

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

**ESTUDO DO MECANISMO ELETROFORÉTICO DE COLETA NA FILTRAÇÃO
DE AEROSSÓIS**

Rafael Lopes Seabra de Mello

SÃO CARLOS – SP

2007

**ESTUDO DO MECANISMO ELETROFORÉTICO DE COLETA NA FILTRAÇÃO
DE AEROSSÓIS**

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

**ESTUDO DO MECANISMO ELETROFORÉTICO DE COLETA NA FILTRAÇÃO
DE AEROSSÓIS**

Rafael Lopes Seabra de Mello

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

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Silveira Gonçalves

Co-orientador: Prof. Dr. José Renato Coury

SÃO CARLOS – SP

2007

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

M527em

Mello, Rafael Lopes Seabra de.

Estudo do mecanismo eletroforético de coleta na filtração de aerossóis / Rafael Lopes Seabra de Mello. -- São Carlos : UFSCar, 2007.

122 f.

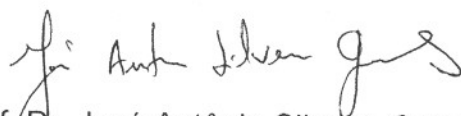
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2007.

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

CDD: 660.294515 (20^º)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **RAFAEL LOPES SEABRA DE MELLO**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 18 DE MAIO DE 2007.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. José Antônio Silveira Gonçalves
Orientador, PPG-EQ/UFSCar



Prof. Dr. José Renato Coury
Co-orientador, PPG-EQ/UFSCar



Dr. Marcos Vinicius Rodrigues
FEQ/UFU-DEQ/UFSCar



Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini
UNAERP

Dedico este
trabalho ao
TJ

AGRADECIMENTOS

Cada palavra escrita neste trabalho conta, direta ou indiretamente, com a colaboração de inúmeras pessoas que profundamente inspiraram e auxiliaram o desenvolvimento desta obra. Destino minha eterna gratidão:

Principalmente a minha mãe e a meu irmão, sem os quais não teria a sólida estrutura familiar, o amor e o exemplo necessários para todos os dias de minha vida.

A meu pai, a minha avó, à Palmira, a minhas tias e tios, e a meus primos pelo carinho e motivação despendidos ao longo desta empreitada.

Ao TJ, por toda alegria que demonstra sempre que nos vemos e pelos inesquecíveis momentos de companheirismo incondicional.

Aos professores José Antônio Silveira Gonçalves e José Renato Coury, pela oportunidade, orientação, incentivo e, principalmente, pela compreensão nos difíceis momentos que passei durante esta jornada.

Ao Marcos Vinícius Rodrigues, por todo material bibliográfico e experimental, pelos ensinamentos e, sobretudo, por toda atenção a mim conferida.

À Maria Rita, por estar sempre do meu lado, por incansavelmente me ajudar a me livrar de minhas angústias e por sempre me motivar a crescer como pessoa.

Aos meus amigos, conhecidos em São Carlos e em Santos, pelas coisas sérias e pelas bobagens que conversamos, pelas risadas, pelos conselhos e, principalmente, pela camaradagem durante todos estes anos.

Aos médicos que cuidam da minha saúde e me auxiliam sempre que necessito: Dr^a. Nair Cléa da Fonseca, Dr. Alex Baeta, Dr^a. Silvana de Oliveira e Dr^a. Maria Cecília.

Aos colegas do Laboratório de Controle Ambiental, por terem me recebido tão bem e pela ajuda oferecida em vários momentos.

Desejo também agradecer, pelo apoio financeiro e pela infra-estrutura, à FAPESP, ao CNPq e ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos.

Enfim, pode ser apenas o meu nome que aparece na autoria deste trabalho, mas certamente foram muitas e fundamentais as contribuições que culminaram em sua realização.

A todos que me auxiliaram e lutaram comigo neste desafio, meu muito obrigado!

“Torna-te quem tu és”
(Friedrich Nietzsche)

RESUMO

Trabalhos anteriores evidenciaram que 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. Mais recentemente, no grupo de pesquisa de controle ambiental do Departamento de Engenharia Química da UFSCar, Rodrigues (2005) realizou estudos experimentais envolvendo a filtração, em feltro de polipropileno, de um aerosol contendo partículas de rocha fosfática eletricamente carregadas e verificou a influência deste carregamento na eficiência de coleta e na queda de pressão do processo. Este trabalho tem como objetivo aprofundar o estudo teórico sobre os experimentos desenvolvidos por Rodrigues (2005). Foi analisada a trajetória das partículas durante a filtração, verificando-se o grau de contribuição de cada mecanismo de coleta atuante no processo. Foi proposto um modelo matemático para o cálculo da eficiência de coleta do mecanismo eletroforético que melhor se ajustou aos valores experimentais de penetração da partícula no filtro em função de seu tamanho.

Palavras-chave: Aerosol, Filtração, Forças eletrostáticas, Filtros fibrosos.

ABSTRACT

Previous works have shown that the presence of electrostatic forces in particles significantly affect the performance of a filter, both increasing collection efficiency and reducing pressure drop. Recently, in the Environmental Control research group of the Chemical Engineering Department of UFSCar, Rodrigues (2005) have studied the filtration of electric charged phosphate rock particles in polypropylene filter, observing the influence of the charge acquired by the particles in collection efficiency and pressure drop. The aim of the present work is to analyze the particle trajectory during filtration and the contribution level of each collect mechanism present in the process, in order to theoretically detail the results obtained by Rodrigues (2005) and propose a model for the electrophoretic mechanism of collection that better fit in experimental data.

Keywords: Aerosol, Filtration, Electrostatics forces, Fibrous filters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação do mecanismo difusional.	28
Figura 2.2 – Representação do mecanismo de interceptação direta.	31
Figura 2.3 – Representação do mecanismo inercial.	32
Figura 2.4 – Representação do mecanismo gravitacional.	35
Figura 2.5 – Representação do mecanismo eletroforético.	37
Figura 2.6 – Mecanismo eletroforético de dipolo-imagem no coletor (Coury, 1983).	38
Figura 2.7 – Atuação dos mecanismos de coleta na eficiência de um único coletor em função do diâmetro de partícula (Coury, 1983).	41
Figura 2.8 – Esquema da descarga corona negativa (Almeida, 2000).	44
Figura 2.9 – Filtro eletrostático com um eletrodo de bloqueio (Rodrigues, 2005).	47
Figura 2.10 – Esquema do Classificador de cargas eletrostáticas (Coury, 1983).	52
Figura 2.11 – Deflexão de uma partícula carregada com carga q submetida a um campo elétrico (Rodrigues, 2005).	53
Figura 3.1 – Fotografia do suporte de filtração utilizado (Rodrigues, 2005).	59
Figura 3.2 – Esquema do suporte de filtração utilizado; dimensões em centímetros (Rodrigues, 2005).	60
Figura 3.3 – Esquema do carregador corona; dimensões em centímetros (Rodrigues, 2005). .	62
Figura 3.4 – Vetores velocidade da partícula (\bar{v}), do fluido (\bar{u}) em coordenadas retangulares e o vetor diferença entre eles ($\bar{u} - \bar{v}$).	67
Figura 3.5 – Sentido do fluxo gasoso e eixo de coordenadas cartesianas adotado.	70
Figura 3.6 – Exemplo de gráfico desenvolvido pela simulação computacional no qual a partícula não é coletada pela fibra.	77
Figura 3.7 – Exemplo de gráfico desenvolvido pela simulação computacional no qual a partícula é coletada pela fibra.	77
Figura 3.8 – Representação da trajetória limite no qual a partícula é coletada.	78
Figura 4.1 – $\eta_{E (exp)}$ em função do diâmetro de Stokes da partícula; Tensão corona aplicada = 0 kV.	81
Figura 4.2 – $\eta_{E (exp)}$ em função do diâmetro de Stokes da partícula; Tensão corona aplicada = - 3 kV.	81
Figura 4.3 – $\eta_{E (exp)}$ em função do diâmetro de Stokes da partícula; Tensão corona aplicada = - 6 kV.	82

Figura 4.4 – η_E em função do diâmetro de Stokes da partícula; Tensão corona aplicada = 0 kV.	84
Figura 4.5 – η_E em função do diâmetro de Stokes da partícula; Tensão corona aplicada = -3 kV.	84
Figura 4.6 – η_E em função do diâmetro de Stokes da partícula; Tensão corona aplicada = -6 kV.	85
Figura 4.7 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,05$ m/s; Tensão corona aplicada = 0 kV.	87
Figura 4.8 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,08$ m/s; Tensão corona aplicada = 0 kV.	87
Figura 4.9 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,12$ m/s; Tensão corona aplicada = 0 kV.	88
Figura 4.10 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,05$ m/s; Tensão corona aplicada = -3 kV.	88
Figura 4.11 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,08$ m/s; Tensão corona aplicada = -3 kV.	89
Figura 4.12 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,12$ m/s; Tensão corona aplicada = -3 kV.	89
Figura 4.13 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,05$ m/s; Tensão corona aplicada = -6 kV.	90
Figura 4.14 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,08$ m/s; Tensão corona aplicada = -6 kV.	90
Figura 4.15 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,12$ m/s; Tensão corona aplicada = -6 kV.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros de projeto mais utilizados na filtração de gases (Matteson, 1987)....	18
Tabela 2.2 – Parâmetros adimensionais para os mecanismos eletroforéticos (Coury, 1983). ...	39
Tabela 2.3 – Equações da carga da partícula em função do diâmetro de Stokes. (Rodrigues, 2005).	57
Tabela 3.1 – Análise química quantitativa do concentrado fosfático em porcentagem de óxidos.....	63

SIMBOLOGIA

A	Área de filtração	$[L^2]$
a_{er}	Aceleração da partícula no eixo radial causada pela força elétrica	$[Lt^{-2}]$
AP	Área projetada pelos coletores	$[L^2]$
$A_{projet,part.}$	Área projetada da partícula	$[L^2]$
b	Altura da área equivalente à seção transversal do fluxo de gás no qual as partículas colidem com o coletor	$[L]$
C	Número de partículas por unidade de volume do gás	$[n^{\circ}L^{-3}]$
C_D	Coefficiente de arraste da partícula	$[]$
D	Coefficiente de difusividade	$[L^2t^{-1}]$
d_c	Diâmetro do coletor	$[L]$
d_p	Diâmetro da partícula	$[L]$
d_{pA}	Diâmetro aerodinâmico da partícula	$[L]$
d_{pS}	Diâmetro de Stokes da partícula	$[L]$
E	Eficiência total do filtro	$[\%]$
E	Intensidade do campo elétrico	$[MLC^{-1}t^{-2}]$
E_x	Intensidade do campo elétrico na direção x	$[MLC^{-1}t^{-2}]$
F_d	Força de arraste da partícula	$[MLt^{-2}]$
F_e	Força elétrica	$[MLt^{-2}]$
F_{er}	Força elétrica na direção radial	$[MLt^{-2}]$
F_R	Força resultante na partícula	$[MLt^{-2}]$
F_S	Fator de escorregamento de Cunningham	$[]$
G	Aceleração da gravidade	$[Lt^{-2}]$
g_r	Aceleração da gravidade na direção radial	$[Lt^{-2}]$
g_x	Aceleração da gravidade na direção x	$[Lt^{-2}]$

g_y	Aceleração da gravidade na direção y	$[Lt^{-2}]$
g_θ	Aceleração da gravidade na direção theta	$[Lt^{-2}]$
H	Termo de probabilidade de adesão das partículas no coletor	[]
K_B	Constante de Boltzmann	$[ML^2t^{-2}T^{-1}]$
K_M	Parâmetro adimensional do mecanismo dipolo-imagem	[]
K_{nc}	Número de Knudsen relativo ao coletor	[]
K_{nP}	Número de Knudsen relativo à partícula	[]
Ku	Fator de Kuwabara	[]
L	Distância entre os eletrodos	[L]
L_f	Comprimento da fibra por unidade de volume	$[L^{-2}]$
m_p	Massa da partícula	[M]
N_C	Número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo	$[n^\circ t^{-1}]$
N_P	Número de partículas depositadas no coletor por unidade de tempo	$[n^\circ t^{-1}]$
NR	Parâmetro de interceptação	[]
P	Penetração	[]
P	Pressão	$[Mt^{-2}L^{-1}]$
Pe	Número de Peclet	[]
PG	Penetração global	[]
q	Carga elétrica da partícula	[C]
Q	Carga elétrica do coletor	[C]
r	Distância entre o centro da partícula e o centro do coletor	[L]
r_c	Raio do coletor	[L]
Re_c	Número de Reynolds do coletor	[]
Re_p	Número de Reynolds da partícula	[]

r_p	Raio da partícula	[L]
St	Número de Stokes	[]
T	Temperatura absoluta	[T]
Tc	Tensão corona aplicada	[ML ² C ⁻¹ t ⁻²]
U	Velocidade de filtração	[Lt ⁻¹]
U ₀	Velocidade do gás	[Lt ⁻¹]
u _r	Velocidade do fluido na direção radial	[Lt ⁻¹]
u _x	Velocidade do fluido na direção x	[Lt ⁻¹]
u _y	Velocidade do fluido na direção y	[Lt ⁻¹]
U _θ	Velocidade do fluido na direção theta	[Lt ⁻¹]
V	Velocidade intersticial do gás	[Lt ⁻¹]
V _P	Volume da partícula	[L ³]
v _r	Velocidade da partícula na direção radial	[Lt ⁻¹]
v _t	Velocidade terminal da partícula	[Lt ⁻¹]
v _x	Velocidade da partícula na direção x	[Lt ⁻¹]
v _y	Velocidade da partícula na direção y	[Lt ⁻¹]
V _θ	Velocidade da partícula na direção theta	[Lt ⁻¹]
X	Deflexão da partícula	[L]
Z	Espessura do meio filtrante	[L]
Z	Comprimento do eletrodo	[L]
Z _p	Eletromobilidade da partícula	[CtM ⁻¹]

Letras gregas

α	Coefficiente de resistência viscosa	[]
β	Fração volumétrica ocupada pelas fibras	[]

ΔP	Queda de pressão no filtro	$[Mt^{-2}L^{-1}]$
ΔV	Diferença de voltagem	$[ML^2C^{-1}t^{-2}]$
ε	Porosidade	[]
ε_C	Constante dielétrica da partícula	[]
ε_D	Constante dielétrica do coletor	[]
ε_F	Constante dielétrica do fluido	[]
ε_0	Permissividade do vácuo	$[t^2C^2M^{-1}L^{-3}]$
η	Eficiência de coleta	[%]
λ	Livre caminho médio molecular	[L]
μ	Viscosidade do gás	$[ML^{-1}t^{-1}]$
ρ_G	Densidade do gás	$[ML^{-3}]$
ρ_{H_2O}	Densidade da água	$[ML^{-3}]$
ρ_P	Densidade da partícula	$[ML^{-3}]$

Subscritos

D	Difusional
E	Eletroforética
EXP	Resultados experimentais
G	Gravitacional
I	Inercial
ID	Interceptação direta
SIM	Valores obtidos pela simulação computacional desenvolvida neste trabalho
T	Total
0	Estágio inicial

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	12
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. Filtração de gases	15
2.1.1. Motivação	15
2.1.2. Generalidades	16
2.1.3. Fundamentos básicos.....	18
2.1.4. Filtros.....	20
2.1.5. Eficiência do coletor, penetração e penetração global	21
2.1.6. Mecanismos de coleta.....	27
2.1.6.1. Mecanismo difusional	27
2.1.6.2. Mecanismo de interceptação direta	30
2.1.6.3. Mecanismo inercial	32
2.1.6.4. Mecanismo gravitacional.....	34
2.1.6.5. Mecanismo eletroforético	36
2.1.6.6. Coleta simultânea por vários mecanismos.....	40
2.2. Queda de pressão no filtro	41
2.3. Mecanismo de carregamento por corrente corona.....	42
2.3.1. Ionização do gás	43
2.3.2. Carregamento elétrico das partículas.....	44
2.4. Efeito de cargas eletrostáticas nos processos de limpeza de gases.....	45
2.5. Métodos para determinação de cargas eletrostáticas em partículas	50
2.5.1. Classificador de cargas eletrostáticas	53
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA UTILIZADA.....	58
3.1. Procedimento experimental e metodologia adotados por Rodrigues (2005).....	58
3.1.1. Suporte de filtração.....	58
3.1.2. Feltro de polipropileno	61
3.1.3. Equipamentos de medida.....	61
3.1.4. Carregador de partículas tipo corona.....	61
3.1.5. Rocha fosfática	62
3.1.6. Condições experimentais.....	63
3.2. Equações utilizadas para determinar as eficiências dos mecanismos de coleta presentes na filtração realizada por Rodrigues (2005).....	64

3.2.1. Eficiências teóricas de coleta dos mecanismos difusional, interceptação direta, inercial e gravitacional.....	64
3.2.2. Eficiência de coleta do mecanismo eletroforético.....	65
3.3. Análise das trajetórias das partículas.....	66
3.3.1. Equação para determinar a variação da velocidade da partícula com o tempo	66
3.3.1.1. Equacionamento considerando os mecanismos de coleta inercial e gravitacional	66
3.3.1.2. Adição do mecanismo eletroforético.....	72
3.3.1.3. Adição do mecanismo de interceptação direta	74
3.3.2. Equação para determinar a variação da distância partícula-coletor e do ângulo θ com o tempo.....	74
3.3.3. Implantação computacional do equacionamento matemático	75
3.3.4. Cálculo das eficiências de coleta pelo mecanismo eletroforético através da análise das trajetórias das partículas	78
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
4.1. Eficiências de coleta eletroforética calculadas a partir das penetrações experimentais obtidas por Rodrigues (2005).....	80
4.2. Eficiências de coleta eletroforética calculadas através de dados gerados pela simulação de trajetórias de partículas	83
4.3. Verificação do modelo computacional para determinação da eficiência do mecanismo eletroforético através do cálculo de penetração das partículas	86
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....	92
CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
APÊNDICES	100
<i>Apêndice A: Dados de determinação experimental da penetração de partículas no filtro (Rodrigues, 2005).</i>	100
<i>Apêndice B: Valores experimentais de penetração de partícula e resultados teóricos para a eficiência de coleta dos mecanismos presentes na filtração.</i>	113
<i>Apêndice C: Resultados obtidos por simulação computacional para a eficiência de coleta do mecanismo eletroforético.</i>	122

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A caracterização do comportamento de partículas sólidas em correntes gasosas tem se tornado uma necessidade importante na medida em que cresce a preocupação pela qualidade do ar atmosférico.

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 (Strauss, 1975): filtros tipo barreira (filtros de manga), filtros granulares, precipitadores eletrostáticos, ciclones, lavadores, etc.

No entanto, devido à 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, principalmente no que diz respeito à eliminação de partículas na faixa respirável ($d_p < 10 \mu\text{m}$).

Desse modo, o melhor conhecimento do processo de filtração e o desenvolvimento de modelos para uma melhor descrição deste fenômeno e suas etapas se tornam fundamentais para a construção de equipamentos mais compactos, com menor perda de carga e menos onerosos.

A separação de material particulado de uma corrente gasosa através da filtração é realizada pela ação conjunta de cinco mecanismos de coleta: difusão browniana, interceptação direta, coleta inercial, sedimentação gravitacional e deslocamento eletrostático.

É importante notar que a eficiência global de um filtro fibroso é fortemente dependente do movimento das partículas e da eficiência de coleta ao longo das fibras. Com esse fim, Kuwabara (1959) e Happel (1959) desenvolveram estudos sobre o campo de velocidade das partículas em torno das fibras coletoras considerando os efeitos das fibras adjacentes, trabalhos estes aceitos como fundamentais em muitos estudos teóricos sobre filtros fibrosos.

Baseados na abordagem de Kuwabara (1959), Stechkina e Fuchs (1966), Yeh e Liu (1974), Stenhouse (1975), Lee e Liu (1982), Liu e Rubow (1990), Payet (1992), Gougeon

(1994), entre outros, desenvolveram equações analíticas para o cálculo da eficiência de coleta para cada mecanismo de captura das partículas.

A área de pesquisa de controle ambiental do Departamento de Engenharia Química da UFSCar vem, há algum tempo, desenvolvendo estudos sobre filtração de gases (Coury et al., 1988; Coury e Duarte Filho, 1989, 1990; Duarte Filho et al., 1992, 1994 e 1995; Duarte Filho, 1995) e precipitadores eletrostáticos (Nóbrega et al., 2001, 2004; Nóbrega, 2002; Falaguasta, 2001), assim como trabalhos recentes sobre a coleta de partículas nanométricas (Falaguasta, 2005; Steffens, 2007).

Em particular, a presença de cargas eletrostáticas nas partículas a serem removidas por filtros é interesse de estudo por ser um fator que contribui para o desempenho do meio filtrante (Coury, 1983; Shapiro et al., 1988; Tardos et al., 1990). No entanto, o mecanismo de coleta eletrostática precisa ser mais bem entendido (Saxena e Swift, 1978; Clift, 1983; Coury, 1986; Tien, 1989; Duarte Filho, 1995).

Duarte Filho (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 em geral provocou uma diminuição na diferença de pressão no leito e na eficiência global do filtro, que passaram por um valor mínimo para, em seguida, aumentarem novamente. Foi também constatado 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 de uma gaiola de Faraday que envolvia o filtro.

Estudos preliminares relacionam 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 adquire carga positiva e parte carga 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.

Duarte Filho (1995), por ter trabalhado com um aspecto experimental bastante complexo e pouco estudado, apresentou 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 fortes 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 uma melhor caracterização da distribuição de cargas eletrostáticas entre as partículas.

Visando 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). Este equipamento é capaz de fornecer a carga da partícula em função de seu deslocamento ao adentrar uma região sob ação de um campo elétrico. O CCE foi também testado com partículas carregadas em diversas condições experimentais (Almeida, 2000) que comprovaram sua aplicabilidade no estudo de cargas eletrostáticas em aerossóis. Seguindo o passo de melhorias no CCE, Rodrigues (2005) automatizou o sistema de operações do equipamento, o que permitiu o aumento da precisão e facilidade operacional para a obtenção da distribuição de cargas eletrostáticas para vários materiais particulados em função do diâmetro de partícula em seu estudo experimental da filtração de partículas eletricamente carregadas em filtros fibrosos.

Diante deste contexto, este trabalho tem como objetivos:

- Analisar teoricamente os resultados obtidos por Rodrigues (2005) na filtração de partículas de rocha fosfática eletricamente carregadas, avaliando o grau de contribuição de cada mecanismo de coleta segundo o tamanho da partícula coletada;
- A partir da análise da trajetória das partículas, propor um modelo computacional para a eficiência de coleta do mecanismo eletroforético.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Filtração de gases

2.1.1. Motivação

A crescente preocupação mundial com as condições do meio ambiente torna imprescindível o desenvolvimento de equipamentos eficientes para remoção de poluentes atmosféricos e para diminuição de emissões industriais prejudiciais ao ser humano. Em especial, a sociedade preocupa-se com as condições globais do ar respirável, sendo a crescente emissão de pó na atmosfera um dos principais fatores de motivação para pesquisas nessa área.

Pó (material particulado) pode ser caracterizado como um conjunto de partículas sólidas, comuns na atmosfera, provenientes das mais variadas formas, como vento, erupções vulcânicas ou terremoto e atividades humanas, por processos que incluem: moenda, demolição, escavamentos, peneiramento, lançamentos industriais, entre outros.

A presença excessiva de partículas na atmosfera é responsável por vários problemas na saúde da população a ela submetida, principalmente em grandes centros urbanos, onde as emissões de poluentes advindos de indústrias e automóveis aumentam a quantidade de partículas lançadas ao ar. As principais causas de efeitos adversos do lançamento de pó no ar são (CDCC/USP São Carlos, 2005):

- Capacidade do sistema respiratório de remover as partículas no ar inalado, retendo-as nos pulmões;
- Presença, nas partículas, de substâncias minerais que possuam propriedades tóxicas;
- Presença de partículas de compostos orgânicos, que possuem propriedades carcinogênicas;
- Capacidade das partículas finas de aumentar os efeitos fisiológicos de gases irritantes também presentes no ar ou de catalisar e transformar quimicamente estes gases, criando espécies mais nocivas.

