportou como um precipitador eletrostático de duplo estágio. O número de partículas coletadas pela sonda isocinética, fornecida pelo APS, foi bastante inferior às contagens obtidas nos testes realizados

com o eletrodo de 1 mm de diâmetro. Foi também observado que uma fina camada do concentrado fosfático ficou depositada sobre a placa positiva do CCE.

Em seguida, foi realizado teste com tensão na placa do CCE de -10 kV, e tensão no carregador tipo corona de -5 kV. Com isso esperava-se evitar que partículas do concentrado fosfático fossem coletadas pela placa aterrada do CCE na zona de deflexão. Neste caso, não foi observada coleta de partículas de concentrado fosfático na placa aterrada do CCE. A Figura 4.18 apresenta os valores do nível de carga da partícula em função do diâmetro para tensão na placa do CCE de -5 kV e tensões no carregador de 0 e -10 kV.

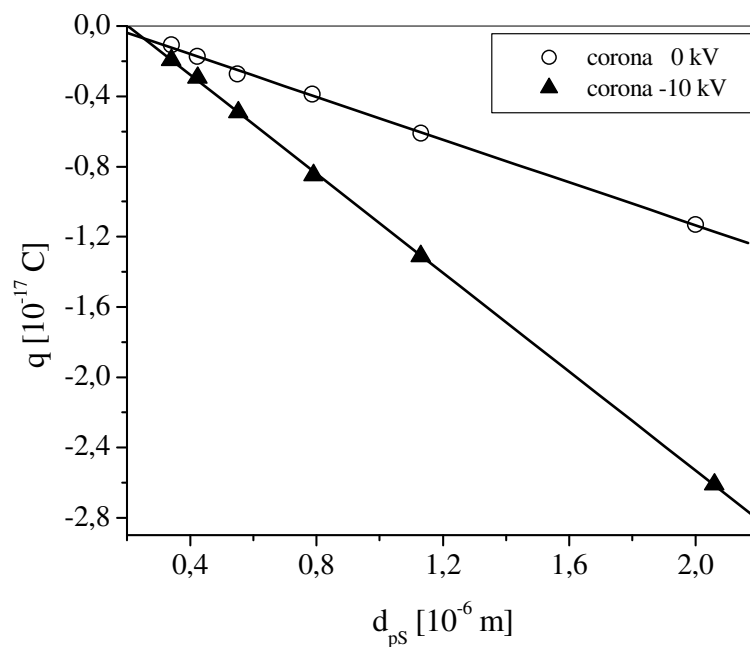


Figura 4.18 – Carga da partícula de concentrado fosfático em função do diâmetro mediante tensão na placa do CCE de -5 kV.

Neste caso também foi evidente comportamento linear entre a carga da partícula em Coulombs e o diâmetro em metros. Essa dependência pode ser expressa por:

$$q = -0,60 \cdot 10^{-11} \cdot d_{ps} + 8,14 \cdot 10^{-19} \quad R^2 = 0,999 \quad \text{corona 0 kV} \quad (4.4)$$

$$q = -1,41 \cdot 10^{-11} \cdot d_{ps} + 2,87 \cdot 10^{-18} \quad R^2 = 1,000 \quad \text{corona -10 kV} \quad (4.5)$$

Pela Figura 4.18 pode-se observar que as partículas eletrizadas pelo carregamento corona apresentaram maior nível de carga em função do diâmetro.

Com a finalidade de se verificar o nível de carga induzido nas partículas pelo carregador corona, foi feita comparação entre o nível de carga induzido por dois diferentes tipos de carregamento. A Figura 4.19 apresenta comparação entre: nível de carga decorrente somente do processo de dispersão do aerossol, nível de carga adicionado por impactação, Almeida (2000) e o nível adicionado por carregamento corona por tensão de -9 kV (tensão na placa do CCE -5 kV).

Através da Figura 4.19 observa-se que o nível de cargas adquiridas pelas partículas de concentrado fosfático por carregamento corona foi 2,5 vezes maior em relação ao nível de cargas das partículas não eletrizadas.

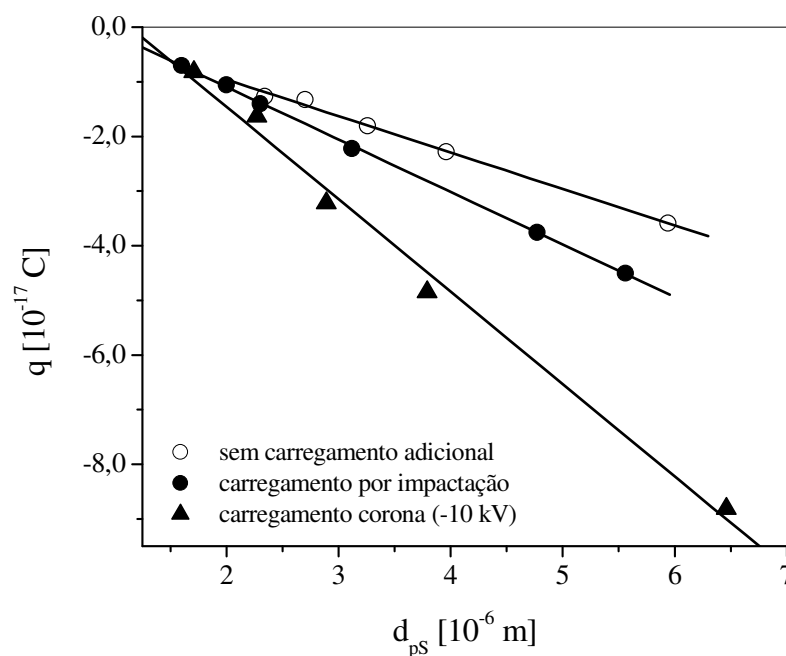


Figura 4.19 – Carga da partícula em função do diâmetro para diferentes métodos de eletrização das partículas de concentrado fosfático.

Através da Figura 4.19 pode-se perceber comportamento linear entre a carga da partícula em Coulombs e o diâmetro em metros. Essa dependência para os três casos pode ser expressa pelas Equações (4.6), (4.7) e (4.8).

$$q = -0,67.10^{-11}.d_{ps} + 3,82.10^{-18} \quad R^2 = 0,995 \quad \text{sem carregamento adicional} \quad (4.6)$$

$$q = -0,87.10^{-11}.d_{ps} + 5,67.10^{-18} \quad R^2 = 1,000 \quad \text{carregamento por impactação} \quad (4.7)$$

$$q = -1,64.10^{-11}.d_{ps} + 1,70.10^{-18} \quad R^2 = 0,999 \quad \text{carregamento corona, -10 kV} \quad (4.8)$$

onde q é a carga da partícula em Coulombs e d_p o diâmetro da partícula em m.

Observando as Equações 4.6 a 4.8 pode-se notar que o efeito corona foi efetivo no carregamento das partículas de concentrado fosfático, comprovado pelo aumento de 2,5 vezes no nível de distribuição de cargas em relação a partículas com carga proveniente somente devido à dispersão. Entretanto este carregamento não afetou a dependência linear entre o diâmetro da partícula e sua carga. O carregamento corona foi 80% superior ao nível de carregamento por impacto obtido por Almeida (2000), comprovando o funcionamento do carregador utilizado.

4.4. Determinação do nível de carga das partículas por carregamento corona

Neste item serão apresentados os níveis de carga das partículas de concentrado fosfático por o carregamento corona. É importante lembrar que para carregamento com tensão corona de 0 kV as cargas das partículas são provenientes do método de dispersão do pó. Os níveis foram ajustados mediante variação da tensão ligada ao eletrodo de descarga do carregador tipo corona. Os valores de tensão utilizados foram de 0, -3, -6, -9, -12 e -15 kV.

Com a finalidade de facilitar o acompanhamento do trabalho, serão apresentados, anteriormente à determinação do nível de cargas das partículas, a obtenção dos pontos de x_0 e x_c . O número de partícula apresentado nas Figuras a seguir foi obtido através do contador APS.

4.4.1. Testes de determinação da posição x_0 das partículas

A Figura 4.20 mostra o número de partículas coletadas pela sonda isocinética em função da posição x , na zona de deflexão do CCE, para partículas com $d_{pS}=3,26 \mu\text{m}$, e tensão na placa defletora do CCE de 0 kV.

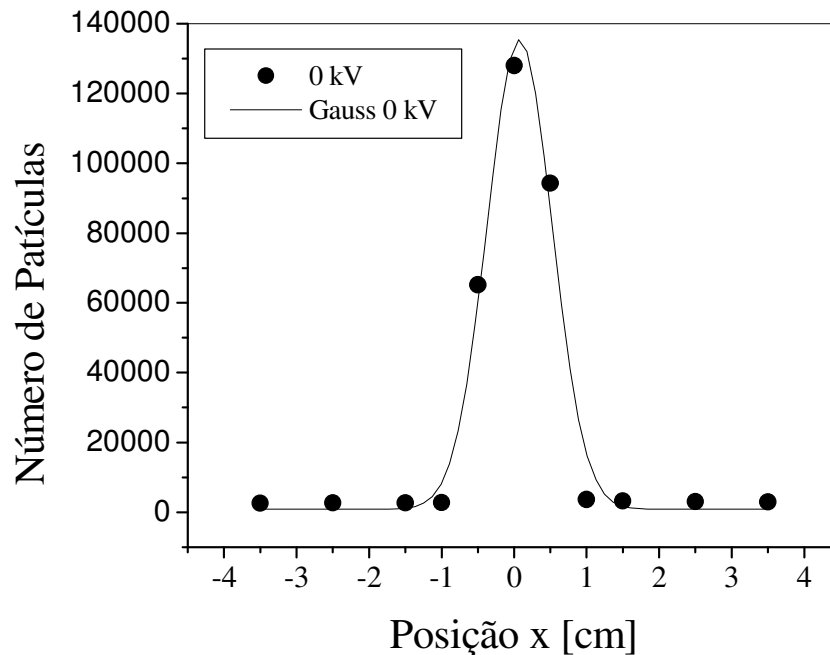


Figura 4.20 – Número de partículas de concentrado fosfático em função da posição x , para $d_{pS} = 3,26 \mu\text{m}$.

Na Figura 4.20 pode-se observar que, na ausência de campo elétrico nas placas do classificador, um número maior de partículas foram coletadas na região central (posição 0) e próxima ao centro posições -0,5 e +0,5 do que nas demais posições. Não houve deflexão das partículas. Através da Gaussiana pode-se observar que o ponto de máximo encontra-se próximo da posição 0.

4.4.2. Verificação da posição x_c das partículas carregadas

A Figura 4.21 apresenta resultado típico do desvio sofrido pelas partículas na região de deflexão do classificador. Foram aplicadas tensões corona de -3 e -6 kV nas partículas, e

tensão na placa do CCE -5 kV. Cada curva apresenta o número total de partículas de concentrado fosfático ($d_{ps} = 3,26 \mu\text{m}$) coletadas em função da posição x . Estas curvas foram ajustadas pelo modelo de Gauss, para obtenção dos pontos de máximo (MARRA JR., 2000).

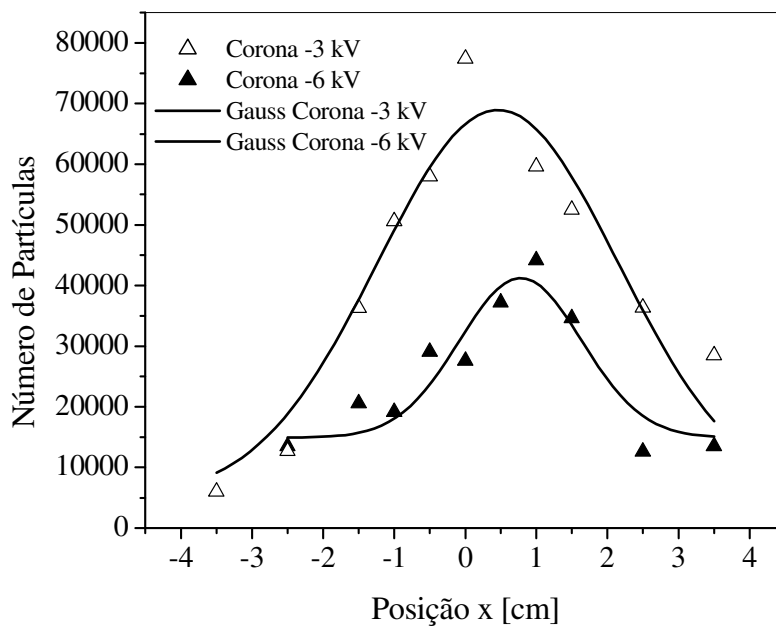


Figura 4.21 – Número de partículas de rocha fosfática em função da posição x , para $d_{ps} = 3,26 \mu\text{m}$, tensão no CCE -5 kV.

Os desvios medidos foram proporcionais ao grau de carregamento da partícula durante o processo de geração do aerossol, bem como à intensidade do campo elétrico. O campo elétrico foi gerado pela aplicação de tensão de -5 kV na placa defletora, situada na parede esquerda, da região de deflexão do CCE. Pelo ponto de máximo das Gaussianas, nota-se que houve maior desvio das partículas eletrizadas com tensão corona de -6 kV do que em relação às partículas eletrizadas por tensão corona de -3 kV.

Observa-se na Figura 4.21 que uma fração de partículas de concentrado fosfático ($d_{ps} = 3,26 \mu\text{m}$) sofreram desvio para a direita em direção a placa de cobre aterrada, evidenciando carga negativa. Isto era esperado uma vez que as partículas foram eletrizadas por corrente corona negativa, -3 e -6 kV. O mesmo comportamento foi observado para partículas de concentrado fosfático mediante tensão no classificador de -10 kV.

Também é possível notar na Figura 4.21 menor número de partículas registradas no contador APS para tensão corona de -6 kV do que para tensão corona de -3 kV. Esta diferença

foi decorrente do espalhamento do concentrado fosfático no disco do gerador SSPD. Variação na espessura da camada de pó durante o espalhamento sobre o disco do gerador, resulta em maior quantidade de partículas na sonda do CCE. A variação de espalhamento não influenciou na tendência de desvio das partículas. O desvio foi devido somente a atuação do campo elétrico sob as partículas carregadas.

4.4.3. Nível de carga das partículas induzido por carregamento corona

A Figura 4.22 apresenta os resultados obtidos de carga da partícula em função do diâmetro, para diferentes tensões aplicadas ao carregador corona, ou seja, 0, -3, -6 e -9 kV. A tensão aplicada à placa defletora do CCE foi de -5 kV.

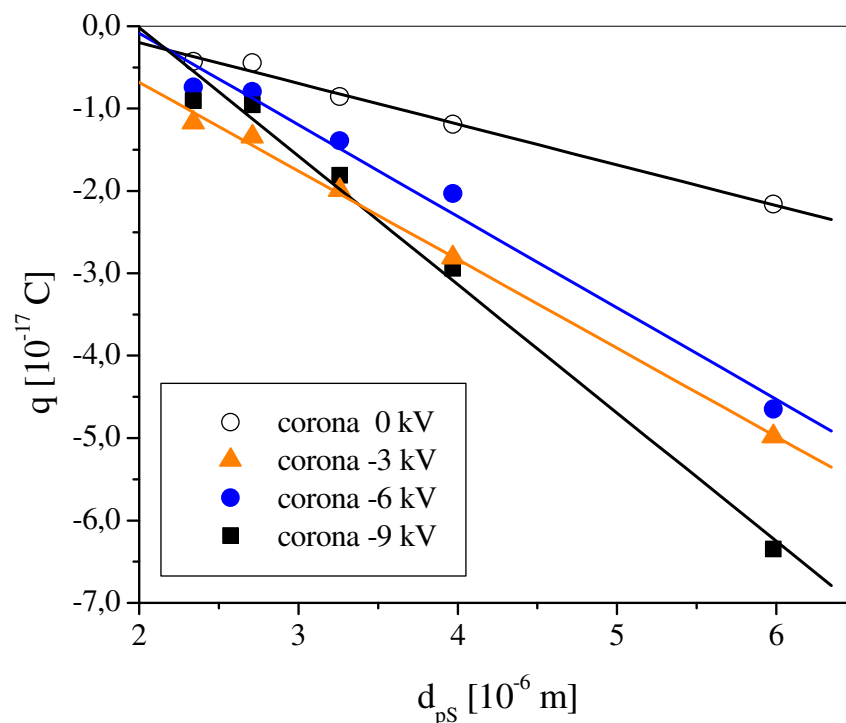


Figura 4.22 – Carga da partícula em função do diâmetro de Stokes para partículas de concentrado fosfático com tensão no CCE -5 kV.

A análise dos resultados evidenciou relação linear de dependência entre o diâmetro da partícula e a quantidade de carga adquirida. Esta relação se verificou para todos os níveis de

carregamento utilizados. Este mesmo comportamento foi observado por Coury (1983) e Guang (1991), em estudos de filtração de partículas de cinza leve.

Analisando a Figura 4.22 pode-se observar que o maior nível de carga adquirida pelas partículas foi para carregamento corona de -9 kV. Para os níveis de carregamento corona de -3, -6 e -9 kV, observou-se aumento gradativo do nível de carregamento das partículas com o aumento da tensão corona.

Para os testes com o nível de carregamento corona de 0 kV, onde a presença de cargas nas partículas foi devida somente ao método de geração do aerossol, não foi observada boa reprodutibilidade entre os valores de cargas. Isto pode ser atribuído à complexidade do carregamento por atrito e os níveis de carga adquiridos pelas partículas serem extremamente sensíveis a pequenas variações de umidade do ar, umidade do sólido e temperatura.

Para tensões de carregamento corona superior a -9 kV, houve decréscimo no nível de carga das partículas. Durante a realização de testes com carregamento de -12 e -15 kV, foi observado que o classificador comportou-se como um precipitador eletrostático de duplo estágio. As partículas eram carregadas e em seguida ficavam retidas na parede aterrada do classificador. Nestes testes, também foi observada queda na contagem do número de partículas coletadas pela sonda isocinética e medido pelo APS.

Deste modo, as tensões de carregamento corona adotadas para serem posteriormente utilizadas na filtração foram de 0, -3, -6 e -9 kV.

As expressões analíticas que relacionam a dependência linear entre carga e diâmetro, para os diferentes níveis de carregamento, considerando uma tensão no CCE de -5 kV estão mostradas na Tabela 4.4. Onde q é a carga da partícula, em Coulomb e, d_{pS} o diâmetro de Stokes da partícula, em metros.

Tabela 4.4 – Equações da carga da partícula em função do diâmetro.

Tensão corona	Carga (q)	R ²
0 kV	$-0,51 \times 10^{-11} d_{pS} + 8,73 \times 10^{-18}$	0,994
-3 kV	$-1,07 \times 10^{-11} d_{pS} + 1,14 \times 10^{-18}$	0,952
-6 kV	$-1,13 \times 10^{-11} d_{pS} + 2,13 \times 10^{-17}$	0,991
-9 kV	$-1,48 \times 10^{-11} d_{pS} + 3,10 \times 10^{-17}$	0,988

Os coeficientes de correlação linear (R^2) obtidos para as todas as equações apresentaram valores próximos a 1,0, indicando bom ajuste aos dados experimentais. Pela Tabela 4.4 pode-se dizer que houve aumento gradativo do nível de cargas adquiridas pelas partículas devido o aumento da tensão do carregador corona.

