

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

**ESTUDO DO PERFIL DE CONCENTRAÇÃO EM UM
PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO DO TIPO PLACA- FIO**

Aluno: Edmundo Valdés Cerda

Orientador: Prof. Dr. José Renato Coury

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração Controle Ambiental.

São Carlos-SP

2004

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

V145ep

Valdés Cerda, Edmundo Eduardo.

Estudo do perfil de concentração em um precipitador eletrostático do tipo placa-fio / Edmundo Eduardo Valdés Cerda. -- São Carlos : UFSCar, 2004.

84 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2004.

1. Tecnologia de gases industriais. 2. Limpeza de gases. 3. Precipitador eletrostático. 4. Perfil de concentração. 5. Controle de poluição – indústria. 6. Medidas isocinéticas. I. Título.

CDD: 665 (20^a)

*Caminante, son tus huellas
el camino y nada más;
Caminante, no hay camino,
se hace camino al andar.
Al andar se hace el camino,
y al volver la vista atrás
se ve la senda que nunca
se ha de volver a pisar.
Caminante no hay camino
sino estelas en la mar.*

Antonio Machado

**Para ti Márcia y a
ustedes carlitos y marquitos**

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar meu trabalho vem aos meus pensamentos as diferentes pessoas que intervieram para chegar até aqui.

A minha família que sempre me compreendeu e me apoiou.

Inicialmente agradeço ao Departamento de Engenharia Química da UFSCar por ter-me acolhido pela segunda vez, sempre com a mesma boa vontade, aos professores que uma vez deixei de ver e voltei a encontrá-los: Moura, Everaldo, Freire, Gubulin, Ana Maria, aos meus companheiros de turma Marlei, Murillo.

No entanto tenho uma especial menção a fazer ao meu orientador, Zezão que me acolheu ajudou neste tempo onde passei por diversas situações, mas ele sempre esteve ali para me escutar e ajudar, além de possuir um grande lado profissional o seu lado humano é mais destacável ainda.

Neste tempo que conheci e compartilhei com os amigos do laboratório. Agradeço o tempo junto aos meus companheiros: Marcos Felicetti, Marquinhos, Juliana, Ricardo, Karina, Érica, Normanda, Edinalda, Batata e Milena.

Faço um especial agradecimento a minha amiga Carol que sempre esteve pronta a me ajudar e aconselhar quando precisei.

Ao Oscar que sempre esteve disposto a ajudar quando precisávamos dos seus serviços da oficina.

Ao CNPq pelo apoio financeiro brindado durante estes meses de estudo e trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	02
2.1 Breve desenvolvimento histórico	02
2.2 Fenômeno da precipitação	03
2.3 Tipos de precipitadores	03
2.3.1 Precipitador tipo placa-fio	04
2.3.2 Precipitadores tipo placa-plana	05
2.3.3 Precipitadores tipo tubo-fio	05
2.4 Teoria de precipitação eletrostática	06
2.4.1 Ionização do gás	07
2.4.1.1 Intensidade do campo elétrico	09
2.4.1.2 Potencial elétrico e corrente	10
2.4.2 Carregamento elétrico das partículas	12
2.4.3 Coleta das partículas	13
2.4.3.1 Cinética das partículas	14
2.5 Eficiência de coleta	15
2.6 Modelos teóricos de perfil de concentração	15
2.6.1 Modelo de Deutsch	15
2.6.2 Estudo qualitativo de Riehle	17
2.6.3 Modelo laminar	18
2.6.4 Modelo numérico de Leonard et al	19
2.6.5 Modelo de Zhibin e Guoquan	21
2.6.6 Modelo de Nóbrega	23
2.7 Comparações experimentais dos modelos de eficiência	24
2.8 Comparações dos modelos de eficiência	26

CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Unidade experimental	27
3.2 Material particulado	32
3.3 Condições operacionais	33
3.3.1 Perfil de velocidade do gás	33
3.3.2 Determinação dos pontos de medição na unidade	34
3.3.3 Determinação das medidas isocinéticas	35
3.3.4 Metodologia de amostragem	36
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Medições das velocidades internas	38
4.2 Concentrações no precipitador sem tensão aplicada	39
4.3 Variação da concentração longitudinal	40
4.4 Variação da concentração com a velocidade do gás	42
4.5 Perfil de concentração	47
4.6 Comparação dos perfis experimentais com relatos da literatura	53
4.7 Eficiências no precipitador	53
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES	57
CAPÍTULO 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
APÊNDICE A	61
APÊNDICE B	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	- Esquema do fenômeno da precipitação eletrostática.	03
Figura 2.2	- Esquema PES placa-fio.	04
Figura 2.3	- Configuração de PES placa-plana.	05
Figura 2.4	- Esquema PES tubo-fio.	06
Figura 2.5	- Etapas da precipitação.	07
Figura 2.6	- Esquema das zonas ativas e passivas no precipitador.	08
Figura 2.7	- Início da corona E_0 , como função do raio do fio.	10
Figura 2.8	- Relação entre corrente e potencial elétrico.	11
Figura 2.9	- Ilustração do modelo de Deutsch.	17
Figura 2.10	- Concentração não homogênea das partículas de fumaça com diâmetro entre 0,5 e 1,0 μm ., em um ESP ($2s= 0,2 \text{ m}$; $E= 40 \text{ kV}$; $V= 1\text{m/s}$).	19
Figura 2.11	- Modelo laminar idealizado.	20
Figura 2.12	- Modelo numérico de Leonard.	21
Figura 2.13	- Perfis de concentração teóricos do modelo de Zhibin e Guoquan para $V_0 = 1 \text{ m/s}$; $V = 45 \text{ kV/cm}$; $dp = 1,0 \mu\text{m}$; $2s = 0,20 \text{ m}$.	23
Figura 2.14	- Perfis de concentração de Nóbrega para $V_0=1 \text{ m/s}$; $V=45 \text{ kV/cm}$; $dp=1,0\mu\text{m}$; $2s=0,20 \text{ m}$.	25
Figura 2.15	- Eficiência de coleta com vários espaçamentos de fios em um PES. Condições experimentais: $2r_{SE} = 2 \text{ mm}$, $E=5,0 \text{ kV/cm}$, $V_0= 1,0 \text{ m/s}$, $2c= 25 \text{ mm}$.	26
Figura 2.16	- Comparação da eficiência total com varias velocidades de gás. Condições experimentais: $2r_{SE} = 2 \text{ mm}$, $E=5,0 \text{ kV/cm}$, $V_0= 1,0 \text{ m/s}$, $2c= 25 \text{ mm}$.	26
Figura 3.1	- Esquema do precipitador eletrostático placa-fio de Controle Ambiental da UFSCar e seus equipamentos básicos.	28
Figura 3.2.	- Dimensões básicas do precipitador eletrostático placa-fio.	29