Desse modo, sendo crescente o risco epidemiológico em grandes populações submetidas à baixa qualidade do ar respirável, assim como outros efeitos danosos ao ambiente, a filtração, processo comumente utilizado para a limpeza de efluentes, há tempos é objeto de investimento tecnológico e estudo científico.

2.1.2. Generalidades

Filtração é a separação de partículas sólidas contidas em um fluido (líquido ou gás) pela passagem da mistura sólido-fluido através de um meio poroso, sobre o qual se deposita a maioria do sólido (McCabe, 1993; Perry e Green, 1984). Desse modo, a filtração de um gás é realizada pela passagem do aerosol através do meio filtrante, sendo as partículas retidas no filtro ao longo do processo em curso.

É comum nesta operação o emprego do termo suspensão para a mistura sólido-fluido a ser separada, que pode conter partículas separadas ou agregadas, rígidas ou plásticas, arredondadas ou alongadas. Da mesma forma, denomina-se torta a massa formada pelas partículas sólidas retidas pelo meio filtrante, podendo ser permeável ou pouco permeável (gelatinosa), incompressível ou compressível. Por fim, emprega-se o termo filtrado para o fluido que percola a torta e o meio filtrante, na maioria das vezes sendo este o fluido objetivo da purificação.

São vários os mecanismos de coleta responsáveis pela retenção das partículas no meio filtrante. Sendo uma operação contínua, as partículas chocam-se com as partículas previamente coletadas no filtro, formando-se a torta de filtração, que pode se transformar no principal elemento coletor. Este processo continua até que a queda de pressão através do sistema exceda valores estáveis de operação (Donovan, 1985).

A grande maioria dos coletores de partículas industriais foi desenvolvida para aplicações específicas e sem qualquer relação com a teoria. Como consequência, são inúmeros os tipos de equipamentos para esse fim utilizados nas indústrias (CDCC/USP São Carlos):

- Coletor gravitacional (para partículas entre 1 mm a 100 μm);
- Ciclones (para partículas entre 1 mm a 10 μm);
- Multiciclones (para partículas entre 1 mm a 5 μm);

- Lavadores de gases (para partículas entre 1 mm a menores que 0,1 μm);
- Filtros de mangas (para partículas entre 1 mm a menores que 0,1 μm);
- Precipitadores eletrostáticos (para partículas entre 100 μm a menores que 0,01 μm).

A classificação dos filtros e da filtração pode ser feita de várias maneiras (Fleming & Dahlstron, 1963):

- Pelo mecanismo da filtração. São dois os mecanismos: a) filtração com formação de torta e b) filtração com os sólidos retidos dentro dos poros do meio filtrante;
- Pela função. A filtração pode ter como objetivo o sólido e/ou o filtrado;
- Pelo ciclo de operação. Podem operar em batelada (intermitentes, recomendado para aplicações onde são permitidas paradas periódicas do sistema de filtragem para limpeza dos elementos filtrantes) ou de forma contínua (indicado para aplicações onde o processo exige uma operação contínua dos filtros, devido a emissões constantes de pó, necessitando, assim, a limpeza dos elementos filtrantes sem interrupção do funcionamento do sistema de exaustão);
- Pela natureza dos sólidos. A torta formada pode conter sólidos indeformáveis (incompressíveis) e/ou sólidos deformáveis (compressíveis).

Para evitar o acúmulo de particulados no elemento filtrante, este passa por um processo de limpeza para o desalojamento do pó em sua superfície, evitando-se, assim, a sua saturação. Esta operação pode ser efetuada com ou sem a interrupção da operação de filtragem, sendo vários os mecanismos de limpeza, escolhido segundo as características do pó a ser manipulado e do material do elemento filtrante (Sinto Brasil Produtos Ltda., 2005):

- Vibração mecânica. Uma válvula tipo *damper* isola o compartimento e os filtros são agitados por um mecanismo acionado por um eixo excêntrico, desalojando o pó. Quando todo o material particulado se deposita no silo, este compartimento volta à operação;
- Ar reverso. Uma válvula tipo *damper* isola o compartimento e o ar é soprado, revertendo o fluxo de ar no coletor. Este fluxo de ar reverso desaloja o pó dos filtros e o força para o silo, voltando, então, o compartimento a operar no sistema de filtragem;

- Ar pulsante. Um pulso de ar comprimido, ativado através de uma válvula acionada por solenóide, é injetado dentro dos elementos filtrantes numa seqüência programada.

A filtração, assim, caracteriza-se por um processo cíclico e contínuo, constituído por etapas de coleta e limpeza do filtro.

2.1.3. *Fundamentos básicos*

O desenvolvimento de um filtro tem como objetivo atingir a eficiência de coleta desejada para um dado tamanho de partícula a ser capturado e um limite de queda de pressão máximo durante a operação. Desse modo, em um processo de filtração, os parâmetros de projeto mais importantes tornam-se a velocidade superficial do gás, a queda de pressão no filtro, o tipo de meio filtrante, a concentração de pó e a eficiência de coleta. Os valores de operação mais comuns para estes parâmetros estão apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Parâmetros de projeto mais utilizados na filtração de gases (Matteson, 1987).

Velocidade do gás (U)	0,5 a 5 m/min
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%

Além destes parâmetros citados, a porosidade da torta de filtração, que é dependente da morfologia do depósito formado e das variáveis de operação, e a temperatura de filtração são propriedades fundamentais para o projeto de filtros.

A porosidade da torta atua tanto na queda de pressão do sistema durante a operação quanto na força necessária para remover a torta de pó no processo de limpeza do filtro (Silva Neto et al., 2002).

Quanto à temperatura de operação, Freitas (2004), utilizando filtros cerâmicos de dupla camada para a filtração de aerossóis a 25 e 700°C, mostrou que a eficiência global de coleta diminui com o aumento de temperatura. As razões apontadas para tal comportamento são diversas. Pode-se afirmar que o aumento da temperatura provoca alterações nas propriedades do gás (diminuição da densidade e aumento da viscosidade) que alteram a capacidade de remoção do filtro. Por outro lado, o aumento da temperatura causa também uma mudança estrutural no meio poroso devido à expansão térmica. Essa alteração, embora em pequena magnitude, pode ter efeitos consideráveis na capacidade de remoção do filtro.

Pode-se definir um processo de filtração como estacionário ou não-estacionário. Em um processo estacionário, uma vez que a partícula a ser coletada entra em contato com a fibra do elemento filtrante, ela permanece retida, não influenciando novas partículas que se depositam no filtro. Este tipo de filtração, que pode ocorrer, de forma prática nos estágios iniciais da filtração e a baixas concentrações de partículas que chegam ao coletor, tem eficiência de coleta e queda de pressão do filtro independentes do tempo.

Entretanto, o processo de filtração é muito mais complexo. As partículas, ao se depositarem, podem ficar separadas das fibras devido à ação de diferentes forças que atuam durante a filtração, podendo, ainda, modificar a forma geométrica do coletor.

Na realidade, conforme o processo de filtração ocorre, o meio filtrante é submetido a uma contínua mudança em sua estrutura com o acúmulo de partículas depositadas. Nos estágios iniciais do processo, as partículas depositam-se no filtro limpo, sendo que, com o passar do tempo, a coleta começa a ser realizada sobre as partículas previamente capturadas no filtro. Nesta última etapa já está formada a torta de filtro, sendo que, em filtros puramente mecânicos, a coleta de partículas tem sua eficiência aumentada com a presença da torta (Brown e Wake, 1999). Esta mudança resulta em um comportamento transiente da capacidade do filtro em coletar partículas, assim como da queda de pressão necessária para manter o fluxo desejado de alimentação de gás.

Assume-se que as partículas se depositam na superfície das fibras em arranjos aleatórios denominados dendritos, que se comportam como novas fibras coletoras com diâmetro igual ao das partículas previamente coletadas. Pode-se, então, considerar cada etapa como uma separação gás-sólido distinta: uma caracterizada pela coleta de partículas realizada pelas fibras do filtro, estacionária; outra caracterizada pela coleta realizada pelas partículas previamente capturadas, transiente (Thomas et al., 1999).

2.1.4. Filtros

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

- Fibras individuais emaranhadas frouxamente dentro de um enchimento;
- Material granular em leito fixo ou fluidizado;
- Fibras, tecidas ou feltradas, dentro de uma estrutura, sendo utilizada no formato cilíndrico (manga).

Todos estes filtros possuem altos valores de eficiência de coleta com aceitáveis valores de tempo de limpeza e queda de pressão. A principal limitação para a escolha do filtro está relacionada com o material constituinte do meio filtrante, sendo necessário baixo custo e boa vida útil sob as condições de operação a que será submetido.

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

- Ser suficientemente poroso para permitir uma satisfatória vazão de ar a uma queda de pressão compatível com o processo;
- Resistir às forças de tensão causadas pela pressão diferencial, 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 uma textura de superfície que favoreça uma rápida liberação da torta durante a limpeza. Isto pode ser contraditório, pois a superfície tem que reter a torta durante a filtração.

2.1.5. Eficiência do coletor, penetração e penetração global

A eficiência de coleta de um filtro depende do tamanho das partículas a serem capturadas e das propriedades das fibras coletoras e da corrente de gás a ser filtrada. Quando resultados teóricos são comparados com dados experimentais é importante saber como variações nas condições da corrente de gás e nas propriedades das partículas podem mudar a eficiência, pois a incerteza sobre sua densidade, por exemplo, também causa incertezas na determinação da eficiência do coletor (Spurny, 1998).

Considere uma corrente de aerosol a uma velocidade U e concentração C_0 , escoando perpendicularmente a uma fina seção fibrosa de espessura dZ e área A . A espessura dZ deve ser muito maior que o diâmetro da fibra, porém fina 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, AP , pode ser representada pela multiplicação do diâmetro da fibra pelo seu comprimento, como mostrado na Equação 2.2.

$$AP = d_c \cdot L_f \cdot A \cdot dZ \quad (2.2)$$

onde: d_c é o diâmetro das fibras coletoras.

A eficiência total de coleta de cada elemento filtrante incluindo todos os mecanismos de coleta para fibra embutida do filtro, η_T , pode ser representada pela Equação 2.3.

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

O número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo, N_P , pode ser expresso pela Equação 2.4.

$$N_P = C \cdot v \cdot d_c \cdot L_f \cdot A \cdot dZ \quad (2.4)$$

onde: C é a concentração (número de partículas por unidade de volume do gás);

v é a velocidade intersticial do gás, dada pela Equação 2.5.

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

onde: U é a vazão da suspensão por unidade de área, ou velocidade superficial;

ε é 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 pela Equação 2.6 (Dullien, 1989).

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

onde: $-dC$ representa a mudança nas concentrações das suspensões que entram e deixam a seção;

U.A é a vazão de gás.

Substituindo-se as Equações 2.4 e 2.6 em 2.3, tem-se a Equação 2.7.

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

Considerando-se $C = C_0$ para $Z = 0$ e $C = C_E$ para $Z = Z$ e integrando-se a Equação 2.7, tem-se a Equação 2.8.

$$\ln \frac{C_E}{C_0} = -\frac{\eta_T \cdot L_f \cdot d_c \cdot Z}{\varepsilon} \quad (2.8)$$

A fração volumétrica ocupada pelas fibras, β , pode ser descrito pela Equação 2.9.

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

O volume total da seção é constituído pela soma da fração volumétrica ocupada pelas fibras mais fração volumétrica de vazios, ε , conforme mostrado na Equação 2.10.

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

Substituindo-se as Equações 2.9 e 2.10 em 2.8, tem-se a Equação 2.11.

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

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, conforme a Equação 2.12.

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

onde: Z é a espessura do meio filtrante;

ε é a sua porosidade;

η_T é a eficiência total de coleta de cada elemento filtrante.

Sabendo-se que partículas grandes podem ricochetear das fibras em altas velocidades de filtração, adiciona-se à Equação 2.12 um termo de probabilidade de adesão das partículas na fibra coletora, h, desenvolvido por Ptak e Jaroszczyk (1990) após estudo do ricocheteio de partículas de vários materiais minerais em filtros fibrosos. A expressão de probabilidade de adesão das partículas é dada pela Equação 2.13.

$$h = \frac{190}{\left(\frac{18 \cdot St^2}{\left(\frac{d_p}{d_c}\right)}\right)^{0,68} + 190} \quad (2.13)$$

onde: d_p é o diâmetro da partícula;

O número de Stokes, St, pode ser calculado pela expressão demonstrada na Equação 2.14.

$$St = \frac{\rho_P \cdot d_P^2 \cdot U \cdot F_S}{18 \cdot \mu \cdot d_c} \quad (2.14)$$

onde: ρ_P é a densidade da partícula;

μ é a viscosidade do gás;

F_S é 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 (1945) apud Coury (1983), é dado pela Equação 2.15.

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

onde: K_{np} é o número de Knudsen relativo à partícula, definido como a razão entre o livre caminho médio molecular no gás, λ , e o raio da partícula, r_P , de acordo com a Equação 2.16.

$$K_{np} = \frac{\lambda}{r_P} \quad (2.16)$$

Pode-se, também, definir o número de Knudsen relativo à fibra coletora, K_{nC} , calculado segundo a Equação 2.17.

$$K_{nC} = \frac{\lambda}{r_C} \quad (2.17)$$

onde: r_C é o raio da fibra coletora.

No caso do fluido ser o ar, o livre caminho médio molecular do gás pode ser calculado segundo a Equação 2.18.

$$\lambda = 2,15 \cdot 10^{-4} \cdot \mu \cdot P \cdot T^{0,5} \quad (2.18)$$

onde: P é a pressão, em bar;

μ é a viscosidade do ar, em kg/m.s;

T é a temperatura absoluta, em Kelvin.

Adicionando-se o termo de probabilidade de adesão das partículas, dado pela Equação 2.13, à Equação 2.12, a eficiência total do filtro pode ser calculada conforme mostra a Equação 2.19.

$$E = 1 - P = 1 - \exp\left[-\frac{4 \cdot Z \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \eta_T \cdot h}{\pi \cdot \varepsilon \cdot d_c}\right] \quad (2.19)$$

De acordo com a Equação 2.19, a concentração de partículas na corrente gasosa que atravessa o filtro decai exponencialmente com o aumento da espessura do filtro, Z, com o aumento da eficiência 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 da fibra coletora, 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 Filho, 1995). Portanto, P é função das características do aerosol 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 mostra a Equação 2.20.

$$PG = \frac{\text{massa total de partículas que penetram através do leito}}{\text{massa total de partículas que entram no leito}} \quad (2.20)$$

2.1.6. 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 devido à combinação de vários mecanismos de coleta: difusão, interceptação direta, inercial, gravitacional e eletroforético.

A dinâmica para a coleta e deposição das partículas nas fibras é fortemente ligada ao mecanismo de captura. Quando os mecanismos inercial e/ou gravitacional são dominantes, as partículas coletadas tendem a se acumular na entrada do filtro. Quando a interceptação direta é o mais significativo, as partículas são capturadas em sua maioria nas laterais das fibras. Já para os mecanismos eletroforético e difusão, o acúmulo de partículas nas fibras ocorre de forma aleatória (Kanaoka et al., 1986).

Por ser simples e permitir a obtenção de expressões analíticas a partir dos campos de velocidade ao redor da fibra, a teoria de Kuwabara (1959), no qual uma única fibra é estudada levando em consideração os efeitos das fibras adjacentes, é o modelo mais usado para a determinação de equações matemáticas para o cálculo das eficiências de coleta de cada mecanismo (Spurny, 1998).

2.1.6.1. *Mecanismo difusional*

O mecanismo difusional resulta do movimento browniano (aleatório) a que as partículas de pequeno diâmetro estão sujeitas em um gás, como representado na Figura 2.1. Ocorre, predominantemente, em partículas submicrômicas 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 coeficiente de difusividade é calculado pela Equação 2.21.

$$D = \frac{K_B \cdot T \cdot F_s}{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p} \quad (2.21)$$

onde: K_B é a constante de Boltzmann.

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 um 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.

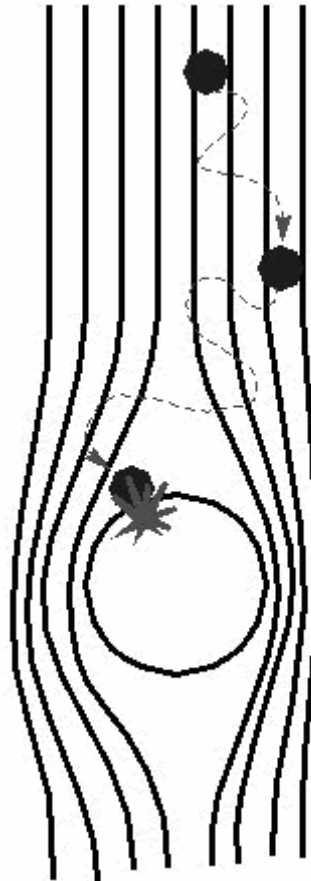


Figura 2.1 – Representação do mecanismo difusional.

Existe um consenso geral de que a eficiência de coleta por difusão, η_D , é proporcional ao fator de Kuwabara, Ku , elevado a $-1/3$ e ao número de Peclet, Pe , elevado a $-2/3$. As expressões para o cálculo de Ku e Pe são exibidas nas Equações 2.22 e 2.23, respectivamente.

$$Ku = -0,5 \ln(1 - \varepsilon) - 0,75 + (1 - \varepsilon) - 0,25 \cdot (1 - \varepsilon)^2 \quad (2.22)$$

$$Pe = \frac{U \cdot d_c}{D} \quad (2.23)$$

onde: D é o coeficiente de difusividade.

Lee e Liu (1982), utilizando uma teoria de camada limite associada aos trabalhos de Kuwabara (1959), desenvolveram a expressão analítica para a determinação de η_D exibida na Equação 2.24.

$$\eta_D = 1,6 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right)^{1/3} \cdot Pe^{-2/3} \quad (2.24)$$

A correlação semi-empírica mostrada na Equação 2.24 é aplicável a regimes contínuos, caracterizada por números de Knudsen relativo à fibra coletora, K_{nc} , pequenos. Quando o diâmetro do coletor é da mesma magnitude do livre caminho médio molecular do gás, λ , o efeito de escorregamento, causado pela descontinuidade do fluxo ao redor da fibra, deve ser levado em consideração no cálculo da eficiência de coleta pelo mecanismo difusional.

Baseado no trabalho de Pich (1966), Lee e Liu (1982) corrigiram o modelo inicial contando com a restrição do efeito de escorregamento. A expressão proposta por eles é demonstrada na Equação 2.25.

$$\eta_D = 1,6 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right)^{1/3} \cdot Pe^{-2/3} \cdot C_d \quad (2.25)$$

onde: C_d é o fator de correção para o efeito de escorregamento para difusão browniana, dado pela Equação 2.26.

$$C_d = 1 + 0,388 \cdot K_{nC} \cdot \left(\frac{\varepsilon \cdot Pe}{Ku} \right)^{1/3} \quad (2.26)$$

Utilizando o modelo de Lee e Liu (1982) em seus dados experimentais, Payet (1991) notou que o valor de η_D dado pela Equação 2.26 pode exceder a unidade em baixos números de Peclet. O autor propôs, então, uma modificação na expressão analítica para se ter $\eta_D < 1$ para partículas muito finas (Payet et al., 1992). Esta modificação para o cálculo de η_D é mostrada na Equação 2.27.

$$\eta_D = 1,6 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right)^{1/3} \cdot Pe^{-2/3} \cdot C_d \cdot C_d'' \quad (2.27)$$

onde: C_d'' é dado pela Equação 2.28.

$$C_d'' = \frac{1}{1 + 1,6 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right)^{1/3} \cdot Pe^{-2/3} \cdot C_d} \quad (2.28)$$

2.1.6.2. Mecanismo de interceptação direta

Interceptação direta resulta do tamanho relativo entre partícula e coletor no filtro, conforme representado na Figura 2.2. 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 ($NR = d_p/d_c$).

Lee e Liu (1982) desenvolveram, para o cálculo da eficiência de coleta pelo mecanismo de interceptação direta, η_{ID} , a seguinte expressão mostrada na Equação 2.29.

$$\eta_{ID} = 0,6 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right) \cdot \frac{NR^2}{(1 + NR)} \quad (2.29)$$

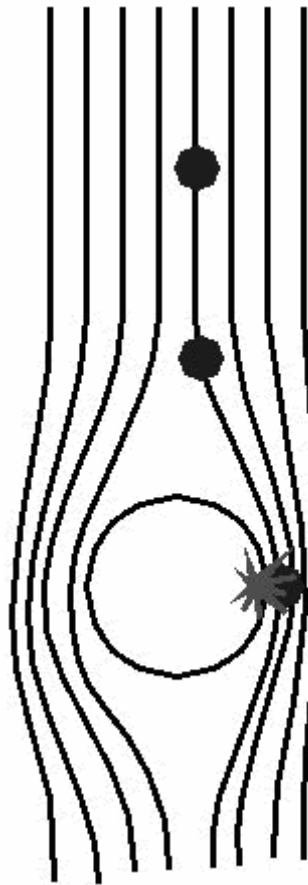


Figura 2.2 – Representação do mecanismo de interceptação direta.

O trabalho de Lee e Liu (1982) foi revisto por Liu e Rubow (1990), que propuseram a adição de um termo de correção para o efeito de escorregamento no fluxo, conforme disposto na Equação 2.30.

$$\eta_{ID} = 0,6 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right) \cdot \frac{NR^2}{(1 + NR)} \cdot C_r \quad (2.30)$$

onde: C_r é dado pela Equação 2.31.

$$C_r = 1 + \frac{1,996 \cdot K_{nc}}{NR} \quad (2.31)$$

2.1.6.3. Mecanismo inercial

Este mecanismo é resultante da inércia da partícula que está sendo carregada pela corrente gasosa. As linhas de corrente do gás se curvam ao passar ao redor do coletor e a capacidade de uma partícula para acompanhar estas linhas de corrente decresce com o aumento de sua massa, devido à inércia, conforme mostrado na Figura 2.3.

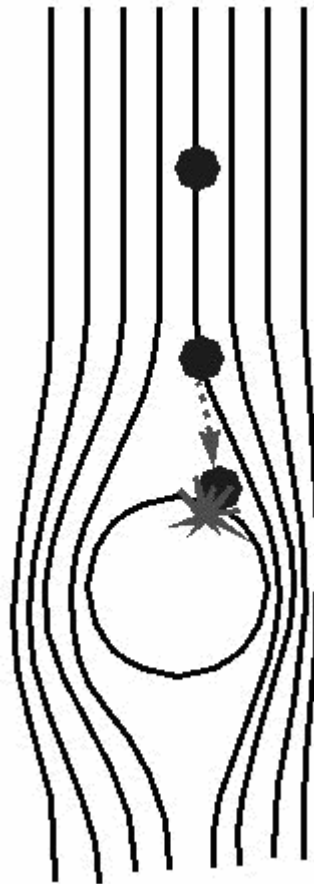


Figura 2.3 – Representação do mecanismo inercial.

Este mecanismo é dominante para altas velocidades do gás. Contudo, nesta região (altos valores de 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 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.

Gougeon (1994), notando a falta de um bom ajuste entre os modelos existentes e seus dados experimentais, desenvolveu uma correlação empírica para determinar a eficiência de coleta pelo mecanismo inercial, η_I . Para isso, Gougeon (1994) fez uso de experimentos em que despreza os efeitos eletroforéticos e gravitacionais e utilizou os modelos de Payet et al. (1992) e Liu e Rubow (1990) na Equação 2.32.

$$\eta_I = \eta(\text{exp}) - [\eta_D(\text{Payet}) - \eta_{ID}(\text{Liu})] \quad (2.32)$$

Através do método descrito acima, Gougeon (1994) encontrou a expressão analítica para o cálculo de η_I demonstrada na Equação 2.33.

$$\eta_I = 0,0334 \cdot St^{3/2} \quad (2.33)$$

A equação 2.33 é válida para $0,5 \leq St \leq 4,1$ e $0,0263 \leq Re_C \leq 0,25$. O número de Stokes, St , pode ser calculado pela Equação 2.14 e o número de Reynolds relativo ao coletor, Re_C , pode ser obtido através da Equação 2.34.

$$Re_C = \frac{d_C \cdot U \cdot \rho_g}{\mu} \quad (2.34)$$

onde: ρ_G é a densidade do gás.