4.5. Determinação experimental da porosidade do feltro de polipropileno

A porosidade de um tecido filtrante é parâmetro de fundamental importância na determinação da penetração teórica (ver equação 2.12). Para a determinação da porosidade do feltro de polipropileno, foi primeiramente utilizado porosímetro a mercúrio, POREMASTER modelo 33. No entanto, os valores de porosidade apresentaram grande variação, entre 0,23 e 0,79, conseqüência do feltro de polipropileno sofrer deformações quando comprimido com o mercúrio do porosímetro. Houve portanto, a necessidade de obtenção da porosidade de outra forma.

Foi feita determinação experimental da porosidade utilizando a metodologia desenvolvida por Aguiar (1995) e discutida na seção 3.7.8.1. A Tabela 4.5 apresenta os valores de porosidade obtidos experimentalmente para 5 amostras do feltro de polipropileno.

Tabela 4.5 – Dados de porosidade experimental do feltro de polipropileno.

Amostra	Porosidade
P1	0,820
P2	0,806
P3	0,811
P4	0,821
P5	0,809

A partir dos valores apresentados na Tabela 4.5, a porosidade média foi de $0,813 \pm 0,07$. Este valor foi utilizado nos cálculos da penetração teórica apresentada a seguir.

4.6. Testes de filtração envolvendo a eletrização das partículas

A seguir estão apresentados os resultados obtidos nos testes de filtração. O material particulado utilizado foi somente o concentrado fosfático. A caracterização do comportamento do filtro foi baseada na penetração, que representa o número de partículas que passam através do filtro em relação ao número de partículas que chegam ao filtro.

Nos testes, o filtro foi considerado limpo e o processo de coleta se desenvolveu somente entre partícula e fibra coletora limpa. Foram utilizadas 3 velocidades de filtração, 5, 8 e 12 cm/s e quatro níveis de carregamento das partículas, apresentados na Tabela 4.4. Durante os experimentos, também foi monitorada a queda de pressão do filtro. As 5 faixas de diâmetro de Stokes das partículas estudadas foram: 2,1; 2,8; 3,3; 4,0 e 5,8 μm .

4.6.1. Comparação entre os valores de penetração experimental e teórico para partículas com tensão corona de 0 kV.

As Figuras 4.23 a 4.25 mostram a comparação entre os valores de penetração obtidos experimentalmente e os valores obtidos pelas equações que descrevem os mecanismos mecânicos de coleta. Nesta seção encontra-se discutida somente a filtração envolvendo partículas que não foram eletrizadas pelo carregamento corona devido às equações propostas na literatura não serem apropriadas para o tipo de tecido e método de geração de carga utilizados neste trabalho. No cálculo da previsão da penetração teórica, foram utilizadas as correlações desenvolvidas para os mecanismos não-eletroforéticos, apresentadas no Capítulo 2: Equação (2.21) para o mecanismo difusional, Equação (2.29) para os mecanismos inercial e interceptação direta e Equação (2.30) para o mecanismo gravitacional. Todos os mecanismos atuaram simultaneamente conforme a Equação (2.41) e a penetração foi determinada de acordo com a Equação (2.12).

Pode-se observar pelas Figuras 4.23 a 4.25 que o comportamento dos resultados experimentais acompanham a tendência da curva teórica, ou seja, a penetração diminuiu de forma acentuada com o aumento do diâmetro das partículas até aproximadamente 3,5 μm .

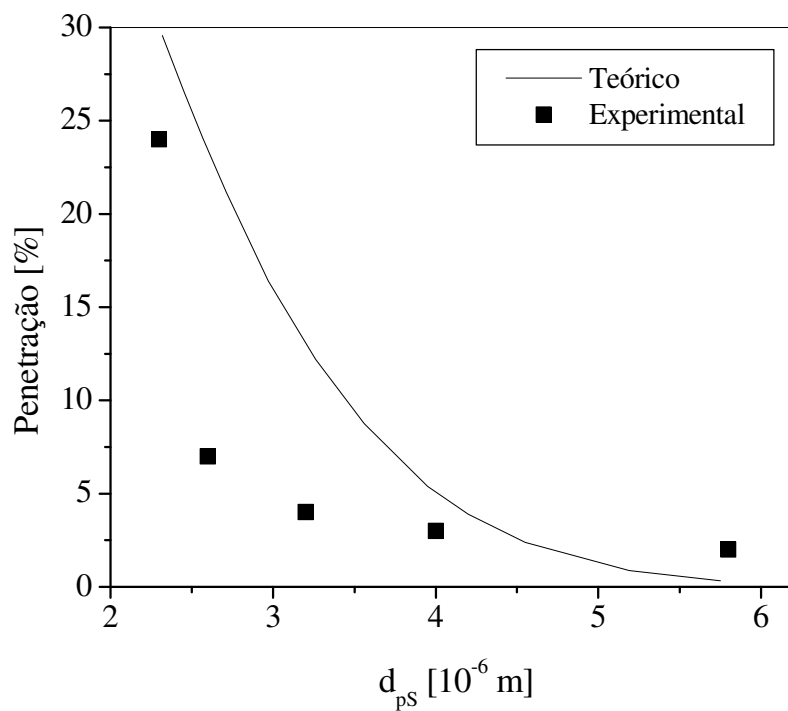


Figura 4.23 – Penetração em função do diâmetro de partícula para velocidade de filtração de 5 cm/s.

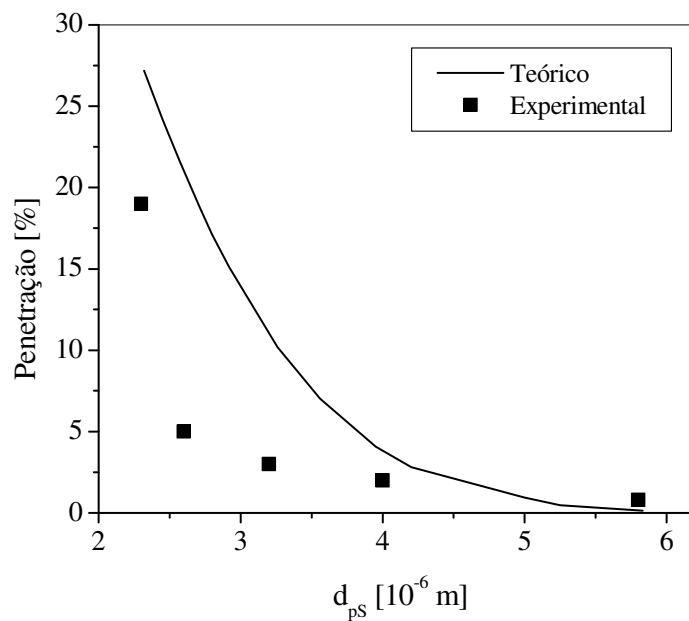


Figura 4.24 – Penetração em função do diâmetro de partícula para velocidade de filtração de 8 cm/s.

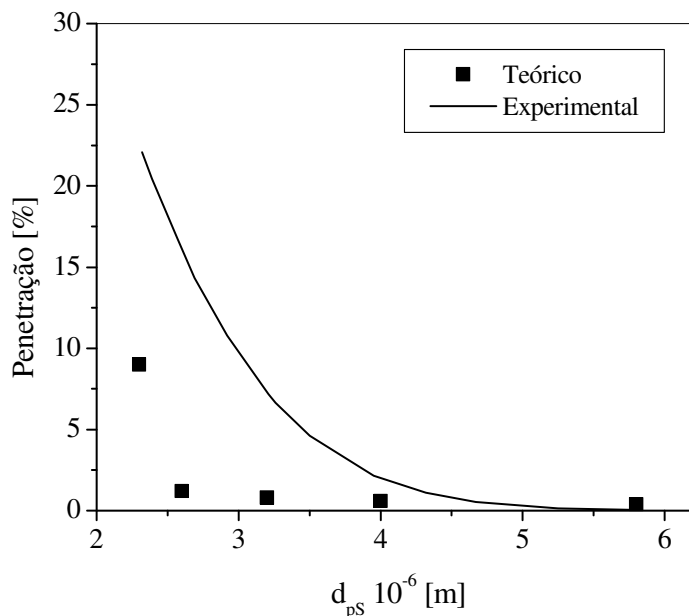


Figura 4.25 – Penetração em função do diâmetro de partícula para velocidade de filtração de 12 cm/s.

Também pode se notar que para aumento da velocidade de filtração, os valores de penetração teórico e experimental ficaram mais próximos para partículas maiores de 4 μm . Isto pode ser consequência da maior atuação dos mecanismos de inércia e de interceptação direta.

Para partículas menores de 4 μm , as equações empíricas para os cálculos dos mecanismos mecânicos de coleta, que fornecem os valores teóricos de penetração, subestimaram os valores experimentais. Este fenômeno pode ser explicado devido à atuação do mecanismo eletroforético na coleta das partículas. Embora não se tenha induzido carga nas partículas, estas foram geradas no processo de dispersão do aerossol e apresentam a seguinte relação linear com o diâmetro: $q(C) = -0,51 \times 10^{-11} d_{ps}(m) + 8,73 \times 10^{-18}$. Estes resultados comprovaram que o mecanismo eletroforético teve maior atuação na coleta de partículas de diâmetro menores que 4 μm .

4.6.2. Determinação experimental da penetração inicial

Os testes foram realizados com as partículas apresentando níveis de cargas provenientes somente do método de geração do aerossol (0 kV) e com cargas induzidas por carregamento corona para tensões de -3, -6, e -9 kV. Os níveis de carga eletrostática presente nas partículas são os mesmos reportados no item 4.4.3.

As Figuras 4.26 a 4.28 mostram resultados típicos de penetração das partículas através do feltro de polipropileno, em função do diâmetro, para diferentes níveis de carga, no estágio inicial da filtração. As velocidades de filtração nos testes foram de 5, 8 e 12 cm/s.

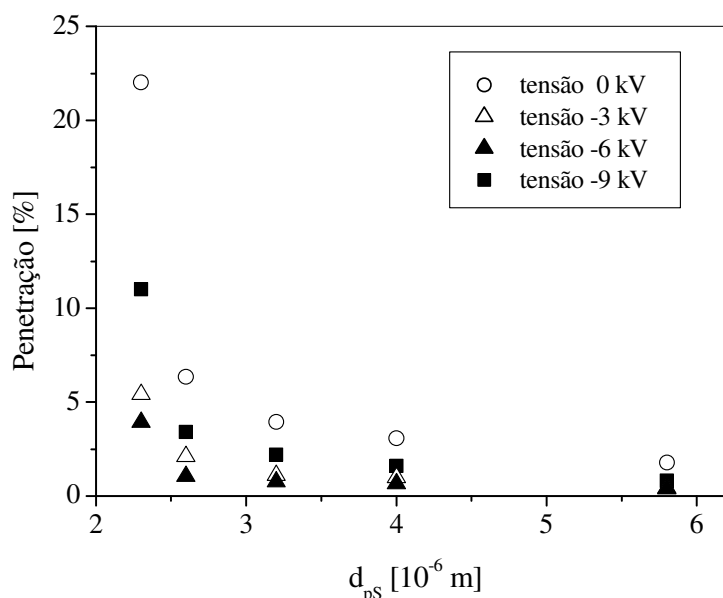


Figura 4.26 – Penetração inicial das partículas em função do diâmetro para velocidade de filtração de 5 cm/s.

Observando as Figuras 4.6 a 4.28 pode-se notar que houve diminuição da penetração com aumento do diâmetro de partícula. Esta redução foi mais acentuada para partículas menores de $3,5 \mu\text{m}$. Para partículas maiores que $3,5 \mu\text{m}$, os valores da penetração foram inferiores a 4 %, indicando que o filtro remove de maneira eficiente partículas desta faixa granulométrica.

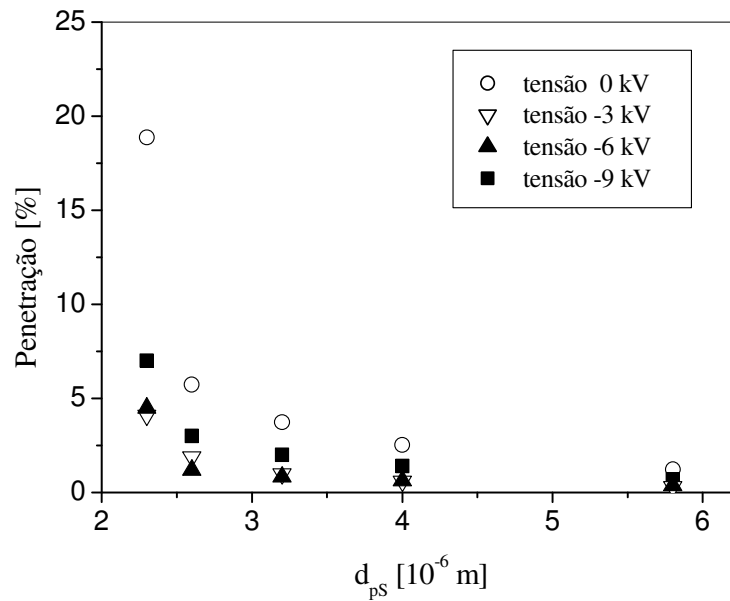


Figura 4.27 – Penetração inicial das partículas em função do diâmetro para velocidade de filtração de 8 cm/s.

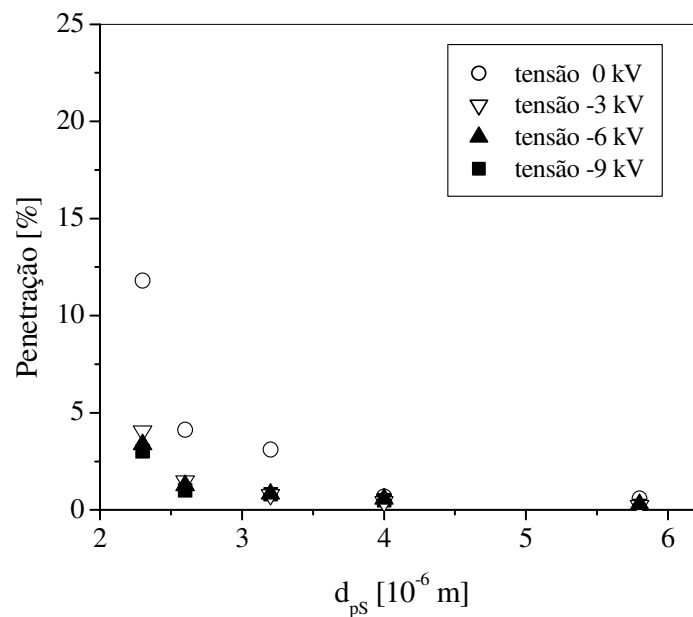


Figura 4.28 – Penetração inicial das partículas em função do diâmetro para velocidade de filtração de 12 cm/s.

É também importante ressaltar que para cada diâmetro de partícula os mecanismos de coleta, mecânicos e eletroforético, atuam de maneira diferente. Enquanto o mecanismo difusional atua de maneira mais pronunciada em partículas menores que 1 μm , os mecanismos de interceptação direta, inercial e gravitacional são relevantes somente para partículas maiores de 3 μm .

O mecanismo eletroforético atua de maneira uniforme para uma faixa de partículas de 0,1 a 5,0 μm . Ou seja, na competição entre os mecanismos mediante os diâmetros de partículas, o mecanismo eletroforético tem maior contribuição para partículas menores que 3,0 μm (ver Figura 2.2).

A presença de carga nas partículas provocou redução na penetração principalmente para partículas menores que 3 μm e para menores velocidades de filtração, neste caso $U=5$ cm/s. Quanto menor a velocidade de filtração maior foi o tempo de atuação das forças elétricas na coleta das partículas. Este mesmo comportamento foi observado por Brown (1989), estudando os efeitos da carga eletrostática na filtração de partículas de NaCl em materiais fibrosos.

Analisando as Figuras 4.26 a 4.28 se nota que para mesma tensão aplicada no carregador tipo corona, ou seja, mesmo nível de carga nas partículas, houve diminuição na penetração com aumento da velocidade de filtração. O aumento da velocidade de filtração, favoreceu a atuação dos mecanismos mecânicos: inercial, gravitacional, e interceptação direta.

As Figuras 4.29 a 4.32 mostram resultados típicos de penetração das partículas através do feltro de polipropileno, em função do diâmetro, para diferentes velocidades de filtração. Os valores de tensão no carregador tipo corona foram de 0, -3, -6, e -9 kV.

Pelas Figuras 4.29 a 4.32 observa-se que quanto maior o grau de carregamento das partículas menores os efeitos da velocidade de filtração. Para o caso de tensão no carregador de -6 kV, Figura 4.31, observa-se que o efeito do mecanismo eletroforético foi tão forte que, a penetração não foi afetada pelo aumento da velocidade de filtração.

Em todas as condições estudadas, a introdução de cargas eletrostáticas nas partículas diminuiu a penetração inicial, principalmente para os menores valores de diâmetro e baixa velocidade de filtração.

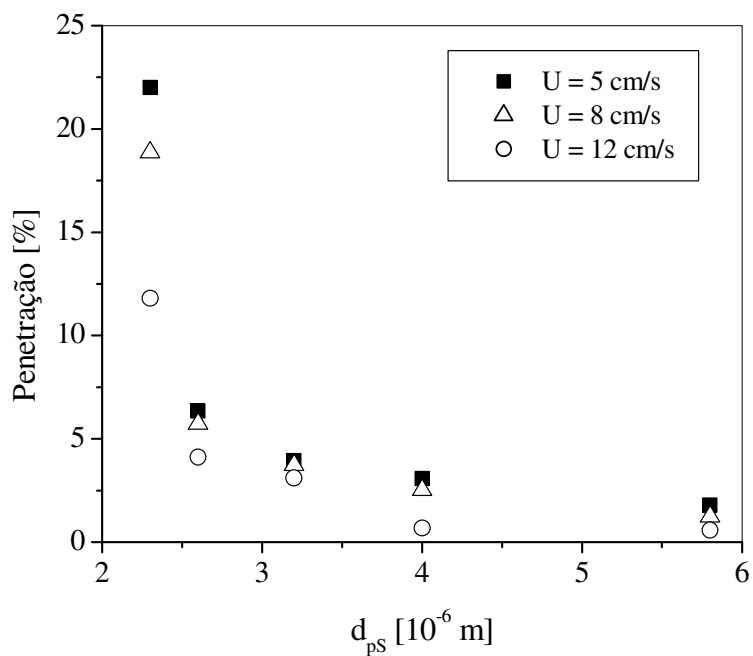


Figura 4.29 – Penetração inicial das partículas em função do diâmetro para tensão no carregador tipo corona de 0 kV.

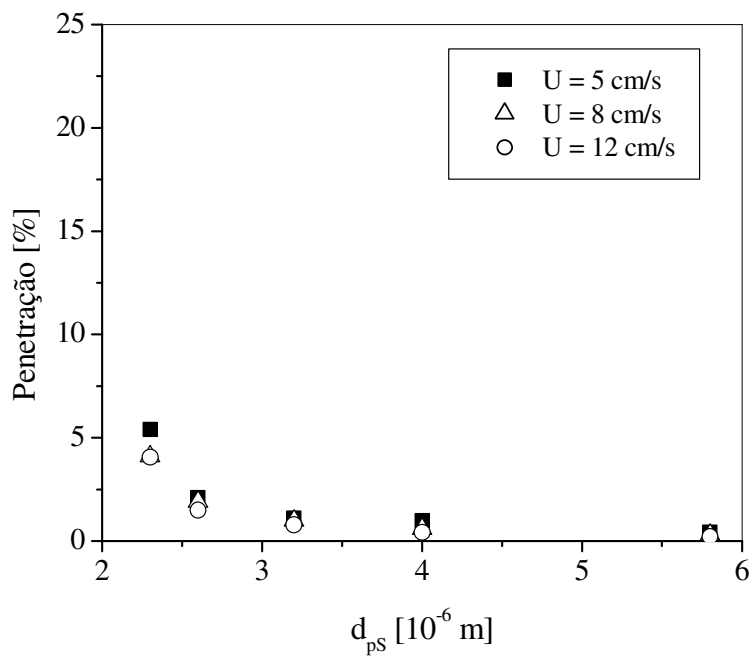


Figura 4.30 – Penetração inicial das partículas em função do diâmetro para tensão no carregador tipo corona de -3 kV.