Figura 3.3	- Desenho esquemático do alimentador.	30
Figura 3.4	- Sonda usada para amostragem isocinética do material particulado e suas principais dimensões.	31
Figura 3.5	- Esquema das sondas de vidro para medições internas.	31
Figura 3.6	- Esquema do porta filtro.	32
Figura 3.7	- Esquema do sistema de medição de concentração com os pontos de medição no interior do precipitador.	33
Figura 3.8	- Pontos de medição de concentração no interior do precipitador.	35
Figura 3.9	- Esquema do volume de controle no precipitador para as medidas isocinéticas	36
Figura 4.1	- Medidas isocinéticas no interior do precipitador eletrostático para $V_0=1,4$ m/s.	39
Figura 4.2	- Medidas do perfil de concentração no interior do precipitador eletrostático sem tensão aplicada para $V_0=0,6$ m/s.	40
Figura 4.3	- Medidas do perfil de concentração no interior do precipitador eletrostático sem tensão aplicada para $V_0=1,0$ m/s.	40
Figura 4.4	- Medidas do perfil de concentração no interior do precipitador eletrostático sem tensão aplicada para $V_0=1,4$ m/s.	41
Figura 4.5	- Variação de concentração ao longo do duto para $V_0=1,0$ m/s e $E=2,5$ kV/cm.	41
Figura 4.6	- Variação de concentração ao longo do duto para $V_0=1,0$ m/s e $E=3,0$ kV/cm.	42
Figura 4.7	- Variação de concentração ao longo do duto para $V_0=1,0$ m/s e $E=4,0$ kV/cm.	42
Figura 4.8	- Variação de concentração ao longo do duto para $V_0=1,0$ m/s e $E=5,0$ kV/cm.	42

- Figura 4.9 - Variação de concentração em função da velocidade do gás para o campo elétrico aplicado de 3,0 kV/cm e posição axial 0. 43
- Figura 4.10 - Variação de concentração em função da velocidade do gás para o campo elétrico aplicado de 3,0 kV/cm e posição axial 1. 44
- Figura 4.11 - Variação de concentração em função da velocidade do gás para o campo elétrico aplicado de 3,0 kV/cm e posição axial 2. 44
- Figura 4.12 - Variação de concentração em função da velocidade do gás para o campo elétrico aplicado de 3,0 kV/cm e posição axial 3. 44
- Figura 4.13 - Variação de concentração em função da velocidade do gás para o campo elétrico aplicado de 3,0 kV/cm e posição axial 4. 45
- Figura 4.14 - Variação de concentração em função da velocidade do gás para o campo elétrico aplicado de 4,0 kV/cm e posição axial 0. 45
- Figura 4.15 - Variação de concentração em função da velocidade do gás para o campo elétrico aplicado de 4,0 kV/cm e posição axial 1. 46
- Figura 4.16 - Variação de concentração em função da velocidade do gás para o campo elétrico aplicado de 4,0 kV/cm e posição axial 2. 46
- Figura 4.17 - Variação de concentração em função da velocidade do gás para o campo elétrico aplicado de 4,0 kV/cm e posição axial 3. 46
- Figura 4.18 - Variação de concentração em função da velocidade do gás para o campo elétrico aplicado de 4,0 kV/cm e posição axial 4. 47
- Figura 4.19 - Perfil de concentração experimental para $V_0=0,6$ m/s ; $E=2,5$ kV/cm. 48

Figura 4.20 - Perfil de concentração experimental para $V_0=0,6$ m/s ; $E=3,0$ kV/cm.	48
Figura 4.21 - Perfil de concentração experimental para $V_0=0,6$ m/s ; $E=4,0$ kV/cm.	49
Figura 4.22 - Perfil de concentração experimental para $V_0=0,6$ m/s ; $E=5,0$ kV/cm.	49
Figura 4.23 - Perfil de concentração experimental para $V_0=1,0$ m/s ; $V=2,5$ kV/cm.	50
Figura 4.24 - Perfil de concentração experimental para $V_0=1,0$ m/s ; $V=3,0$ kV/cm.	50
Figura 4.25 - Perfil de concentração experimental para $V_0=1,0$ m/s ; $V=4,0$ kV/cm.	51
Figura 4.26 - Perfil de concentração experimental para $V_0=1,0$ m/s ; $V=5,0$ kV/cm.	51
Figura 4.27 - Perfil de concentração experimental para $V_0=1,4$ m/s ; $V=2,5$ kV/cm.	52
Figura 4.28 - Perfil de concentração experimental para $V_0=1,4$ m/s ; $V=3,0$ kV/cm.	52
Figura 4.29 - Perfil de concentração experimental para $V_0=1,4$ m/s ; $V=4,0$ kV/cm.	52
Figura 4.30 - Perfil de concentração experimental para $V_0=1,4$ m/s ; $V=5,0$ kV/cm.	53
Figura 4.31 - Esquema de cálculo da eficiência	54
Figura 4.32 - Eficiência ao longo do precipitador para $V=2,5$ kV/cm.	55
Figura 4.33 - Eficiência ao longo do precipitador para $V=3,0$ kV/cm.	55
Figura 4.34 - Eficiência ao longo do precipitador para $V=4,0$ kV/cm.	56
Figura 4.35 - Eficiência ao longo do precipitador para $V=4,0$ kV/cm	56

LISTA DE SIMBOLOS

A	- Área total de coleta [L ²]
A _e	- Área do duto de entrada do precipitador [L ²]
A _i	- Área do duto no interior do precipitador [L ²]
b	- Mobilidade elétrica do íon [t ² I M ⁻¹]
C	- Concentração da corrente gasosa [M L ⁻³]
c	- Distância entre os fios de descarga [L]
C _{dpi}	- Concentração da partícula de tamanho i [M L ⁻³]
C _e	- Concentração de Partículas na entrada do sistema [M L ⁻³]
C _F	- Coeficiente de resistência [adimensional]
C _s	- Concentração de Partículas na saída do sistema [M L ⁻³]
Cu	- Fator de correção de Cunningham [adimensional]
D	- Difusividade turbulenta [L ² T]
d	- Longitude do difusor da corrente de gás [L]
De	- Numero de Deutsch [adimensional]
D _h	- Diâmetro hidráulico [L]
d _{pi}	- Diâmetro da partícula [L]
E	- Campo elétrico [M L I ⁻¹ t ⁻³]
E _o	- Campo elétrico necessário para o início da corona . [V L ⁻¹].
E _p	- Campo elétrico desenvolvido na camada de pó. [V L ⁻¹].
E _y	- Difusividade turbulenta da partícula [L ⁻² t ⁻¹]
f	- Distância da entrada da alimentação do material particulado até o início do difusor [L]
\vec{F}_T	- Forças de movimento [M L t ⁻²]
\vec{F}_{el}	- Forças elétricas [M L t ⁻²]
\vec{F}_w	- Forças de arrasto [M L t ⁻²]
g	- Distância desde a entrada do gás até a entrada do material particulado [L]
i	- Corrente total da corona [I]