Contudo, a Equação 2.33 pode ser extrapolada maiores valores de St , o que é exibido na Equação 2.35.

$$\eta_I = \frac{0,0334 \cdot St^{3/2}}{1 + 0,0334 \cdot St^{3/2}} \quad (2.35)$$

Já Zhu et al. (2000), partindo de um sistema de equações dado por Flagan e Seinfeld (1988), demonstram uma equação analítica para o cálculo da eficiência combinada dos mecanismos de interceptação direta e inercial, η_{ID+I} , para $NR \ll 1$. A expressão matemática pode ser observada na Equação 2.36.

$$\eta_{ID+I} = \frac{\varepsilon}{Ku} \cdot \left\{ NR + St \cdot \sqrt{(1 - \varepsilon)} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-1}{St \cdot \sqrt{(1 - \varepsilon)}} \right) \right] \right\}^2 \quad (2.36)$$

2.1.6.4. Mecanismo gravitacional

A coleta gravitacional é resultante da ação da gravidade sobre a partícula, que causa desvio de sua trajetória, conforme representado na Figura 2.4, sendo dependente da posição espacial do filtro e do sentido do escoamento. Este mecanismo pode ser dominante na filtração com velocidade do gás muito baixa, partículas grandes o suficiente para ter velocidade terminal, v_t , significativa e pequena difusão browniana.

Segundo Frising et al. (2003), a sedimentação gravitacional é um mecanismo de coleta importante apenas para partículas com diâmetro acima de 10 μm . Entretanto, Thomas et al. (1971) apud Kirsh (2001) relatam a observação dos efeitos deste mecanismo em diâmetros na faixa de 1 a 5 μm , evidenciando que a sedimentação gravitacional não deve ser desprezada em um cálculo rigoroso da eficiência de coleta da filtração.

Ranz e Wong (1952) apud Matteson (1987) concluíram que, em caso de escoamento vertical descendente em filtro fibroso, a equação para o cálculo da eficiência do mecanismo gravitacional, η_G , pode ser dada pela Equação 2.37.

$$\eta_G = \frac{d_p^2 \cdot \rho_p \cdot g}{18 \cdot \mu \cdot U} = \frac{v_t}{U} \quad (2.37)$$

onde: g é a aceleração da gravidade.

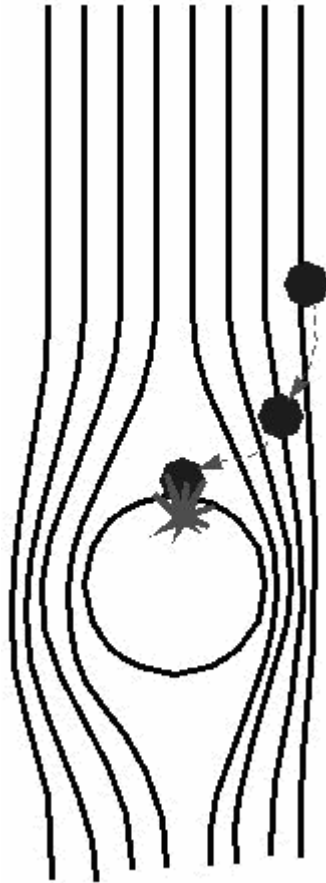


Figura 2.4 – Representação do mecanismo gravitacional.

Stechkina et al. (1969) apud Kirsh (2001) definem, para escoamento na mesma direção da velocidade terminal, uma correlação semelhante para o cálculo da eficiência do mecanismo gravitacional, mostrada na Equação 2.38.

$$\eta_G = (1 + NR) \cdot G \quad (2.38)$$

onde:

$$NR = \frac{d_p}{d_c} \quad (2.39)$$

$$G = \frac{F_s \cdot \rho_p \cdot g \cdot d_p^2}{18 \cdot \mu \cdot U} \quad (2.40)$$

2.1.6.5. 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), como representa a Figura 2.5.

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.

A geração de cargas eletrostáticas nas partículas e/ou coletores de um filtro podem ocorrer normalmente por atrito (triboeletrificação) inerente 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 (1952) apud Matteson (1987).

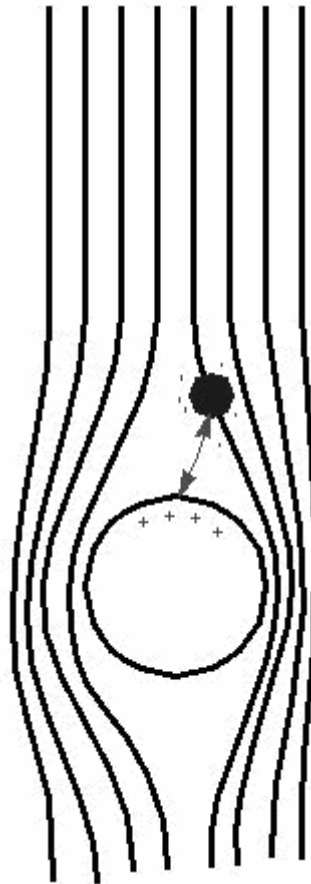


Figura 2.5 – Representação do mecanismo eletroforético.

Para que este processo seja bem descrito, o conhecimento de como estas forças eletrostáticas atuam entre partículas e fibras é indispensável, sendo estes:

- a) Partícula carregada e fibra carregada com sinais opostos (força “Coulômbica”);
- b) Partícula carregada e dipolo induzido na fibra neutra (dipolo-imagem no coletor);
- c) Fibra carregada e dipolo induzido na partícula neutra (dipolo-imagem na partícula);
- d) Repulsão de carga espacial de uma partícula carregada por uma partícula próxima com carga similar.

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 no coletor será aqui tratado, por ser o mais relevante no estudo proposto.

O mecanismo dipolo-imagem resulta da 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 2.6) gera, por efeito dipolo, uma região levemente negativa, causando a atração da partícula na direção do elemento filtrante.

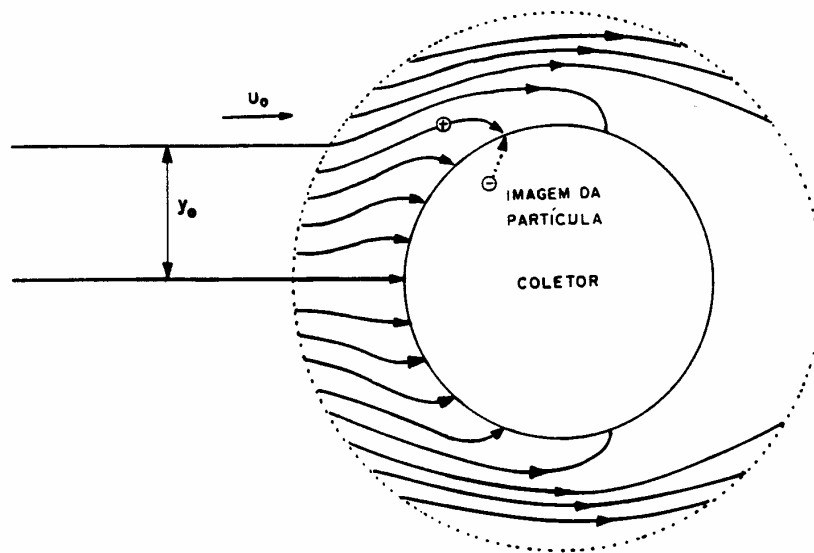


Figura 2.6 – Mecanismo eletroforético de dipolo-imagem no coletor (Coury, 1983).

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, 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 b) a partir da trajetória da partícula carregada com carga q . A expressão proposta para $1.10^{-4} < K_M < 1.10^{-6}$ e $St < 5.10^{-3}$ é demonstrada na Equação 2.45.

$$\eta_E = 8,24 \cdot K_M^{0,5} \quad (2.45)$$

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, conforme Equação 2.46.

$$\eta_E = 2,3 \cdot K_M^{0,5} \quad (2.46)$$

Tabela 2.2 – Parâmetros adimensionais para os mecanismos eletroforéticos (Coury, 1983).

Mecanismo	Parâmetro adimensional
a)	$K_C = \frac{F_S \cdot Q \cdot q}{3 \cdot \pi \cdot d_c \cdot d_p^2 \cdot \mu \cdot U} \quad (2.41)$
b)	$K_M = \frac{\gamma_C \cdot F_S \cdot q^2}{3 \cdot \pi^2 \cdot \epsilon_0 \cdot d_p \cdot d_c^2 \cdot \mu \cdot U} \quad (2.42)$
c)	$K_I = \frac{2 \cdot \gamma_D \cdot F_S \cdot Q^2 \cdot d_p^2}{3 \cdot \pi^2 \cdot \epsilon_0 \cdot d_c^5 \cdot \mu \cdot U} \quad (2.43)$
d)	$K_s = \frac{F_S \cdot q^2 \cdot d_c \cdot n}{18 \cdot \pi \cdot \mu \cdot U \cdot d_p \cdot \epsilon_0} \quad (2.44)$
<p>onde:</p> <p>$\gamma_C = (\epsilon_c - \epsilon_f)/(\epsilon_c + 2\epsilon_f)$ é o coeficiente de polarização do coletor;</p> <p>$\gamma_D = (\epsilon_D - \epsilon_f)/(\epsilon_D + 2\epsilon_f)$ é o coeficiente de polarização da partícula;</p> <p>ϵ_D é o constante dielétrica do coletor;</p> <p>ϵ_c é o constante dielétrica da partícula;</p> <p>ϵ_f é o constante dielétrica do fluido;</p> <p>ϵ_0 é a permissividade do vácuo = $8,855 \cdot 10^{-12}$ A.s/V.m;</p> <p>q é a carga elétrica da partícula;</p> <p>Q é a carga elétrica da fibra coletora;</p> <p>n é o número de partículas por unidade de volume.</p>	

Coury et al. (1991) e Duarte Filho (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 pela Equação 2.47.

$$\eta_E = \Phi \cdot K_M^{0,5} \quad (2.47)$$

onde: Φ é o parâmetro adimensional do mecanismo dipolo imagem, que depende do nível de carregamento e do material particulado.

Rodrigues (2005), para filtração de partículas de rocha fosfática carregadas por um carregador por corrente corona nas tensões 0 kV (cargas originadas pelo atrito entre as partículas e a tubulação do dispersor de aerosol), -3 kV e -6 kV, ajustou o parâmetro adimensional do mecanismo dipolo imagem para a fibra neutra e partícula carregada proposto na Equação 2.47, fornecendo uma expressão para o cálculo da eficiência de coleta do mecanismo eletroforético, dada pela Equação 2.48.

$$\eta_E = 2,562 \cdot (0,848)^{|T_{cl}|} \cdot K_M^{0,5} \quad (2.48)$$

onde: T_c é a tensão aplicada ao carregador corona de partículas, em kV.

2.1.6.6. *Coleta simultânea por vários mecanismos*

Geralmente, admite-se que a eficiência total de coleta de um coletor é a soma das eficiências individuais. Apesar de ser a abordagem mais simples e que considera a intensidade dos efeitos de cada mecanismo de coleta segundo a faixa de tamanho da partícula capturada, isto não é inteiramente correto, uma vez que há influência de um mecanismo sobre o outro.

A Figura 2.7 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).

De acordo com a Figura 2.7, pode-se observar que o mecanismo difusional é mais atuante em partículas pequenas ($d_p < 0,3 \mu\text{m}$) enquanto os mecanismos gravitacional, inercial e de interceptação direta são mais atuantes para partículas maiores que $2 \mu\text{m}$. 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 μm). Assim, a eficiência total de coleta pode ser obtida pela soma de todos os mecanismos atuantes, conforme mostra a Equação 2.49, e a penetração é dada pela Equação 2.50.

$$\eta_T = \eta_D + \eta_{ID} + \eta_I + \eta_G + \eta_E \quad (2.49)$$

$$P_T = P_D \cdot P_{ID} \cdot P_I \cdot P_G \cdot P_E \quad (2.50)$$

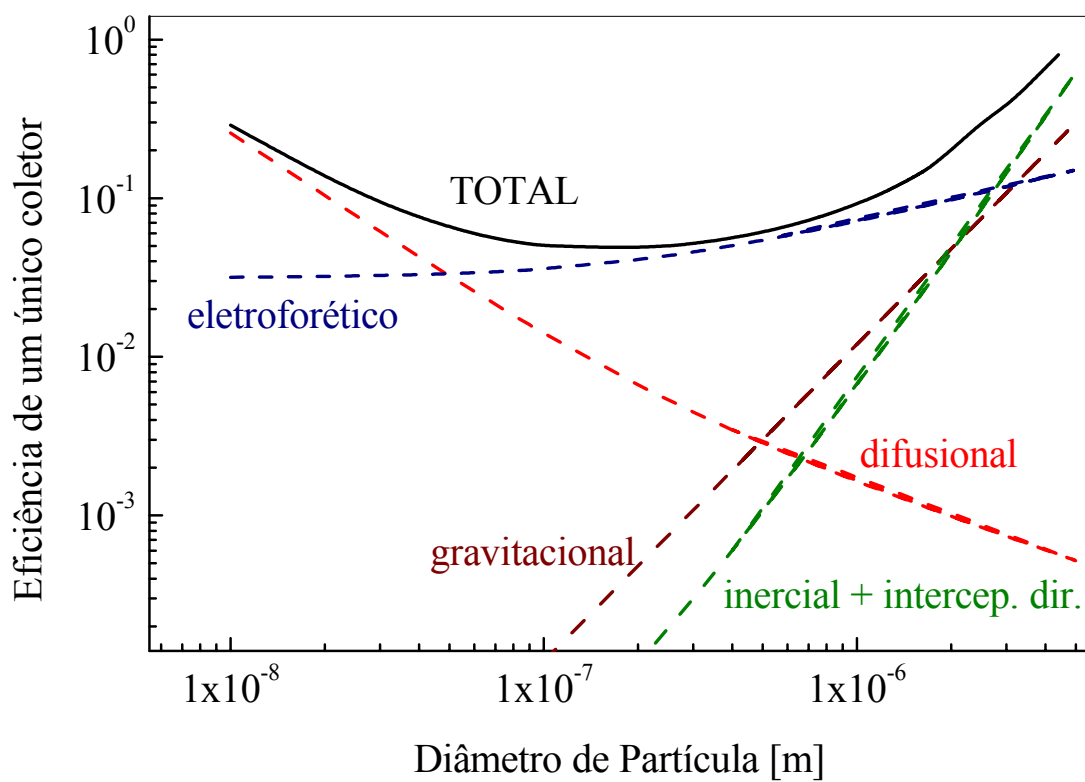


Figura 2.7 – Atuação dos mecanismos de coleta na eficiência de um único coletor em função do diâmetro de partícula (Coury, 1983).

2.2. Queda de pressão no filtro

A queda de pressão em um filtro é tão importante quanto a eficiência. 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 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 2.51.

$$\frac{\Delta P}{H} = \alpha \cdot \mu \cdot U + \nu \cdot \alpha \cdot U^2 \quad (2.51)$$

onde: H é a espessura do meio filtrante;

α é o coeficiente de resistência viscosa;

ν é o coeficiente de resistência inercial.

Para o caso de escoamento puramente viscoso, o segundo termo da Equação 2.51 torna-se desprezível e a expressão resultante é conhecida como a equação de Darcy para escoamento em meios porosos, mostrada na Equação 2.52.

$$\frac{\Delta P}{H} = \alpha \cdot \mu \cdot U \quad (2.52)$$

2.3. Mecanismo de carregamento por corrente corona

A eletrização de partículas, que pode afetar a queda de pressão e a eficiência de uma filtração, 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 a segunda decorrente do carregamento elétrico das partículas.

2.3.1. 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, conforme mostra a Figura 2.8. Esta 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 movimentos rápidos e alternados por toda a superfície. Outra característica deste tipo de descarga é que ela emite barulho semelhante a um assóvio.

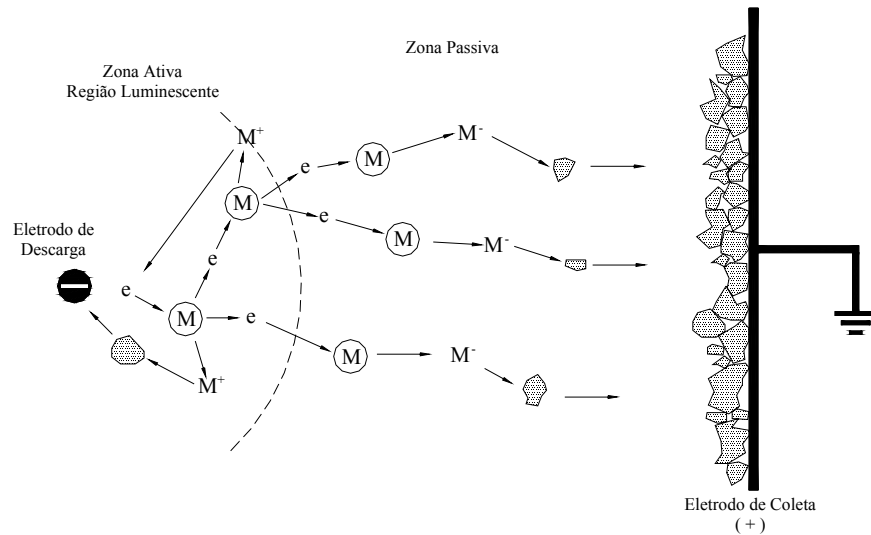


Figura 2.8 – Esquema da descarga corona negativa (Almeida, 2000).

2.3.2. 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 o carregamento por difusão. O carregamento por campo é predominante para partículas com diâmetro acima de $1,0 \mu\text{m}$ e o por difusão para partículas menores que $0,4 \mu\text{m}$. 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, criada através da aproximação do íon carregado e do campo elétrico aplicado.

No processo de carregamento por difusão, de acordo com White (1963), íons presentes no gás compartilham a energia térmica das moléculas gasosas, obedecendo à 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 uma alternativa razoável aos métodos de solução numérica. A Equação 2.53 representa a carga de saturação da partícula.

$$q = \left\{ \left(1 + \frac{2 \cdot \lambda}{d_p} \right)^2 + \left(\frac{2}{1 + \frac{2 \cdot \lambda}{d_p}} \right) \cdot \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right) \right\} \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot E \quad (2.53)$$

onde: q 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.

Deve-se frisar 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.

2.4. Efeito de cargas eletrostáticas 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 Filho, 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.

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 cilíndricos 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 2.9.

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 $1,6 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ entre o filtro e o eletrodo de bloqueio, de modo que este último ficava carregado com cargas de mesmo sinal que as partículas.

Assim, 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 três tipos de filtros fibrosos comerciais, dois carregados por corona e um carregado triboeletricamente, de acordo com Brown (1993). Foram utilizadas partículas neutras e carregadas de cloreto de sódio de diâmetros ($0,05$ a $0,5 \text{ }\mu\text{m}$) 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 “Coulômbico” somente atuou em partículas menores de $0,3\ \mu\text{m}$ enquanto o mecanismo dipolo-imagem atuou em partículas maiores que $0,3\ \mu\text{m}$.

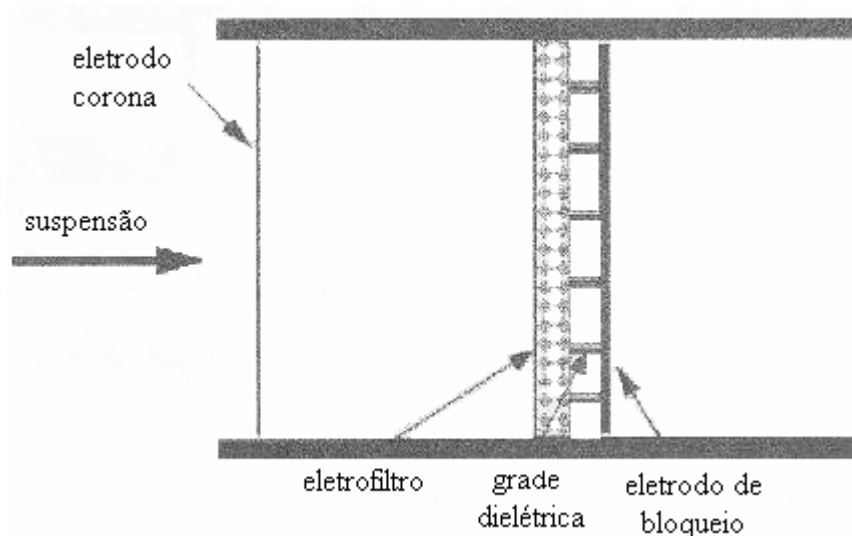


Figura 2.9 – Filtro eletrostático com um eletrodo de bloqueio (Rodrigues, 2005).

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, carregam-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 $1,40\ \mu\text{m}$. Os autores observaram, para partículas de mesmo tamanho, menores valores de penetração e de queda de pressão para partículas carregadas do que para aquelas no estado neutro. Foi observado também que o fenômeno de obstrução completa do filtro ocorre mais rápido quando partículas neutras foram utilizadas.

Duarte Filho (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 uma 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 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;
- Ocorreu a formação de torta de filtração somente para alguns níveis de carga nas partículas;
- O crescimento no nível de carga nas partículas, em 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;
- Foi observado que o aumento da carga eletrostática nas partículas induz à formação de estruturas de deposição menos resistente ao escoamento do fluido;
- 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, conseqüência 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 ($10 \text{ nm} < d_p < 5 \text{ }\mu\text{m}$) e partículas polidispersas de quartzo, com e sem cargas elétricas. Os autores observaram para os vários filtros testados (na forma de lã e de fibras fracionadas) que para o uso de eletretos foi obtido maiores valores de eficiência inicial de coleta para partículas menores de $1 \text{ }\mu\text{m}$. 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 três 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 $1 \text{ }\mu\text{m}$. 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 $1 \text{ }\mu\text{m}$ e $2 \text{ }\mu\text{m}$, 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 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 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 $2 \text{ }\mu\text{m}$ e carregadas negativamente por triboeletrificação durante o processo de dispersão. Foram utilizados pelo autor grânulos coletores de areia com diâmetro médio de 350 e $780 \text{ }\mu\text{m}$ e velocidade de filtração de $0,062$ e $0,122 \text{ m/s}$. Observou-se diminuição na penetração inicial das partículas de diâmetro menor que $2 \text{ }\mu\text{m}$ quando comparada com a penetração das partículas neutralizadas por fonte radioativa de Polônio-210. A maior penetração das partículas neutralizadas com $d_p > 1 \text{ }\mu\text{m}$, 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.

Tardos e Pfeffer (1981) estudaram os efeitos da umidade relativa do ar na filtração. Neste trabalho foram utilizados como grânulos esferas de poliestireno e cilindros de polietileno e como aerosol esferas de látex ($d_p = 1 \text{ }\mu\text{m}$). 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 possuíam o mesmo sinal, a eficiência do leito poderia ser menor do que no caso de ausência total de forças eletrostáticas.

2.5. 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), Brown (1997), Flagan (1998) e Marra Jr. (2000).

Os três parâmetros mais importantes no comportamento de partículas em aerosol são o seu tamanho, carga elétrica e formato. Dos três, apenas a carga elétrica é um parâmetro completamente independente. Medidas de carga podem ser feitas por dois métodos: estático, no qual a carga absoluta é medida; e dinâmico, no qual se mede a eletromobilidade.

Medidas estáticas baseiam-se em transferência ou indução de cargas. Este método tende a ser limitado para partículas com alta carga elétrica ou aerossóis com carga unipolar.