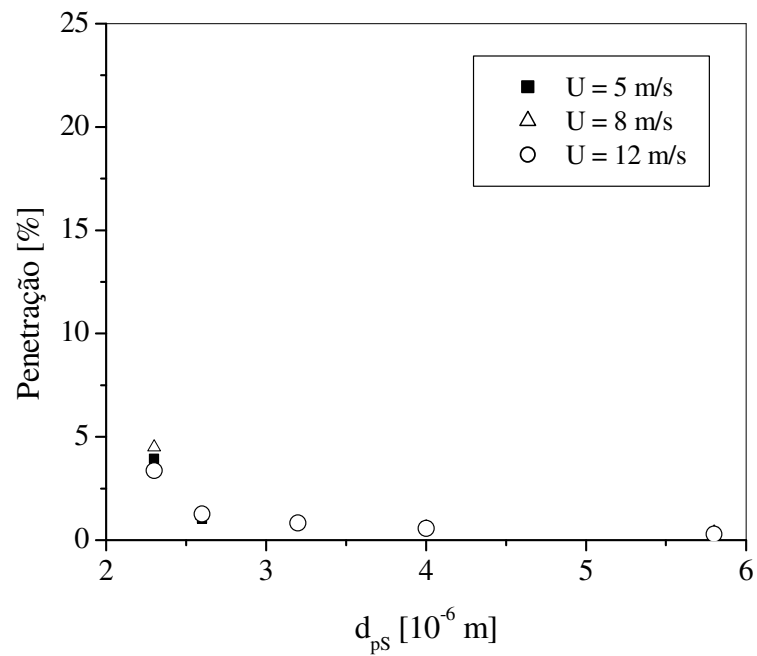


Figura 4.31 – Penetração inicial das partículas em função do diâmetro para tensão no carregador tipo corona de -6 kV.

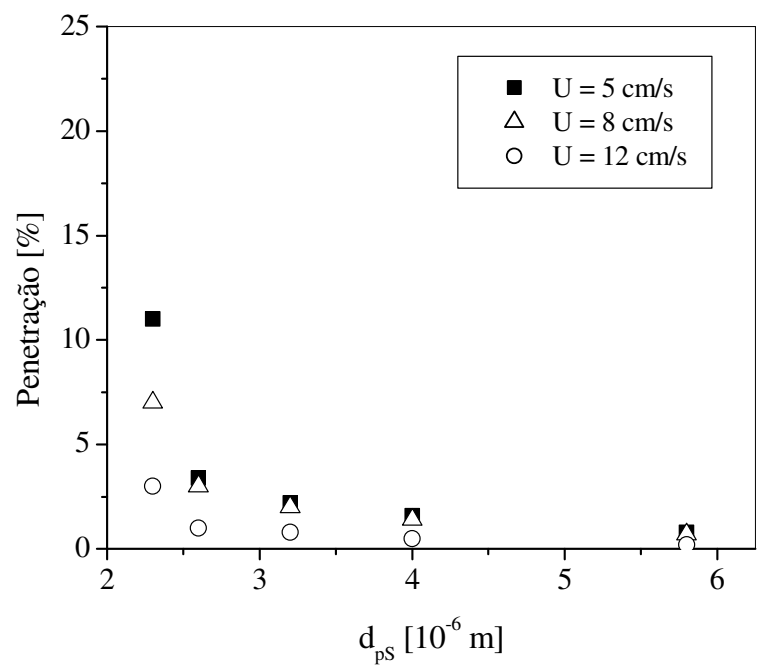


Figura 4.32 – Penetração inicial das partículas em função do diâmetro para tensão no carregador tipo corona de -9 kV.

A redução na penetração, devido aumento do nível de carga das partículas, comprovou 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 Brown (1989), Walsh e Stenhouse (1997), Romay et al. (1998) e com leitos granulares Tardos et al. (1978), Coury (1983) e Duarte F^o (1995).

4.6.3. Cálculo da penetração teórica considerando atuação do mecanismo eletroforético de dipolo-imagem para tensão corona 0 kV.

Os resultados mostrados no item 4.6.1 mostraram a subestimação da penetração teórica em relação à penetração experimental devido à ausência do mecanismo eletroforético. Mesmo para o menor nível de carregamento estudado, 0 kV. Desta forma, as Figuras 4.33 a 4.35 mostram a comparação entre os valores de penetração obtidos experimentalmente e as curvas de penetração teóricas descrevendo a atuação dos mecanismos: puramente mecânicos, e mecânicos mais o eletroforético de dipolo-imagem. As cargas das partículas foram originadas durante a dispersão, ou seja, nenhuma tensão foi aplicada ao carregador.

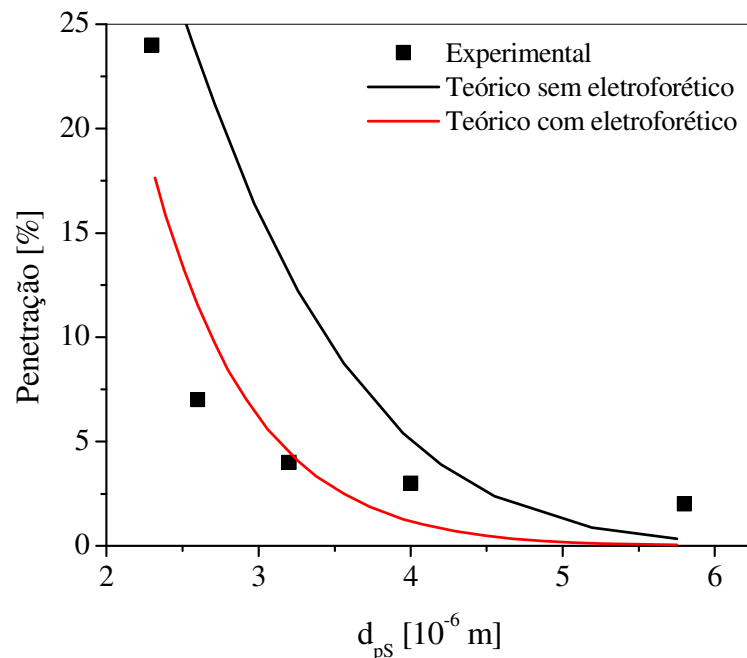


Figura 4.33 – Penetração em função do diâmetro de partícula para velocidade de filtração de 5 cm/s.

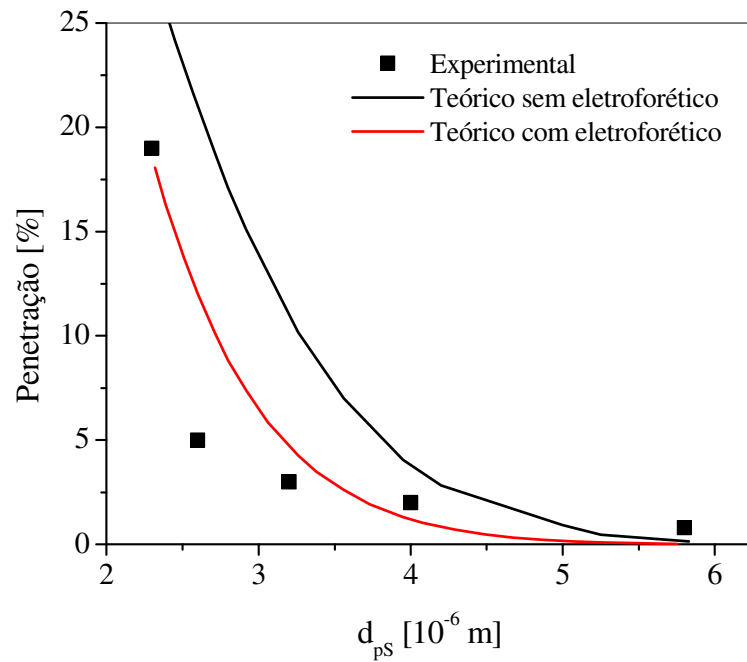


Figura 4.34 – Penetração em função do diâmetro de partícula para velocidade de filtração de 8 cm/s.

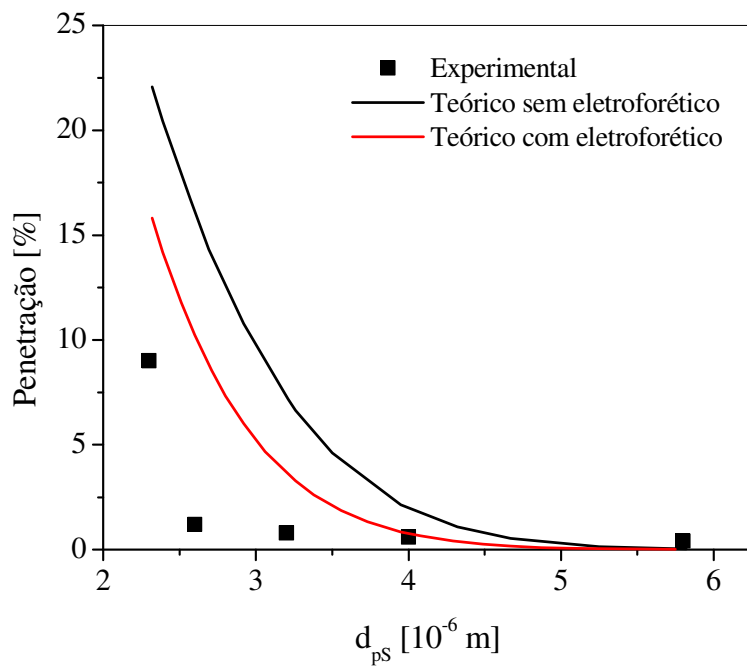


Figura 4.35 – Penetração em função do diâmetro de partícula para velocidade de filtração de 12 cm/s.

No cálculo da penetração teórica foram utilizadas as mesmas Equações e mesmo procedimento apresentado no item 4.6.1. Foi adicionado o mecanismo eletroforético ao cálculo da penetração segundo a equação: $\eta_E = 2,3 * K_M^{0,5}$, proposta por Yoshida e Tien (1985).

Nas Figuras 4.33 a 4.35 pode-se perceber através das curvas teóricas que a adição do mecanismo eletroforético provocou redução na penetração, se ajustando melhor aos dados experimentais. Esta redução foi mais intensa para menores velocidades de filtração e menores diâmetros de partícula. Estes resultados comprovam que o mecanismo eletroforético tem maior atuação para as condições anteriormente citadas. O modelo teórico apresentou bom ajuste aos dados experimentais de penetração para velocidade de filtração de 5 e 8 cm/s. Enquanto que para velocidade de filtração de 8 cm/s houve pequena subestimação aos valores experimentais para partículas com $d_{ps} < 3\mu\text{m}$.

A adição do mecanismo eletroforético à equação para o cálculo da penetração teórica forneceu bom ajuste somente para o caso de partículas com carga proveniente apenas do processo de geração do aerossol, 0 kV. Não foi possível ajustar a equação proposta por Yoshida e Tien (1985) aos dados experimentais de penetração para os casos de partículas eletrizadas pelo carregador com tensões de -3, -6 e -9 kV. A equação utilizada não apresentou sensibilidade mediante o aumento do nível de carga das partículas com aplicação de tensão no carregador. Desta forma, surgiu necessidade de ajustar uma equação que fosse representativa para o aumento do nível de cargas nas partículas geradas pelo carregador tipo corona.

4.6.4. Ajuste da equação para predição da penetração teórica.

Conforme apresentado anteriormente, não foi encontrada na literatura correlação para o cálculo de η_E , que considerasse os efeitos da variação do nível de carregamento das partículas. Desta forma, foi feito ajuste dos dados experimentais de penetração considerando-se a variação do nível de carga das partículas com o aumento da tensão no carregador tipo corona. As tensões aplicadas no carregador durante os testes de filtração foram: 0 kV (cargas originadas durante a dispersão), -3 e -6 kV. Para o ajuste da equação não foi considerada a

tensão de -9 kV, devido esta tensão estar no limite da inversão do nível de carga das partículas com o aumento da tensão corona.

No cálculo de penetração teórica foram utilizadas as correlações desenvolvidas para os mecanismos mecânicos mencionados no Capítulo 2: Equação 2.21, para o mecanismo difusional, Equação 2.29 para o mecanismo inercial e interceptação direta e Equação 2.30 para o mecanismo gravitacional. Para o cálculo do mecanismo eletroforético foi ajustada a Equação 2.40, na qual foi estimado o parâmetro Φ que depende do nível de carregamento e do material particulado utilizado. Todos estes mecanismos atuaram simultaneamente conforme a Equação 2.41.

O mecanismo eletroforético foi ajustado em função da tensão aplicada no carregador e do parâmetro adimensional do mecanismo de dipolo imagem para fibra neutra e partícula carregada. Desta forma, a equação ajustada foi:

$$\eta_E = 2,562 * (0,848)^{|T_c|} * K_M^{0,5} \quad (4.9)$$

onde, T_c é a tensão aplicada ao carregador em kV.

De acordo com a equação 4.9 pode-se perceber aumento da eficiência individual de coleta do mecanismo eletroforético de dipolo-imagem com o aumento da tensão aplicada ao carregador corona.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados experimentais de penetração e os valores calculados pela equação proposta, enquanto a Figura 4.36 apresenta os dados de penetração experimental versus penetração calculada pela equação proposta.

Através da Figura 4.36 pode-se perceber que os valores experimentais foram bem ajustados pelo modelo proposto. Os valores de penetração teóricos apresentaram desvios inferiores a 4 pontos percentuais em relação às penetrações experimentais. O ajuste da reta apresentado na Figura 3.36 apresentou coeficiente de correlação linear de 0,8114.

As Figuras 4.37 a 4.39 mostram comparação entre os valores de penetração experimentais e os valores de penetração teóricos obtidos pela equação proposta. As Figuras representam testes de filtração para velocidade de filtração de 8 cm/s e tensões de carregamento corona de 0, -3 e -6 kV, respectivamente.

Tabela 4.6 – Valores experimentais e teóricos, ajustados pelo modelo proposto, de penetração.

Penetração experimental [%]									
d_{ps} ($10^{-6}m$)	Tensão corona: 0 kV			Tensão corona: -3 kV			Tensão corona: -6 kV		
	U = 5	U = 8	U = 12	U = 5	U = 8	U = 12	U = 5	U = 8	U = 12
2,31	22,02	18,87	11,8	5,51	4,11	4,02	3,93	4,71	3,36
2,69	6,35	5,73	4,12	2,13	1,92	1,47	1,05	1,20	1,26
3,26	3,94	3,73	3,11	1,82	0,99	0,79	0,76	0,82	0,82
3,98	3,08	2,52	0,68	0,98	0,60	0,42	0,66	0,62	0,57
5,95	1,78	1,23	0,58	0,45	0,31	0,22	0,39	0,37	0,29
Penetração teórica [%]									
d_{ps} ($10^{-6}m$)	Tensão corona: 0 kV			Tensão corona: -3 kV			Tensão corona: -6 kV		
	U = 5	U = 8	U = 12	U = 5	U = 8	U = 12	U = 5	U = 8	U = 12
2,31	16,62	17,25	15,23	2,04	3,32	3,57	5,66	7,37	7,57
2,69	8,92	9,50	8,08	1,18	1,94	1,89	3,51	4,55	4,40
3,26	3,59	3,87	3,02	0,51	0,84	0,69	1,67	2,12	1,83
3,98	1,09	1,15	0,76	0,16	0,26	0,17	0,60	0,72	0,51
5,95	0,03	0,03	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01

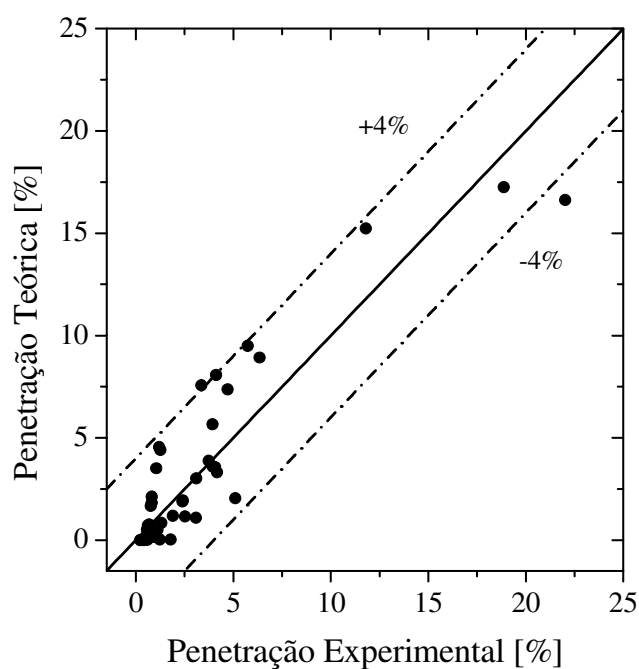


Figura 4.36 – Valores de penetração teóricos versus penetração experimental.

Nas Figuras 3.37 a 3.39 pode-se perceber através das curvas teóricas que a adição do mecanismo eletroforético de dipolo imagem provocou redução na penetração teórica em relação às curvas contendo somente mecanismos mecânicos (ver Figuras 4.23 a 4.25).

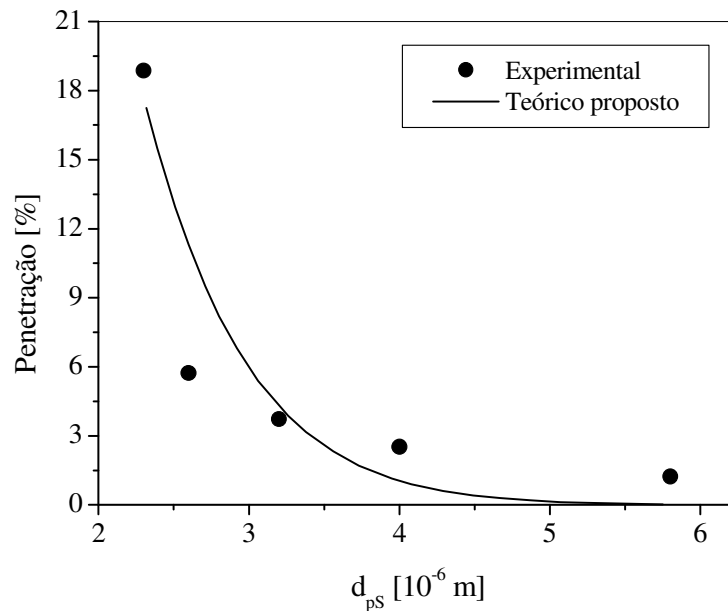


Figura 4.37 – Penetração em função do diâmetro para velocidade de filtração de 8 cm/s e tensão corona de 0 kV.