\dot{J}_{NE}	- Densidade de corrente por unidade de área de coleta [$I L^{-2}$]
J_{SE}	- Densidade de corrente por unidade de comprimento de fio [$I L^{-2}$]
K_m	- Constante de separação de variáveis.
L	- Comprimento da corona no fio [L]
L_{NE}	- Comprimento característico do precipitador [L]
m	- Massa da partícula [M]
N_{EHD}	- Coeficiente eletrohidrodinâmico [adimensional]
P	- Pressão do gás [$M L^{-1} t^{-2}$]
P_{abs}	- Pressão absoluta [$M L^{-1} t^{-2}$]
Pe	- Numero de Peclet [adimensional]
PES	- Precipitador Eletrostático
P_{real}	- Pressão atmosférica nas condições de trabalho [$M L^{-1} t^{-2}$]
P_{teor}	- Pressão de calibração do medidor [$M L^{-1} t^{-2}$]
Q	- Vazão volumétrica da corrente de gás [$L^3 t^{-1}$]
Q_e	- Vazão do gás na entrada [$L^3 t^{-1}$]
Q_i	- Vazão do gás no interior do precipitador [$L^3 t^{-1}$]
Q_{teor}	- Vazão de operação calculada para operar [$L^3 t^{-1}$]
Q_{real}	- Vazão de operação nas condições de trabalho [$L^3 t^{-1}$]
Q_p^∞	- Carga da partícula na saturação [I t]
r_o	- Raio da zona ativa da corona [L]
r_{se}	- Raio do eletrodo de descarga [L]
s	- Distância entre placa coletora e o eletrodo de carga [L]
T	- Temperatura do gás [T]
T°_{real}	- Temperatura da corrente de gás nas condições de trabalho [T]
T°_{teor}	- Temperatura da corrente de gás calibrada no medidor [T]
Re	- Número de Reynolds (adimensional)
V	- Volt
V_{cr}	- Diferença de potencial critica no gás [V]
V_e	- Velocidade do gás na entrada do precipitador [$M t^{-1}$]
$V_{ne,0}$	- Diferença de potencial para iniciar corona. [V]
V_o	- Velocidade de gás. [$M t^{-1}$]

w - Velocidade de migração da partícula [$L t^{-1}$]

w_{th} - Velocidade teórica de migração [$L t^{-1}$]

x - Direção longitudinal ao escoamento [L]

y - Direção transversal ao escoamento [L]

Letras Gregas

δ - Densidade relativa. [$M L^{-3}$].

δ_g - Densidade do gás [$M L^{-3}$].

ΔP - Queda de Pressão [$M L^{-1} t^{-2}$]

ϵ_0 - Permissividade no vácuo $8,86 \times 10^{12}$ As/Vm

ϵ_r - Constante dielétrica da partícula [adimensional]

η - Eficiência de coleta global [adimensional]

η_{dpi} - Eficiência de coleta fracionaria [adimensional]

λ - Caminho livre médio das moléculas.[L]

μ - Viscosidade dinâmica do gás, N .s/m² [$M L^{-1} t^{-1}$]

ξ - Adimensional de y/s

ρ_{po} - Resistividade elétrica de material particulado [$M L^3 I^{-2} t^{-3}$]

ρ_p - Densidade da partícula [$M L^{-3}$]

τ_p -Tempo de relaxação da partícula em comportamento dinâmico [t]

Θ_m - Autofunção de valores [adimensional]

ν - Viscosidade cinemática [$L T^{-2}$]

RESUMO

Os diferentes modelos utilizados para o cálculo da eficiência de coleta de precipitadores eletrostáticos baseiam-se em diferentes hipóteses sobre o comportamento das partículas no interior do equipamento. Assim, em um extremo, consideram-se as partículas em mistura perfeita e perfil de concentração achatado em função do escoamento turbulento, conhecido como modelo de Deutsch e no outro, assume-se que o escoamento seja laminar, sem misturas. Outros autores propõem comportamentos teóricos intermediários. No entanto, dados experimentais são muitos escassos. Portanto, com o intuito de conhecer o comportamento real no interior do precipitador, desenvolveu-se uma metodologia experimental para medir as concentrações do aerossol no interior do precipitador e verificar quais os comportamentos mostrados na literatura descrevem adequadamente os dados. O precipitador eletrostático usado foi do tipo placa-fio em escala laboratorial com comprimento de 0,50 m, largura de 0,20 m e 6 eletrodos de descarga. Observou-se que os pontos de maior concentração ocorreram no centro e que esta diminuiu na direção das paredes. O modelo de Deutsch ajustou-se melhor aos pontos experimentais. No entanto, notou-se que na região de entrada ocorreu um comportamento diferenciado. Foi ainda possível verificar que, com o aumento do campo elétrico, a concentração diminuiu tanto no centro como próximo às paredes, sendo a variável que apresentou um efeito mais significativo na concentração frente a velocidade do gás.

ABSTRACT

The different models utilized for the calculation of the collection efficiency of electrostatic precipitators are based in distinct hypotheses about the behavior of the particles inside the equipment. Hence, in one extreme they consider the particles in perfect mixture, in a flat concentration profile in turbulent flow, known as the Deutsch model, and in the other it is assumed a laminar flow without mix. Other authors proposed intermediate theoretical behaviors. However, experimental results are very scarce. Therefore, to know the real behavior inside the precipitator, an experimental method was devised to measure and determine the concentrations of the aerosol and verify which of the proposed behaviors in the literature describe adequately the data. The electrostatic precipitator utilized was of the plate-wire type, in laboratorial scale, with a 0.50 m in length and 0.20 m in width, with 6 discharge electrodes. It was observed that the points of higher concentrations occurred in the duct center and decreased towards the walls. The Deutsch model offered the best description of the experimental profile. However, it was noticed that in the entrance region, a different behavior occurred. Also, it was noticed that, with the increase of the electric field, the concentration decreased both in the center as near the wall, and this variable presented a more significant effect in the concentration than the gas velocity.