Os métodos dinâmicos geralmente submetem o aerosol a um alto campo elétrico, medindo-se a os desvios causados na partícula e relacionando-se estes à sua mobilidade elétrica (Brown, 1997).

Inúmeros equipamentos foram desenvolvidos para a determinação de cargas elétricas em partículas, com as mais variadas características estruturais, sensibilidades e possibilidades de aplicação.

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, que permitem avaliar o nível e a distribuição de cargas nas partículas segundo seu tamanho e concentração. Estes métodos se fundamentam 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 deste campo.

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, em 1923. O equipamento utilizado nestes estudos era constituído basicamente de um conduto de seção retangular, possuindo duas placas coletoras de metal paralelas, nas quais se aplicava uma diferença de potencial de até ± 10 kV e por entre as quais o aerosol era injetado. A partícula deslocava-se em direção a uma das placas, de acordo com sua carga, ficando lá 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 aerosol 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 aerosol 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 2.10 exhibe um esquema do Classificador de cargas eletrostáticas projetado por Coury (1983).

O aerosol 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 uma 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.

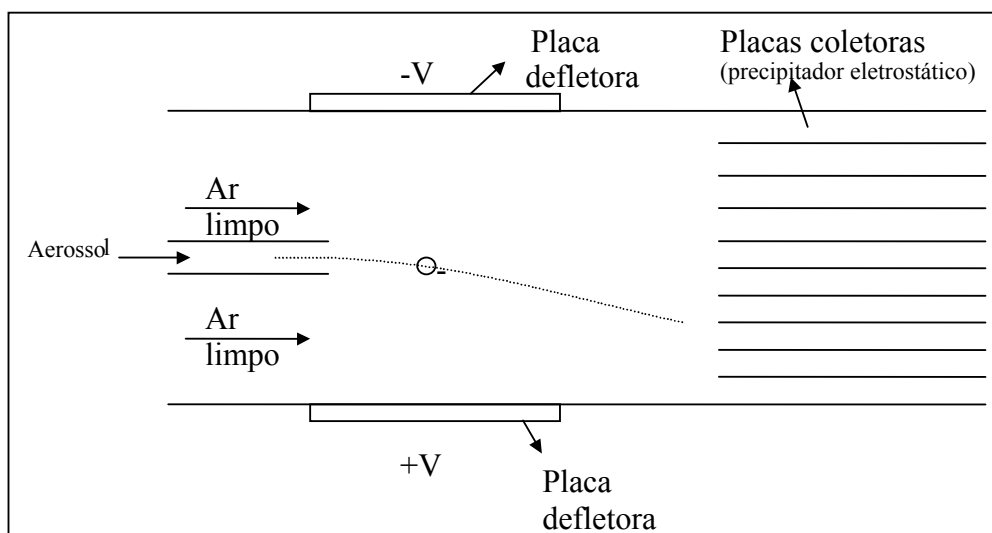


Figura 2.10 – Esquema do Classificador de cargas eletrostáticas (Coury, 1983).

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), com algumas modificações.

2.5.1. *Classificador de cargas eletrostáticas*

A eletromobilidade vem do fato de 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 esta força elétrica, a partícula move-se com velocidade v_x na direção das linhas de força, conforme pode ser observado na Figura 2.11.

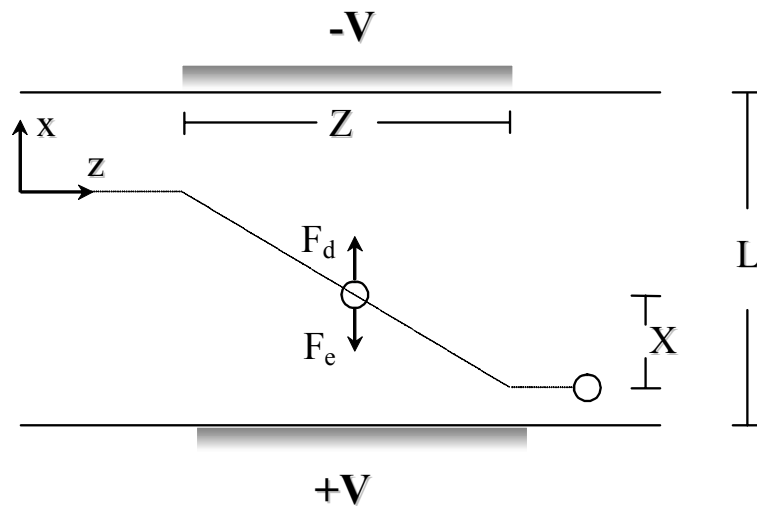


Figura 2.11 – Deflexão de uma partícula carregada com carga q submetida a um campo elétrico (Rodrigues, 2005).

A força de arraste, \vec{F}_d , que irá contrabalançar a força elétrica é dada pela Equação 2.54.

$$\vec{F}_d = \frac{C_D \cdot \rho_g \cdot v_x^2 \cdot d_p^2 \cdot \pi}{8 \cdot F_s} \quad (2.54)$$

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 a Equação 2.55.

$$\frac{C_D \cdot \rho_g \cdot v_x^2 \cdot d_p^2 \cdot \pi}{8 \cdot F_S} = q \cdot \overline{E} \quad (2.55)$$

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 2.56.

$$E_x = \frac{\Delta V}{L} \quad (2.56)$$

A velocidade da partícula na direção x, v_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 2.57.

$$v_x = \frac{U_0 \cdot X}{Z} \quad (2.57)$$

Substituindo-se as Equações 2.56 e 2.57 na Equação 2.55, obtém-se a Equação 2.58.

$$q = \frac{C_D \cdot \rho_g \cdot \pi \cdot L \cdot U_0^2 \cdot X^2 \cdot d_p^2}{8 \cdot F_S \cdot \Delta V \cdot Z^2} \quad (2.58)$$

De acordo com a Equação 2.58, 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 se movendo com velocidade relativa v_x em um gás estagnado (regime de Stokes) é dada pela Equação 2.59.

$$C_D = \frac{24}{Re_p} = \frac{24 \cdot \mu}{\rho_g \cdot d_p \cdot v_x} \quad (2.59)$$

A Equação 2.59 é válida para $Re_p < 0,1$.

onde: Re_p é o número de Reynolds da partícula, dado pela Equação 2.60.

$$Re_p = \frac{d_p \cdot U \cdot \rho_g}{\mu} \quad (2.60)$$

Como o número de Reynolds da partícula é normalmente pequeno e os tempos de relaxação da partícula e do fluido também são, a força de arraste, $\overline{F_d}$, que irá contrabalançar a força elétrica pode ser dada pela Equação 2.61.

$$\overline{F_d} = \frac{3 \cdot \mu \cdot \pi \cdot d_{pS} \cdot v_x}{F_s} \quad (2.61)$$

onde: d_{pS} é o diâmetro de Stokes da partícula, que equivale ao diâmetro de uma esfera com a mesma densidade e velocidade terminal de sedimentação da partícula em estudo, podendo ser calculado pela relação entre a densidade da partícula, ρ_p , a densidade da água, ρ_{H_2O} , e o diâmetro aerodinâmico, d_{pA} , que é definido como o diâmetro de uma partícula esférica de densidade igual a uma unidade ($\rho=1 \text{ g/cm}^3$), que tem o mesmo comportamento aerodinâmico que a partícula real considerando seu tamanho, forma e densidade. A relação entre diâmetro de Stokes e diâmetro aerodinâmico é apresentada na Equação 2.62.

$$d_{pS} = \frac{d_{pA}}{\sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_{H_2O}}}} \quad (2.62)$$

Logo, através do equilíbrio de forças $\overline{F_e} = \overline{F_d}$, tem-se a Equação 2.63.

$$\frac{3 \cdot \mu \cdot \pi \cdot d_{PS} \cdot v_x}{F_S} = q \cdot \bar{E} \quad (2.63)$$

Rearranjando a Equação 2.63, tem-se a Equação 2.64.

$$v_x = \frac{q \cdot F_S}{3 \cdot \mu \cdot \pi \cdot d_p} \cdot \bar{E} = Z_P \cdot \bar{E} \quad (2.64)$$

Z_P é a eletromobilidade da partícula dada pela Equação 2.65.

$$Z_P = \frac{q \cdot F_S}{3 \cdot \mu \cdot \pi \cdot d_p} \quad (2.65)$$

Combinando-se as Equações 2.56 e 2.57 com a Equação 2.64, tem-se a Equação 2.66.

$$Z_P = \frac{U_0 \cdot X \cdot L}{Z \cdot \Delta V} \quad (2.66)$$

Igualando-se e ordenando-se as Equações 2.65 e 2.66, tem-se a Equação 2.67.

$$q = \frac{3 \cdot \mu \cdot \pi \cdot d_{PS} \cdot U_0 \cdot X \cdot L}{F_S \cdot Z \cdot \Delta V} \quad (2.67)$$

A Equação 2.67 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 foi considerado 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.

Rodrigues (2005), medindo em um Classificador de cargas eletrostáticas a eletromobilidade de partículas de rocha fosfática carregadas por corrente corona, obteve, com o uso da Equação 2.67, expressões lineares para o cálculo da carga da partícula em função de seu diâmetro de Stokes, mostradas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Equações da carga da partícula em função do diâmetro de Stokes. (Rodrigues, 2005).

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

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA UTILIZADA

No presente trabalho, foi utilizado o conjunto de dados experimentais obtidos por Rodrigues (2005) na filtração de partículas de rocha fosfática eletricamente carregadas em feltro de polipropileno. As propriedades e dados obtidos por Rodrigues (2005) serviram, então, de base para a simulação das trajetórias das partículas de rocha fosfática, estudando-se teoricamente os resultados e obtendo-se uma equação generalizada para a eficiência do mecanismo de coleta eletroforética.

Neste capítulo, serão apresentados o procedimento experimental realizado por Rodrigues (2005) e o equacionamento matemático utilizado na simulação computacional do presente trabalho.

3.1. Procedimento experimental e metodologia adotados por Rodrigues (2005)

A unidade de filtração utilizada por Rodrigues (2005) consistia em um sistema de geração e controle de umidade do ar, sistema de dispersão, carregador corona, contador de partículas, suporte de filtração, tecido filtrante e equipamentos de medida.

3.1.1. Suporte de filtração

O suporte de filtração construído para os testes experimentais realizados por Rodrigues (2005) possuía um duto cilíndrico de 4,7 cm de diâmetro e comprimento total de 22,0 cm. As Figuras 3.1 e 3.2 apresentam, respectivamente, a fotografia e o esquema do suporte de filtração.

O meio filtrante de tecido era fixado no suporte por flange situado a 10,0 cm da base do mesmo. 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 de partículas. Após a coleta das partículas, a sonda era deslocada até a parede do suporte.



Figura 3.1 – Fotografia do suporte de filtração utilizado (Rodrigues, 2005).

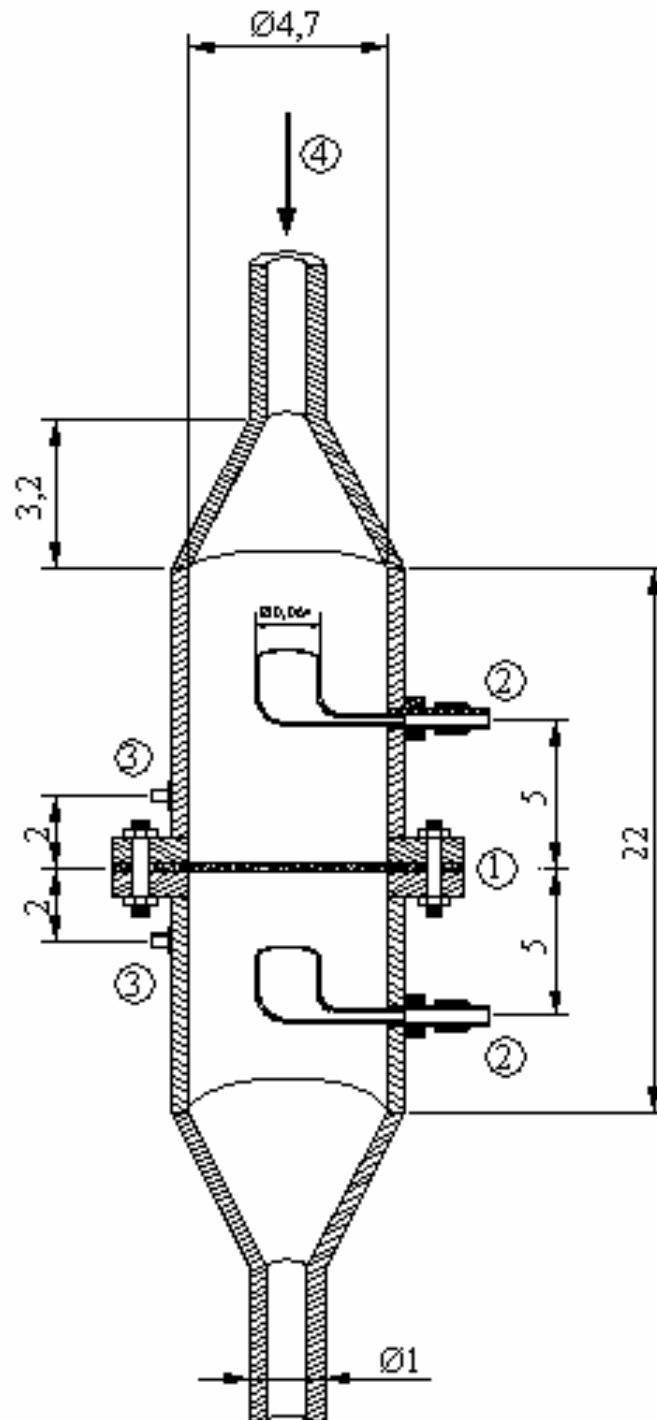


Figura 3.2 – Esquema do suporte de filtração utilizado; dimensões em centímetros (Rodrigues, 2005).

Legenda da figura: 1 – Flange para fixação do tecido; 2 – Pontos de amostragem isocinética; 3- Pontos de medida de queda de pressão; 4 – Entrada do aerosol.

3.1.2. Feltro de polipropileno

O tecido filtrante utilizado por Rodrigues (2005) era constituído 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). O diâmetro médio da fibra do tecido utilizado era de $23,0 \pm 1,8 \text{ }\mu\text{m}$.

3.1.3. Equipamentos de medida

O fluxo de ar na filtração foi promovido por uma bomba a vácuo da 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 um rotâmetro, marca 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, marca Furness Controls, modelo FC012, que permitia leituras de 0 a 200 mm de coluna de água com precisão de 0,01 mm.

O ar com partículas suspensas era sugado através de amostradores isocinéticos localizados na posição anterior e posterior ao filtro de tecido para que fosse feita a contagem do número de partículas. A contagem de partículas foi feita através do contador de partículas modelo APS 3320, da marca TSI.

3.1.4. Carregador de partículas tipo corona

O sistema de geração de cargas utilizado por Rodrigues (2005) consistiu em um carregador tipo corona, cilíndrico, confeccionado em PVC, com diâmetro interno de 5,1 cm e comprimento de 14,0 cm.

O eletrodo de descarga consistiu em um fio de aço inox cilíndrico de 0,25 mm de diâmetro. Conforme mostrado na Figura 3.3, 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 de 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.

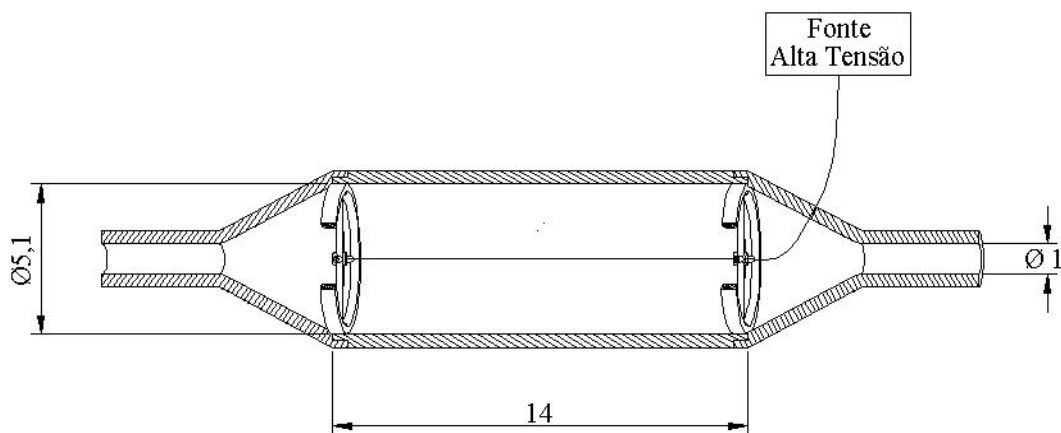


Figura 3.3 – Esquema do carregador corona; dimensões em centímetros (Rodrigues, 2005).

3.1.5. Rocha fosfática

O concentrado de rocha fosfática empregado por Rodrigues (2005) 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. O material foi colocado em estufa a 100°C por 24 horas até que toda água residual fosse evaporada. Os blocos secos de pó de rocha foram colocados em moinho de bolas por período de 8 horas.

A análise química do pó de rocha fosfática utilizado por Rodrigues (2005) é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Análise química quantitativa do concentrado fosfático em porcentagem de óxidos.

Composto	Porcentagem (%)
P ₂ O ₅	24,6
CaO	31,2
SiO ₂	28,9
Al ₂ O ₃	6,07
Fe ₂ O ₃	2,83
MgO	0,48
TiO ₂	0,31
BaO	0,08
PF	4,46

Após passar por todos os procedimentos citados, foram efetuadas as medidas de densidade através da análise em picnômetro a gás hélio modelo AccuPyc 1330, marca Micromeritics, sendo o valor obtido igual a $2940 \pm 32 \text{ kg/m}^3$. A distribuição granulométrica deste material polidisperso foi determinada através do contador de partículas modelo APS 3320, da marca TSI, que fornece o número de partículas em função do diâmetro aerodinâmico das mesmas. O valor do diâmetro aerodinâmico médio do concentrado fosfático foi igual a $4,37 \text{ }\mu\text{m}$. O diâmetro de Stokes calculado foi de $2,55 \text{ }\mu\text{m}$.

O concentrado fosfático era constituído por partículas com formas irregulares, apresentando esfericidade igual a 0,60.

3.1.6. *Condições experimentais*

Cada teste de filtração realizado por Rodrigues (2005) teve duração de 90 minutos, com concentração média de $0,52 \pm 0,11 \text{ mg}$ de pó/min. Para a contagem do número de partículas que chegavam e 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, sendo eles 2,32, 2,71, 3,26, 3,95 e 5,75 μm .

Os ensaios foram realizados para as velocidades de filtração de 0,05, 0,08 e 0,12 m/s. O ar que alimentava o gerador de aerosol 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, conforme mostra a Tabela 2.3. 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 pelo qual o aerosol 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.

Os resultados de número de partículas na entrada e saída do filtro obtidos por Rodrigues (2005) em cada teste são apresentados no Apêndice A.

3.2. Equações utilizadas para determinar as eficiências dos mecanismos de coleta presentes na filtração realizada por Rodrigues (2005)

3.2.1. Eficiências teóricas de coleta dos mecanismos difusional, interceptação direta, inercial e gravitacional

Para o cálculo teórico das eficiências de coleta dos mecanismos difusional, interceptação direta, inercial e gravitacional, foram utilizados, respectivamente, os modelos desenvolvidos por Payet et al. (1992), Equação 2.27, Liu e Rubow (1990), Equação 2.30, Gougeon (1994), Equação 2.33, e Ranz e Wong (1952), Equação 2.37. Estas correlações para a determinação das eficiências teóricas de coleta foram escolhidas por serem atuais, com bons ajustes em resultados experimentais em outros trabalhos e por terem sido obtidas em estudos com características semelhantes as dos desenvolvidos por Rodrigues (2005).

3.2.2. Eficiência de coleta do mecanismo eletroforético

Para a determinação da eficiência de coleta do mecanismo eletroforético, admitiu-se que a eficiência total de coleta de um coletor é a soma das eficiências individuais, como mostra a Equação 2.49, utilizando-se as eficiências teóricas de coleta dos mecanismos difusional, interceptação direta, inercial e gravitacional (conforme mostrado no item 3.2.1) e as eficiências totais de coleta obtidas nos experimentos realizados por Rodrigues (2005).

Rearranjando-se a Equação 2.49, pode-se obter o valor da eficiência de coleta do mecanismo eletroforético, conforme mostra abaixo a Equação 3.1.

$$\eta_E(\text{exp}) = \eta_T(\text{exp}) - \eta_D(\text{teórico}) - \eta_{ID}(\text{teórico}) - \eta_I(\text{teórico}) - \eta_G(\text{teórico}) \quad (3.1)$$

Para se determinar a eficiência total de coleta (η_T) experimental, primeiramente foi necessário obter os valores de penetração (P). A penetração para os tamanhos de partícula considerados em cada um dos testes realizados por Rodrigues (2005) foi determinada pela relação entre o número de partículas de um determinado diâmetro que penetra através do leito (S) e o número de partículas com o mesmo diâmetro que chegam ao filtro (E). Para este cálculo, foram consideradas as médias das amostragens do número de partículas que chegavam ao filtro.

Com os valores de penetração experimental, rearranjou-se a Equação 2.19 com o objetivo de se calcular a eficiência total de coleta da fibra coletora, conforme mostra a Equação 3.2.

$$\eta_T = - \left(\frac{\ln(P) \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot d_c}{4 \cdot Z \cdot (1 - \varepsilon) \cdot h} \right) \quad (3.2)$$

onde: P é a penetração da partícula;

ε é a sua porosidade;

d_c é o diâmetro das fibras coletoras;

Z é a espessura do meio filtrante;

h é termo de probabilidade de adesão das partículas na fibra coletora.

Os resultados calculados, a partir dos dados experimentais de Rodrigues (2005), para a penetração, a eficiência total de coleta e as eficiências de coleta dos mecanismos difusional, interceptação direta, inercial, gravitacional e eletroforético estão dispostos no Apêndice B. Observa-se que, por ser desprezível em alguns casos, aproximou-se para zero o valor da eficiência eletroforética, não tendo sentido físico o valor negativo obtido matematicamente.

3.3. Análise das trajetórias das partículas

Com o objetivo de determinar as trajetórias das partículas em função de suas propriedades físicas e das condições da filtração, foi introduzido no software Microsoft Excel um equacionamento matemático que simula seu percurso realizado no escoamento. Este equacionamento foi desenvolvido em coordenadas cilíndricas, sendo considerados nos cálculos os mecanismos de coleta de interceptação direta, inercial, gravitacional e eletroforético. Preliminarmente, o mecanismo difusional havia sido incluído nas equações utilizadas na simulação computacional. Entretanto, o mesmo foi desconsiderado por não ter influenciado os resultados obtidos na faixa de diâmetros de partícula utilizada.

3.3.1. Equação para determinar a variação da velocidade da partícula com o tempo

3.3.1.1. Equacionamento considerando os mecanismos de coleta inercial e gravitacional

Considerando-se, inicialmente, apenas o efeito inercial agindo sobre a partícula em movimento, tem-se que o corpo em escoamento está submetido à força de arraste, obtendo-se a Equação 3.3.

$$\overline{F_R} = \overline{F_d} \quad (3.3)$$

onde: $\overline{F_R}$ é a força resultante;

$\overline{F_d}$ é a força de arraste.

Para o cálculo de $\overline{F_d}$, é preciso considerar que o vetor que descreve a velocidade do fluido (\overline{u}) em um ponto qualquer difere em magnitude e/ou direção do vetor que descreve a velocidade da partícula (\overline{v}) no mesmo ponto, dizendo-se que há um “escorregamento” entre a partícula e o gás. Assim, devido ao efeito de escorregamento, utiliza-se o vetor diferença entre \overline{u} e \overline{v} (vetor velocidade relativa) para descrever a velocidade atuante na força $\overline{F_d}$, representado na Figura 3.4. Utilizando-se este vetor diferença, a expressão que determina a força de arraste, $\overline{F_d}$, é mostrada na Equação 3.4.