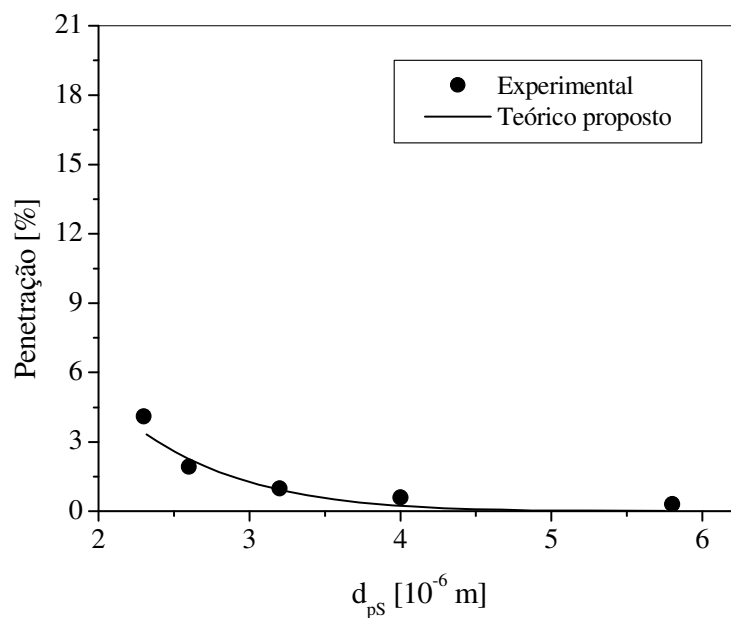


Figura 4.38 – Penetração em função do diâmetro para velocidade de filtração de 8 cm/s e tensão corona de -3 kV.

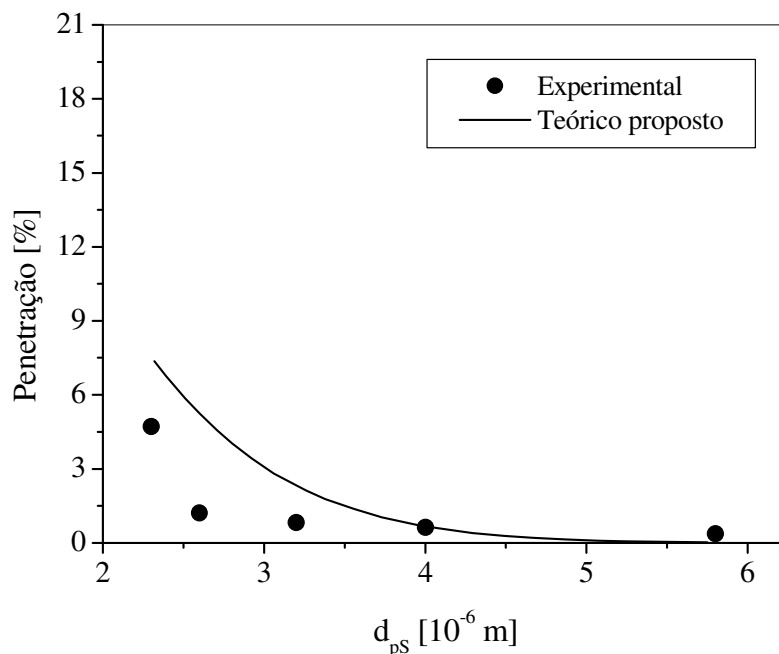


Figura 4.39 – Penetração em função do diâmetro para velocidade de filtração de 8 cm/s e tensão corona de -6 kV.

Os valores de penetração experimental foram subestimados pelo ajuste contendo somente mecanismos mecânicos, mesmo para o caso em que as partículas não possuíam carregamento adicional, ou seja, tensão de 0 kV.

4.6.5. Queda de pressão na filtração

As Figuras 4.40 a 4.42 apresentam o comportamento da variação da queda de pressão no filtro em função da massa total de partículas retida no mesmo, para partículas eletrizadas por tensões no carregador tipo corona de 0, -3, -6 e -9 kV. Pode ser observado que, em todos os casos, houve aumento da variação da queda de pressão com o aumento da massa total de partículas retida no filtro e com o aumento da velocidade de filtração.

Também é possível notar que para os testes em que não houve carregamento adicional das partículas, corona 0 kV, houve maior quantidade de massa retida no filtro. Isto pode ser explicado pelo fato de que maior quantidade de partículas ficaram retidas no eletrodo de

descarga e na carcaça do carregador quando sob ação de alta tensão, -3, -6 e -9 kV. Esta diferença de massa retida no filtro foi minimizada com o aumento da velocidade de filtração.

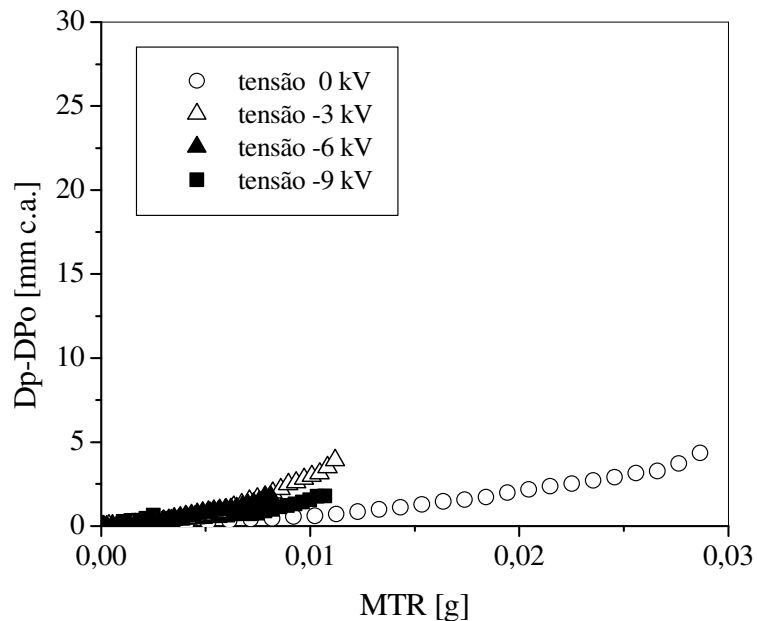


Figura 4.40 - Variação da queda de pressão em função da massa total retida no filtro para velocidade de filtração de 5 cm/s.

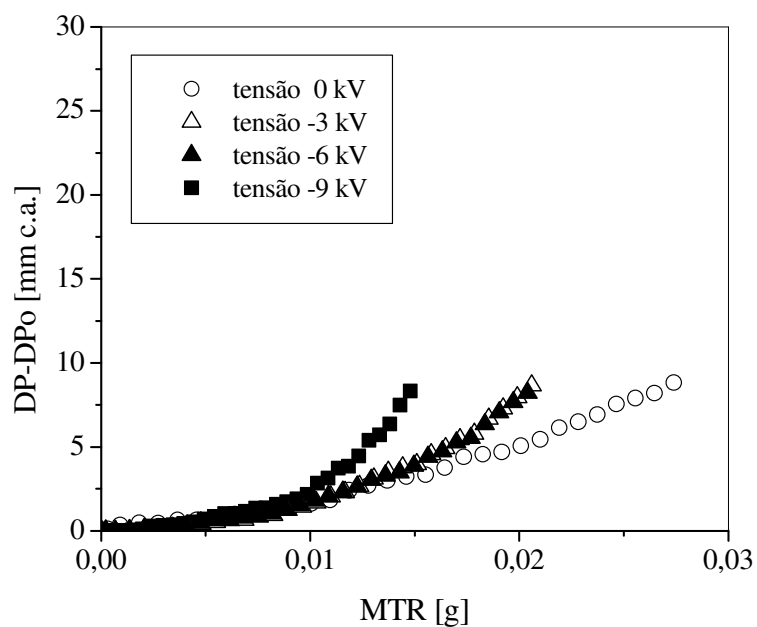


Figura 4.41 - Variação da queda de pressão em função da massa total retida no filtro para velocidade de filtração de 8 cm/s.

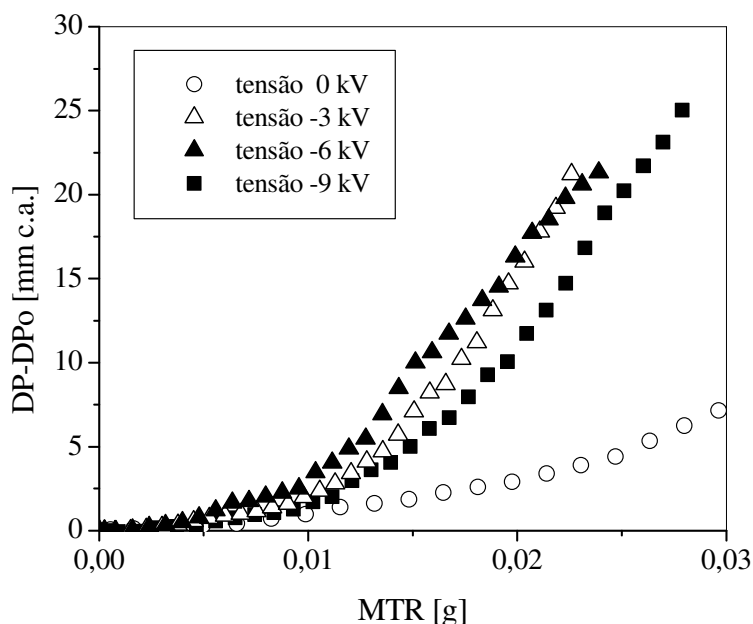


Figura 4.42 - Variação da queda de pressão em função da massa total retida no filtro para velocidade de filtração de 12 cm/s.

Nota-se também, que os incrementos da variação da queda de pressão apresentaram sensibilidade à variação do nível de carga nas partículas. Em todos os casos houve menor variação na queda de pressão quando as partículas não foram eletrizadas. Ou seja, as estruturas formadas entre as partículas eletrizadas coletadas e as fibras do tecido formaram estruturas que apresentaram resistência ao escoamento do gás. Comportamento contrário foi observado por Walsh e Stenhouse (1997) e Romay et al (1998) em estudos de filtros fibrosos. Este comportamento também foi contrário aos resultados obtidos por Duarte F^o (1995), no entanto, a quantidade de pó retido no filtro no presente trabalho foi dez vezes menor.

Diante destes resultados, é importante considerar que durante os testes não houve formação de torta de filtração. Considerando que as partículas formaram uma camada indefinida, a porosidade pode ser determinada pela razão entre o volume de vazios e o volume total do depósito, $\varepsilon = (V_T - V_S)/V_T$. Sabe-se que a densidade de um sólido é fornecida pela relação entre a massa e o volume do mesmo. O volume ocupado pelas partículas retidas no filtro é obtido pelo produto entre a área de filtração e a espessura do depósito formado. Deste modo: $V = A_f \cdot h_S$. Combinando-se estas relações, obtém-se:

$$h_s = \frac{m_s}{\rho_s \cdot A \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (4.10)$$

onde ε é a porosidade, m_s e ρ_s a massa e a densidade dos sólidos, A a área de filtração e h_s espessura dos sólidos depositados sobre o filtro.

Considerando a porosidade do depósito como sendo aquela típica de um leito granular ($\varepsilon = 0,45$), área de filtração igual a $86,35 \text{ cm}^2$, densidade do concentrado fosfático $2,94 \text{ g/cm}^3$ e a massa total retida de $0,03 \text{ g}$, obtém-se uma espessura de pó formada de aproximadamente $2,2 \text{ }\mu\text{m}$.

Para a filtração de concentrado fosfático, cujo diâmetro médio de Stokes de $2,5 \text{ }\mu\text{m}$, essa espessura representa uma monocamada. Pode-se afirmar, portanto, que não houve formação de torta de filtração. Deste modo, o processo de filtração foi estacionário, no qual ocorreu pequena variação da queda de pressão. Os ensaios de filtração foram encerrados no momento em que se iniciava a formação da torta de filtração.

A penetração em partículas não eletrizadas foi maior do que para partículas carregadas. Isto pode ser explicado pelo fato de que as partículas com maior nível de carga, corona -3, -6 e -9 kV, retidas no filtro, deviam possuir diâmetro médio inferior às partículas com menor nível de carga, corona 0 kV, retidas no filtro. Deste modo, houve formação de estrutura, composta de pó e fibras do tecido filtrante, com maior porosidade para o último caso mencionado. Isto fez com que a variação na queda de pressão fosse menor para partículas com menor valor de carga.

CAPÍTULO 5

5.1. Conclusões

Com os resultados deste estudo pode-se concluir que:

A natureza do pó comprovou ser fator influente no nível e polaridade da carga das partículas do aerossol. A carga medida apresentou sinais distintos para os diferentes aerossóis gerados, sendo negativa para o concentrado fosfático, e positiva para diatomito, pirocloro e pó de madeira.

Foi observada relação de dependência linear entre a carga adquirida pela partícula e diâmetro para todos os materiais estudados. Os coeficientes de correlação linear (R^2) obtidos para as todas as equações ajustadas apresentaram valores próximos à unidade, indicando que a variabilidade dos dados foi bem representada pelos modelos das equações propostas.

A quantidade de carga encontrada em todos os casos foi bastante similar quando comparada a trabalhos de outros autores, indicando a consistência dos equipamentos e da metodologia empregados. Os métodos de dispersão do aerossol empregados envolveram, principalmente, o contato entre o sólido e o dispersor (triboeletrificação), produzindo aerossóis com características eletrostáticas similares.

Nos testes realizados com o classificador automatizado, pode-se perceber que os resultados para a carga da partícula em função do diâmetro foram semelhantes aos resultados obtidos com o CCE antes da automatização. O processo de automação simplificou muito o procedimento experimental e melhorou o coeficiente de correlação linear das equações que relacionaram a carga versus o diâmetro da partícula. A automação permitiu o monitoramento dos fluxos no interior do CCE, garantindo estabilidade no perfil de escoamento do classificador.

Em todos os testes de determinação do nível de carga das partículas foi observado comportamento linear entre o nível de carga adquirida pela partícula e o diâmetro. Os níveis de tensão aplicados ao carregador foram: 0, -3, -6, e -9 kV. Para o nível de tensão de 0 kV, as cargas das partículas foram provenientes apenas do processo de dispersão do aerossol.

O maior nível de carga adquirida pelas partículas foi para tensão de -9 kV. Para os níveis de tensão no carregador corona de -3, -6 e -9 kV, observou-se aumento gradativo do nível de carregamento das partículas com o aumento da tensão aplicada. Para tensões aplicadas no carregador superiores a -9 kV houve decréscimo no nível de carga das partículas. Para os testes com tensões corona de -12 e -15 kV o classificador comportou-se como um precipitador eletrostático de duplo estágio.

O nível de cargas adquiridas pelas partículas de rocha fosfática eletrizadas pelo corona foi 2,5 vezes maior em relação ao nível de cargas das partículas não eletrizadas e 80% superior ao maior nível de carregamento por impacto obtido por Almeida (2000), comprovando o funcionamento do carregador utilizado.

O valor experimental médio da porosidade do feltro de polipropileno foi de $0,813 \pm 0,07$.

Nos testes de filtração sem carregamento adicional das partículas, carga proveniente do método de geração, o comportamento dos resultados experimentais acompanhou a tendência da curva teórica, a penetração diminuiu de forma acentuada com o aumento do diâmetro das partículas até aproximadamente $3,5 \mu\text{m}$. As equações empíricas para o cálculo da penetração envolvendo somente os mecanismos mecânicos de coleta subestimaram os valores experimentais para partículas com $d_{ps} < 4 \mu\text{m}$.

Nos testes de filtração, para todas as condições estudadas, a introdução de cargas eletrostáticas nas partículas diminuiu a penetração inicial, principalmente para menores valores de diâmetro de partícula, $d_{ps} < 3,5 \mu\text{m}$, e baixos valores de velocidade de filtração.

Este fato comprovou a relevância do mecanismo eletroforético de dipolo-imagem presente na filtração inicial.

O aumento da velocidade de filtração favoreceu a atuação dos mecanismos mecânicos: inercial, gravitacional, e interceptação direta.

Em todos os casos de filtração estudados houve menor variação na queda de pressão quando as partículas não foram eletrizadas. Durante os testes não houve formação de torta de filtração. A massa depositada nos filtros durante os testes indicaram espessura de pó formada de aproximadamente 2,2 μm , formando uma monocamada.

A adição do mecanismo eletroforético proposto por Yoshida e Tien (1985) no cálculo da penetração teórica apresentou bom ajuste aos dados experimentais para velocidades de filtração de 5 e 8 cm/s. Porém, a equação proposta pelos autores não apresentou sensibilidade com aumento do nível de carga das partículas devido aplicação de tensão no carregador.

Foi proposta uma equação de ajuste da penetração considerando-se a variação do nível de carga das partículas com o aumento da tensão no carregador tipo corona. O mecanismo eletroforético foi ajustado em função da tensão aplicada no carregador e o parâmetro adimensional do mecanismo de dipolo imagem para fibra neutra e partícula carregada. Desta forma a equação ajustada foi:

$$\eta_E = 2,562 * (0,848)^{|T_c|} * K_M^{0,5} \quad (4.9)$$

onde, T_c é a tensão aplicada ao carregador em kV.

Os valores experimentais foram bem ajustados pelo modelo proposto. Os valores de penetração teóricos apresentaram desvios inferiores a 4% em relação às penetrações experimentais.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Após o aprimoramento dos equipamentos de medida de carga eletrostática, desenvolvimento do carregador tipo corona e da unidade de filtração, alguns itens são sugeridos para continuidade e melhoria dos resultados obtidos no presente trabalho:

- monitoramento do desvio da partícula na região de deflexão do CCE por fotografia,
- estudar a influência da umidade do ar na variação do nível de carga adquirido pelas das partículas;
- verificar a influência da umidade no carregamento elétrico das partículas;
- instalação de um eletrodo de descarga no carregador tipo corona;
- testes de filtração com adição de cargas eletrostáticas nas partículas envolvendo formação de torta de filtração;
- utilização de outros materiais pulverulentos e de outros feltros de tecido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M. L. Filtração de Gases em Filtros de Tecido: Deposição e Remoção da Camada de Pó Formada, São Carlos, UFSCar, 1995, 123p (Tese de Doutorado)

ALMEIDA R. G. Determinação da Distribuição de Cargas Eletrostáticas em Aerossóis. São Carlos, UFSCar, 2000. 155p. (Dissertação de Mestrado).

BAUMGARTNER, H.; LOFFLER, F. Particle collection in electric fibres filters a basic theoretical na experimental study. Filtration & Separation, p. 346-351. Sept/Oct. 1987.

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

BROWN, R.C. Aerosol filtration: An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters. Pergamon Press Oxford, p. 120-177, 1993.

BROWN, R. C. Tutorial Review: Simultaneous Measurement of Particle Size and Particle Charge. Journal Aerosol Science, v. 28, n. 81, p. 1373-1391, 1997.

BROWN, B. R. Effect of electric charge in filter materials. Filtration & Separation, p. 46-51. Jan/Feb, 1989.

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

CLIFT, R. Fundamental processes in gas filtration. In: The International Symposium on Filtration and Separation, Sidney, Australian, 1983. Proceedings. Mech. Engrs. Trans. I.E., Sidney, Australian, 1983, p. 181-192.

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

COURY, J. R. Electrostatic Effects in Granular Bed Filtration of Gases. University of Cambridge, 1983. 234p. (Ph.D. Thesis).

COURY, J. R. Filtração de gases em filtros granulares. In: J.T. Freire; J.C. Gubulin (eds.). Tópicos especiais em sistemas particulados. São Carlos, SP., UFSCar, 1986, v. 2, Cap. II, p. 65-121.

COURY, J.R.; DUARTE FILHO, O.B. Filtration of solid aerosols in a granular bed. In: The 21st Meeting of the Fine Particle Society, San Diego, E.U.A., 1990. Abstracts. San Diego, E.U.A., 1990.