INTRODUÇÃO

A agressão ao meio ambiente está fortemente ligada aos processos industriais. Sendo assim, criam-se cada vez mais restrições governamentais para a emissão de efluentes líquidos, sólidos e gasosos. Neste sentido, há uma crescente necessidade por parte das indústrias de aplicar técnicas para o controle dos efluentes gerados.

No processo de separação do material particulado de efluentes gasosos, um dos equipamentos mais usados em indústrias de grande porte é o precipitador eletrostático (PES), devido a sua elevada eficiência na remoção de partículas finas, pois há necessidade de remover partículas com diâmetros menores que $2,5 \mu\text{m}$, por trazerem prejuízos ao sistema respiratório humano (Cass et al., 1998).

Os precipitadores eletrostáticos industriais operam com eficiência global de coleta com valores acima de 99%. O projeto destes freqüentemente é feito sem um prévio conhecimento dos parâmetros envolvidos no fenômeno de precipitação, sendo assumidos dados de precipitadores em operação. Além do que na análise da eficiência de precipitadores para faixas sub-micrônicas de material particulado em que se subestima a eficiência dos equipamentos em função de se utilizar correlações que não representam satisfatoriamente o seu comportamento, induzindo a projetos superdimensionados (Gallimbert, 1998).

Portanto, torna-se importante conhecer e entender o comportamento do material particulado no interior do PES, pois desta forma poder-se-ia escolher apropriadamente a equação de projeto que melhor represente o sistema. Tendo em vista a importância deste equipamento no controle de efluentes gasosos e a falta de dados experimentais para perfis de concentração do material particulado que sejam utilizados como subsídio para o projeto deste, realizou-se este estudo experimental. Utilizou-se um precipitador eletrostático do tipo placa-fio, onde foram levantados perfis experimentais no seu interior, observando-se o comportamento destes quando submetidos a diferentes campos elétricos e velocidades de gás no interior do duto de coleta. Assim, os resultados experimentais obtidos foram qualitativamente comparados com as previsões teóricas da literatura.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Breve desenvolvimento histórico

A separação de partículas sólidas de gases pelo fenômeno eletrostático vem sendo estudada desde o século XVI. Lindley e Rowson (1997) fizeram uma descrição das diferentes etapas do desenvolvimento da precipitação tanto no seu desenvolvimento comercial quanto o tecnológico.

Algumas operações de separações sólido-gás tiveram êxito entre os anos 1870 e 1900, porém este sucesso dependia da forma como era realizada a remoção das partículas, se a seco ou a úmido. Algumas patentes foram registradas por pesquisadores pioneiros na área da agricultura, gráfica, papel, elétrica, minérios e metalúrgica.

Conseguiram-se progressos significativos entre 1900 e 1920 na operação dos precipitadores devido principalmente a três fatores:

- a- Abastecimento fixo de eletricidade por geradores eletromagnéticos comerciais, além de transformadores que substituíram máquinas estáticas irregulares.
- b- Uso de elevados campos eletrostáticos e concentrados entre as placas coletoras.
- c- Emprego de instrumentos para medir os distúrbios elétricos.

Em 1908, instalou-se um separador eletrostático em uma planta de separação em Wiscounsinn (American Zinc Ore Separating Company), com a finalidade de separar os materiais de diferentes condutividades elétricas.

Entre 1940 e 1960, como consequência das atividades da guerra, houve à necessidade do uso de titânio em soldas. Como este material encontrava-se em depósitos de areia em praias, havia a necessidade de separá-lo e a técnica de separação eletrostática mostrou-se promissora. Este fato incentivou o aparecimento de novas pesquisas mais ligadas aos fenômenos eletrodinâmicos e, como consequência houve a otimização de parâmetros como diâmetro, configuração do eletrodo e fontes de eletricidade do precipitador eletrostático.

Em 1963 White publicou o primeiro livro sobre precipitadores eletrostáticos, apresentando de forma mais científica as explicações dos fenômenos eletrostáticos.

Da década de 80 até hoje, surgiram diferentes pesquisas visando, entre outros, o estudo dos fenômenos eletrohidrodinâmicos na precipitação eletrostática. Outro ponto abordado foi à remoção de partículas sub-micronicas de gases, devido ao crescente interesse despertado pelas mesmas, dado os efeitos prejudiciais para o ser humano, faixa na qual este equipamento apresenta uma alta eficiência de coleta com valores de mais de 99% (Riehle e Löffler, 1993).

2.2 Fenômeno da precipitação

O processo de separação sólido-gás em um precipitador eletrostático ocorre no duto, que contém eletrodos de descarga no centro e placas coletoras nas paredes. Quando o material particulado passa através deste duto, submete-se à ação de um campo elétrico que gera um campo ionizado ao redor do eletrodo, chamado de corona, este carrega as partículas, permitindo que as forças elétricas promovam a separação.

As partículas adquirem carga e são atraídas na direção das placas de coleta. No entanto, a turbulência do gás tende a mantê-las uniformemente misturadas. O processo da coleta é, portanto, uma concorrência entre as forças elétricas e as de inércia. Eventualmente, as partículas se aproximam das paredes, onde o escoamento em regime turbulento decai, e estas são coletadas pela diminuição da velocidade do gás nesta região, como mostrado na Figura 2.1.

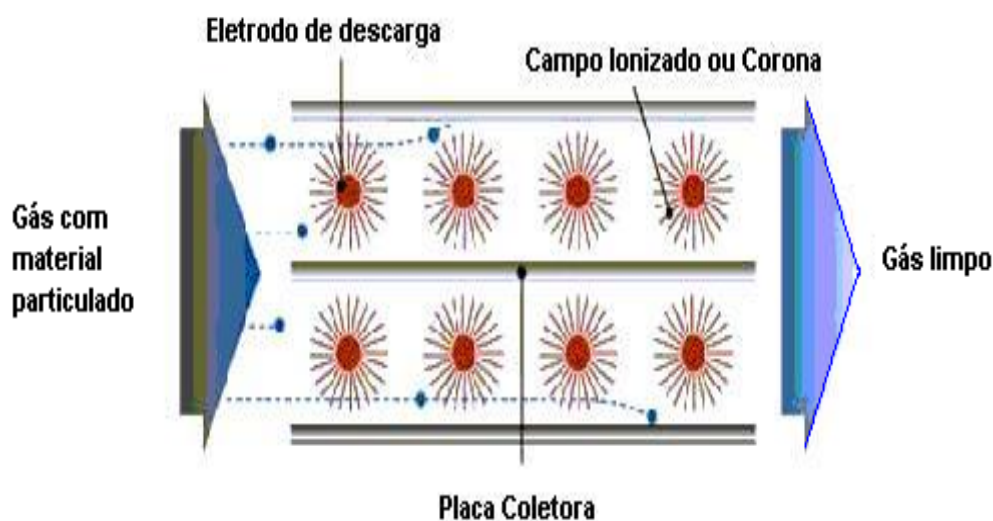


Figura 2.1: Esquema do fenômeno da precipitação eletrostática (powerspancorp.com,2002)

2.3 Tipo de precipitadores

A U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (1999) descreve diferentes configurações para os PES da seguinte forma:

- 1 - O precipitador tipo placa-fio;
- 2 - O precipitador tipo placa-plana;
- 3 - O precipitador tipo tubo-fio.