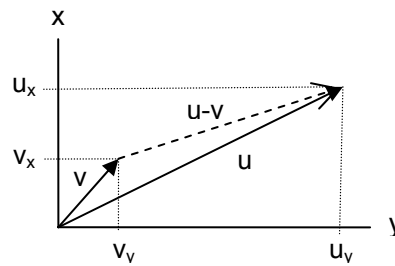


Figura 3.4 – Vetores velocidade da partícula (\overline{v}), do fluido (\overline{u}) em coordenadas retangulares e o vetor diferença entre eles ($\overline{u} - \overline{v}$).

$$\overline{F_d} = \frac{C_D \cdot A_{\text{projet. part.}} \cdot \rho_g}{2} \cdot (\overline{u} - \overline{v}) \cdot |\overline{u} - \overline{v}| \quad (3.4)$$

onde: C_D é o coeficiente de arraste da partícula;

$A_{\text{projet. part.}}$ é a área projetada da partícula;

ρ_g é a densidade do fluido;

\overline{u} e \overline{v} são os vetores velocidade do fluido e da partícula, respectivamente.

Buscando-se, então, obter uma função que expresse a aceleração da partícula no escoamento, combina-se e rearranja-se as Equações 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 na Equação 3.3. Esta nova relação obtida para determinar a aceleração da partícula pode ser observada na Equação 3.8.

$$\overline{F_R} = m_p \cdot \frac{d\overline{v}}{dt} = V_p \cdot \rho_p \cdot \frac{d\overline{v}}{dt} = \frac{\pi \cdot d_p^3 \cdot \rho_p}{6} \cdot \frac{d\overline{v}}{dt} \quad (3.5)$$

onde: m_p é a massa da partícula;

V_p é o volume da partícula (aproximando-se a partícula para o formato esférico);

$\frac{d\overline{v}}{dt}$ é a aceleração da partícula;

ρ_p é a densidade da partícula;

d_p é o diâmetro da partícula.

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} = \frac{24 \cdot \mu}{\rho_g \cdot d_p \cdot |\overline{u} - \overline{v}|} \quad (3.6)$$

onde: μ é a viscosidade do fluido.

$$A_{\text{projet. part.}} = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \quad (3.7)$$

A Equação 3.7 considera a partícula no formato esférico.

$$\frac{d\overline{v}}{dt} = A \cdot (\overline{u} - \overline{v}) \quad (3.8)$$

onde: $A = \frac{18 \cdot \mu}{d_p^2 \cdot \rho_p}$

Pode-se, então, adicionar à Equação 3.8 a aceleração gravitacional à que as partículas estão sujeitas no escoamento, g , obtendo-se a Equação 3.9.

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = A \cdot (\bar{u} - \bar{v}) + g \quad (3.9)$$

Decompondo-se o vetor \bar{v} da Equação 3.9 em coordenadas retangulares, tem-se as Equações 3.10 e 3.11.

$$\frac{dv_x}{dt} = A \cdot (u_x - v_x) + g_x \quad (3.10)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = A \cdot (u_y - v_y) + g_y \quad (3.11)$$

A componente da aceleração gravitacional é nula na direção y , já que o filtro utilizado por Rodrigues (2005) e considerado neste trabalho estava na posição vertical e era alimentado com um fluxo gasoso vertical descendente, como observado na Figura 3.5.

Desse modo, através da inclusão da aceleração gravitacional, obtém-se as Equações 3.12 e 3.13.

$$\frac{dv_x}{dt} = A \cdot (u_x - v_x) + g \quad (3.12)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = A \cdot (u_y - v_y) \quad (3.13)$$

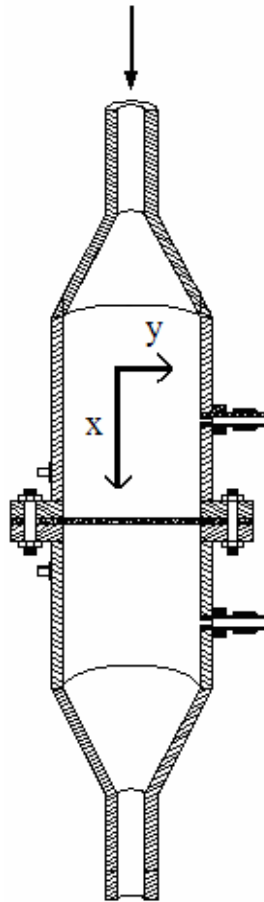


Figura 3.5 – Sentido do fluxo gasoso e eixo de coordenadas cartesianas adotado.

Visando-se alterar o sistema de coordenadas das Equações 3.12 e 3.13 de retangular para cilíndrico, decompõe-se o vetor \bar{v} conforme mostra a Equação 3.14.

$$\bar{v} = v_x \cdot \delta_x + v_y \cdot \delta_y \quad (3.14)$$

onde: δ_x e δ_y são vetores unitários nas direções x e y, respectivamente.

Analogamente, pode-se decompor o mesmo vetor em coordenadas cilíndricas nos eixos r e θ , como mostrado na Equação 3.15.

$$\bar{v} = v_r \cdot \delta_r + v_\theta \cdot \delta_\theta \quad (3.15)$$

onde: δ_r e δ_θ são vetores unitários nos eixos r e θ , respectivamente.

As relações entre os vetores unitários referentes às coordenadas cilíndricas e coordenadas retangulares são apresentadas nas Equações 3.16 e 3.17, onde θ é o ângulo que determina o posicionamento da partícula no espaço, sendo igual a π (180°) a montante do coletor e 0 (0°) a jusante, considerando-se o centro do coletor como origem do sistema.

$$\delta_r = (\cos\theta) \cdot \delta_x + (\text{sen}\theta) \cdot \delta_y \quad (3.16)$$

$$\delta_\theta = (-\text{sen}\theta) \cdot \delta_x + (\cos\theta) \cdot \delta_y \quad (3.17)$$

Substituindo-se as Equações 3.16 e 3.17 na Equação 3.15 e rearranjando-se, tem-se a Equação 3.18.

$$\bar{v} = (v_r \cdot \cos\theta - v_\theta \cdot \text{sen}\theta) \cdot \delta_x + (v_r \cdot \text{sen}\theta + v_\theta \cdot \cos\theta) \cdot \delta_y \quad (3.18)$$

Comparando-se a Equação 3.18 com a Equação 3.14, observam-se as relações entre a velocidade da partícula em coordenadas retangulares e em coordenadas cilíndricas, apresentadas nas Equações 3.19 e 3.20.

$$v_x = v_r \cdot \cos\theta - v_\theta \cdot \text{sen}\theta \quad (3.19)$$

$$v_y = v_r \cdot \text{sen}\theta + v_\theta \cdot \cos\theta \quad (3.20)$$

De forma análoga, obtém-se as relações entre a velocidade do fluido em coordenadas retangulares e em coordenadas cilíndricas, mostradas nas Equações 3.21 e 3.22.

$$u_x = u_r \cdot \cos\theta - u_\theta \cdot \text{sen}\theta \quad (3.21)$$

$$u_y = u_r \cdot \text{sen}\theta + u_\theta \cdot \cos\theta \quad (3.22)$$

As Equações 3.12 e 3.13 podem ser colocadas em coordenadas cilíndricas substituindo-se nelas as Equações 3.19, 3.20, 3.21 e 3.22, resultando nas Equações 3.23 e 3.24.

$$\frac{d(v_r \cdot \cos \theta - v_\theta \cdot \text{sen} \theta)}{dt} = A \cdot (u_r \cdot \cos \theta - u_\theta \cdot \text{sen} \theta - v_r \cdot \cos \theta + v_\theta \cdot \text{sen} \theta) + g \quad (3.23)$$

$$\frac{d(v_r \cdot \text{sen} \theta + v_\theta \cdot \cos \theta)}{dt} = A \cdot (u_r \cdot \text{sen} \theta + u_\theta \cdot \cos \theta - v_r \cdot \text{sen} \theta - v_\theta \cdot \cos \theta) \quad (3.24)$$

Por fim, a expressão para a variação da velocidade da partícula no eixo r (\bar{v}_r) com o tempo foi obtida multiplicando-se a Equação 3.23 por $\cos \theta$ e a Equação 3.24 por $\text{sen} \theta$, sendo então somadas as duas equações resultantes. O mesmo procedimento foi realizado para se determinar a expressão para a variação da velocidade da partícula no eixo θ (\bar{v}_θ) com o tempo. Porém, nesse caso, as Equações 3.23 e 3.24 foram multiplicadas por $-\text{sen} \theta$ e $\cos \theta$, respectivamente. As novas expressões obtidas podem ser observadas nas Equações 3.25 e 3.26.

$$\frac{dv_r}{dt} = A \cdot (u_r - v_r) + g \cdot \cos \theta \quad (3.25)$$

$$\frac{dv_\theta}{dt} = A \cdot (u_\theta - v_\theta) - g \cdot \text{sen} \theta \quad (3.26)$$

3.3.1.2. Adição do mecanismo eletroforético

Às Equações 3.25 e 3.26 (desenvolvidas considerando-se apenas os efeitos inercial e gravitacional) foi adicionado o efeito eletroforético. Shuyi et al. (1998) apresenta a equação da força dipolo-imagem entre partícula carregada e coletor neutro na direção radial (a força dipolo-imagem no eixo θ é nula). A expressão utilizada para a força dipolo-imagem no eixo r é mostrada na Equação 3.27.

$$\overline{F_{er}} = \left(\frac{\varepsilon_D - 1}{\varepsilon_D + 1} \right) \cdot \frac{q^2}{16 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot (r - r_c - r_p)^2} \quad (3.27)$$

onde: ε_D é o constante dielétrica do coletor;

ε_0 é a permissividade do vácuo = $8,855 \cdot 10^{-12}$ A.s/V.m;

q é a carga elétrica da partícula;

r é a distância entre o centro do coletor e o centro da partícula;

r_c é o raio do coletor;

r_p é o raio da partícula.

Para se adicionar o efeito de dipolo-elétrico na direção radial à Equação 3.25, foi necessário obter a aceleração causada pela força elétrica. Utilizando a 2ª Lei de Newton, dividiu-se a Equação 3.27 pela massa da partícula, podendo ser observada na Equação 3.28 a equação que determina a aceleração proveniente da força elétrica.

$$\overline{a_{er}} = \frac{6 \cdot \left(\frac{\varepsilon_D - 1}{\varepsilon_D + 1} \right) \cdot \left(\frac{q^2}{16 \cdot \varepsilon_0} \right)}{d_p^3 \cdot \rho_p \cdot (r - r_c - r_p)^2} \quad (3.28)$$

Considerando-se a partícula no formato esférico.

A Equação 3.28 foi subtraída da Equação 3.25, obtendo-se uma nova expressão que determina a aceleração da partícula no eixo r. A subtração se dá pois a força elétrica atrai a partícula em direção ao coletor, no sentido contrário à orientação da direção radial.

Tem-se, portanto, um conjunto de equações em coordenadas cilíndricas para a velocidade da partícula considerando-se os mecanismos de coleta inercial, gravitacional e eletroforético. Este conjunto de expressões é composto das Equações 3.29 e 3.26.

$$\frac{dv_r}{dt} = A \cdot (u_r - v_r) + g \cdot \cos \theta - \frac{6 \cdot \left(\frac{\varepsilon_D - 1}{\varepsilon_D + 1} \right) \cdot \left(\frac{q^2}{16 \cdot \varepsilon_0} \right)}{d_p^3 \cdot \rho_p \cdot (r - r_c - r_p)^2} \quad (3.29)$$

$$\frac{dv_{\theta}}{dt} = A \cdot (u_{\theta} - v_{\theta}) - g \cdot \text{sen}\theta \quad (3.26)$$

onde: $A = \frac{18 \cdot \mu}{d_p^2 \cdot \rho_p}$

3.3.1.3. *Adição do mecanismo de interceptação direta*

O mecanismo de coleta por interceptação direta é incluído na simulação através de uma condição lógica. Sabendo-se que a partícula entra em contato com o coletor (ou seja, é coletada por interceptação direta) sempre que a distância do centro desta partícula em relação ao centro do coletor é igual ao raio da partícula somado ao raio do coletor, a programação computacional desenvolvida neste trabalho verifica todos os valores de distância partícula-coletor, acusando a coleta sempre que esta distância é igual à soma dos raios da partícula e da fibra coletora. Quando verificado o contato com a fibra, os cálculos matemáticos seguintes tornam-se sem significado físico.

3.3.2. Equação para determinar a variação da distância partícula-coletor e do ângulo θ com o tempo

Considera-se, inicialmente, a definição física da velocidade da partícula em coordenadas retangulares, apresentada nas Equações 3.30 e 3.31.

$$\frac{dx}{dt} = v_x \quad (3.30)$$

$$\frac{dy}{dt} = v_y \quad (3.31)$$

Objetivando-se transformar as equações para coordenadas cilíndricas, substitui-se a relação $x = r \cdot \cos\theta$ e a Equação 3.19 na Equação 3.30, e a relação $y = r \cdot \text{sen}\theta$ e a

Equação 3.20 na Equação 3.31. Rearranjando-se as expressões resultantes, obtém-se o sistema dado pelas Equações 3.32 e 3.33.

$$-r \cdot \operatorname{sen} \theta \cdot \frac{d\theta}{dt} + \cos \theta \frac{dr}{dt} = v_r \cdot \cos \theta - v_\theta \cdot \operatorname{sen} \theta \quad (3.32)$$

$$r \cdot \cos \theta \cdot \frac{d\theta}{dt} + \operatorname{sen} \theta \frac{dr}{dt} = v_r \cdot \operatorname{sen} \theta + v_\theta \cdot \cos \theta \quad (3.33)$$

Para se obter a equação que determina a variação de r (distância entre o centro da partícula e o centro do coletor) com o tempo, multiplica-se a Equação 3.32 por $\cos \theta$ e a Equação 3.33 por $\operatorname{sen} \theta$, somando-se então as duas expressões obtidas. Da mesma forma, a fim de se obter a equação que determina a variação do ângulo θ com o tempo, multiplica-se a Equação 3.32 por $-\operatorname{sen} \theta$ e a Equação 3.33 por $\cos \theta$, somando-se ambas em seguida. As expressões obtidas são apresentadas nas Equações 3.34 e 3.35.

$$\frac{dr}{dt} = v_r \quad (3.34)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{v_\theta}{r} \quad (3.35)$$

As Equações 3.34 e 3.35 mostram a variação da posição espacial da partícula em função do tempo em coordenadas cilíndricas.

3.3.3. Implantação computacional do equacionamento matemático

Para se determinar as trajetórias das partículas em função de seu diâmetro, da velocidade de filtração, da temperatura e da tensão corona aplicada, foram introduzidas no software Microsoft Excel as Equações 3.26 e 3.29, para a obtenção da variação da velocidade (em coordenadas cilíndricas) da partícula com o tempo, e as Equações 3.34 e 3.35, para determinar a variação da posição espacial da partícula. Programou-se, ainda, a verificação dos

valores de distância partícula-coletor em cada linha de cálculo, acusando-se a coleta sempre que esta distância é igual à soma dos raios da partícula e da fibra coletora, conforme explicado no item 3.3.1.3.

Os cálculos matemáticos foram realizados por linhas em série, variando-se o tempo (passo de integração considerado igual a 10^{-5} segundos) e utilizando-se os dados do cálculo anterior para a linha de cálculo seguinte e assim por diante. A obtenção dos valores da velocidade da partícula e sua posição espacial para a linha de cálculo seguinte foram feitas por integração simples.

No início dos cálculos matemáticos ($t = 0$ segundos), a velocidade da partícula foi considerada igual à velocidade do fluido, sendo utilizado para a velocidade do gás o modelo de Kuwabara para coleta em sistema de cilindros, válido para distâncias próximas ao coletor. Este modelo foi adotado por levar em consideração a influência das outras fibras coletoras em torno da fibra analisada e por ter apresentado melhores ajustes em estudos experimentais de outros autores (Wu et al., 1999). O modelo de Kuwabara é mostrado nas Equações 3.36 e 3.37.

$$u_r = \frac{-U_0}{2 \cdot Ku} \cdot \left(1 - \frac{r_c^2}{r^2} - 2 \cdot \ln \frac{r}{r_c} \right) \cdot \cos \theta \quad (3.36)$$

$$u_\theta = \frac{-U_0}{2 \cdot Ku} \cdot \left(1 - \frac{r_c^2}{r^2} + 2 \cdot \ln \frac{r}{r_c} \right) \cdot \sin \theta \quad (3.37)$$

onde: U_0 é a velocidade de filtração;

Ku é o fator de Kuwabara;

r_c é o raio do coletor;

r é a distância entre o centro do coletor e o centro da partícula;

θ é o ângulo que determina o posicionamento da partícula no espaço, sendo igual π (180°) a montante do coletor e 0 (0°) a jusante, considerando-se o centro do coletor como origem do sistema.

A carga da partícula, necessária para a Equação 3.29, foi determinada pelas expressões empíricas obtidas por Rodrigues (2005), apresentadas na Tabela 2.3.

As Figuras 3.6 e 3.7 ilustram os gráficos de trajetória de partícula obtidos através da simulação desenvolvida computacionalmente.

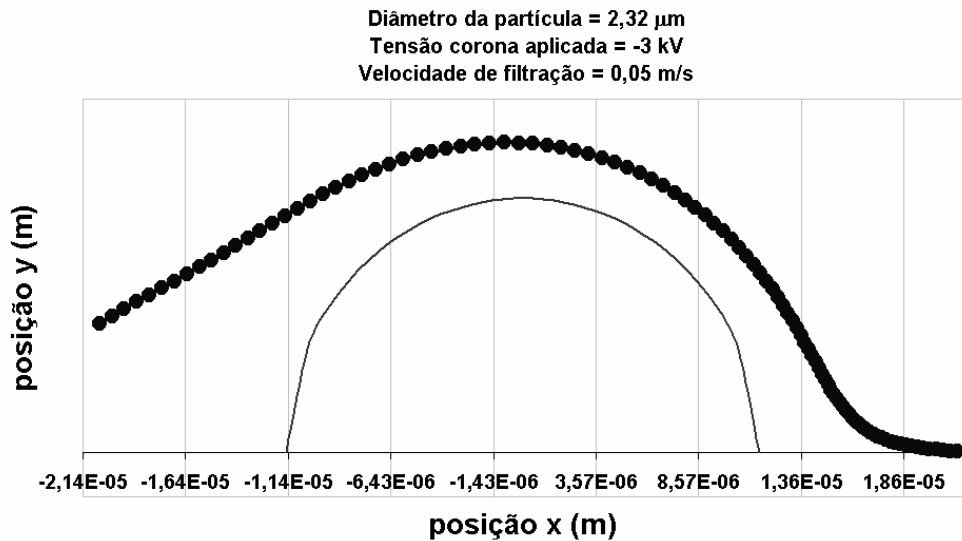


Figura 3.6 – Exemplo de gráfico desenvolvido pela simulação computacional no qual a partícula não é coletada pela fibra.

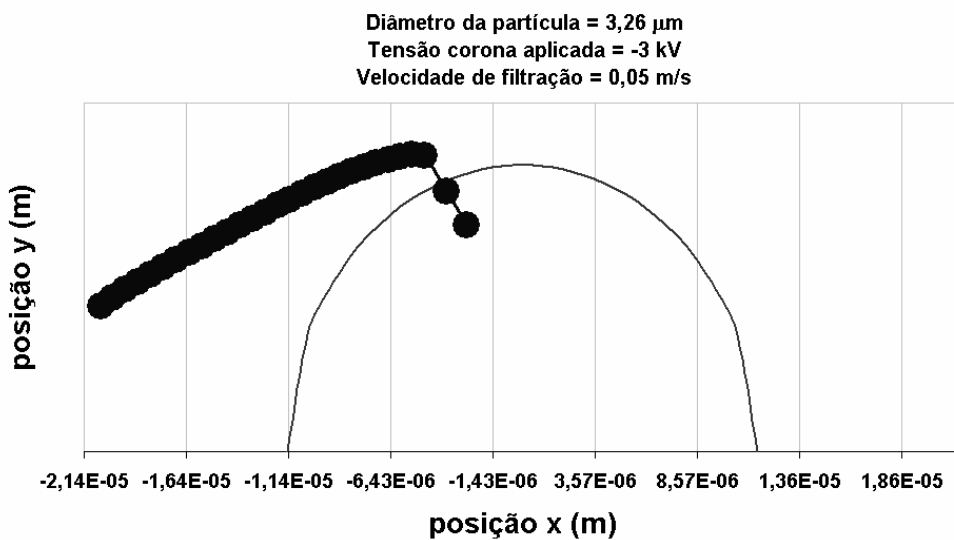


Figura 3.7 – Exemplo de gráfico desenvolvido pela simulação computacional no qual a partícula é coletada pela fibra.

3.3.4. Cálculo das eficiências de coleta pelo mecanismo eletroforético através da análise das trajetórias das partículas

A eficiência total de coleta de partículas de um dado diâmetro é definida como a fração de partículas deste diâmetro contidas no fluido que colidem com a superfície coletora. Isto pode ser expresso em termos da altura da área equivalente à seção transversal do fluxo de gás no qual as partículas colidem com o coletor, conforme apresentado na Figura 3.8 e na Equação 3.38.

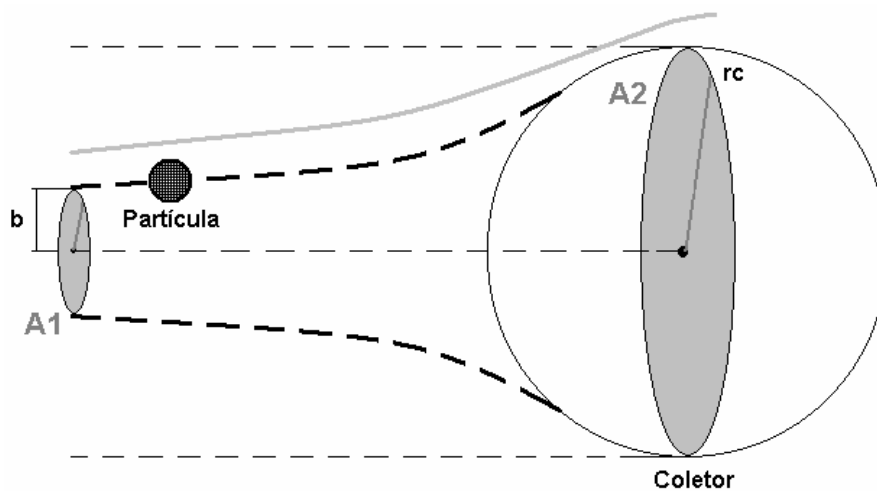


Figura 3.8 – Representação da trajetória limite no qual a partícula é coletada.

$$\eta_T(\text{simulação}) = \frac{b}{r_c} \quad (3.38)$$

onde: b é a altura da área equivalente à seção transversal do fluxo de gás no qual as partículas colidem com o coletor;

r_c é o raio do coletor.

Para se poder encontrar o valor da altura b e calcular a eficiência de coleta total do elemento filtrante para um dado diâmetro de partícula através da Equação 3.38, determinou-se sua trajetória limite variando-se o ângulo θ inicial da partícula a montante do coletor. Desse modo, obteve-se o valor máximo de θ no qual ela se choca com a fibra e,

assim, também a altura inicial desta trajetória em relação ao eixo horizontal que passa pelo centro do coletor.

Para se obter a eficiência de coleta do mecanismo eletroforético, inicialmente calculou-se a eficiência de coleta considerando-se todos os mecanismos com exceção do mecanismo elétrico, igualando-se, para isso, a carga da partícula a zero. Por fim, subtraiu-se esta eficiência de coleta sem o mecanismo elétrico da eficiência total (no qual a carga elétrica da partícula é considerada), tendo-se, assim, o grau de participação do mecanismo elétrico, ou seja, a eficiência de coleta do mecanismo eletroforético.