COURY, J.R.; DUARTE FILHO, O.B.; CLIFT, R. Filtração não estacionária de cinza de combustão de carvão em leito fixo granular. In: VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo, S.P., 1988. Anais. São Paulo, ABEQ. 1988.

COURY, J. R.; GUANG, D.; RAPER, J. A.; CLIFT, R. Measurement of Electrostatic Charge on Gas-Borne Particles and the Effect of Charges on Fabric Filtration. TransIChemE, v. 69, part B, p. 97 - 106, May, 1991.

CROSS, J. A. Electrostatics: Principles, Problems and Applications. Adam Hilger, Bristol. 1987. 500 p.

DONOVAN, R.P. Fabric filtration for combustion sources. New York, Marcel Dekker Inc., 1985.

DUARTE FILHO, O. B. Filtração de Gases em Leito Fixo Granular: Efeitos da Variação do Nível de Carga Eletrostática nas Partículas. São Paulo, Escola Politécnica da USP, 1995. 144 p. (Tese de Doutorado).

DUARTE FILHO, O.B.; MARRA JR., W.D.; KACHAN, G.C.; COURY, J.R. Filtration of Electrified Solid Particles. Ind. Eng. Chem. Research, v. 39, n. 10, p. 3884-3895, 2000.

DUARTE FILHO, O.B.; KACHAN, G.C.; COURY, J.R. Filtração de aerossóis carregados eletrostaticamente: quantificação da carga. In: 9º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Salvador, BA., 1992. Anais. Salvador, BA, ABEQ, v. 1, 1992.

DUARTE FILHO, O.B.; KACHAN, G.C.; COURY, J.R. Verificação do efeito de cargas eletrostáticas na filtração do ar em um filtro granular II. In: 10º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo, 1994. Anais. São Paulo, ABEQ, v. 1, p. 235-240, 1994.

DUARTE FILHO, O.B.; KACHAN, G.C.; COURY, J.R. Granular Bed Filtration of Solid Particles Electrified by Impact. In: PARTEC'95 - International Congress for Particle Technology, 3rd European Symposium on Separation of Particles from Gases, Nuremberg, Alemanha, 1995. Proceedings. PARTEC, Nuremberg, Alemanha, 1995.

DULLIEN, F.A.L. Introduction to Industrial Gas Cleaning, UK, Academic Press, 1989, 285p.

EMETS, E. P.; KASCHEEV, V. A.; POLUEKTOV, P. P. Simultaneous Measurements of Aerosol Particle Charge and Size Distributions. Journal Aerosol Science, v. 22, n. 3, p. 389-394, 1991.

FLAGAN, R.C. History of Electrical Aerosol Measurements. Aerosol Science and Technology, v. 28, p. 301-380, 1998.

FORSYTH B.; LIU, B. Y. H.; ROMAY, F. J. Particle Charge Distribution Measurement for Commonly Generated Laboratory Aerosols. Aerosol Science and Technology, v. 28, p. 489-501, 1998.

GUANG, D. In-Situ Measurement of Electrostatic Charge and Distribution on Flyash Particles in Power Station Exhaust Stream. University of New South Wales, 1991. 315p. (Ph.D. Thesis).

Hinds, W.C. Aerosol Technology. John Wiley & Sons , New York. 1982.

JODEIT, H.; LOFFLER, F. The influence of electrostatic forces upon particle collection in fibrous filters. In: The Eleventh Annual Conference of the Association for Aerosol Research. Proceeding, 1987 p. 311-320.

JOHNSTON, A. M; VINCENT, J. H.; JONES A. D; McLACHLAN, C. Q. Measurements of Electric Charge on Airborne Dusts in Textile Industry Workplaces. Textile Research Journal, p. 469-477, August, 1985.

JOHNSTON, A. M.; VINCENT, J. H.; JONES, A. D. Electrical Charge Characteristics of Dry Aerosols Produced by a Number of Laboratory Mechanical Dispensers. Aerosol Science and Technology, v. 6, p. 115-127, 1987.

KHARE, M.; SINHA, M. Computer-aided simulation of efficiency of an electrostatic precipitator. Environmental International, v. 22, n. 4, p. 451-462, 1996.

KRAEMER,H.F.; JONHSTONE,H.F. Collection of aerosol particles in presence of electrostatic fields. Ind. Eng. Chem., v. 47, n. 12, p. 2426-2434, 1955.

LANGER, G.; RADNIK, J. L. Development and Preliminary Testing of a Device for Electrostatic Classification of Submicron Airborne Particles. Journal of Applied Physics, v. 32, n. 5, p. 955-957, 1961.

LICHT, W. Air Pollution Control Engineering, Marcel Dekker, Inc., 2^a edição, 1988. 477p.

LUNDGREN, D.A.; WHITBY, K.T. Effect of particle electrostatic charge on filtration by fibrous filter. Ind. Eng. Chem. Process Design Development, v. 4, n. 4, p. 345-349, Oct. 1965.

MARRA JR., W. D. Desenvolvimento de um Equipamento para a Determinação da Distribuição de Cargas Eletrostáticas em Aerossóis. São Carlos, UFSCar, 2000. 205 p. (Tese de Doutorado).

MARRA JR., W. D.; COURY, J. R. Measurement of the Electrostatic Charge in Airborne Particles: I- Development of the Equipment and Preliminary Results. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 17, n. 1, p. 39-50, 2000.

MATTESON, M.J. Filtration: Principles and Practices, New York, Marcel Dekker Inc. 1987. 736p.

MEGAW, W. J.; WELLS, A. C. A High resolution Charge and Mobility Spectrometer for Radioactive Submicrometre Aerosol. Journal of Scientific Instruments (Journal of Physics E), Series 2, v. 2, p. 1013-1016, 1969.

MIZUNO, A. Electrostatic precipitation. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 7, n. 5, p. 615-624, 2000.

OGAWA, A. Separation of Particles from Air and Gases. v.II, CRC Press, Boca Raton, FL 1984. 342p.

OGLESBY, S.; NICHOLS, G. B. Electrostatic Precipitation, Pollution Engineering and Technology, v. 8, Marcel Dekker, New York, NY, 1978.

PNUELI, D.; GUTFINGER, C.; MOLDAVISKY, L.; SHUSTER, K.; FICHMAN, M. Electrostatic porous filter with a blocking electrode. Journal Aerosol Science, v. 31, n. 11, p. 1371-1379, 2000.

RIEHLE, C. Basic and theoretical operation of ESPs. In: PARKER, K.R., Applied Electrostatic Precipitation, Cap. 3, p.25-88, Blackie & Professional, New York, 1997, 521p.

ROMAY, F.J.; LIU, B.Y.H.; CHAE, S. Experimental study of electrostatic capture mechanism in commercial electret filters. Aerosol Science and Technology, v. 28, p.224-234, 1998.

SAXENA, S.C.; SWIFT, W.M. Dust removal from hot compressed gas streams by fibrous - and granular - bed filters: A state of the art review. Argonne National Laboratory Report, CEN/FE-77-9, 1978.

SHAPIRO M.; GUTFINGER, C.; LAUFER, G. Electrostatic mechanisms of aerosol collection by granular filters: A review. Journal Aerosol Science, v. 19, n. 6, p. 651-677, 1988.

SHAPIRO M.; LAUFER; G. GUTFINGER, C. Electric forces in aerosol filtration in fibrous and granular filters-A parametric study. Atmospheric Environment, v. 17, n. 3, p. 447-484. 1983.

STENHOUSE, J.I.T. Filtration of air by fibrous filters. Filtration & Separation, May/Jun, p. 269-274, 1975.

STRAUSS, W. Industrial Gas Cleaning, 2^a ed. Pergamon Press, New York, 1975.

TARDOS, G.I; PFEFFER, R; ZHAO, Z.M. The influence of dust loading on the performance of electrostatically enhanced fibrous filters. In: 21st Meeting of the Fine Particle Society, San Diego, E.U.A., 1990. Abstracts, San Diego, 1990.

TARDOS, G. I.; ABUAF, N.; GUTFINGER, C. Dust deposition in granular bed filters: theories and experiments. Journal Air Pollution Control Assoc. v. 28, p. 354, 1978.

TARDOS, G.I; PFEFFER, R. The influence of electrostatic charges on the filtration efficiencies of airborne dust in a fluidized bed. In: Filtech Conference, UK, 1981. Proceeding. UK, 1981. p. 69-82.

TARDOS, G.I; PFEFFER, R; ZHAO, Z.M. The influence of dust loading on the performance of electrostatically enhanced fibrous filters. In: 21st Meeting of the Fine Particle Society, San Diego, E.U.A., 1990. Abstracts, San Diego, 1990.

TIEN, C. Granular filtration of aerosols and hydrosols. USA, Butterworths, 1989, 365p.

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

WANG, C. S., Electrostatic Forces in fibrous filters- a review Powder Technology, 118, p 166-170, Editora Elsevier, 2001

WEAST, R. C. Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press, Inc. 64th edition, Florida, 1983. 1387p.

WHITBY, K. T.; PETERSON, C. M. Electrical Neutralization and Particle Size Measurement of Dye Aerosols. I&EC Fundamentals, v. 4, n. 1, p. 66-72, 1965.

WHITE, H. J. Electrostatic precipitation of fly ash (Part II). Journal of the Air Pollution Control Association, v. 27, n. 2, p. 114-120, 1963.

YOSHIDA, H.; TIEN, C. A new correlation of the initial collection efficiency of granular aerosol filtration. AIChE Journal, v. 31, n. 10, p. 1752-1754, Oct. 1985.

APÊNDICES

Apêndice A

Caracterização dos sólidos utilizados nos testes antes da automação do CCE.

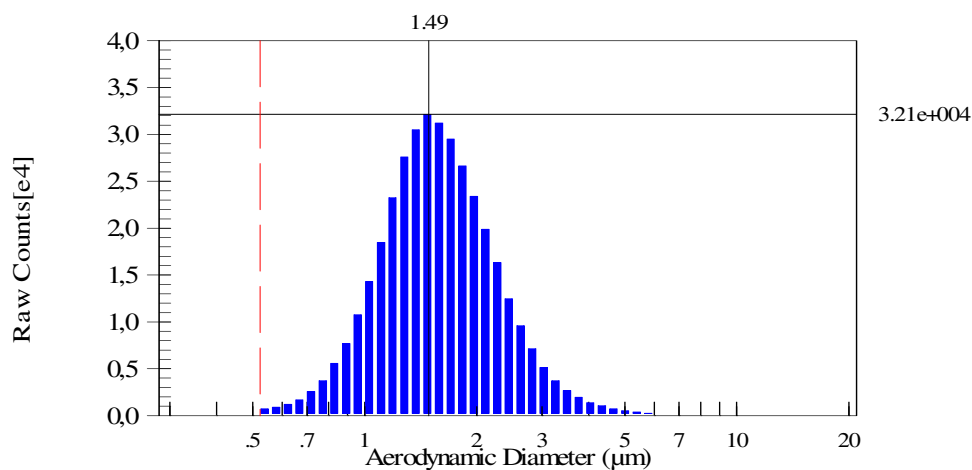


Figura A1 – Histograma do número de partículas de pirocloro em função do diâmetro aerodinâmico.

Tabela A1 – Número de partículas de pirocloro por faixa de diâmetro aerodinâmico.

dpS [mm]	Número de partículas	dpS [mm]	Número de partículas	dpS [mm]	Número de partículas
0,54	739	1,84	26700	6,26	202
0,58	900	1,98	23400	6,73	149
0,63	1200	2,13	19900	7,23	98
0,67	1680	2,29	16400	7,77	77
0,72	2570	2,46	12500	8,35	52
0,78	3740	2,64	9620	8,98	46
0,84	5580	2,84	7160	9,65	51
0,90	7720	3,05	5140	10,37	43
0,97	10800	3,28	3750	11,14	29
1,04	14300	3,52	2690	11,97	35
1,11	18500	3,79	1960	12,86	19
1,20	23300	4,07	1400	13,82	16
1,29	27600	4,37	1070	14,86	21
1,38	30500	4,70	752	15,96	16
1,49	32100	5,05	535	17,15	20
1,60	31200	5,43	386	18,43	13
1,72	29500	5,83	273	19,81	17

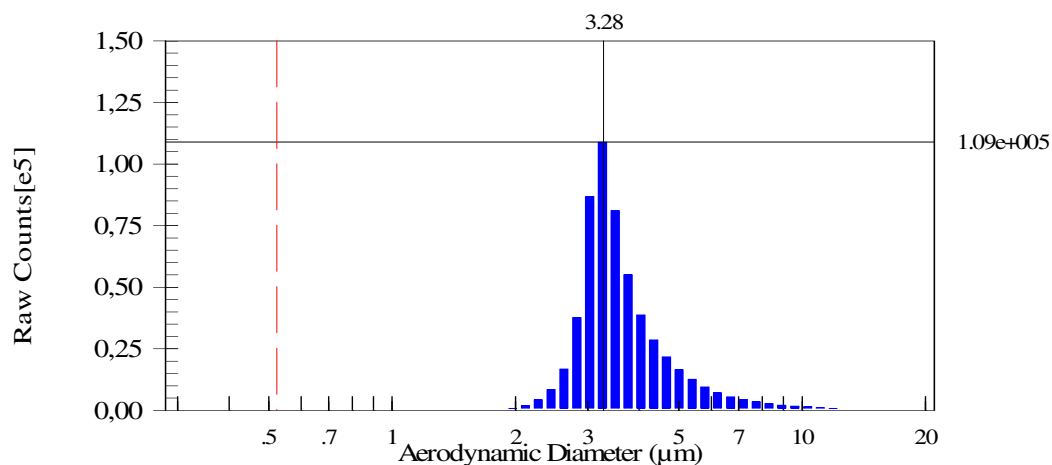


Figura A2 – Histograma do número de partículas de diatomito em função do diâmetro aerodinâmico.

Tabela A2 – Número de partículas de diatomito por faixa de diâmetro aerodinâmico.

dpS [mm]	Número de partículas	dpS [mm]	Número de partículas	dpS [mm]	Número de partículas
0,54	1	1,84	349	6,26	8920
0,58	3	1,98	1300	6,73	6740
0,63	2	2,13	2940	7,23	5480
0,67	0	2,29	5950	7,77	4420
0,72	3	2,46	11200	8,35	3400
0,78	7	2,64	22200	8,98	2740
0,84	5	2,84	48000	9,65	2150
0,90	3	3,05	111000	10,37	1810
0,97	10	3,28	144000	11,14	1450
1,04	16	3,52	107000	11,97	1110
1,11	12	3,79	71900	12,86	854
1,20	15	4,07	49800	13,82	683
1,29	24	4,37	36300	14,86	544
1,38	19	4,70	27700	15,96	428
1,49	40	5,05	20600	17,15	353
1,60	50	5,43	15500	18,43	303
1,72	136	5,83	11700	19,81	262

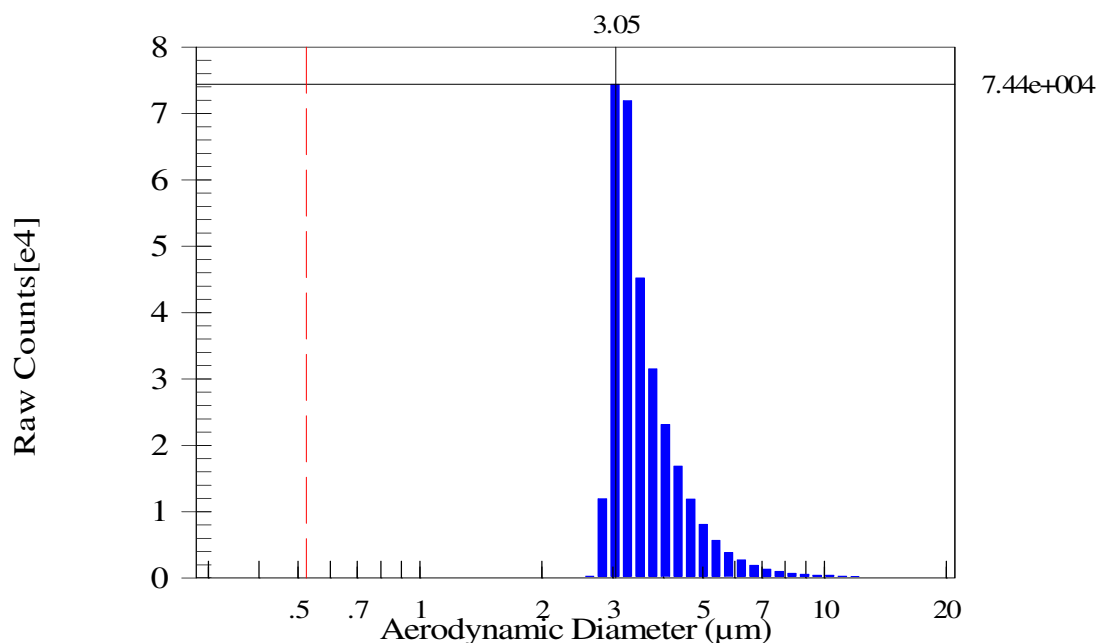


Figura A3 – Histograma do número de partículas de pó de madeira em função do diâmetro aerodinâmico.

Tabela A3 – Número de partículas de madeira por faixa de diâmetro aerodinâmico.

dpA [mm]	Número de partículas	dpA [mm]	Número de partículas	dpA [mm]	Número de partículas
0,54	0	1,84	14	6,26	2750
0,58	0	1,98	13	6,73	1930
0,63	0	2,13	32	7,23	1370
0,67	1	2,29	65	7,77	1010
0,72	0	2,46	91	8,35	733
0,78	0	2,64	318	8,98	614
0,84	2	2,84	12000	9,65	471
0,90	1	3,05	74400	10,37	419
0,97	1	3,28	72000	11,14	292
1,04	2	3,52	45200	11,97	270
1,11	2	3,79	31500	12,86	242
1,20	4	4,07	23100	13,82	219
1,29	5	4,37	16900	14,86	171
1,38	6	4,70	11900	15,96	126
1,49	10	5,05	8110	17,15	129
1,60	5	5,43	5670	18,43	93
1,72	8	5,83	3870	19,81	85

Apêndice B

Dados experimentais de medida de carga no CCE antes da automação.

Tabela B1-1 – Condições experimentais de operação / Pirocloro

Gerador: SSPD	Velocidade do ar no CCE: 0,29 m/s
Turntable: 9 rph, sentido anti-horário	Temperatura: 25,4 °C
Capsuhelic 155	Umidade relativa: 19,4 %

Tabela B1-2 – Dados de caracterização do material

		Faixa de diâmetro (µm)					Total
N _p		0,52-1,07	1,07-1,54	1,54-2,20	2,20-4,21	4,21-20,53	
		843	349.000	315.000	83.940	21.660	770.443
%		0,001	0,453	0,409	0,109	0,028	1,00
Diâmetro aerodinâmico médio (µm)							
d _{pA}		1,78	3,15	3,92	5,90	10,99	
Densidade do pirocloro 4,11 g/cm ³							
Diâmetro de Stokes médio (µm)							
d _{pS}		0,88	1,55	1,93	2,91	5,42	

Tabela B1-3 - número de partículas em função da posição x e da faixa de diâmetros.