2.3.1 - Precipitador tipo placa-fio

Os PES do tipo placa-fio são utilizados em uma ampla variedade de aplicações industriais com o intuito de capturar partículas, em caldeiras, fornos de cimento, incineradores de resíduos não perigosos, caldeiras de recuperação em usinas de papel, unidades de refinação de petróleo por desintegração catalítica, usina de sinterização, fornos básicos de oxigênio, fornos de chaminé aberta, fornos de arco elétrico, baterias de fornos de coque e fornos de vidro, etc.

Neste tipo de precipitador, o gás flui entre placas paralelas de metal e eletrodos de descarga com alto potencial elétrico (com valores de até 50 kV), formados por fios longos fixados a uma estrutura rígida posicionada entre as placas coletoras. O aerossol deve passar por cada fio em seqüência, através da unidade. A Figura 2.2 mostra o esquema do precipitador com placas coletoras e os eletrodos.

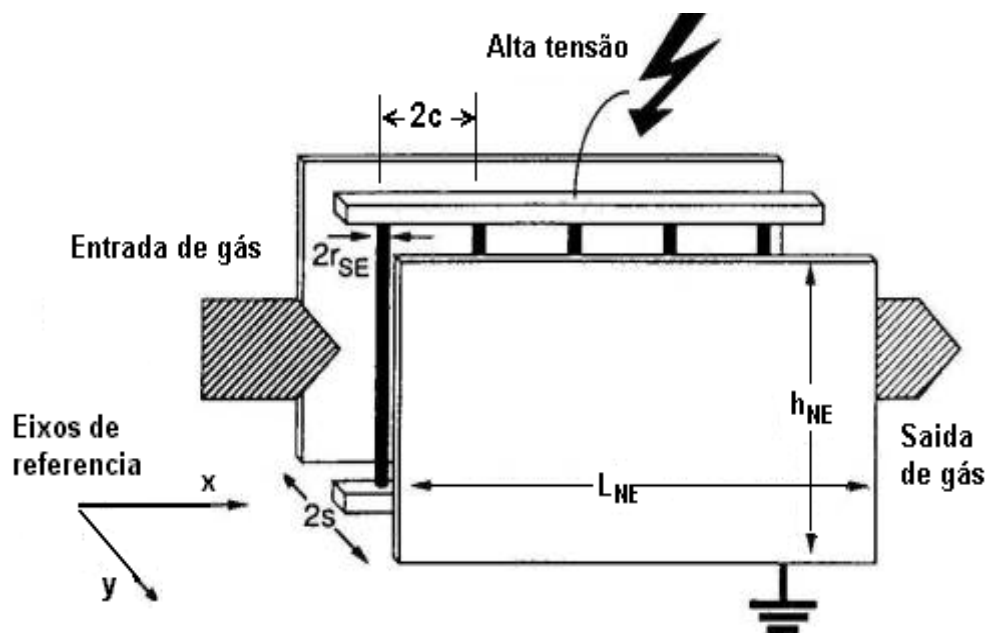


Figura 2.2: Esquema PES placa-fio (Riehle, 1997)

O PES do tipo placa-fio permite que várias linhas de fluxo operem em paralelo. Como resultado, este tipo de precipitador é adequado para processar grandes volumes de gás. Em um processo contínuo, existe a necessidade de vibrar as placas para desprender o material coletado, assim é necessário que sejam divididas em secções, as quais podem ser vibradas independentemente. Com frequência, as fontes de energia são divididas da mesma maneira. O material particulado também se deposita no fio do eletrodo de descarga e deve ser removido periodicamente de forma similar a da placa de coleta.

2.3.2 Precipitador tipo placa-plana

São precipitadores menores, que operam a vazões entre 2800 a 5600 m³/s, utilizam placas planas em lugar de fios como eletrodos de descarga que proporcionam uma maior área superficial, para coletar as partículas. Não é possível gerar o efeito corona. Por isso, utilizam-se placas planas simples com agulhas pontiagudas aderidas às bordas para gerar este efeito, como mostra a Figura 2.3.

Os PES tipo placa plana, segundo a EPA (1999) tem amplo uso para partículas de alta resistividade com diâmetros médios de 1 a 2 μm . Estas aplicações enfatizam especialmente as vantagens deste precipitador porque as forças elétricas para retirar partículas menores são mais fracas.

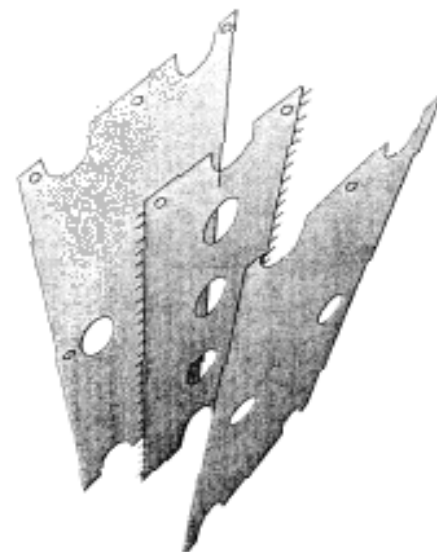


Figura 2.3: Configuração de PES placa-plana (EPA, 1999)

2.3.3 Precipitador tipo tubo-fio

Os PES originais eram tubo-fio ou tubulares, como as chaminés. O eletrodo de descarga está orientado ao longo do eixo do tubo. Têm aplicações típicas em plantas de adição de ácido sulfúrico, limpeza do gás como subproduto dos fornos de coque e recentemente em plantas de sinterização de ferro e aço. Tais unidades tubulares ainda são utilizadas em algumas aplicações, com muitos tubos operando em paralelo para operar com maiores fluxos de gás. Estes podem ter forma circular, quadrada ou hexagonal com o gás fluindo para cima ou para baixo. A Figura 2.4 mostra o esquema de um PES tipo tubular.

Os PES tubulares são menos freqüente na coleta de material particulado úmido ou pegajoso. São normalmente limpos com água e têm perdas por reentrada de uma ordem de magnitude menor que a dos precipitadores de operados a seco.