Os resultados obtidos através da simulação computacional para a eficiência de coleta do mecanismo eletroforético são mostrados no Apêndice C.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Eficiências de coleta eletroforética calculadas a partir das penetrações experimentais obtidas por Rodrigues (2005)

A partir dos valores experimentais de penetração da partícula no filtro obtidos por Rodrigues (2005), calculou-se a eficiência experimental de coleta do mecanismo eletroforético, $\eta_{E (exp)}$, através da Equação 3.1, conforme metodologia apresentada no item 3.2.2. Não foram considerados os resultados experimentais obtidos para tensão corona aplicada igual a -9 kV. Rodrigues (2005) relatou que, nos experimentos desenvolvidos com aplicação de tensão corona desta magnitude, o sistema experimental funcionou como um precipitador eletrostático de duplo estágio, onde as partículas carregadas depositaram-se nas paredes das tubulações antes de serem coletadas pelo contador de partículas. Os valores de $\eta_{E(exp)}$ considerados, assim como os valores de penetração experimental e as eficiências calculadas teoricamente para os outros mecanismos de coleta estão dispostos no Apêndice B.

As Figuras 4.1 a 4.3 apresentam as curvas da eficiência experimental do mecanismo eletroforético em função do diâmetro de Stokes da partícula, para os carregamentos corona de 0, -3 e -6 kV e velocidades de filtração adotados por Rodrigues (2005).

Através dos gráficos de $\eta_{E (exp)}$ em função do diâmetro da partícula, pode-se observar a presença de pontos de valor máximo para a eficiência eletroforética. Este fato pode ser explicado pelo efeito de sobreposição dos mecanismos de coleta.

Coury (1983) mostrou que, considerando-se apenas o mecanismo eletroforético atuando sobre o processo de captação pelo filtro, η_E mantém um valor praticamente constante ao se variar o diâmetro da partícula analisada, enquanto os outros mecanismos apresentam faixas de diâmetro em que têm maior ou menor eficiência quando considerados atuando sozinhos no processo de coleta.

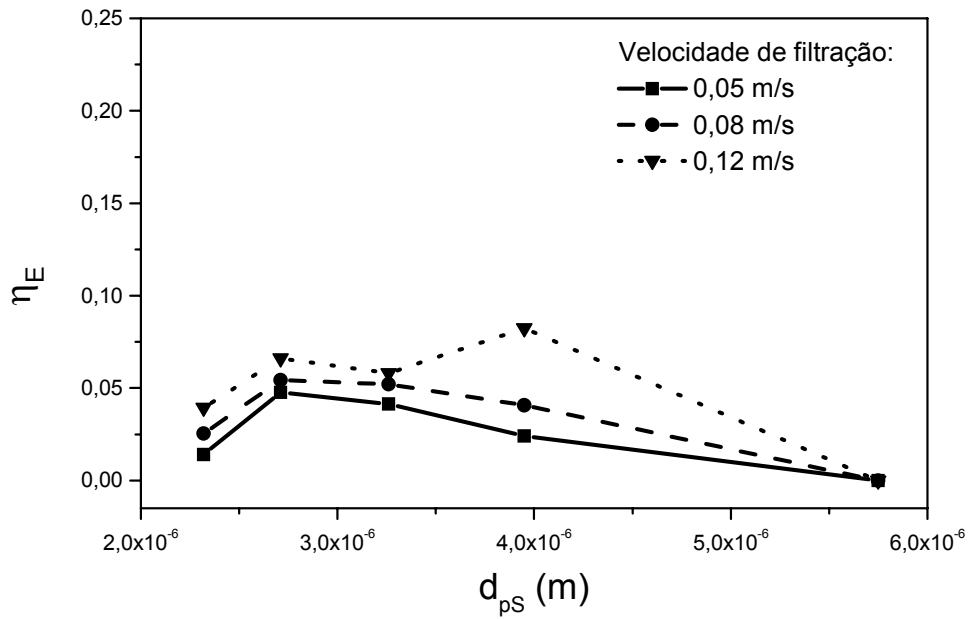


Figura 4.1 – η_E (exp) em função do diâmetro de Stokes da partícula; Tensão corona aplicada = 0 kV.

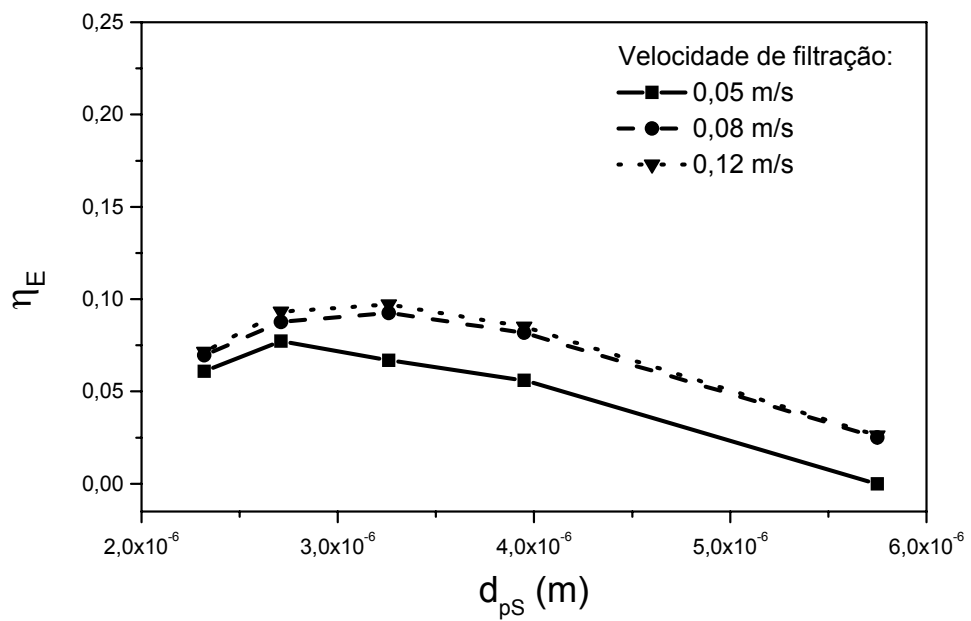


Figura 4.2 – η_E (exp) em função do diâmetro de Stokes da partícula; Tensão corona aplicada = -3 kV.

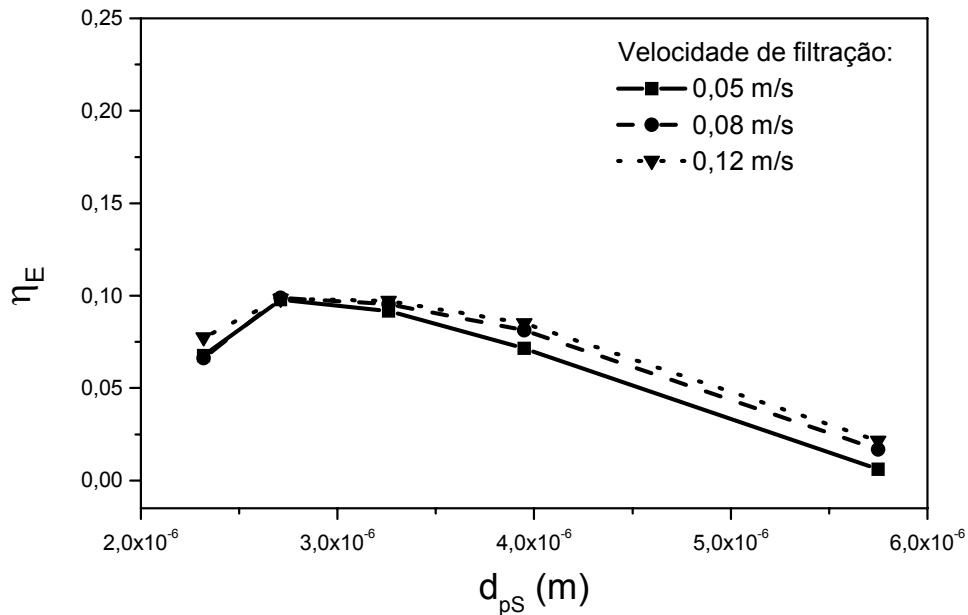


Figura 4.3 – $\eta_{E (exp)}$ em função do diâmetro de Stokes da partícula; Tensão corona aplicada = -6 kV.

Entretanto, ao se considerar todos atuando simultaneamente na filtração, observa-se uma competição entre os mecanismos de coleta, conforme abordagem dada pela Equação 2.49. Desse modo, o mecanismo eletroforético apresenta maior significância no processo na faixa de diâmetro de partícula onde os outros mecanismos são pouco eficientes, tendo-se o valor máximo de $\eta_{E (exp)}$ em torno de 3 μm , tamanho em que a partícula é muito grande para se ter eficiência significativa do mecanismo difusional e ainda muito pequena para se ter significativa coleta pelos mecanismos inercial, interceptação direta e gravitacional.

A partir dos gráficos, observa-se, ainda, um ligeiro aumento da eficiência de coleta eletroforética com o aumento da velocidade de filtração nos experimentos conduzidos sem carregamento corona ($T_c = 0 \text{ kV}$).

Jodeit e Loffler (1987) verificaram, para partículas com diâmetro maior que 2 μm , uma diminuição da eficiência total de filtração com o aumento da velocidade, decorrente da menor adesão das partículas nas fibras coletoras. Entretanto, as velocidades utilizadas experimentalmente por Rodrigues (2005) e consideradas neste trabalho (0,05 a 0,12 m/s) não são grandes o suficiente para causar ricocheteamento significativo das partículas nas fibras.

Além disso, este pequeno crescimento da eficiência eletroforética obtido com o aumento da velocidade de filtração para experimentos ausentes de carregamento corona pode

ser justificado pelo ganho de cargas elétricas na partícula por triboeletrificação. O processo de carregamento elétrico por triboeletrificação, dado pelo choque da partícula com as tubulações do gerador de aerosol, ocorre simultaneamente com o carregamento corona. A triboeletrificação acontece simplesmente devido ao contato e posterior separação de dois materiais, momento em que há troca de elétrons entre suas superfícies. Considerando-se que os dois materiais estão em fricção, quanto maior a velocidade relativa entre os materiais, mais vezes suas superfícies entram em contato e se separam. Portanto, quanto maior a velocidade de filtração, mais vezes a partícula entra em contato e se separa da tubulação do sistema experimental (maior fricção), ou seja, maior a quantidade de elétrons trocados e maior o carregamento elétrico devido a esse mecanismo (maior a carga elétrica global da partícula). Sendo a eficiência experimental de coleta eletroforética diretamente proporcional à carga elétrica da partícula, logo ela é também proporcional à velocidade de filtração.

Contudo, este aumento da eficiência eletroforética com o aumento da velocidade de filtração não é visualizado para experimentos desenvolvidos com carregamentos iguais a -3 e -6 kV. Isto pode ser explicado pelo fato da triboeletrificação ser significativa apenas mediante a não utilização de carregamento corona, já que a magnitude do ganho de cargas através da aplicação de tensão corona é muito superior a da obtida por triboeletrificação.

4.2. Eficiências de coleta eletroforética calculadas através de dados gerados pela simulação de trajetórias de partículas

A partir das trajetórias das partículas desenvolvidas pela rotina de simulação computacional demonstrada no item 3.3, obteve-se as eficiências de coleta eletroforética conforme o método descrito no item 3.3.4. Novamente, foram desconsiderados os resultados experimentais obtidos por Rodrigues (2005) utilizando carregamento corona igual a -9 kV, como explicado no item 4.1. Os valores de $\eta_{E(sim)}$ estão dispostos no Apêndice C.

Os gráficos de η_E , calculados através dos dados gerados por simulação, em função do diâmetro de Stokes da partícula são apresentados nas Figuras 4.4 a 4.6, sendo comparados com os resultados experimentais.

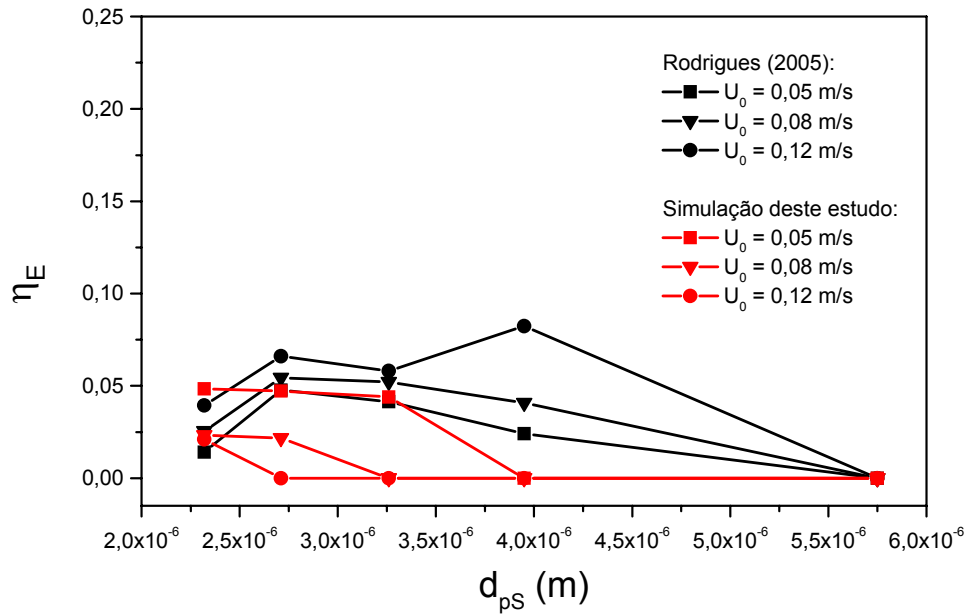


Figura 4.4 – η_E em função do diâmetro de Stokes da partícula; Tensão corona aplicada = 0 kV.

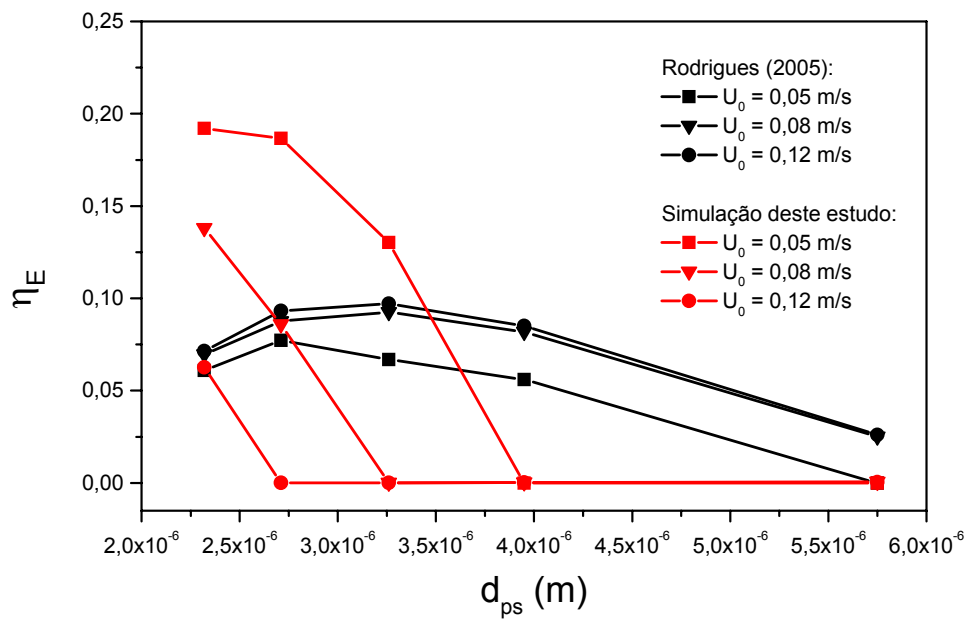


Figura 4.5 – η_E em função do diâmetro de Stokes da partícula; Tensão corona aplicada = -3 kV.

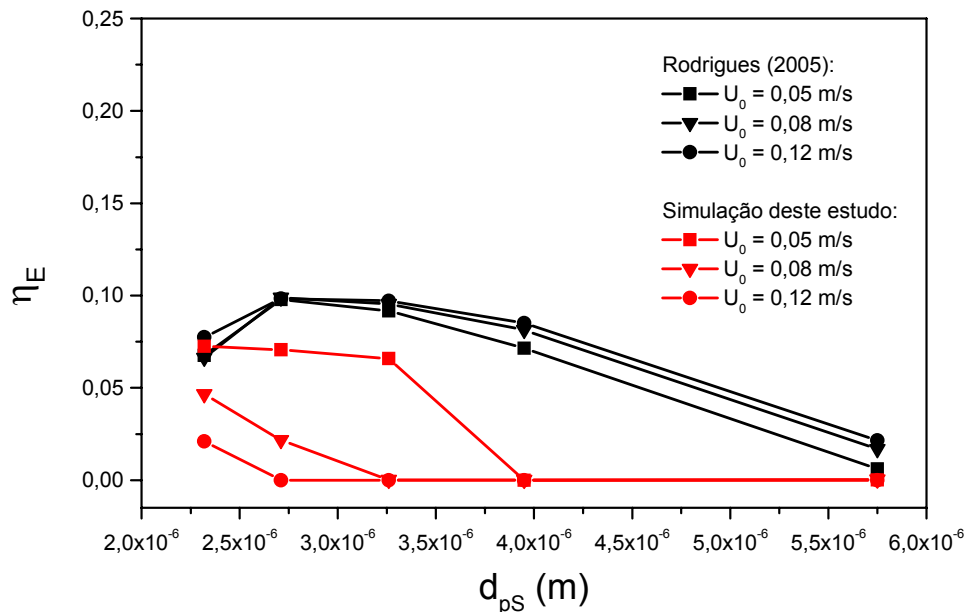


Figura 4.6 – η_E em função do diâmetro de Stokes da partícula; Tensão corona aplicada = -6 kV.

Analisando-se os gráficos que comparam os valores calculados pela simulação computacional com os resultados obtidos através dos experimentos de Rodrigues (2005), observa-se, primeiramente, que as magnitudes dos valores obtidos neste trabalho para velocidade de filtração igual a 0,05 m/s tem melhor ajuste com os resultados experimentais, tornando-se menos preciso com o aumento de U_0 .

Verifica-se, também, que as curvas de eficiência eletroforética em função do diâmetro de partícula desenvolvidas computacionalmente apresentam o mesmo perfil das curvas experimentais, com pontos de máximo (em torno de 3 μm) justificados pela sobreposição dos mecanismos de coleta.

Entretanto, existe uma inversão na variação de η_E com o aumento da velocidade de filtração: como visto no item 4.1, tem-se pelos resultados experimentais um ligeiro aumento da eficiência eletroforética com o aumento da velocidade para experimentos ausentes de carregamento corona; já nos resultados obtidos pela simulação, a eficiência eletroforética diminui mediante o aumento da velocidade.

Isto ocorre, provavelmente, pelo fato das equações utilizadas para o cálculo da carga elétrica da partícula (dispostas na Tabela 2.3) não serem dependentes da velocidade de filtração. Com isso, o equacionamento matemático desenvolvido para a simulação não é

sensível ao pequeno crescimento da carga elétrica causado pelo aumento da velocidade. Assim, nos resultados gerados computacionalmente, o aumento da velocidade causa acréscimo apenas dos efeitos inercial e gravitacional na coleta da partícula, o que, considerando-se a sobreposição dos mecanismos de coleta (segundo abordagem da Equação 2.49), torna η_E menos significativa.

Ressalta-se, ainda, que os erros normalmente inerentes ao modelo desenvolvido na simulação computacional contribuem para as discrepâncias entre os valores experimentais e os resultados obtidos neste trabalho.

4.3. Verificação do modelo computacional para determinação da eficiência do mecanismo eletroforético através do cálculo de penetração das partículas

Utilizando-se os resultados obtidos pela simulação computacional (item 4.2), calculou-se a penetração das partículas no filtro para as velocidades de filtração de 0,05, 0,08 e 0,12 m/s e tensões coronas aplicadas iguais a -3 e -6 kV, além de resultados na ausência de carregamento corona, onde as cargas nas partículas são geradas pelo processo de triboeletrificação.

Através destes gráficos, busca-se comparar os valores de η_E obtidos neste trabalho com os resultados experimentais de Rodrigues (2005) e os valores obtidos pelo uso de equações de eficiência eletroforética propostas por outros autores. As equações de η_E nestas comparações foram desenvolvidas por Yoshida e Tien (1985), dada pela Equação 2.46, e por Rodrigues (2005), dada pela Equação 2.48. Comparou-se, também, a penetração desconsiderando-se o mecanismo eletroforético.

Estas alterações de equações de eficiência eletroforética foram realizadas modificando-se ou descartando-se o termo de η_E no cálculo da eficiência total de cada elemento filtrante (η_T), dado pela Equação 2.49, cujo valor é substituído na Equação 2.19 para a obtenção da penetração de partículas no filtro. Ainda para o cálculo de η_T , as eficiências de coleta dos mecanismos difusional, interceptação direta, inercial e gravitacional foram obtidos, respectivamente, pelos modelos desenvolvidos por Payet et al. (1992), Equação 2.27, Liu e Rubow (1990), Equação 2.30, Gougeon (1994), Equação 2.33, e Ranz e Wong (1952), Equação 2.37.

Os gráficos de penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula estão dispostos nas Figuras 4.7 a 4.15.

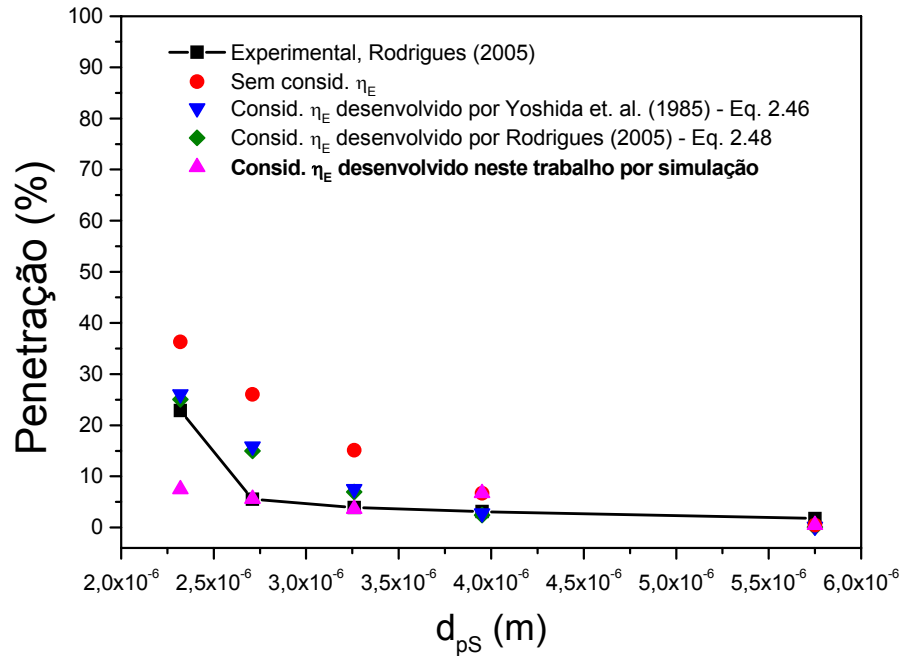


Figura 4.7 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,05$ m/s; Tensão corona aplicada = 0 kV.