Voltagem na Placa do CCE:0 kv							
n. pos.	x(cm)	0,52/1,07	1,07/1,54	1,54/2,20	2,20/4,21	4,21/20,52	Total
7,5	3,5	1	1.720	705	105	21	2.551
6,5	2,5	2	1.660	819	106	19	2.606
5,5	1,5	2	1.840	780	102	18	2.742
5	1	2	2.850	1.270	190	42	4.354
4,5	0,5	32	41.600	35.900	6.040	728	84.300
4	0	188	169.000	141.000	21.200	2.920	334.308
3,5	-0,5	58	86.000	74.700	11.600	1.490	173.848
3	-1	1	3.230	2.390	425	74	6.120
2,5	-1,5	2	2.490	1.450	245	36	4.223
1,5	-2,5	2	1.460	615	90	15	2.182
0,5	-3,5	0	1.160	395	40	14	1.609
Voltagem na Placa do CCE:- 10 kv							
n. pos.	x(cm)	0,52/1,07	1,07/1,54	1,54/2,20	2,20/4,21	4,21/20,52	Total
7,5	3,5	4	6.320	5.160	1.090	137	12.711
6,5	2,5	7	12.100	9.960	2.190	285	24.542
5,5	1,5	23	27.100	19.600	3.940	491	51.154

Continuação

5	1	37	43.000	25.800	5.270	740	74.847
4,5	0,5	52	74.100	48.300	8.330	1.130	131.912
4	0	85	87.200	54.900	9.000	1.320	152.505
3,5	-0,5	79	96.000	62.300	9.550	1.510	169.439
3	-1	70	81.800	53.600	8.290	1.200	144.960
2,5	-1,5	39	54.800	38.100	5.920	904	99.763
1,5	-2,5	30	47.100	36.700	6.320	806	90.956
5	-3,5	16	34.300	28.400	5.070	608	68.394

Tabela B2-1 – Condições experimentais de operação / Diatomito

Gerador: SSPD	Velocidade do ar no CCE: 0,29 m/s
Turntable: 9 rph, sentido anti-horário	Temperatura: 21,9 °C
Capsuhelic 155	Umidade relativa: 17,2 %

Tabela B2-2 – Dados de caracterização do material

N _p	Faixa de diâmetro (µm)					Total
	0,52-2,20	2,20-3,39	3,39-4,87	4,87-8,05	8,05-20,53	
	3.717	277.800	334.400	86.480	19.400	721.797
%	0,005	0,385	0,463	0,120	0,027	1,000
Diâmetro aerodinâmico médio (µm)						
d _{pA}	1,97	3,08	3,90	5,90	10,74	
Densidade do diatomito 2,86 g/cm ³						
Diâmetro de Stokes médio (µm)						
d _{pS}	1,01	1,86	2,30	3,49	6,34	

Tabela B2-3 - número de partículas em função da posição x e da faixa de diâmetros.

n. pos.	x(cm)	Voltagem na Placa do CCE:0 kv					total
		0,52/2,20	2,20/3,39	3,39/4,87	4,87/8,05	8,05/20,52	
7,5	3,5	2	1.960	291	58	35	2.344
6,5	2,5	0	1.990	256	50	28	2.324
5,5	1,5	3	3.660	2.500	411	54	6.628
5	1	2	3.830	2.100	207	61	6.200
4,5	0,5	23	43.400	54.300	10.100	778	108.601
4	0	4.100	163.000	101.000	17.000	1.570	286.670
3,5	-0,5	77	76.500	77.500	14.400	1.040	169.517
3	-1	1	4.420	4.260	669	81	9.431

Continuação

2,5	-1,5	2	4.430	2.540	391	65	7.428
1,5	-2,5	0	2.130	303	29	27	2.489
0,5	-3,5	2	2.140	294	32	29	2.497
Voltagem na Placa do CCE:- 10 kv							
n. pos.	X(cm)	0,52/2,20	2,20/3,39	3,39/4,87	4,87/8,05	8,05/20,52	total
7,5	3,5	3	9.380	7.020	1.240	113	17.756
6,5	2,5	6	14.700	12.900	2.250	227	30.083
5,5	1,5	7	17.800	15.800	2.760	249	36.616
5	1	7	19.500	17.100	3.090	244	39.941
4,5	0,5	20	33.100	32.900	5.660	467	72.147
4	0	16	32.700	32.900	5.920	493	72.029
3,5	-0,5	10	26.900	28.000	5.260	434	60.604
3	-1	25	36.900	39.100	7.260	561	83.846
2,5	-1,5	13	20.800	21.200	4.270	285	46.568
1,5	-2,5	3	11.800	11.700	2.460	172	26.135
5	-3,5	5	10.900	10.900	2.360	166	24.331

Tabela B3-1 – Condições experimentais de operação / Pó de madeira

Gerador: SSPD	Velocidade do ar no CCE: 0,28 m/s
Turntanle: 11 rph, sentido anti-horário	Temperatura: 23,9 °C
Capsuhelic: 150	Umidade relativa: 17,4 %

Tabela B3-2 – Dados de caracterização do material

N _P	Faixa de diâmetro (µm)					Total
	0,52/2,54	2,54/3,65	3,65/5,23	5,23/8,05	8,05/20,52	
	1.325	201.200	56.860	12.822	4.526	276.733
%	0,005	0,727	0,205	0,046	0,016	1,000
Diâmetro aerodinâmico médio (µm)						
d _{pA}	2,54	3,12	4,19	6,20	11,05	
Densidade do Pó de madeira 1,44 g/cm ³						
Diâmetro de Stokes médio (µm)						
d _{ps}	2,13	2,62	3,51	5,21	9,28	

Tabela B3-3 - número de partículas em função da posição x e da faixa de diâmetros.

Voltagem na Placa do CCE: 0 kv							
n. pos.	X(cm)	0,52/2,54	2,54/3,65	3,65/5,23	5,23/8,05	8,05/20,52	total
7,5	3,5	37	3.020	217	52	94	3.383
6,5	2,5	31	3.030	208	50	81	3.400
5,5	1,5	54	3.130	221	54	92	3.551
5	1	98	3.590	215	73	96	4.072
4,5	0,5	31	9.600	1.400	150	97	11.278
4	0	110	31.200	5.260	463	216	37.249
3,5	-0,5	80	21.400	3.850	466	179	25.975
3	-1	25	3.660	304	67	86	4.142
2,5	-1,5	41	3.290	266	66	101	3.764
1,5	-2,5	44	3.280	220	77	64	3.685
0,5	-3,5	33	2.980	201	48	83	3.345
Voltagem: - 10 kv							
n. pos.	X(cm)	0,52/2,54	2,54/3,65	3,65/5,23	5,23/8,05	8,05/20,52	total
7,5	3,5	132	4.210	350	88	101	4.881
6,5	2,5	140	4.920	452	83	128	5.723
5,5	1,5	121	6.050	641	101	99	7.012
5	1	152	7.970	838	111	115	9.186
4,5	0,5	153	8.930	991	121	135	10.330
4	0	120	10.600	1.160	134	129	12.143
3,5	-0,5	126	10.800	1.120	133	128	12.307
3	-1	211	14.300	1.510	176	147	16.344
2,5	-1,5	181	13.400	1.510	173	143	15.407
1,5	-2,5	193	9.240	1.090	124	137	10.784
5	-3,5	144	7.700	959	127	130	9.060

Apêndice C

Dados experimentais de medida de carga no CCE após a automação.

Tabela C1-1 – Condições experimentais de operação / Pirocloro

Gerador: SSPD	Velocidade do ar no CCE: 0,289 m/s
Turntable: 10 rph, sentido anti-horário	Temperatura: 20 °C
Capsuhelic: 150	Umidade relativa: 16,2 %

Tabela C1-2 – Dados de caracterização do material

N _p	Faixa de diâmetro (µm)					total
	0,52/0,80	0,80/1,33	1,33/2,05	2,05/4,53	4,53/20,52	
	64.700	152.625	113.575	65.275	4.180	400.355
%	0,162	0,381	0,284	0,163	0,010	1,000
Diâmetro aerodinâmico médio (µm)						
d _{pA}	0,68	1,06	1,64	2,63	6,37	
Densidade do pirocloro 4,11 g/cm ³						
Diâmetro de Stokes médio (µm)						
d _{pS}	0,34	0,52	0,81	1,30	3,14	

Tabela C1-3 - número de partículas em função da posição x e da faixa de diâmetros.

Voltagem na Placa do CCE: 0 kv							
n. pos.	X(cm)	0,52/0,80	0,80/1,33	1,33/2,05	2,05/4,53	4,53/20,52	Total
7,5	3,5	77	128	69	56	0	330
6,5	2,5	69	97	27	10	0	203
5,5	1,5	166	253	124	31	0	574
5	1	1.980	3.370	2.150	918	11	8.429
4,5	0,5	9.040	16.400	10.300	4.590	50	40.380
4	0	29.200	53.700	32.900	13.300	166	129.266
3,5	-0,5	10.900	20.100	12.000	4.690	48	47.738
3	-1	2.160	4.050	2.420	930	13	9.573
2,5	-1,5	628	959	517	180	2	2.286
1,5	-2,5	166	211	93	25	0	495
0,5	-3,5	96	122	33	16	0	267
Voltagem na Placa do CCE: - 10 kv							
n. pos.	X(cm)	0,52/0,80	0,80/1,33	1,33/2,05	2,05/4,53	4,53/20,52	Total
7,5	3,5	2.850	6.520	2.990	1.500	13	13.873
6,5	2,5	2.770	5.590	2.650	1.170	16	12.196
5,5	1,5	5.800	9.940	4.490	1.900	27	22.157
5	1	8.670	13.800	5.970	2.410	47	30.897
4,5	0,5	9.450	13.600	5.650	2.110	37	30.847

Continuação

4	0	12.700	18.000	7.460	2.660	40	40.860
3,5	-0,5	24.300	33.900	15.100	5.590	98	78.988
3	-1	16.400	23.700	11.600	4.370	59	56.129
2,5	-1,5	16.100	24.600	13.100	5.230	67	59.097
1,5	-2,5	8.680	15.400	9.470	3.760	48	37.358
5	-3,5	8.210	14.900	9.720	1.470	49	34.349

Tabela C2-1 – Condições experimentais de operação / Diatomito

Gerador: SSPD	Velocidade do ar no CCE: 0,277 m/s
Turntable: 10 rph, sentido anti-horário	Temperatura: 23,8 °C
Capsuhelic 155	Umidade relativa: 17,2 %

Tabela C2-2 – Dados de caracterização do material

N _p	Faixa de diâmetro (µm)					Total
	0,52-2,20	2,20-3,39	3,39-4,87	4,87-8,05	8,05-20,53	
	2.508	206.400	208.400	53.600	13.248	484.156
%	0,005	0,426	0,430	0,111	0,027	1,000
Diâmetro aerodinâmico médio (µm)						
d _{pA}	1,85	3,13	3,89	5,91	10,86	
Densidade do diatomito 2,86 g/cm ³						
Diâmetro de Stokes médio (µm)						
d _{pS}	1,04	1,89	2,30	3,49	6,40	

Tabela C2-3 - número de partículas em função da posição x e da faixa de diâmetros.

n. pos.	x(cm)	Voltagem na Placa do CCE: 0 kv					Total
		0,52/2,20	2,20/3,39	3,39/4,87	4,87/8,05	8,05/20,52	
7,5	3,5	0	1.360	185	32	13	1.590
6,5	2,5	0	1.420	184	40	25	1.669
5,5	1,5	0	1.740	613	95	27	2.475
5	1	0	2.440	1.330	228	33	4.031
4,5	0,5	20	53.900	67.700	10.100	768	132.488
4	0	245	208.000	300.000	48.000	3.500	559.745
3,5	-0,5	126	158.000	181.000	29.800	2.230	371.156
3	-1	2	5.640	5.260	873	77	11.852
2,5	-1,5	1	2.130	891	130	24	3.176
1,5	-2,5	0	1.470	221	41	27	1.759
0,5	-3,5	2	1.520	192	37	22	1.773

Continuação

Voltagem na Placa do CCE:- 10 kv							
n. pos.	x(cm)	0,52/2,20	2,20/3,39	3,39/4,87	4,87/8,05	8,05/20,52	Total
7,5	3,5	5	15.400	14.600	2.210	211	32.426
6,5	2,5	9	21.200	20.800	3.110	263	45.382
5,5	1,5	20	33.900	34.500	5.330	444	74.194
5	1	19	39.000	39.000	5.910	496	84.425
4,5	0,5	21	42.600	44.300	6.510	476	93.907
4	0	17	43.900	46.800	7.100	564	98.381
3,5	-0,5	19	55.100	59.800	9.080	727	124.726
3	-1	25	45.300	49.900	8.020	605	103.850
2,5	-1,5	9	34.600	39.100	6.410	523	80.642
1,5	-2,5	4	17.200	19.800	3.360	231	40.595
5	-3,5	3	9.920	11.200	1.960	148	23.231

Tabela C3-1 – Condições experimentais de operação / Concentrado fosfático

Gerador: SSPD	Velocidade do ar no CCE: 0,284 m/s
Turntante: 10 rph, sentido anti-horário	Temperatura: 20 °C
Capsuhelic: 150	Umidade relativa: 16,2 %

Tabela C3-2 – Dados de caracterização do material

N _p	Faixa de diâmetro (µm)					Total
	0,52/0,64	0,64/0,86	0,86/1,24	1,24/2,20	2,20/20,53	
	157.500	198.000	108.650	41.300	9.315	514.765
%	0,306	0,385	0,211	0,080	0,018	1,000
Diâmetro aerodinâmico médio (µm)						

Continuação

d _{pA}	0,586	0,746	1,010	1,555	3,495	
Densidade do concentrado fosfático 2,94 g/cm ³						
Diâmetro de Stokes médio (µm)						
d _{pS}	0,34	0,44	0,59	0,91	2,04	

Tabela C3-3 - número de partículas em função da posição x e da faixa de diâmetros.

Voltagem na Placa do CCE:- 10 kv							
n. pos.	x(cm)	Faixas de diâmetros					Total
		0,52/0,64	0,64/0,86	0,86/1,24	1,24/2,20	2,20/20,53	
7,5	3,5	2550	2150	873	276	34	5883
6,5	2,5	2450	1960	776	171	24	5381
5,5	1,5	2750	2180	928	225	30	6113

Continuação

5	1	18600	17500	8730	3020	449	48299
4,5	0,5	197000	221000	122000	48600	9000	597600
4	0	307000	365000	210000	84100	16100	982200
3,5	-0,5	144000	164000	94900	36600	6540	446040
3	-1	17200	19300	10900	4080	679	52159
2,5	-1,5	3170	2570	1130	257	37	7164
1,5	-2,5	2480	1990	939	293	37	5739
0,5	-3,5	2360	1950	874	254	25	5463
Voltagem na Placa do CCE -10 kV							
Faixas de diâmetros							
n. pos.	x(cm)	0,52/0,64	0,64/0,86	0,86/1,24	1,24/2,20	2,20/20,53	Total
7,5	3,5	36900	42700	25100	9840	1750	116290
6,5	2,5	36700	42000	23700	9440	1710	113550
5,5	1,5	43300	49000	27400	10600	1970	132270
5	1	53400	64200	36500	14100	2570	170770
4,5	0,5	59600	72100	42300	17200	3290	194490
4	0	48400	58200	34300	14100	2390	157390
3,5	-0,5	45100	52900	29400	11900	2270	141570
3	-1	38300	44100	24300	9470	1830	118000
2,5	-1,5	37500	41400	21900	8420	1510	110730
1,5	-2,5	35600	39600	21000	7850	1390	105440
0,5	-3,5	15700	17100	9260	3460	589	46109

Apêndice D

Dados do ajuste inicial do nível de carga induzido pelo carregador corona.

Tabela D1-1 – Condições experimentais de operação / Concentrado fosfático

Gerador: SSPD	Velocidade do ar no CCE: 0,271 m/s
Turntanle: 8 rph, sentido anti-horário	Temperatura: 18 °C
Capsuhelic: 155	Umidade relativa: 14,5 %
Tensão na placa do CCE: -10 kV	Tensão corona: 0 kV

Tabela D1-2 – Dados de caracterização do material

N _p	Faixa de diâmetro (µm)					
	0,52/0,64	0,64/0,86	0,86/1,24	1,24/2,20	2,20/20,53	Total
	68.633	84.200	56.833	27.167	6.737	243.570
%	0,282	0,346	0,233	0,112	0,028	1,000
Diâmetro aerodinâmico médio (µm)						
d _{pA}	0,585	0,748	1,013	1,563	3,490	
Densidade do concentrado fosfático 2,94 g/cm ³						
Diâmetro de Stokes médio (µm)						
d _{pS}	0,341	0,436	0,591	0,912	2,035	

Tabela D1-3 - número de partículas em função da posição x e da faixa de diâmetros.

Voltagem na Placa do CCE: 0 kV							
Faixas de diâmetros							
n. pos.	X(cm)	0,52/0,64	0,64/0,86	0,86/1,24	1,24/2,20	2,20/20,53	Total
7,5	3,5	2550	2150	873	276	34	5883
6,5	2,5	2450	1960	776	171	24	5381
5,5	1,5	2750	2180	928	225	30	6113
5	1	18600	17500	8730	3020	449	48299
4,5	0,5	197000	221000	122000	48600	9000	597600
4	0	307000	365000	210000	84100	16100	982200
3,5	-0,5	144000	164000	94900	36600	6540	446040
3	-1	17200	19300	10900	4080	679	52159
2,5	-1,5	3170	2570	1130	257	37	7164
1,5	-2,5	2480	1990	939	293	37	5739
0,5	-3,5	2360	1950	874	254	25	5463
Voltagem na Placa do CCE: -10 kV							
Faixas de diâmetros							
n. pos.	X(cm)	0,52/0,64	0,64/0,86	0,86/1,24	1,24/2,20	2,20/20,53	Total
7,5	3,5	44000	52100	30000	12000	2240	140340
6,5	2,5	57400	68600	40000	15500	2930	184430

Continuação

5,5	1,5	80500	98000	57000	22400	4350	262250
5	1	90700	113000	65300	25000	4790	298790
4,5	0,5	88600	109000	63500	24900	4820	290820
4	0	63200	76700	43200	16500	2950	202550
3,5	-0,5	66100	84900	48900	17500	2880	220280
3	-1	64200	75900	41600	15000	2750	199450
2,5	-1,5	55700	64500	34700	12600	2260	169760
1,5	-2,5	37700	43100	23000	8510	1380	113690
0,5	-3,5	24300	17800	14800	5510	880	63290

Tabela D2-1 – Condições experimentais de operação / Concentrado fosfático

Gerador: SSPD	Velocidade do ar no CCE: 0,276 m/s
Turntanle: 9 rph, sentido anti-horário	Temperatura: 22,8 °C
Capsuhelic: 155	Umidade relativa: 16,4 %
Tensão na placa do CCE: -10 kV	Tensão corona: -15 kV

Tabela D2-2 – Dados de caracterização do material

N _p	Faixa de diâmetro (µm)					
	0,52/0,64	0,64/0,86	0,86/1,24	1,24/2,20	2,20/20,53	Total
	68.633	84.200	56.833	27.167	6.737	243.570
%	0,282	0,346	0,233	0,112	0,028	1,000
Diâmetro aerodinâmico médio (µm)						
d _{pA}	0,585	0,748	1,013	1,563	3,490	
Densidade do concentrado fosfático 2,94 g/cm ³						
Diâmetro de Stokes médio (µm)						
d _{pS}	0,341	0,436	0,591	0,912	2,035	

Tabela D2-3 - número de partículas em função da posição x e da faixa de diâmetros.