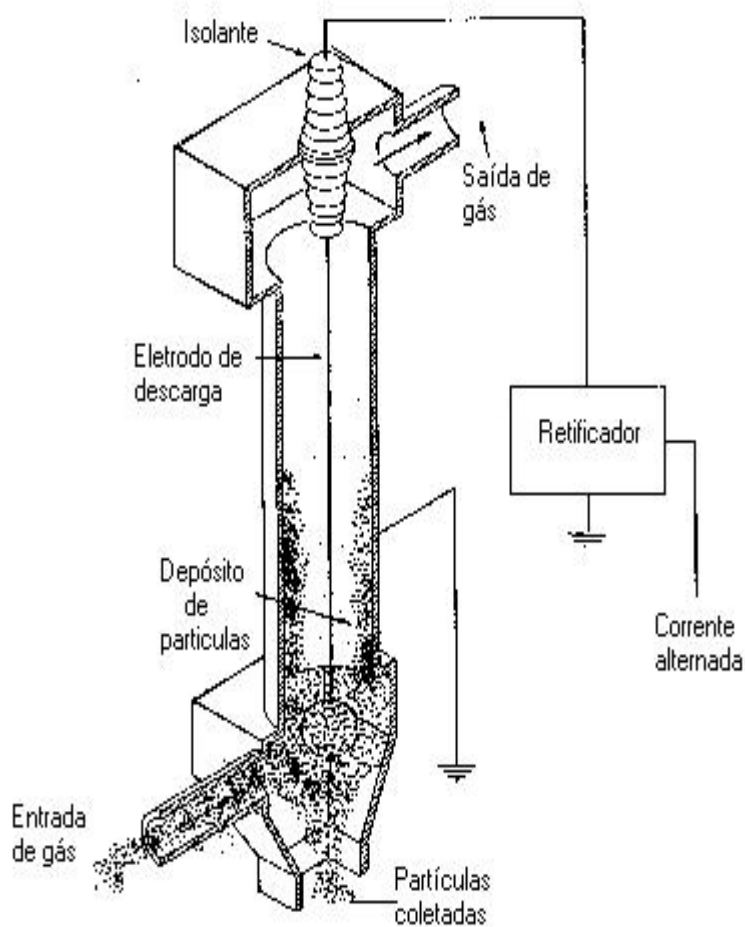


Figura 2.4: Esquema PES tubo-fio (EPA, 1999)

2.4 Teoria da precipitação eletrostática

O precipitador eletrostático de estágio simples é o mais utilizado em indústrias. Consiste em passar um material particulado polidisperso em um gás através de um duto que, ao estar carregado eletricamente, forma um campo entre as placas coletoras e os fios, permitindo separar os sólidos do gás.

Riehle (1997) divide o processo de precipitação eletrostática em quatro etapas principais, de acordo com a Figura 2.5.

1. Ionização do gás;
2. Carregamento elétrico das partículas;
3. Coleta das partículas;
4. Remoção das partículas.

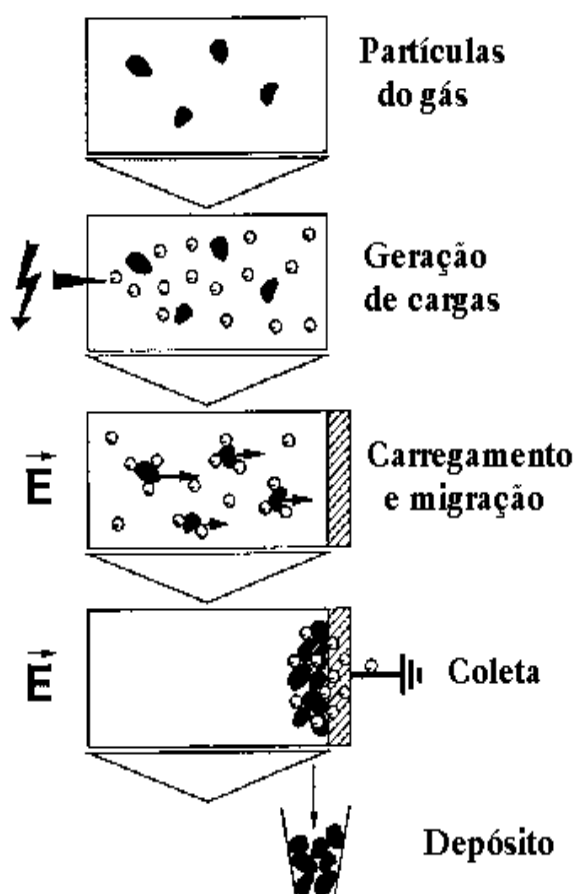


Figura 2.5: Etapas da precipitação (Riehle 1997)

2.4.1 Ionização do gás

Como o gás não é um condutor natural, é necessária a criação de íons, que são gerados pela quebra da resistência elétrica do gás quando uma tensão é aplicada.

A corrente elétrica flui entre os eletrodos (placa-fio), iniciando um processo chamado de descarga de corona.

As moléculas do gás, ao separar-se na ionização, transformam-se em íons positivos e elétrons livres, que colidem com moléculas de gás neutro, provocando a liberação de novos elétrons, criando novos íons e gerando uma avalanche de íons. Este processo ocorre na chamada zona ativa, conforme pode ser observado na Figura 2.6.

Posteriormente, este campo perde a intensidade e recebe o nome de zona passiva, região em que os elétrons aderem às partículas do gás, formando íons negativos. Para compensar o decréscimo de transporte de íons, o campo é continuamente alimentado pela descarga de corona. Porém, a quantidade de tensão aplicada tem um limite de 50 kV que, se ultrapassado, gera um arco elétrico no sistema (corona reversa).