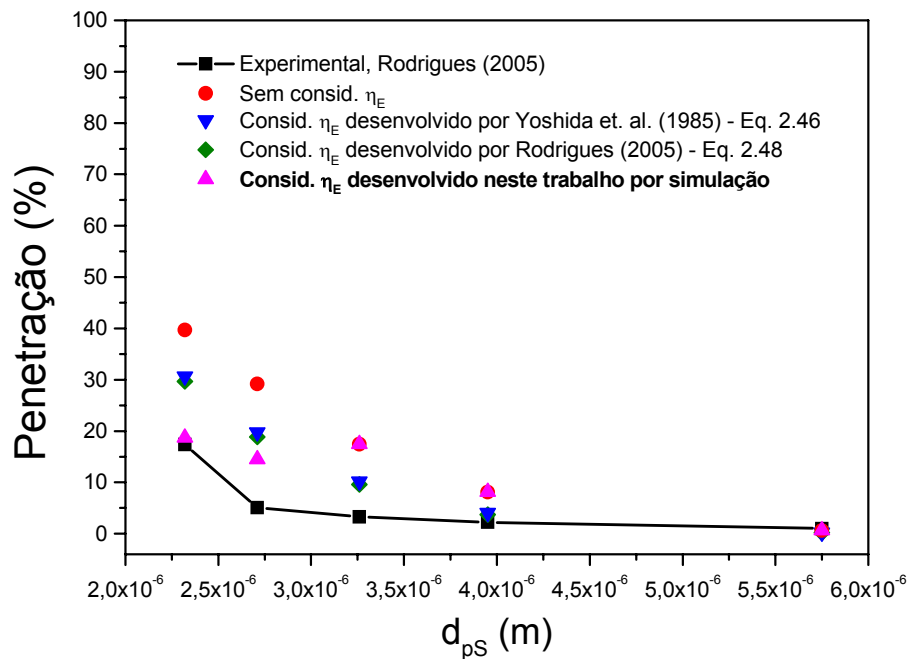


Figura 4.8 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,08$ m/s; Tensão corona aplicada = 0 kV.

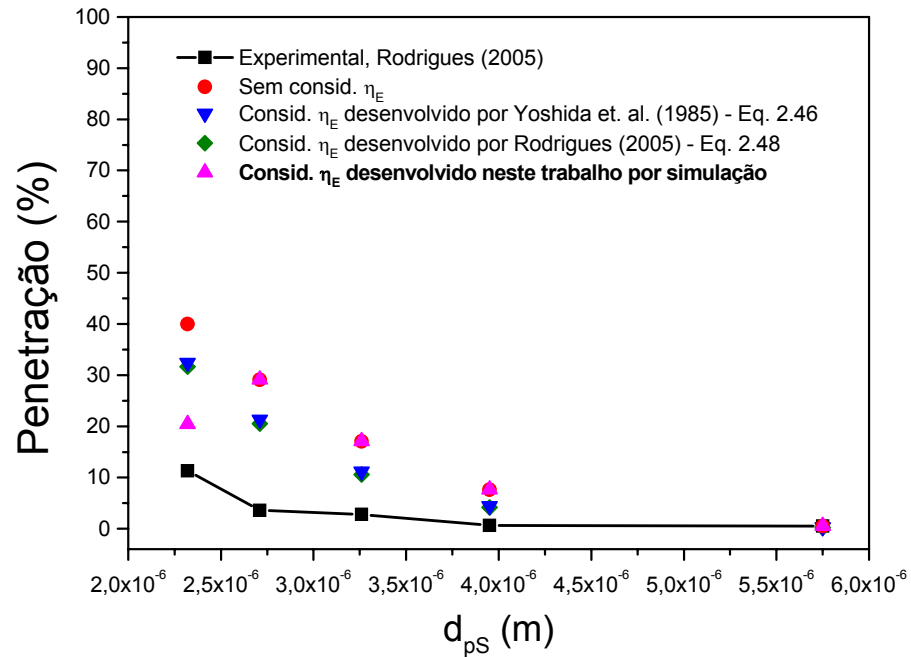


Figura 4.9 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,12$ m/s; Tensão corona aplicada = 0 kV.

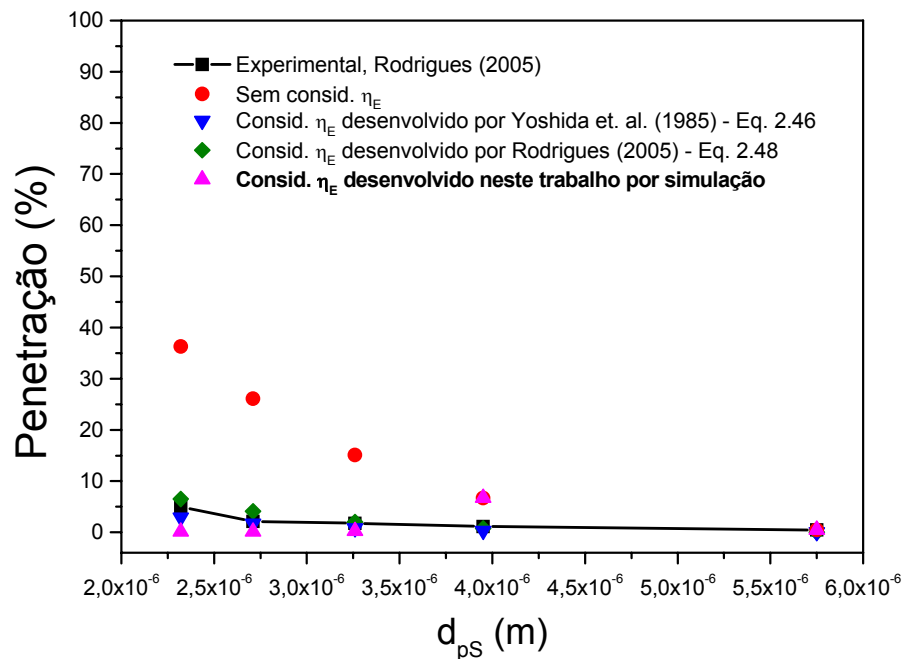


Figura 4.10 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,05$ m/s; Tensão corona aplicada = -3 kV.

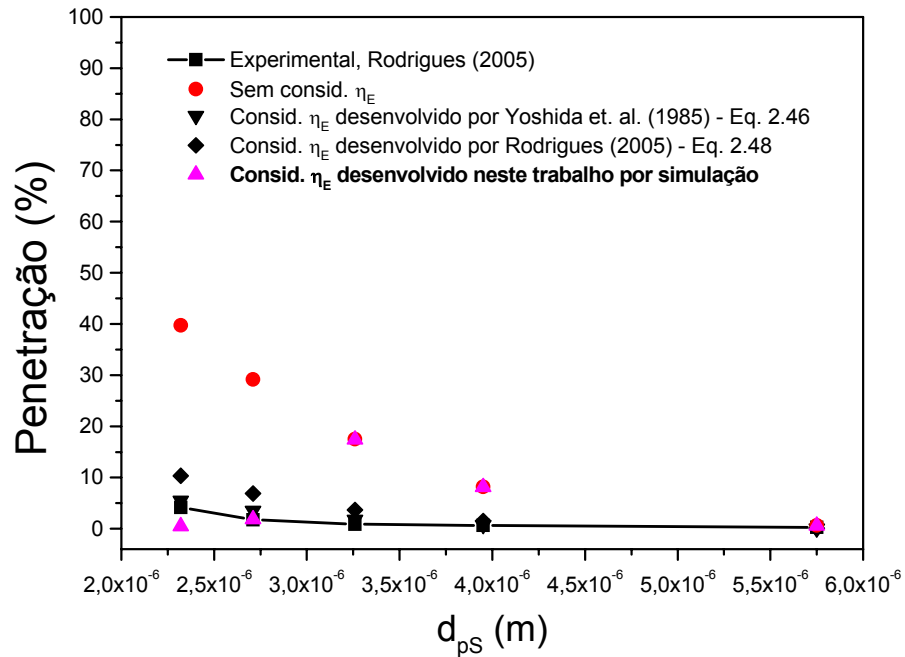


Figura 4.11 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,08$ m/s; Tensão corona aplicada = -3 kV.

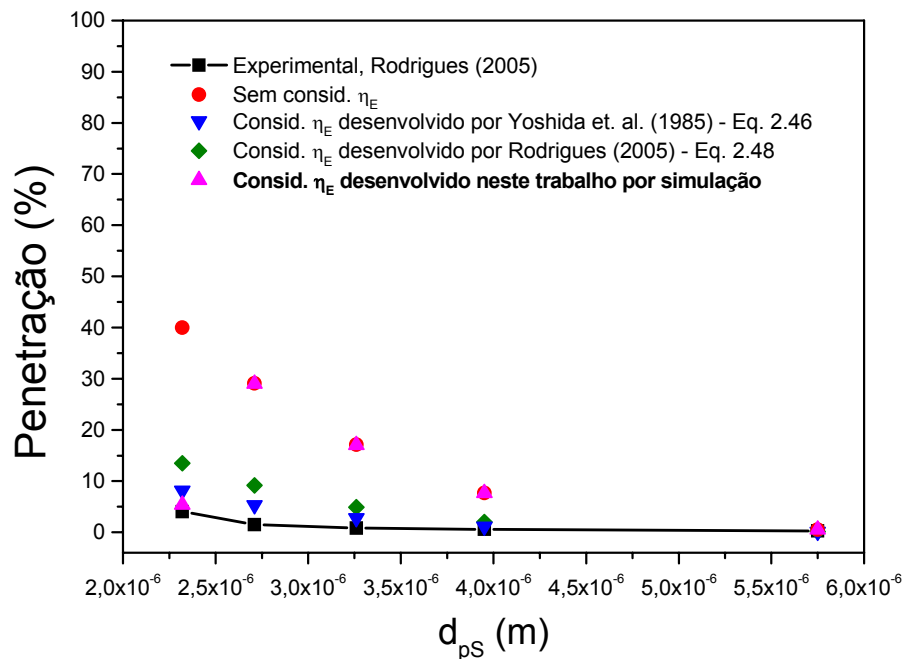


Figura 4.12 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,12$ m/s; Tensão corona aplicada = -3 kV.

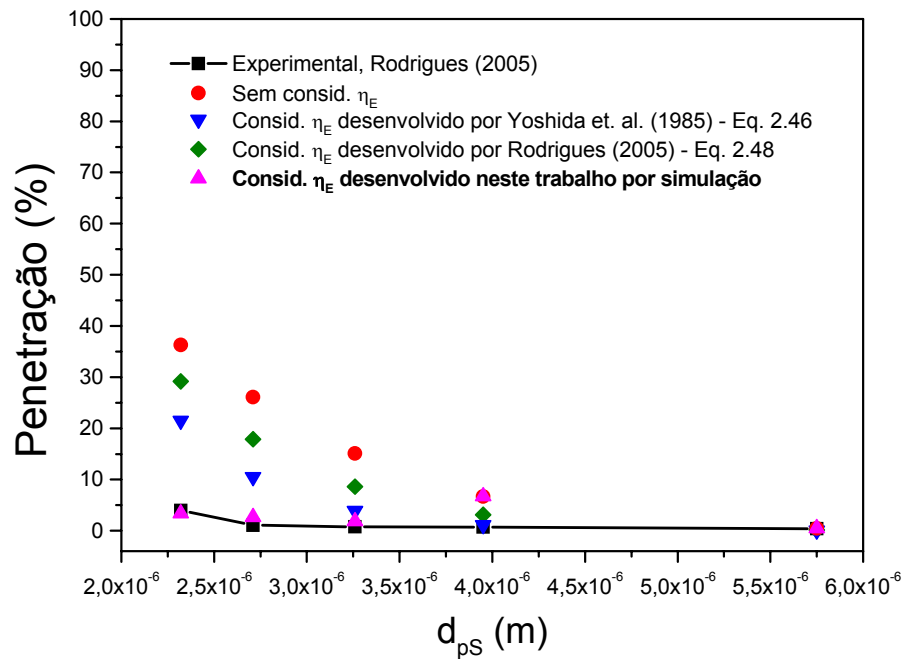


Figura 4.13 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,05$ m/s; Tensão corona aplicada = -6 kV.

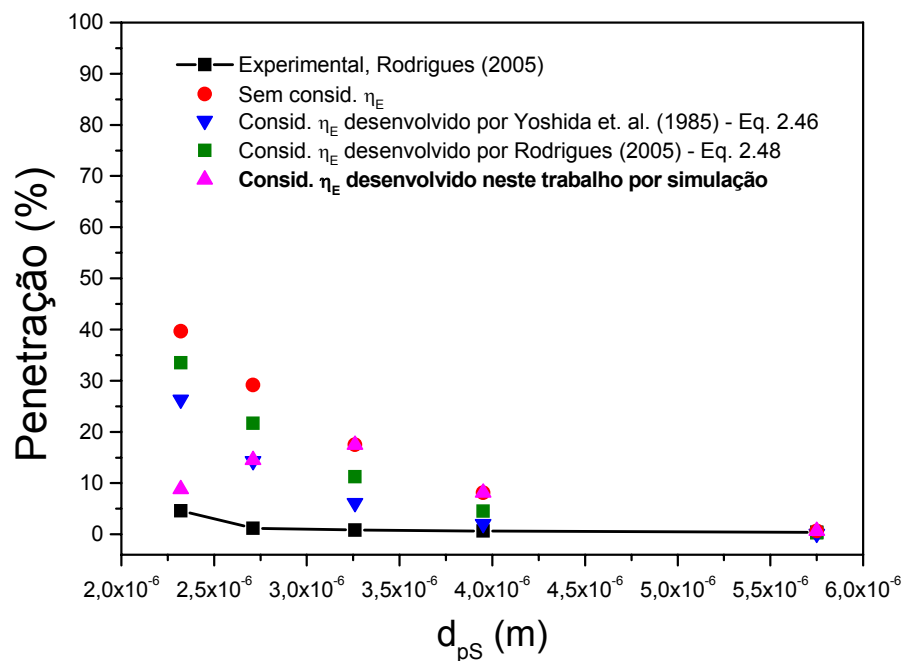


Figura 4.14 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,08$ m/s; Tensão corona aplicada = -6 kV.

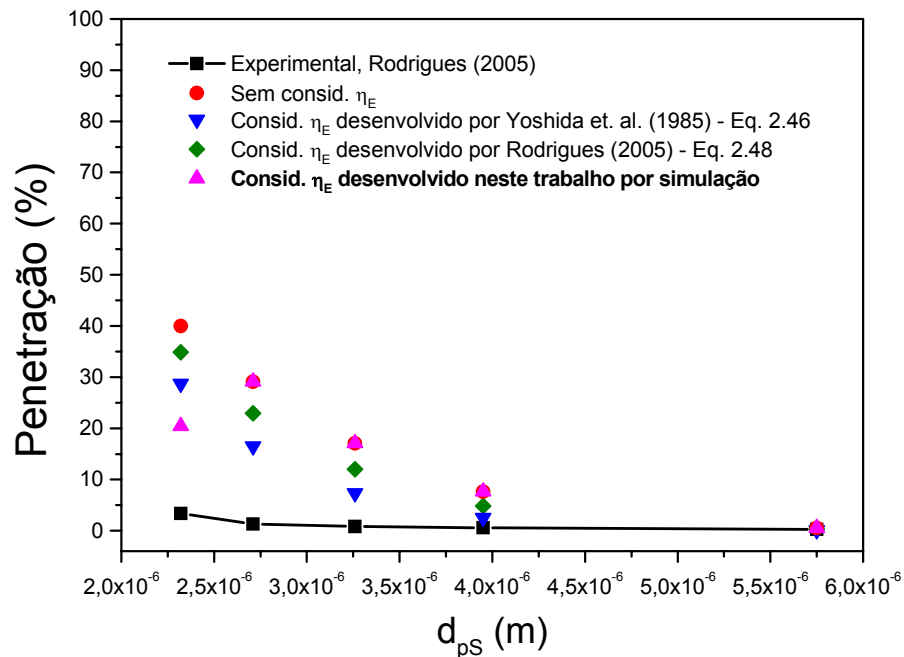


Figura 4.15 – Penetração em função do diâmetro de Stokes da partícula; $U_0 = 0,12$ m/s; Tensão corona aplicada = -6 kV.

Através das Figuras 4.7 a 4.15, verifica-se, inicialmente, que as penetrações de partículas obtidas desconsiderando-se o termo de eficiência eletroforética do cálculo de η_T fornece os valores de penetração menos próximos dos resultados experimentais dentre as curvas comparadas, evidenciando a importância do mecanismo de coleta eletroforética no processo de filtração.

Quanto às equações de η_E propostas, observa-se que, para velocidade de filtração igual a 0,05 m/s, o uso resultados dos obtidos pela simulação proposta neste trabalho fornece valores de penetração de partícula mais próximos dos determinados experimentalmente por Rodrigues (2005). Já para as velocidades de 0,08 e 0,12 m/s, a equação proposta por Yoshida e Tien (1985) é a mais precisa.

Isto era esperado visto que, como mostrado no item 4.2, a simulação proposta neste trabalho tem melhor ajuste aos dados experimentais quando a velocidade de filtração é igual a 0,05 m/s, piorando sua precisão com o aumento de U_0 .

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Analisando-se os resultados obtidos neste trabalho, pode-se obter as seguintes conclusões:

- Resultados experimentais mostram que, considerando-se todos os mecanismos de coleta atuando em conjunto, o mecanismo eletroforético tem maior eficiência na faixa de tamanho de partícula em que os mecanismos difusional, interceptação direta, inercial e gravitacional são poucos significativos (em torno de 3 μm), apresentando ponto de máximo nas curvas de $\eta_{E(\text{exp})}$ em função do diâmetro de partícula;
- A eficiência experimental do mecanismo eletroforético é diretamente proporcional à velocidade de filtração para experimentos conduzidos sem carregamento corona. Isso ocorre devido ao aumento de cargas elétricas na partícula com o aumento da velocidade com que esta partícula se choca com as tubulações do sistema experimental;
- A partir dos dados gerados por simulação, obteve-se curvas de eficiência do mecanismo eletroforético em função do diâmetro de partícula com o mesmo perfil dos resultados experimentais, apresentando pontos de máximo (em torno de 3 μm) justificados pela sobreposição dos mecanismos de coleta;
- Através do cálculo das penetrações de partícula, verifica-se, a importância do mecanismo de coleta eletroforética no processo de filtração, já que as penetrações de partículas obtidas desconsiderando-se o termo de eficiência eletroforética fornece os valores de penetração menos próximos dos resultados experimentais;
- Comparando-se as penetrações de partícula obtidas utilizando-se a simulação computacional desenvolvida neste trabalho com as penetrações calculadas utilizando-se as equações de Yoshida e Tien (1985), dada pela Equação 2.46, e de Rodrigues (2005), dada pela Equação 2.48, observa-se que, para a velocidade de filtração igual a 0,05 m/s, os valores obtidos por simulação aproximam-se mais dos resultados experimentais. Contudo, para velocidades iguais a 0,08 e 0,12 m/s, a equação desenvolvida por Yoshida e Tien (1985) é mais precisa.

CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após o desenvolvimento da rotina de simulação computacional deste trabalho, alguns itens são sugeridos para a continuidade em trabalhos futuros:

- Basear a simulação computacional em outros trabalhos experimentais que envolvam a filtração de partículas de diferentes diâmetros e materiais, a utilização de diferentes velocidades de filtração e carregamento elétrico das partículas, assim como filtros fabricados com diferentes tecidos, porosidades e diâmetros de fibra coletora;
- Otimizar a simulação computacional de modo a obter resultados mais próximos dos experimentais, sobretudo para velocidades de filtração maiores que 0,05 m/s;
- Buscar na literatura novas equações para a eficiência de coleta eletroforética, visando-se ter maior margem de comparação com a equação ajustada computacionalmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguiar, M.L. Filtração de gases em filtros de tecido: deposição e remoção da camada de pó formada. São Carlos, UFSCar, 1995 (Tese de Doutorado).
2. Almeida, R.G. Determinação da distribuição de cargas eletrostáticas em aerossóis. São Carlos, UFSCar, 2000 (Dissertação de Mestrado).
3. Baumgartner, H., Löffler, F. Particle collection in electric fibres filters a basic theoretical na experimental study. *Filtration & Separation*, p. 346-351, Set/Out, 1987.
4. Biermann, A., Bergman, W. Measurements of aerosol concentrations as a function of size and charge. *Aerosol Science and Technology*, 3, p. 293-304, 1984.
5. Brown, R.C. *Aerosol filtration: an integrated approach to the theory and applications of fibrous filters*. Pergamon Press Oxford, p. 120-177, 1993.
6. Brown, R.C., Tutorial review: simultaneous measurement of particle size and particle shape. *Journal Aerosol Science*, v. 28, n. 8, pp. 1373-1391, 1997.
7. Brown, R.C., Wake, D. Loading filters with monodisperse aerosols: macroscopic treatment. *Journal Aerosol Science*, v. 30, n. 2, pp. 227-234, 1999.
8. Cavasseno, V. *Industrial Air Pollution Engineering*. McGraw-Hill, EUA, 1980.
9. CDCC/USP São Carlos; <http://fisica.cdcc.sc.usp.br/olimpiadas/02/palestras/PA1.html>; acessado em 10 de setembro de 2005.
10. Clift, R., Grace, J.R., Weber, M.E. *Bubbles, drops and particles*. Academic Press, EUA, 1978.
11. Clift, R. Fundamental process in gas filtration. In: *The International Symposium on Filtration and Separation*, Australia, 1983.
12. Coury, J.R. *Electrostatic effects in granular bed filtration of gases*. University of Cambridge, 1983 (Ph.D. Thesis).
13. Coury, J.R. Filtração de gases em filtros granulares. In: J.T. Freire, J.C. Gubullin (eds.). *Tópicos especiais em sistemas particulados*, v. 2, cap. 2, pp. 65-121, São Carlos, UFSCar, 1986.
14. 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, ABEQ, 1988.
15. Coury, J.R., Duarte Filho, O.B. Filtration of solid aerosols in a granular bed. In: *The 21st Meeting of the Fine Particles Society*. EUA, 1990.

16. 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, 1991.
17. Cross, J.A. *Electrostatics: principles, problems and applications*. Adam Hilger, Reino Unido, 1987.
18. Donovan, R.P. *Fabric filtration for combustion sources*. Marcel Dekker Inc., EUA, 1985.
19. Duarte Filho, O.B., Coury, J.R. Filtração de ar em leito fixo: resultados preliminares. In: XVII Encontro sobre escoamento em meios porosos. São Carlos, ABEQ, 1989.
20. 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, ABEQ, 1992.
21. 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, ABEQ, 1994.
22. 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. Alemanha, 1995.
23. Duarte Filho, O.B. Filtração de gases em leito fixo granular: efeitos da variação no nível de carga eletrostática nas partículas. São Paulo, Escola Politécnica da USP, 1995 (Tese de doutorado).
24. Dullien, F.A.L. *Introduction to industrial gas cleaning*. Academic Press, Reino Unido, 1989.
25. 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.
26. Falaguasta, M.C.R. Estudo do aumento de escala de um precipitador eletrostático do tipo placa-fio. São Carlos, UFSCar, 2001 (Dissertação de Mestrado).
27. Falaguasta, M.C.R. Estudo do desempenho de um precipitador eletrostático operando na captura de partículas sub-micrométricas e nanométricas. São Carlos, UFSCar, 2005 (Dissertação de Doutorado).
28. Flagan, R.C. History of electrical aerosol measurements. *Aerosol Science and Technology*, v. 28, p. 301-380, 1998.
29. Flagan, R.C., Seinfeld, J.H. *Fundamentals of air pollution engineering*. Prentice-Hall, EUA, 1988.
30. Fleming, D.K. & Dahlstrom. *Chemical Engineering Progress*, v. 59, n. 7, 1963.