Voltagem na Placa do CCE: -10 kV							
Faixas de diâmetros							
n. pos.	x(cm)	0,52/0,64	0,64/0,86	0,86/1,24	1,24/2,20	2,20/20,53	Total
7,5	3,5	17700	19400	11100	4830	704	53734
6,5	2,5	22300	24300	13200	4910	813	65523
5,5	1,5	48600	56000	32600	12300	1950	151450
5	1	52700	61800	36200	13200	2070	165970
4,5	0,5	42800	55100	31400	11300	1710	142310
4	0	44900	51500	29300	10400	1430	137530
3,5	-0,5	42200	45100	23400	8340	1310	120350

Continuação

3	-1	48700	53100	28400	10000	1490	141690
2,5	-1,5	28800	31600	16800	5980	919	84099
1,5	-2,5	24600	27100	15000	5290	820	72810
0,5	-3,5	9330	10000	5250	1900	273	26753

Tabela D3-1 – Condições experimentais de operação / Concentrado fosfático

Gerador: SSPD	Velocidade do ar no CCE: 0,274 m/s
Turntanle: 10 rph, sentido anti-horário	Temperatura: 18 °C
Capsuhelic: 155	Umidade relativa: 15,8 %
Tensão na placa do CCE: -5 kV	Tensão corona: 0 kV

Tabela D3-2 – Dados de caracterização do material

N _p	Faixa de diâmetro (µm)					Total
	0,52/0,64	0,64/0,86	0,86/1,24	1,24/2,20	2,20/20,53	
	68.633	84.200	56.833	27.167	6.737	243.570
%	0,282	0,346	0,233	0,112	0,028	1,000
Diâmetro aerodinâmico médio (µm)						
d _{pA}	0,585	0,748	1,013	1,563	3,490	
Densidade do concentrado fosfático 2,94 g/cm ³						
Diâmetro de Stokes médio (µm)						
d _{pS}	0,341	0,436	0,591	0,912	2,035	

Tabela D3-3 - número de partículas em função da posição x e da faixa de diâmetros.

Voltagem na Placa do CCE: -5 kV								
Faixas de diâmetros								
n. pos.	x(cm)	0,52/0,64	0,64/0,80	0,80/1,15	1,15/1,65	1,65/2,37	2,37/10,74	Total
7,5	3,5	8740	8660	8440	2730	1000	340	29910
6,5	2,5	25500	23900	20400	5610	1980	625	78015
5,5	1,5	41800	40100	36400	10500	3690	1230	133720
5	1	71300	69500	63600	19000	6970	2340	232710
4,5	0,5	79900	75600	70100	20600	7530	2730	256460
4	0	93900	90400	83200	25700	9520	3470	306190
3,5	-0,5	78700	76000	69500	20700	7350	2580	254830
3	-1	43000	39300	33600	9320	3330	1180	129730
2,5	-1,5	35500	31800	26700	7230	2370	793	104393
1,5	-2,5	22800	19900	16500	4420	1480	495	65595
0,5	-3,5	6680	6130	5520	1660	621	200	20811

Tabela D4-1 – Condições experimentais de operação / Concentrado fosfático

Gerador: SSPD	Velocidade do ar no CCE: 0,271 m/s
Turntanle: 8 rph, sentido anti-horário	Temperatura: 18 °C
Capsuhelic: 155	Umidade relativa: 14,5 %
Tensão na placa do CCE: -5 kV	Tensão corona: -10 kV

Tabela D4-2 – Dados de caracterização do material

Faixa de diâmetro (µm)						
N _p	0,52/0,64	0,64/0,86	0,86/1,24	1,24/2,20	2,20/20,53	Total
	68.633	84.200	56.833	27.167	6.737	243.570
%	0,282	0,346	0,233	0,112	0,028	1,000
Diâmetro aerodinâmico médio (µm)						
d _{pA}	0,585	0,748	1,013	1,563	3,490	
Densidade do concentrado fosfático 2,94 g/cm ³						
Diâmetro de Stokes médio (µm)						
d _{pS}	0,341	0,436	0,591	0,912	2,035	

Tabela D4-3 - número de partículas em função da posição x e da faixa de diâmetros.

Voltagem na Placa do CCE: -5 kV							
Faixas de diâmetros							
n. pos.	x(cm)	0,52/0,64	0,64/0,80	0,80/1,15	1,15/1,65	1,65/2,37	2,37/10,74
7,5	3,5	7220	6370	5610	1690	619	191
6,5	2,5	30700	28000	26200	8300	3030	1110
5,5	1,5	50600	45200	41000	12800	4660	1650
5	1	70000	63000	57800	17600	6450	2390
4,5	0,5	90600	79900	71500	21700	8080	2970
4	0	64000	54300	46700	13600	4890	1900
3,5	-0,5	54500	46300	39000	11200	4180	1510
3	-1	45500	38600	32600	9260	3270	1110
2,5	-1,5	37900	32600	28300	8150	2940	988
1,5	-2,5	18700	16000	13400	3950	1310	418
0,5	-3,5	8690	7250	5930	1710	613	167
Voltagem na placa do CCE -5 kV							
Faixas de diâmetros							
n. pos.	X(cm)	0,523/2,371	2,371/3,398	3,398/4,532	4,532/5,623	5,623/8,058	
7,5	3,5	355	5.160	14.900	8.250	4.180	
6,5	2,5	1.020	11.000	32.800	19.600	9.150	
5,5	1,5	3.690	34.500	65.700	33.000	15.400	
5	1	2.270	33.900	82.100	40.600	17.100	
4,5	0,5	2.710	28.200	61.400	29.400	12.300	

Continuação

4	0	1.270	16.100	39.700	18.900	7.750
3,5	-0,5	2.650	26.300	55.300	26.700	11.200
3	-1	3.800	25.100	46.700	27.800	13.100
2,5	-1,5	1.350	19.300	38.900	18.200	7.650
1,5	-2,5	506	7.590	24.300	13.300	5.570
0,5	-3,5	302	3.940	9.370	4.450	2.020

Tabela D5-1 – Condições experimentais de operação / Concentrado fosfático

Gerador: SSPD	Velocidade do ar no CCE: 0,278 m/s
Turntante: 10 rph, sentido anti-horário	Temperatura: 21 °C
Capsuhelic: 140	Umidade relativa: 21 %
Tensão na placa do CCE: -5 kV	Tensão corona: 0 kV

Tabela D5-2 – Dados de caracterização do material

N _p	Faixa de diâmetro (µm)					
	0,52/3,65	3,65/4,21	3,39/4,53	4,53/5,62	5,62/8,05	8,05/20,53
	2.980	75.267	177.333	43.200	29.933	11.443
%	0,009	0,221	0,521	0,127	0,088	0,034
Diâmetro aerodinâmico médio (µm)						
d _{pA}	3,38	4,02	4,63	5,59	6,79	10,18
Densidade do concentrado fosfático 2,94 g/cm ³						
Diâmetro de Stokes médio (µm)						
d _{pS}	1,97	2,34	2,70	3,26	3,96	5,94

Tabela D5-3 - número de partículas em função da posição x e da faixa de diâmetros.

n. pos.	x(cm)	Voltagem na placa do CCE 0 kV					
		0,52/3,65	3,65/4,21	3,39/4,53	4,53/5,62	5,62/8,05	8,05/20,53
7,5	3,5	367	10.200	15.800	2.940	1.190	122
6,5	2,5	429	10.500	16.300	3.060	1.310	149
5,5	1,5	434	11.600	17.800	3.250	1.510	209
5	1	446	13.200	20.500	3.690	1.930	410
4,5	0,5	8.100	199.000	420.000	94.300	62.600	21.700
4	0	11.900	247.000	527.000	128.000	87.900	30.900
3,5	-0,5	6.160	132.000	265.000	65.200	45.100	16.100
3	-1	347	10.000	15.800	2.810	1.370	156
2,5	-1,5	357	9.830	15.100	2.700	1.140	128

continuação

1,5	-2,5	398	9.920	14.900	2.680	1.050	105
0,5	-3,5	381	9.770	14.500	2.590	1.040	101
Voltagem na placa do CCE -5 kV							
Faixas de diâmetros							
n. pos.	x(cm)	0,52/3,65	3,65/4,21	3,39/4,53	4,53/5,62	5,62/8,05	8,05/20,53
7,5	3,5	260	11.500	16.500	3.790	2.300	560
6,5	2,5	463	17.600	32.300	8.430	5.870	1.770
5,5	1,5	1.330	36.000	91.900	25.900	18.400	5.680
5	1	1.770	48.300	137.000	40.000	28.500	8.660
4,5	0,5	1.180	34.600	99.600	28.900	20.600	6.190
4	0	868	28.700	89.900	25.800	18.800	5.740
3,5	-0,5	940	32.100	86.300	24.400	16.900	4.970
3	-1	908	30.100	73.300	20.000	14.100	4.280
2,5	-1,5	609	22.700	48.300	12.400	8.100	2.400
1,5	-2,5	311	13.100	19.000	4.240	2.610	632
0,5	-3,5	251	10.900	13.100	2.890	1.690	419

Tabela D6-1 – Condições experimentais de operação / Concentrado fosfático

Gerador: SSPD	Velocidade do ar no CCE: 0,284 m/s
Turntante: 10 rph, sentido anti-horário	Temperatura: 23 °C
Capsuhelic: 155	Umidade relativa: 19 %
Tensão na placa do CCE: -5 kV	Tensão corona: 0 kV

Tabela D6-2 – Dados de caracterização do material

N _p	Faixa de diâmetro (µm)					
	0,52/3,65	3,65/4,21	3,39/4,53	4,53/5,62	5,62/8,05	8,05/20,53
	2.980	75.267	177.333	43.200	29.933	11.443
%	0,009	0,221	0,521	0,127	0,088	0,034
Diâmetro aerodinâmico médio (µm)						
d _{pA}	3,38	4,02	4,63	5,59	6,79	10,18
Densidade do concentrado fosfático 2,94 g/cm ³						
Diâmetro de Stokes médio (µm)						
d _{pS}	1,97	2,34	2,70	3,26	3,96	5,94

Tabela D6-3 - número de partículas em função da posição x e da faixa de diâmetros.

Voltagem na placa do CCE -5 kV							
Faixas de diâmetros							
n. pos.	x(cm)	0,523/2,371	2,371/3,398	3,398/4,532	4,532/5,623	5,623/8,058	8,058/20,535
7,5	3,5	355	5.160	14.900	8.250	4.180	1.250
6,5	2,5	1.020	11.000	32.800	19.600	9.150	2.510
5,5	1,5	3.690	34.500	65.700	33.000	15.400	4.150
5	1	2.270	33.900	82.100	40.600	17.100	4.940
4,5	0,5	2.710	28.200	61.400	29.400	12.300	3.580
4	0	1.270	16.100	39.700	18.900	7.750	2.300
3,5	-0,5	2.650	26.300	55.300	26.700	11.200	3.310
3	-1	3.800	25.100	46.700	27.800	13.100	3.430
2,5	-1,5	1.350	19.300	38.900	18.200	7.650	1.920
1,5	-2,5	506	7.590	24.300	13.300	5.570	1.420
0,5	-3,5	302	3.940	9.370	4.450	2.020	549

Apêndice E

Dados do ajuste dos níveis de carregamento induzido pelo carregador corona.

Tabela E1-1 – Condições experimentais de operação / Concentrado fosfático

Gerador: SSPD	Velocidade do ar no CCE: 0,281 m/s
Turntante: 10 rph, sentido anti-horário	Temperatura: 24 °C
Capsuhelic: 155	Umidade relativa: 26 %
Tensão na placa do CCE: -5 kV	Tensão corona: 0 kV

Tabela E1-2 – Dados de caracterização do material

N _p	Faixa de diâmetro (µm)					Total
	3,65/4,21	4,21/5,23	5,23/6,04	6,04/8,05	8,05/20,53	
	46.000	112.733	36.367	29.567	12.287	236.953
%	0,194	0,476	0,153	0,125	0,052	1,000
Diâmetro aerodinâmico médio (µm)						
d _{pA}	3,98	4,65	5,59	6,81	10,25	
Densidade do concentrado fosfático 2,94 g/cm ³						
Diâmetro de Stokes médio (µm)						
d _{pS}	2,32	2,71	3,26	3,97	5,98	

Tabela E1-3 - número de partículas em função da posição x e da faixa de diâmetros.

Voltagem na placa do CCE -5 kV							
Faixas de diâmetros							
n. pos.	x(cm)	3,65/4,21	3,39/4,53	4,53/5,62	5,62/8,05	8,05/20,53	Total
7,5	3,5	9.260	15.900	3.200	1.720	319	20433
6,5	2,5	12.100	21.800	4.520	2.440	494	41354
5,5	1,5	21.000	41.200	8.950	4.800	971	76921
5	1	20.600	42.700	9.440	5.130	902	78772
4,5	0,5	62.600	149.000	35.300	18.300	3.360	268560
4	0	62.400	151.000	35.200	18.400	3.190	270190
3,5	-0,5	34.800	79.800	17.200	8.740	1.520	142060
3	-1	23.500	48.600	9.770	4.700	876	87446
2,5	-1,5	16.800	32.400	6.250	2.960	501	58911
1,5	-2,5	9.200	14.900	2.650	1.230	185	28165
0,5	-3,5	6.820	10.700	1.920	844	149	30399

Tabela E2-1 – Condições experimentais de operação / Concentrado fosfático

Gerador: SSPD	Velocidade do ar no CCE: 0,278 m/s
Turntante: 10 rph, sentido anti-horário	Temperatura: 22 °C
Capsuhelic: 155	Umidade relativa: 25 %
Tensão na placa do CCE: -5 kV	Tensão corona: -3 kV

Tabela E2-2 – Dados de caracterização do material

N _p	Faixa de diâmetro (µm)					Total
	3,65/4,21	4,21/5,23	5,23/6,04	6,04/8,05	8,05/20,53	
	46.000	112.733	36.367	29.567	12.287	236.953
%	0,194	0,476	0,153	0,125	0,052	1,000
Diâmetro aerodinâmico médio (µm)						
d _{pA}	3,98	4,65	5,59	6,81	10,25	
Densidade do concentrado fosfático 2,94 g/cm ³						
Diâmetro de Stokes médio (µm)						
d _{pS}	2,32	2,71	3,26	3,97	5,98	

Tabela E2-3 - número de partículas em função da posição x e da faixa de diâmetros.

Voltagem na placa do CCE -5 kV							
Faixas de diâmetros							
n. pos.	x(cm)	3,65/4,21	3,39/4,53	4,53/5,62	5,62/8,05	8,05/20,53	Total
7,5	3,5	9.740	16.200	2.910	1.430	332	20326
6,5	2,5	15.200	28.600	5.480	3.010	736	53026
5,5	1,5	26.900	55.400	11.300	6.030	1.540	101170
5	1	56.100	124.000	26.000	14.000	3.190	223290
4,5	0,5	94.000	223.000	47.800	24.500	5.310	394610
4	0	72.600	174.000	36.000	18.000	3.760	304360
3,5	-0,5	46.500	103.000	20.300	9.800	1.950	181550
3	-1	35.000	75.100	13.900	6.660	1.340	132000
2,5	-1,5	20.300	42.500	7.690	3.510	722	74722
1,5	-2,5	11.800	27.200	5.050	2.360	442	46852
0,5	-3,5	5.610	11.600	2.040	933	143	30612

Tabela E3-1 – Condições experimentais de operação / Concentrado fosfático

Gerador: SSPD	Velocidade do ar no CCE: 0,276 m/s
Turntante: 10 rph, sentido anti-horário	Temperatura: 23 °C
Capsuhelic: 155	Umidade relativa: 24 %
Tensão na placa do CCE: -5 kV	Tensão corona: -6 kV

Tabela E3-2 – Dados de caracterização do material

		Faixa de diâmetro (μm)					
N_p		3,65/4,21	4,21/5,23	5,23/6,04	6,04/8,05	8,05/20,53	Total
		46.000	112.733	36.367	29.567	12.287	236.953
%		0,194	0,476	0,153	0,125	0,052	1,000
Diâmetro aerodinâmico médio (μm)							
d_{pA}		3,98	4,65	5,59	6,81	10,25	
Densidade do concentrado fosfático $2,94 \text{ g/cm}^3$							
Diâmetro de Stokes médio (μm)							
d_{pS}		2,32	2,71	3,26	3,97	5,98	

Tabela E3-3 - número de partículas em função da posição x e da faixa de diâmetros.

Voltagem na placa do CCE -5 kV							
Faixas de diâmetros							
n. pos.	X(cm)	3,65/4,21	3,39/4,53	4,53/5,62	5,62/8,05	8,05/20,53	Total
7,5	3,5	9.010	14.400	5.530	2.300	690	8119
6,5	2,5	17.300	32.200	7.610	4.940	1.450	63500
5,5	1,5	36.300	75.100	18.200	11.100	3.060	143760
5	1	56.700	118.000	28.600	16.800	4.390	224490
4,5	0,5	81.200	182.000	44.900	25.700	5.870	339670
4	0	77.200	175.000	41.500	24.000	5.300	323000
3,5	-0,5	62.400	136.000	31.100	17.300	3.860	250660
3	-1	36.800	72.900	16.000	8.630	1.950	136280
2,5	-1,5	21.500	40.100	8.480	4.740	1.140	75960
1,5	-2,5	8.190	13.200	2.580	1.490	365	25825
0,5	-3,5	3.390	3.630	642	361	96	31930

Tabela E4-1 – Condições experimentais de operação / Concentrado fosfático

Gerador: SSPD	Velocidade do ar no CCE: 0,276 m/s
Turrtanle: 10 rph, sentido anti-horário	Temperatura: 23°C
Capsuhelic: 155	Umidade relativa: 25 %
Tensão na placa do CCE: -5 kV	Tensão corona: -9 kV

Tabela E4-2 – Dados de caracterização do material

Faixa de diâmetro (μm)						
N_p	0,52/0,64	0,64/0,86	0,86/1,24	1,24/2,20	2,20/20,53	Total
	68.633	84.200	56.833	27.167	6.737	243.570
%	0,282	0,346	0,233	0,112	0,028	1,000
Diâmetro aerodinâmico médio (μm)						
d_{pA}	0,585	0,748	1,013	1,563	3,490	
Densidade do concentrado fosfático $2,94 \text{ g/cm}^3$						
Diâmetro de Stokes médio (μm)						
d_{pS}	0,341	0,436	0,591	0,912	2,035	

Tabela E4-3 - número de partículas em função da posição x e da faixa de diâmetros.

Voltagem na placa do CCE -5 kV							
Faixas de diâmetros							
n. pos.	x(cm)	3,65/4,21	3,39/4,53	4,53/5,62	5,62/8,05	8,05/20,53	Total
7,5	3,5	9.010	14.400	5.530	2.300	690	8119
6,5	2,5	17.300	32.200	7.610	4.940	1.450	63500
5,5	1,5	36.300	75.100	18.200	11.100	3.060	143760
5	1	56.700	118.000	28.600	16.800	4.390	224490
4,5	0,5	81.200	182.000	44.900	25.700	5.870	339670
4	0	77.200	175.000	41.500	24.000	5.300	323000
3,5	-0,5	62.400	136.000	31.100	17.300	3.860	250660
3	-1	36.800	72.900	16.000	8.630	1.950	136280
2,5	-1,5	21.500	40.100	8.480	4.740	1.140	75960
1,5	-2,5	8.190	13.200	2.580	1.490	365	25825
0,5	-3,5	3.390	3.630	642	361	96	31930

Apêndice F

Dados de determinação experimental da penetração inicial e queda de pressão na filtração.