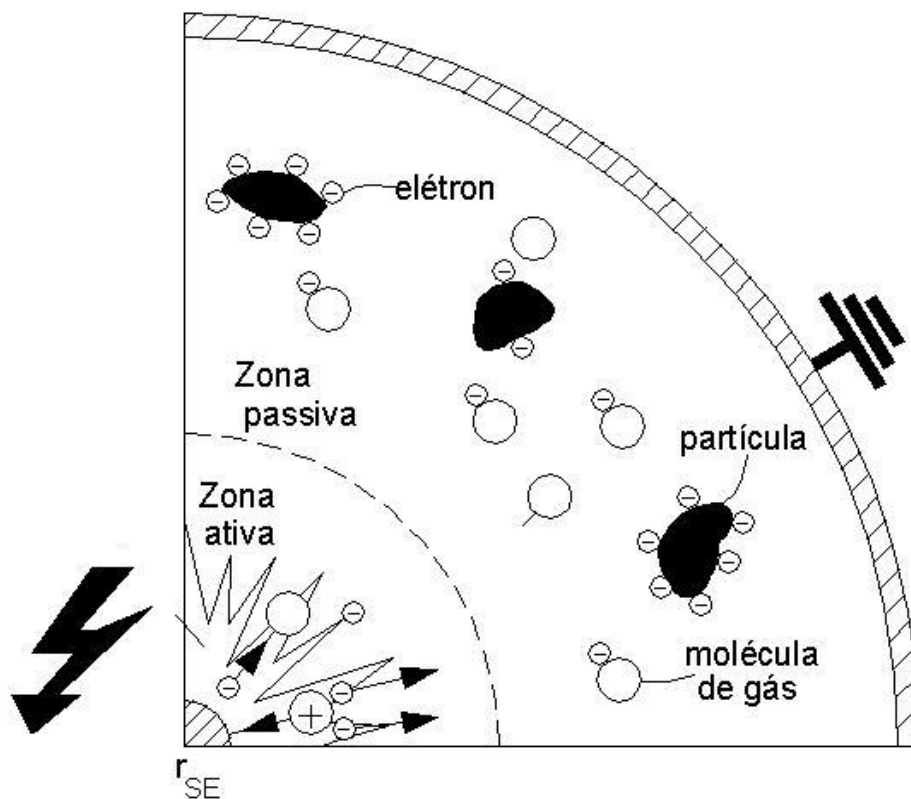


Figura 2.6: Esquema das zonas ativas e passivas no precipitador (Rhiele 1997)

A descarga corona pode ser operada positiva ou negativamente. Riehle (1997) menciona que o início da geração da corona negativa requer maiores valores de tensão.

A descarga corona positiva ocorre quando os elétrons que foram produzidos na zona ativa são atraídos para o eletrodo positivo (fio), onde são coletados sendo os íons positivos direcionados para as placas coletoras (aterradas). O eletrodo positivo serve somente para a coleta de elétrons, o que caracteriza este processo como sendo inteiramente gasoso, com a ionização ocorrendo através da liberação fotoelétrica de elétrons das moléculas do gás, White (1963).

Na descarga corona negativa, a ionização ocorre com a colisão de elétrons no eletrodo de descarga (fio) mais precisamente na zona ativa. Assim, uma alimentação constante de elétrons é realizada para ocorrer uma ionização primária. Os eletrodos de descarga interagem com íons positivos, negativos, elétrons livres e moléculas. Esta região é pequena e gera elétrons. Na zona passiva é donde ocorrem os mecanismos de carga e de coleta das partículas, White (1963).

Khare e Sinha (1996) definem o raio da zona ativa da corona (r_o) como a distância do eletrodo de descarga até a região onde ocorre uma diminuição da intensidade do campo elétrico. O cálculo é dado pela Equação 2.1, proposta por Crawford (1980) apud Khare e Sinha (1996) para a configuração de um precipitador tubular, sendo aplicável também para um precipitador do tipo placa-fio.

$$r_o = r_{se} + 0,03\sqrt{r_{se}} \quad (2.1)$$

sendo:

r_o = raio da zona ativa da corona;

r_{se} = raio do eletrodo de descarga.

2.4.1.1 Intensidade do campo elétrico

A Figura 2.7, apresentada por Riehle (1997), mostra a dependência do raio do eletrodo com o campo elétrico onde se observa que, à medida que os fios aumentam de diâmetro, o campo aplicado para iniciar o efeito corona é menor.

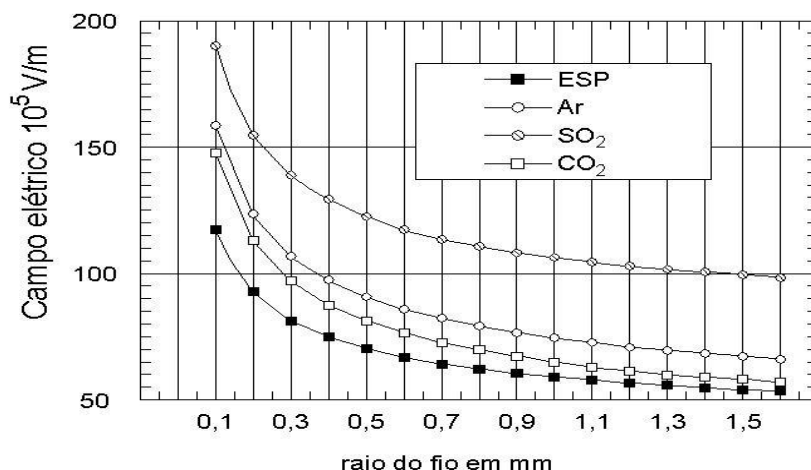


Figura 2.7 Início da corona E_o , como função do raio do fio. (Rihle 1997)

Assim, ao aplicar uma diferença de potencial entre os eletrodos de descarga (fio) e a placa coletora (parede) gera-se um campo elétrico. Um aumento gradativo deste é feito até um valor crítico onde se inicia o efeito de descarga corona, denominado como E_o . O qual depende da energia de ionização do gás, das partículas que nele se encontram e as fases livres entre as colisões dos elétrons. Peek (1929) apud Rihle (1997) apresentou uma equação empírica para relacionar estes parâmetros em função da densidade do gás e do raio do eletrodo usado r_{se} .

$$E_o = A' \delta + B' \sqrt{\frac{\delta}{r_{se}}} \quad (2.2)$$

$$\delta = \frac{\rho_{g2}}{\rho_{g1}} = \frac{P_2}{P_1} \frac{T_1}{T_2} \quad (2.3)$$

sendo:

E_o = campo elétrico necessário para o início da corona em kV/cm;

δ = densidade relativa, tendo como condições normais T_1, P_1 ;

ρ_{g1} = densidade de gás a T_1 e P_1 ;

ρ_{g2} = densidade de gás a T_2 e P_2 ;

T_1 = temperatura do gás inicial, geralmente 273 K;

P_1 = pressão do gás inicial, geralmente 1 bar;

P_2, T_2 = temperatura e pressão de operação.

Robinson (1971) sugere os seguintes valores para A' e B' ,

$$A' = 32 \text{ kV/cm};$$

$$B' = 9 \text{ kV/cm}^{1/2}.$$

2.4.1.2 Potencial elétrico e corrente

A Figura 2.8 mostra uma relação utilizada para potencial elétrico e a corrente, na qual se observa o início da curva em $V_{ne,0}$. A partir deste valor, é possível medir uma corrente entre os eletrodos de descarga e os de coleta, dando início ao efeito corona.