31. Freitas, N.L., Maniero, M.G., Coury, J.R. Filtração de aerossóis em altas temperaturas utilizando filtros cerâmicos de dupla camada: influência do diâmetro de partícula na eficiência de coleta. *Cerâmica*, v. 50; n. 316, pp. 355-361, 2004.
32. Frising, T., Thomas, D., Contal, P., Bémer, D., Leclerc, D. Influence of filter fibre size distribution on filter efficiency calculations. *Trans IchemE*, v. 81, parte A, p. 1179-1184, 2003.
33. Gougeon, R. Filtration des aerosols liquides par des filters è fibres en régime d'interception et d'inertie. Université Paris XII, 1994.
34. Guang, D. In-Situ measurement of electrostatic charge and distribution on flyash particles in power station exhaust stream. University of New South Wales, 1991 (Ph.D. Thesis).
35. Happel, J. *AIChE Journal*, v. 5, p. 174, 1959.
36. Kanaoka, C., Emi, H., Hiragi, S., Myojo, T. Morphology of particulate agglomerates on a cylindrical fiber and a collection efficiency of a dust loader fiber. Proc. of the 2nd international aerosol conference, Alemanha, 1986.
37. Kirsh, V.A. Gravitational deposition of aerosol particles on a fibrous filter with account for the effect of Van der Waals force. *Colloid Journal*, v. 63, n. 1, p. 68-73, 2001.
38. Kuwabara, S. *Journal Phys. Soc. Japan*, v. 14, p. 527, 1959.
39. 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, p. 311-320, 1987.
40. 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.
41. Lee, K.W., Liu, B.Y.H. *Aerosol Science Technology*, v. 1, p. 147, 1982.
42. Liu, B.Y.H., Rubow, K.L. Proc. of the 5th world filtration congress, França, 1990.
43. 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, 1965.
44. Marra Jr, W.D. Desenvolvimento de um equipamento para a determinação da distribuição de cargas eletrostáticas em aerossóis. São Carlos, UFSCar, 2000 (Tese de doutorado).
45. Matteson, M.J. *Filtration: Principles and Practices*. Marcel Dekker Inc., EUA, 1987.
46. McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriot, P. *Unit operations of chemical engineering*. 5^a ed., pp. 1130, Mc-Graw Hill, EUA, 1993.

47. 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.
48. Mizuno, A. Electrostatic precipitation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 7, n. 5, p. 615-624, 2000.
49. Nóbrega, S.W., Arnosti Jr., S., Coury, J.R. Evaluation of the performance of a wire-plate electrostatic precipitator. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 18, n. 3, pp. 313-325, 2001.
50. Nóbrega, S.W. Estudo do desempenho de um precipitador eletrostático do tipo placa-fio na remoção de um material particulado polidisperso. São Carlos, UFSCar, 2002 (Tese de doutorado).
51. Nóbrega, S.W., Falagusta, M.C.R., Coury, J.R. A study of a wire-plate electrostatic precipitator operating in the removal of polydispersed particles. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 21, n. 2, pp. 275-284, 2004.
52. Ogawa, A. Separation of particles from air and gases. CRC Press, EUA, 1984.
53. Oglesby, S., Nichols, G.B. Electrostatic precipitation, pollution engineering and technology. Marcel Dekker, EUA, 1978.
54. Payet, S. Filtration stationnaire et dynamique des aerosols liquids submicroniques. Université Paris XII, 1991.
55. Payet, S., Boulaud, D., Madelaine, G., Renoux, A. Penetration and pressure drop of a HEPA filter during loading with submicron liquid particles. *Journal Aerosol Science*, v. 23, n. 7, p. 723-735, 1992.
56. Perry, R.H., Green, D.W. Perry's chemical engineers handbook. 6^a ed., pp. 2302, McGraw-Hill, EUA, 1984.
57. Pich, J. In *Aerosol Science*. Ed. Academic Press, EUA, 1966.
58. Pnuelli, 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.
59. Ptak, T., Jaroszczyk, T. Theoretical-experimental aerosol filtration model for fibrous filters at intermediate Reynolds numbers. Proc. of the 5th world filtration congress, França, 1990.
60. Riehle, C. Basic and theoretical operation of ESPs. In: PARKER, K.R., *Applied electrostatic precipitation*. Cap. 3, p.25-88, Blackie & Professional, EUA, 1997.
61. Rodrigues, M.V. Determinação da carga eletrostática em aerossóis e seu efeito na filtração de gases. São Carlos, UFSCar, 2005 (Tese de Doutorado).

62. 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.
63. 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.
64. 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.
65. Shapiro, M., Gutfinger, C., Laufer, G. Electrostatic mechanisms of aerosol collection by granular filters: a review. *Journal Aerosol Science*, v. 19, n. 6, pp. 651-677, 1988.
66. Shuyi, W.; Xiancheng, W.; Xiyan, G.; Jun H. Study of computer modeling for fibrous filters with image effects. Society of Automative Engineers Inc., n. 00FCC-70, 1998.
67. Silva Neto, O.G., Aguiar, M.L., Coury, J.R. Filtração de gás em filtro de manga: estudo da porosidade. *Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra*, v. 21, n. 1, pp.187-195, 2002.
68. Sinto Brasil Produtos Ltda.; <http://www.sinto.com.br>; acessado em 02 de setembro de 2005.
69. Spurny, K.V. *Advances in aerosol filtration*. Lewis Publishers, EUA, 1998.
70. Stechkina, I.B., Fuchs, N.A. *Ann. Occup. Hyg.*, 9, 59, 1966.
71. Steffens, J. Desempenho de filtros fibrosos operando na remoção de partículas nanométricas de aerossóis. São Carlos, UFSCar, 2007 (Dissertação de Doutorado).
72. Stenhouse, J.I.T. Filtration of air by fibrous filters. *Filtration & Separation*, Reino Unido, 1975.
73. Strauss, W. *Industrial Gas Cleaning*. 2^a ed., Pergamon Press, EUA, 1975.
74. Tardos, G.I., Abuaf, N., Gutfinger, C. Dust deposition in granular bed filters: theories and experiments. *Journal Air Pollution Control Association*, v. 28, p. 354, 1978.
75. Tardos, G.I; Pfeffer, R. The influence of electrostatic charges on the filtration efficiencies of airborne dust in a fluidized bed. In: *Filtech Conference. Proceeding*, p. 69-82, Reino Unido, 1981.
76. 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*, EUA, 1990.
77. Thomas, D., Contal, P., Renaudin, V., Penicot, P., Leclerc, D., Vendel, J. Modelling pressure drop in HEPA filters during dynamic filtration. *Journal Aerosol Science*, v. 30, n. 2, p. 235-246, 1999.

78. Tien, C. Granular filtration of aerosols and hydrosols. pp. 365, Butterworths, EUA, 1989.
79. 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.
80. Wang, C.S. Electrostatic forces in fibrous filters: a review. *Powder Tecnology*, n. 118, p. 166-170, 2001.
81. Weast, R.C., *Handbook of chemistry and physics*. 64^a ed., pp. 1387, CRC Press, Inc., EUA, 1983.
82. 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.
83. 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.
84. Wu, Z.; Walters, J. K.; Thomas, D. W. P. The deposition of particles from an air flow on a single cylindrical fiber in a uniform electrical field. *Aerosol Science and Technology*, v. 30, n. 1, p. 62-70, 1999.
85. Yeh, H.C., Liu, B.Y.H. Aerosol filtration by fibrous filters - I. Theoretical. *Journal Aerosol Science*, v. 5, n. 2, p. 191-204, 1974.
86. Yoshida, H., Tien, C. A new correlation of the inicial collection efficiency of granular aerosol filtration. *AIChE Journal*, v. 31, n. 10, p. 1752-1754, 1985.
87. Zhu, C., Lin, C.H., Cheung, C.S. Inertial Impaction-dominated fibrous filtration with rectangular or cylindrical fibers. *Powder Technology*, n. 112, p. 149-162, 2000.

APÊNDICES

Apêndice A: Dados de determinação experimental da penetração de partículas no filtro (Rodrigues, 2005).

Tabela A.1-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 0,05 m/s	Tensão corona aplicada = 0 kV
Temperatura = 24°C	Umidade do ar = 26%
Vazão de filtração = 5,20 l/min	Vazão sonda isocinética = 93,66 ml/min
Massa filtro = 4,2785 g	Massa filtro + pó = 4,3190 g

Tabela A.1-2 – Números de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas para determinação da penetração.

d_{ps} 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 A.2-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 0,08 m/s	Tensão corona aplicada = 0 kV
Temperatura = 25°C	Umidade do ar = 21%
Vazão de filtração = 8,33 l/min	Vazão sonda isocinética = 150 ml/min
Massa filtro = 4,7100 g	Massa filtro + pó = 4,7430 g

Tabela A.2-2 – Números de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas para determinação da penetração.

d_{ps} 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 A.3-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 0,12 m/s	Tensão corona aplicada = 0 kV
Temperatura = 25°C	Umidade do ar = 25%
Vazão de filtração = 12,49 l/min	Vazão sonda isocinética = 224,8 ml/min
Massa filtro = 4,3596 g	Massa filtro + pó = 4,4090 g

Tabela A.3-2 – Números de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas para determinação da penetração.

d_{ps} médio	2,32	2,71	3,26	3,95	5,75
E1	51.200	51.000	8.300	17.600	5.880
E2	43.300	49.000	7.850	18.700	6.550
E3	48.000	49.600	6.920	13.900	5.020
E4	49.400	37.200	5.670	13.300	4.870
S1	5.910	1.694	197	68	22
S2	5.600	1.680	223	98	29
S3	5.380	1.658	196	87	42
S4	5.300	1.487	208	95	34
S5	5.140	1.636	193	121	22
S6	5.220	1.890	196	134	25

Tabela A.4-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 0,05 m/s	Tensão corona aplicada = -3 kV
Temperatura = 25°C	Umidade do ar = 21%
Vazão de filtração = 5,20 l/min	Vazão sonda isocinética = 93,66 ml/min
Massa filtro = 4,2670 g	Massa filtro + pó = 4,2782 g

Tabela A.4-2 – Números de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas para determinação da penetração.

d_{ps} 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 A.5-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 0,08 m/s	Tensão corona aplicada = -3 kV
Temperatura = 28°C	Umidade do ar = 24%
Vazão de filtração = 8,33 l/min	Vazão sonda isocinética = 150 ml/min
Massa filtro = 4,2374 g	Massa filtro + pó = 4,2580 g

Tabela A.5-2 – Números de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas para determinação da penetração.

d_{ps} 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 A.6-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 0,12 m/s	Tensão corona aplicada = -3 kV
Temperatura = 27°C	Umidade do ar = 26%
Vazão de filtração = 12,49 l/min	Vazão sonda isocinética = 224,8 ml/min
Massa filtro = 4,4404 g	Massa filtro + pó = 4,4630 g

Tabela A.6-2 – Números de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas para determinação da penetração.

d_{ps} 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 A.7-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 0,05 m/s	Tensão corona aplicada = -6 kV
Temperatura = 26°C	Umidade do ar = 23%
Vazão de filtração = 5,20 l/min	Vazão sonda isocinética = 93,66 ml/min
Massa filtro = 4,3506 g	Massa filtro + pó = 4,3587 g

Tabela A.7-2 – Números de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas para determinação da penetração.

d_{ps} 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 A.8-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 0,08 m/s	Tensão corona aplicada = -6 kV
Temperatura = 27°C	Umidade do ar = 26%
Vazão de filtração = 8,33 l/min	Vazão sonda isocinética = 150 ml/min
Massa filtro = 4,0238 g	Massa filtro + pó = 4,0442 g

Tabela A.8-2 – Números de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas para determinação da penetração.

d_{ps} 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	4.900	1.350	212	93	22
S2	4.480	1.490	262	149	48
S3	4.480	1.640	306	179	34
S4	4.460	1.750	314	175	36
S5	5.330	1.820	338	170	34
S6	5.630	2.010	336	186	29

Tabela A.9-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 0,12 m/s	Tensão corona aplicada = -6 kV
Temperatura = 25°C	Umidade do ar = 25%
Vazão de filtração = 12,49 l/min	Vazão sonda isocinética = 224,8 ml/min
Massa filtro = 4,1208 g	Massa filtro + pó = 4,1447 g

Tabela A.9-2 – Números de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas para determinação da penetração.

d_{ps} 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

Tabela A.10-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 0,05 m/s	Tensão corona aplicada = -9 kV
Temperatura = 23°C	Umidade do ar: 23%
Vazão de filtração = 5,20 l/min	Vazão sonda isocinética: 93,66 ml/min
Massa filtro = 5,0338 g	Massa filtro + pó: 5,0445 g

Tabela A.10-2 – Números de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas para determinação da penetração.

d_{ps} 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 A.11-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 0,08 m/s	Tensão corona aplicada = -9 kV
Temperatura = 24°C	Umidade do ar = 23%
Vazão de filtração = 8,33 l/min	Vazão sonda isocinética = 150 ml/min
Massa filtro = 4,5561 g	Massa filtro + pó = 4,5709 g

Tabela A.11-2 – Números de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas para determinação da penetração.

d_{ps} 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 A.12-1 – Condições experimentais de filtração.

U = 0,12 m/s	Tensão corona aplicada = -9 kV
Temperatura = 24°C	Umidade do ar = 26%
Vazão de filtração = 12,49 l/min	Vazão sonda isocinética = 224,8 ml/min
Massa filtro = 4,2329 g	Massa filtro + pó = 4,2608 g

Tabela A.12-2 – Números de partículas por faixa de diâmetro na entrada (E) e saída do filtro (S) coletados pelas sondas isocinéticas para determinação da penetração.

d_{ps} 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

Apêndice B: Valores experimentais de penetração de partícula e resultados teóricos para a eficiência de coleta dos mecanismos presentes na filtração.

Tabela B.1 – Valores experimentais de penetração e eficiência total e resultados teóricos de eficiência de coleta para cada mecanismo.

U = 0,05 m/s							
Tensão corona aplicada = 0 kV							
d_{ps} (μm)	Penetração (exp)	η_{total} (exp)	η_D (teo)	η_{ID} (teo)	η_I (teo)	η_G (teo)	η_E (exp)
2,32	0,2290	4,497 E-02	1,247 E-03	1,869 E-02	1,398 E-03	9,604 E-03	1,403 E-02
2,71	0,0549	8,885 E-02	1,120 E-03	2,478 E-02	2,172 E-03	1,310 E-02	4,768 E-02
3,26	0,0394	9,956 E-02	9,876 E-04	3,461 E-02	3,683 E-03	1,896 E-02	4,132 E-02
3,95	0,0308	1,081 E-01	8,686 E-04	4,891 E-02	6,404 E-03	2,784 E-02	2,403 E-02
5,75	0,0172	1,298 E-01	6,797 E-04	9,538 E-02	1,909 E-02	5,899 E-02	0 (-4,429E-02)

Tabela B.2 – Valores experimentais de penetração e eficiência total e resultados teóricos de eficiência de coleta para cada mecanismo.

U = 0,08 m/s							
Tensão corona aplicada = 0 kV							
d_{ps} (μm)	Penetração (exp)	η_{total} (exp)	η_D (teo)	η_{ID} (teo)	η_I (teo)	η_G (teo)	η_E (exp)
2,32	0,1739	5,384 E-02	9,323 E-04	1,870 E-02	2,821 E-03	5,989 E-03	2,540 E-02
2,71	0,0506	9,243 E-02	8,379 E-04	2,478 E-02	4,383 E-03	8,172 E-03	5,425 E-02
3,26	0,0331	1,067E- 01	7,398E- 04	3,462E- 02	7,433 E-03	1,183 E-02	5,207 E-02
3,95	0,0226	1,205E- 01	6,515E- 04	4,892E- 02	1,292 E-02	1,736 E-02	4,064 E-02
5,75	0,0098	1,550E- 01	5,112E- 04	9,540E- 02	3,851 E-02	3,679 E-02	0 (-1,616E-02)

Tabela B.3 – Valores experimentais de penetração e eficiência total e resultados teóricos de eficiência de coleta para cada mecanismo.

U = 0,12 m/s							
Tensão corona aplicada = 0 kV							
d_{ps} (μm)	Penetração (exp)	η_{total} (exp)	η_D (teo)	η_{ID} (teo)	η_I (teo)	η_G (teo)	η_E (exp)
2,32	0,1131	6,801 E-02	7,259 E-04	1,870 E-02	5,183 E-03	3,993 E-03	3,940 E-02
2,71	0,0358	1,050 E-01	6,531 E-04	2,478 E-02	8,052 E-03	5,448 E-03	6,610 E-02
3,26	0,0281	1,147 E-01	5,773 E-04	3,462 E-02	1,365 E-02	7,884 E-03	5,796 E-02
3,95	0,0063	1,670 E-01	5,091 E-04	4,892 E-02	2,374 E-02	1,157 E-02	8,230 E-02
5,75	0,0052	1,891 E-01	4,005 E-04	9,540 E-02	7,075 E-02	2,453 E-02	0 (-1,964E-03)

Tabela B.4 – Valores experimentais de penetração e eficiência total e resultados teóricos de eficiência de coleta para cada mecanismo.

U = 0,05 m/s							
Tensão corona aplicada = -3 kV							
d_{ps} (μm)	Penetração (exp)	η_{total} (exp)	η_D (teo)	η_{ID} (teo)	η_I (teo)	η_G (teo)	η_E (exp)
2,32	0,0493	9,183 E-02	1,249 E-03	1,870 E-02	1,394 E-03	9,582 E-03	6,090 E-02
2,71	0,0209	1,184 E-01	1,122 E-03	2,478 E-02	2,166 E-03	1,307 E-02	7,726 E-02
3,26	0,0172	1,251 E-01	9,891 E-04	3,462 E-02	3,673 E-03	1,892 E-02	6,687 E-02
3,95	0,0110	1,400 E-01	8,699 E-04	4,892 E-02	6,385 E-03	2,778 E-02	5,605 E-02
5,75	0,0045	1,727 E-01	6,807 E-04	9,540 E-02	1,903 E-02	5,886 E-02	0 (-1,294E-03)

Tabela B.5 – Valores experimentais de penetração e eficiência total e resultados teóricos de eficiência de coleta para cada mecanismo.

U = 0,08 m/s							
Tensão corona aplicada = -3 kV							
d_{ps} (μm)	Penetração (exp)	η_{total} (exp)	η_D (teo)	η_{ID} (teo)	η_I (teo)	η_G (teo)	η_E (exp)
2,32	0,0413	9,808 E-02	9,365 E-04	1,872 E-02	2,799 E-03	5,949 E-03	6,967 E-02
2,71	0,0173	1,257 E-01	8,417 E-04	2,481 E-02	4,347 E-03	8,118 E-03	8,754 E-02
3,26	0,0091	1,471 E-01	7,431 E-04	3,465 E-02	7,370 E-03	1,175 E-02	9,256 E-02
3,95	0,0062	1,616 E-01	6,545 E-04	4,895 E-02	1,281 E-02	1,725 E-02	8,189 E-02
5,75	0,0029	1,957 E-01	5,136 E-04	9,544 E-02	3,817 E-02	3,655 E-02	2,504 E-02

Tabela B.6 – Valores experimentais de penetração e eficiência total e resultados teóricos de eficiência de coleta para cada mecanismo.

U = 0,12 m/s							
Tensão corona aplicada = -3 kV							
d_{ps} (μm)	Penetração (exp)	η_{total} (exp)	η_D (teo)	η_{ID} (teo)	η_I (teo)	η_G (teo)	η_E (exp)
2,32	0,0405	1,000 E-01	7,282 E-04	1,871 E-02	5,156 E-03	3,975 E-03	7,146 E-02
2,71	0,0152	1,320 E-01	6,552 E-04	2,480 E-02	8,008 E-03	5,424 E-03	9,314 E-02
3,26	0,0083	1,538 E-01	5,791 E-04	3,464 E-02	1,358 E-02	7,849 E-03	9,716 E-02
3,95	0,0058	1,697 E-01	5,107 E-04	4,894 E-02	2,360 E-02	1,152 E-02	8,511 E-02
5,75	0,0024	2,167 E-01	4,018 E-04	9,543 E-02	7,033 E-02	2,442 E-02	2,615 E-02

Tabela B.7 – Valores experimentais de penetração e eficiência total e resultados teóricos de eficiência de coleta para cada mecanismo.

U = 0,05 m/s							
Tensão corona aplicada = -6 kV							
d_{ps} (μm)	Penetração (exp)	η_{total} (exp)	η_D (teo)	η_{ID} (teo)	η_I (teo)	η_G (teo)	η_E (exp)
2,32	0,0397	9,843 E-02	1,251 E-03	1,871 E-02	1,390 E-03	9,561 E-03	6,752 E-02
2,71	0,0107	1,389 E-01	1,123 E-03	2,479 E-02	2,160 E-03	1,305 E-02	9,778 E-02
3,26	0,0077	1,498 E-01	9,905 E-04	3,463 E-02	3,662 E-03	1,888 E-02	9,165 E-02
3,95	0,0067	1,554 E-01	8,711 E-04	4,893 E-02	6,367 E-03	2,772 E-02	7,150 E-02
5,75	0,0036	1,798 E-01	6,817 E-04	9,541 E-02	1,897 E-02	5,873 E-02	5,981 E-03

Tabela B.8 – Valores experimentais de penetração e eficiência total e resultados teóricos de eficiência de coleta para cada mecanismo.

U = 0,08 m/s							
Tensão corona aplicada = -6 kV							
d_{ps} (μm)	Penetração (exp)	η_{total} (exp)	η_D (teo)	η_{ID} (teo)	η_I (teo)	η_G (teo)	η_E (exp)
2,32	0,0461	9,470 E-02	9,351 E-04	1,871 E-02	2,806 E-03	5,963 E-03	6,628 E-02
2,71	0,0120	1,370 E-01	8,405 E-04	2,480 E-02	4,359 E-03	8,136 E-03	9,885 E-02
3,26	0,0083	1,500 E-01	7,420 E-04	3,464 E-02	7,391 E-03	1,177 E-02	9,542 E-02
3,95	0,0063	1,611 E-01	6,535 E-04	4,894 E-02	1,285 E-02	1,728 E-02	8,134 E-02
5,75	0,0037	1,876 E-01	5,128 E-04	9,543 E-02	3,828 E-02	3,663 E-02	1,675 E-02

Tabela B.9 – Valores experimentais de penetração e eficiência total e resultados teóricos de eficiência de coleta para cada mecanismo.

U = 0,12 m/s							
Tensão corona aplicada = -6 kV							
d_{ps} (μm)	Penetração (exp)	η_{total} (exp)	η_D (teo)	η_{ID} (teo)	η_I (teo)	η_G (teo)	η_E (exp)
2,32	0,0334	1,061 E-01	7,259 E-04	1,870 E-02	5,183 E-03	3,993 E-03	7,746 E-02
2,71	0,0129	1,372 E-01	6,531 E-04	2,478 E-02	8,052 E-03	5,448 E-03	9,829 E-02
3,26	0,0083	1,539 E-01	5,773 E-04	3,462 E-02	1,365 E-02	7,884 E-03	9,712 E-02
3,95	0,0058	1,698 E-01	5,091 E-04	4,892 E-02	2,374 E-02	1,157 E-02	8,502 E-02
5,75	0,0027	2,127 E-01	4,005 E-04	9,540 E-02	7,075 E-02	2,453 E-02	2,160 E-02

Apêndice C: Resultados obtidos por simulação computacional para a eficiência de coleta do mecanismo eletroforético.

Tabela C.1 – Resultados obtidos por simulação computacional para a eficiência de coleta do mecanismo eletroforético.

d_{ps} (μm)	$U = 0,05 \text{ m/s}$			$U = 0,08 \text{ m/s}$			$U = 0,12 \text{ m/s}$		
	Tensão corona = 0 kV	Tensão corona = -3 kV	Tensão corona = -6 kV	Tensão corona = 0 kV	Tensão corona = -3 kV	Tensão corona = -6 kV	Tensão corona = 0 kV	Tensão corona = -3 kV	Tensão corona = -6 kV
	η_E (sim)	η_E (sim)	η_E (sim)	η_E (sim)	η_E (sim)	η_E (sim)	η_E (sim)	η_E (sim)	η_E (sim)
2,32	4,834 E-02	1,921 E-01	7,246 E-02	2,325 E-02	1,381 E-01	4,646 E-02	2,101 E-02	6,271 E-02	2,101 E-02
2,71	4,719 E-02	1,866 E-01	7,070 E-02	2,164 E-02	8,583 E-02	2,173 E-02	0	1,400 E-04	0
3,26	4,398 E-02	1,303 E-01	6,584 E-02	0	2,000 E-04	1,200 E-04	0	1,900 E-04	0
3,95	0	0	3,000 E-05	0	2,800 E-04	1,700 E-04	0	2,700 E-04	0
5,75	0	0	6,000 E-05	0	5,500 E-04	3,300 E-04	0	5,000 E-04	0