Tabela F1-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 5 cm/s	Corona: 0 kV
Temperatura: 24 °C	Umidade do ar: 26 %
Turntable: 13; sentido: anti-horário	Capsuhelic: 155
Vazão de filtração: 5,20 L/min	Vazão sonda isoc.: 93,66 ml/min
Massa filtro: 4,2785 g	Massa filtro + pó: 4,3190 g

Tabela F1-2 – Variação da queda de pressão com o tempo.

Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]
0	0	30	0,61	63	2,37
1	0,01	33	0,72	66	2,53
3	0,01	36	0,85	69	2,72
6	0,01	39	1	72	2,91
9	0	42	1,11	75	3,15
12	0,19	45	1,29	78	3,27
15	0,25	48	1,46	81	3,72
18	0,33	51	1,57	84	4,35
21	0,42	54	1,73		
24	0,45	57	1,98		
27	0,56	60	2,17		

Tabela F1-3 – Número de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas, para determinação da penetração.

Faixa dpA (APS)	0,52/4,21	4,21/5,23	5,23/6,04	6,04/8,05	8,05/20,32
dpS médio	2,32	2,71	3,26	3,95	5,75
E1	29.100	44.300	11.900	8.090	2.760
E2	24.700	34.200	8.940	6.250	2.060
E3	23.300	30.900	8.150	5.600	1.770
E4	16.700	20.000	5.230	3.620	1.080
S1	5.360	1.120	242	138	29
S2	5.287	1.310	284	163	25
S3	5.580	1.660	327	179	34
S4	5.200	2.000	370	203	35
S5	5.310	2.320	372	206	39
S6	5.480	2.250	427	200	36

Tabela F2-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 8 cm/s	Corona: 0 kV
Temperatura: 25 °C	Umidade do ar: 21 %
Turntable: 13; sentido: anti-horário	Capsuhelic: 155
Vazão de filtração: 8,33 L/min	Vazão sonda isoc.: 150 ml/min
Massa filtro: 4,7100 g	Massa filtro + pó: 4,7430 g

Tabela F2-2 – Variação da queda de pressão com o tempo.

Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]
0	0	30	1,47	63	4,7
1	0,13	33	1,63	66	5,06
3	0,34	36	1,85	69	5,45
6	0,47	39	2,42	72	6,14
9	0,46	42	2,7	75	6,49
12	0,64	45	3	78	6,93
15	0,64	48	3,23	81	7,56
18	0,74	51	3,34	84	7,9
21	0,99	54	3,76	87	8,2
24	1,1	57	4,41	90	8,83
27	1,32	60	4,56		

Tabela F2-3 – Número de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas, para determinação da penetração.

Faixa dpA (APS)	0,52/4,21	4,21/5,23	5,23/6,04	6,04/8,05	8,05/20,32
dpS médio	2,32	2,71	3,26	3,95	5,75
E1	45.000	78.900	20.100	13.600	4.280
E2	56.700	107.000	29.900	21.300	7.030
E3	33.100	55.900	14.800	10.000	3.300
E4	52.200	93.700	25.200	17.700	6.090
S1	9.010	5.380	1.080	508	64
S2	8.780	5.040	916	422	71
S3	7.820	4.100	645	326	40
S4	7.770	3.740	647	295	43
S5	7.790	3.550	599	298	41
S6	7610	3630	577	277	45

Tabela F3-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 12 cm/s	Corona: 0 kV
Temperatura: 25 °C	Umidade do ar: 25 %
Turtable: 13; sentido: anti-horário	Capsuhelic: 155
Vazão de filtração: 12,49 L/min	Vazão sonda isoc.: 224,8 ml/min
Massa filtro: 4,3596 g	Massa filtro + pó: 4,4090 g

Tabela F3-2 – Variação da queda de pressão com o tempo.

Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]
0	0	30	2,26	63	11,7
1	0,06	33	2,6	66	12,7
3	0,12	36	2,91	69	14,6
6	0,17	39	3,4		
9	0,3	42	3,9		
12	0,42	45	4,41		
15	0,72	48	5,35		
18	0,98	51	6,24		
21	1,4	54	7,15		
24	1,62	57	8,01		
27	1,86	60	9,9		

Tabela F3-3 – Número de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas, para determinação da penetração.

Faixa dpA (APS)	0,52/4,21	4,21/5,23	5,23/6,04	6,04/8,05	8,05/20,32
dpS médio	2,32	2,71	3,26	3,95	5,75
E1	72.200	105.000	26.000	17.600	5.880
E2	74.300	107.000	26.400	18.700	6.550
E3	55.000	79.600	19.900	13.900	5.020
E4	57.400	77.200	19.000	13.300	4.870
S1	7.126	2.680	1.770	450	247
S2	6.980	2.547	1.845	396	389
S3	6.640	2.780	1.923	385	296
S4	5.140	2.458	2.147	408	412
S5	8.450	2.841	1.995	356	298
S6	7.630	2.146	2.204	452	429

Tabela F4-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 5 cm/s	Corona: -9 kV
Temperatura: 23 °C	Umidade do ar: 23 %
Turntable: 13; sentido: anti-horário	Capsuhelic: 155
Vazão de filtração: 5,20 L/min	Vazão sonda isoc.: 93,66 ml/min
Massa filtro: 5,0338 g	Massa filtro + pó: 5,0445 g

Tabela F4-2 – Variação da queda de pressão com o tempo.

Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]
0	0	30	0,44	63	0,76
1	0,06	33	0,46	66	0,89
3	0,07	36	0,51	69	0,99
6	0,26	39	0,54	72	1,15
9	0,26	42	0,55	75	1,21
12	0,33	45	0,61	78	1,31
15	0,35	48	0,61	81	1,43
18	0,45	51	0,65	84	1,57
21	0,64	54	0,72	87	1,78
24	0,33	57	0,73	90	1,79
27	0,46	60	0,71		

Tabela F4-3 – Número de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas, para determinação da penetração.

Faixa dpA (APS)	0,52/4,21	4,21/5,23	5,23/6,04	6,04/8,05	8,05/20,32
dpS médio	2,32	2,71	3,26	3,95	5,75
E1	40.300	75.500	20.200	14.000	4.440
E2	32.200	49.200	12.400	8.250	2.630
E3	41.900	64.900	16.600	11.400	3.640
E4	34.000	51.600	13.100	8.850	2.800
S1	3.050	1.200	229	125	25
S2	3.800	1.710	289	153	26
S3	3.920	1.610	312	134	24
S4	4.190	2.010	379	204	43
S5	4.220	2.100	353	183	30
S6	4.310	2.060	372	175	27

Tabela F5-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 8 cm/s	Corona: -9 kV
Temperatura: 24 °C	Umidade do ar: 23 %
Turntable: 13; sentido: anti-horário	Capsuhelic: 155
Vazão de filtração: 8,33 L/min	Vazão sonda isoc.: 150 ml/min
Massa filtro: 4,5561 g	Massa filtro + pó: 4,5709 g

Tabela F5-2 – Variação da queda de pressão com o tempo.

Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]
0	0	30	0,69	63	2,84
1	0	33	0,85	66	3,14
3	0,01	36	1,02	69	3,72
6	0,02	39	1,03	72	3,84
9	0,05	42	1,17	75	4,45
12	0,12	45	1,35	78	5,4
15	0,28	48	1,37	81	5,71
18	0,33	51	1,58	84	6,35
21	0,37	54	1,74	87	7,48
24	0,43	57	1,9	90	8,31
27	0,53	60	2,17		

Tabela F5-3 – Número de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas, para determinação da penetração.

Faixa dpA (APS)	0,52/4,21	4,21/5,23	5,23/6,04	6,04/8,05	8,05/20,32
dpS médio	2,32	2,71	3,26	3,95	5,75
E1	57.500	109.000	27.900	19.300	6.450
E2	54.800	106.000	27.800	18.900	6.420
E3	29.900	54.800	13.500	8.860	2.950
E4	43.400	81.100	20.900	14.700	4.920
S1	3.690	2.900	574	267	30
S2	3.450	2.950	555	277	44
S3	3.080	2.590	489	255	26
S4	2.900	2.470	437	231	41
S5	2.830	2.470	422	218	51
S6	2.920	2.560	481	233	36

Tabela F6-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 12 cm/s	Corona: -9 kV
Temperatura: 24 °C	Umidade do ar: 26 %
Turntable: 13; sentido: anti-horário	Capsuhelic: 155
Vazão de filtração: 12,49 L/min	Vazão sonda isoc.: 224,8 ml/min
Massa filtro: 4,2329 g	Massa filtro + pó: 4,2608 g

Tabela F6-2 – Variação da queda de pressão com o tempo.

Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]
0	0	30	1,27	63	10,05
1	0	33	1,7	66	11,72
3	-0,05	36	2,02	69	13,12
6	-0,03	39	2,97	72	14,72
9	0,18	42	3,62	75	16,82
12	0,25	45	4,05	78	18,92
15	0,35	48	5,01	81	20,22
18	0,57	51	6,08	84	21,72
21	0,77	54	6,72	87	23,12
24	0,95	57	7,96	90	25,02
27	1,07	60	9,28		

Tabela F6-3 – Número de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas, para determinação da penetração.

Faixa dpA (APS)	0,52/4,21	4,21/5,23	5,23/6,04	6,04/8,05	8,05/20,32
dpS médio	2,32	2,71	3,26	3,95	5,75
E1	104.000	184.000	47.300	32.600	11.500
E2	92.700	140.000	35.000	24.200	8.550
E3	105.000	164.000	41.500	29.500	10.400
E4	120.000	175.000	44.000	31.600	11.600
S1	3.840	2.520	468	231	35
S2	3.610	2.250	401	180	36
S3	3.390	1.880	285	150	21
S4	3.750	2.160	350	165	39
S5	3.450	1.770	293	150	25
S6	3.510	1.720	279	153	27

Tabela F7-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 5 cm/s	Corona: -3 kV
Temperatura: 25 °C	Umidade do ar: 21 %
Turntable: 13; sentido: anti-horário	Capsuhelic: 155
Vazão de filtração: 5,20 L/min	Vazão sonda isoc.: 93,66 ml/min
Massa filtro: 4,2670 g	Massa filtro + pó: 4,2782 g

Tabela F7-2 – Variação da queda de pressão com o tempo.

Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]
0	0	30	0,4	63	1,75
1	0,02	33	0,48	66	1,99
3	0,03	36	0,58	69	2,19
6	0,04	39	0,68	72	2,48
9	0,06	42	0,79	75	2,59
12	0,07	45	0,85	78	2,8
15	0,09	48	1	81	2,97
18	0,15	51	1,14	84	3,14
21	0,21	54	1,28	87	3,5
24	0,3	57	1,51	90	3,92
27	0,35	60	1,63		

Tabela F7-3 – Número de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas, para determinação da penetração.

Faixa dpA (APS)	0,52/4,21	4,21/5,23	5,23/6,04	6,04/8,05	8,05/20,32
dpS médio	2,32	2,71	3,26	3,95	5,75
E1	127.200	184.200	37.900	25.700	8.540
E2	105.000	158.050	33.800	23.200	8.640
E3	121.000	163.500	38.100	27.160	9.130
E4	109.200	178.000	35.050	24.980	8.940
S1	6.010	3.860	738	344	53
S2	5.710	3.500	607	274	37
S3	5.820	3.690	658	272	42
S4	5.820	3.770	653	316	41
S5	5.520	3.490	556	245	30
S6	5.310	3.140	534	210	37

Tabela F8-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 8 cm/s	Corona: -3 kV
Temperatura: 28 °C	Umidade do ar: 24 %
Turntable: 13; sentido: anti-horário	Capsuhelic: 155
Vazão de filtração: 8,33 L/min	Vazão sonda isoc.: 150 ml/min
Massa filtro: 4,2374 g	Massa filtro + pó: 4,2580 g

Tabela F8-2 – Variação da queda de pressão com o tempo.

Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]
0	0	30	0,66	63	3,77
1	0	33	0,83	66	3,96
3	-0,02	36	0,94	69	4,56
6	0,02	39	1,24	72	4,92
9	0,08	42	1,42	75	5,45
12	0,11	45	1,68	78	5,78
15	0,16	48	2,04	81	6,66
18	0,29	51	2,3	84	7,27
21	0,4	54	2,67	87	7,95
24	0,52	57	3,12	90	8,64
27	0,62	60	3,52		

Tabela F8-3 – Número de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas, para determinação da penetração.

Faixa dpA (APS)	0,52/4,21	4,21/5,23	5,236,04	6,04/8,05	8,05/20,32
dpS médio	2,32	2,71	3,26	3,95	5,75
E1	122.000	119.000	34.700	23.000	8.150
E2	136.000	128.000	55.500	38.800	14.400
E3	114.000	140.000	38.900	26.800	9.800
E4	124.000	143.000	35.600	24.200	9.080
S1	4.990	2.350	381	194	35
S2	5.020	2.150	336	180	32
S3	5.030	2.250	381	163	33
S4	5.130	2.190	363	151	21
S5	5.230	2.360	377	171	29
S6	5.290	2.470	419	191	32

Tabela F9-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 12 cm/s	Corona: -3 kV
Temperatura: 27 °C	Umidade do ar: 26 %
Turntable: 13; sentido: anti-horário	Capsuhelic: 155
Vazão de filtração: 12,49 L/min	Vazão sonda isoc.: 224,8 ml/min
Massa filtro: 4,4404 g	Massa filtro + pó: 4,4630 g

Tabela F9-2 – Variação da queda de pressão com o tempo.

Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]
0	0	30	1,15	63	8,21
1	0	33	1,38	66	8,71
3	0,04	36	1,59	69	10,21
6	0,02	39	1,99	72	11,21
9	0,11	42	2,36	75	13,11
12	0,21	45	2,81	78	14,71
15	0,34	48	3,41	81	16,01
18	0,56	51	4,11	84	17,81
21	0,75	54	4,72	87	19,21
24	0,88	57	5,71	90	21,21
27	1	60	7,09		

Tabela F9-3 – Número de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas, para determinação da penetração.

Faixa dpA (APS)	0,52/4,21	4,21/5,23	5,23/6,04	6,04/8,05	8,05/20,32
dpS médio	2,32	2,71	3,26	3,95	5,75
E1	111.000	185.000	42.900	29.200	11.200
E2	124.000	166.000	52.400	28.100	10.400
E3	159.000	141.000	58.700	40.600	15.700
E4	147.000	165.000	49.700	34.000	12.800
S1	5.830	3.340	595	273	35
S2	5.450	2.960	529	244	33
S3	5.770	2.600	438	204	25
S4	5.320	2.240	336	171	29
S5	5.280	2.060	365	126	24
S6	5.240	1.800	260	135	33

Tabela F10-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 5 cm/s	Corona: -6 kV
Temperatura: 26 °C	Umidade do ar: 23 %
Turntable: 13; sentido: anti-horário	Capsuhelic: 155
Vazão de filtração: 5,20 L/min	Vazão sonda isoc.: 93,66 ml/min
Massa filtro: 4,3506 g	Massa filtro + pó: 4,3587 g

Tabela F10-2 – Variação da queda de pressão com o tempo.

Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]
0	0	30	0,25	63	0,96
1	-0,01	33	0,31	66	0,97
3	-0,02	36	0,36	69	1,01
6	0,04	39	0,45	72	1,06
9	0,01	42	0,52	75	1,14
12	0,02	45	0,59	78	1,26
15	0,06	48	0,65	81	1,36
18	0,12	51	0,73	84	1,45
21	0,19	54	0,8	87	1,66
24	0,21	57	0,85	90	1,76
27	0,21	60	0,92		

Tabela F10-3 – Número de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas, para determinação da penetração.

Faixa dpA (APS)	0,52/4,21	4,21/5,23	5,23/6,04	6,04/8,05	8,05/20,32
dpS médio	2,32	2,71	3,26	3,95	5,75
E1	88.400	118.000	27.300	18.000	6.040
E2	88.800	117.000	26.900	18.000	6.190
E3	108.000	142.000	33.700	23.200	8.310
E4	142.000	153.000	35.100	23.900	8.690
S1	3.890	1.360	228	135	25
S2	3.870	1.300	222	140	23
S3	4.210	1.480	267	141	33
S4	4.120	1.460	233	128	26
S5	4.620	1.370	239	123	30
S6	4.740	1.510	235	165	23

Tabela F11-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 8 cm/s	Corona: -6 kV
Temperatura: 27 °C	Umidade do ar: 26 %
Turntable: 13; sentido: anti-horário	Capsuhelic: 155
Vazão de filtração: 8,33 L/min	Vazão sonda isoc.: 150 ml/min
Massa filtro: 4,0238 g	Massa filtro + pó: 4,0442 g

Tabela F11-2 – Variação da queda de pressão com o tempo.

Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]
0	0	30	0,79	63	3,48
1	0	33	0,89	66	3,87
3	-0,01	36	1,03	69	4,4
6	0,03	39	1,28	72	4,74
9	0,06	42	1,54	75	5,26
12	0,11	45	1,8	78	5,54
15	0,17	48	2,07	81	6,35
18	0,28	51	2,34	84	7,04
21	0,48	54	2,63	87	7,66
24	0,62	57	3,02	90	8,21
27	0,7	60	3,29		

Tabela F11-3 – Número de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas, para determinação da penetração.

Faixa dpA (APS)	0,52/4,21	4,21/5,23	5,23/6,04	6,04/8,05	8,05/20,32
dpS médio	2,32	2,71	3,26	3,95	5,75
E1	105.000	146.000	35.700	25.400	8.450
E2	118.000	158.000	41.000	31.200	11.900
E3	111.000	127.000	38.300	21.700	8.600
E4	89.200	129.000	26.800	22.100	7.400
S1	0,0463	0,0096	0,0060	0,0037	0,0024
S2	0,0423	0,0106	0,0074	0,0059	0,0053
S3	0,0423	0,0117	0,0086	0,0071	0,0037
S4	0,0422	0,0125	0,0089	0,0070	0,0040
S5	0,0504	0,0130	0,0095	0,0068	0,0037
S6	0,0532	0,0144	0,0095	0,0074	0,0032

Tabela F12-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 12 cm/s	Corona: -6 kV
Temperatura: 25 °C	Umidade do ar: 25 %
Turntable: 13; sentido: anti-horário	Capsuhelic: 155
Vazão de filtração: 12,49 L/min	Vazão sonda isoc.: 224,8 ml/min
Massa filtro: 4,1208 g	Massa filtro + pó: 4,1447 g

Tabela F12-2 – Variação da queda de pressão com o tempo.

Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]	Tempo [min]	DP [mm c.a.]
0	0	30	2,02	63	11,71
1	-0,01	33	2,26	66	12,61
3	-0,04	36	2,51	69	13,71
6	0,06	39	3,46	72	14,51
9	0,21	42	4,03	75	16,31
12	0,33	45	4,87	78	17,71
15	0,51	48	5,47	81	18,51
18	0,79	51	6,93	84	19,81
21	1,2	54	8,47	87	20,61
24	1,66	57	10,01	90	21,31
27	1,75	60	10,61		

Tabela F12-3 – Número de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas, para determinação da penetração.

Faixa dpA (APS)	0,52/4,21	4,21/5,23	5,23/6,04	6,04/8,05	8,05/20,32
dpS médio	2,321	2,7	3,26	3,95	5,75
E1	128.000	159.000	35.600	24.200	9.080
E2	127.000	128.000	59.700	38.800	14.400
E3	126.000	140.000	38.900	26.800	9.800
E4	123.000	143.000	34.700	25.000	8.150
S1	4.280	1.690	380	177	23
S2	4.120	2.040	327	154	29
S3	4.270	1.990	381	158	29
S4	3.940	1.770	336	180	34
S5	4.860	1.830	308	173	33
S6	3.780	1.750	363	152	21

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)