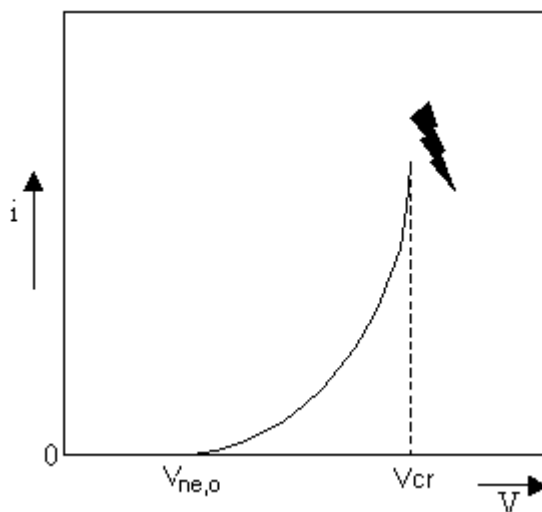


Figura 2.8 Relação entre corrente e potencial elétrico (Nóbrega, 2002).

O aumento gradativo do potencial é mostrado até um valor crítico, chamado de V_{cr} , no qual ocorre um rompimento dielétrico do gás. Riehle (1997) afirma que uma diferença apreciável de valores entre os valores de início e crítico é importante na precipitação eletrostática para obter um processo de coleta estável.

A diferença de potencial $V_{ne,0}$ para iniciar o efeito corona é função também da configuração dos eletrodos. Riehle (1997) fez uma análise para precipitadores placa-fio, na qual relaciona esta tensão com o espaçamento entre os fios e as placas coletoras. A Equação de Riehle (1997) para calcular da diferença de potencial que dê início a descarga de corona é:

$$V_{ne,0} = E_o(\delta, r_{se}) * r_{se} * \ln \frac{L_{NE}(s, 2c)}{r_{se}} \quad (2.4)$$

$$\frac{L_{NE}}{2c} = \frac{4}{\pi} \frac{s}{2c}; \text{ para } \frac{s}{2c} \leq 0,3 \quad (2.5)$$

$$\frac{L_{NE}}{2c} = 0,18 \exp\left(2,96 \frac{s}{2c}\right); \text{ para } 0,3 \leq \frac{s}{2c} \leq 1,0 \quad (2.6)$$

$$\frac{L_{NE}}{2c} = \frac{1}{2\pi} \exp\left(\pi \frac{s}{2c}\right); \text{ para } 1,0 \leq \frac{s}{2c} \quad (2.7)$$

sendo:

L_{NE} = comprimento característico do precipitador placa-fio;

s = distância entre as placas coletoras;

$2c$ = distância entre os fios.

A corrente elétrica é formada principalmente pelos íons do gás que passam através da zona passiva, sendo sua velocidade proporcional ao campo elétrico e sua mobilidade elétrica, chamada de b . Cooperman (1960) apud Riehle (1997) propôs a Equação 2.8 para relacionar os parâmetros acima especificados quando o precipitador é operado com baixa corrente elétrica.

$$J_{NE} = \frac{J_{SE}}{4c} = \frac{\pi \varepsilon_o b (\delta) V (V_{ne} - V_{ne,o})}{cs^2 \ln \frac{L_{NE}}{r_{se}}} \quad (2.8)$$

sendo:

J_{NE} = densidade de corrente por unidade de área de coleta;

J_{SE} = densidade de corrente por unidade de comprimento do fio;

b = mobilidade elétrica dos íons;

ε_o = permissividade no vácuo $8,86 \times 10^{12}$ As/Vm;

r_{se} = raio do eletrodo de descarga.

Cooperman (1981) obteve uma nova equação para altas correntes elétricas, apresentada na Equação 2.9.

$$J_{NE} = \frac{\varepsilon_o b}{16s^3} = \left[\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 192 (s_{NE,J=0})^3 (V_{ne} - V_{ne,0})} \right] \quad (2.9)$$

$$\alpha = 9(V_{ne} - V_{ne,0} + s E_{NE,J=0})^2 - 12(s \cdot E_{NE,J=0})^2 \quad (2.10)$$

$$E_{NE, J=0} = \frac{\pi V_{ne,0}}{2c \ln \frac{L_{NE}}{r_{se}}} \quad (2.11)$$

2.4.2 - Carregamento elétrico das partículas

A etapa de carregamento elétrico do material particulado na corrente gasosa permite que as partículas sejam transportadas para as placas coletoras por ação do campo. Este processo ocorre na chamada zona passiva.

Oglesby e Nicholds (1978) mencionam dois mecanismos que atuam neste processo: carregamento por campo e difusão. Estes mecanismos atuam conjuntamente, porém, para partículas maiores que $1\mu\text{m}$., a importância do carregamento por campo é maior e para partículas menores que $0,1\mu\text{m}$, a difusão é predominante. Já nos valores intermediários ambos, os mecanismos atuam com grande intensidade no carregamento das partículas.

De acordo com Cochet (1961) apud Rhiele (1997) uma equação para a carga de saturação adquirida pela partícula, é dada pela Equação 2.12:

$$Q_p^\infty = \left\{ \left(1 + \frac{2\lambda}{d_p}\right)^2 + \left(\frac{2}{1 + \frac{2\lambda}{d_p}}\right) + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2}\right) \right\} \cdot \pi \epsilon_0 d_p^2 E \quad (2.12)$$

sendo:

- Q_p^∞ = carga da partícula na saturação;
- λ = caminho livre médio das moléculas;
- d_p = diâmetro médio da partícula;
- ϵ_r = constante dielétrica da partícula;
- E = campo elétrico.

Beard (1976) apud Nóbrega (2002) apresenta a Equação 2.13 para o cálculo do caminho médio do ar (λ).

$$\lambda = \frac{215 \mu T^{1/2}}{P} \quad (2.13)$$

sendo:

λ = caminho livre médio, μm .;

μ = viscosidade dinâmica do gás, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$;

P = pressão do gás, bar;

T = temperatura do gás, K;

A Equação 2.14 é usada para o cálculo da viscosidade dinâmica do ar (Sutherland apud Nóbrega (2002)):

$$\mu = 15,2 \cdot 10^{-7} \frac{T^{3/2}}{T + 215} \quad (2.14)$$

2.4.3 Coleta de partículas

As partículas são carregadas eletricamente ao entrarem no precipitador e migram com uma certa velocidade para as placas coletoras. O processo de coleta da partícula na corrente gasosa ocorre devido à ação das forças elétricas e inerciais.

Oglesby e Nichols (1978) calcularam analiticamente a ação das forças sobre as partículas e propuseram um equacionamento para o movimento teórico destas, quando submetidas às forças de inércia do escoamento e forças elétricas no processo de coleta.

2.4.3.1 Cinética das partículas

As forças que atuam na partícula são: forças elétricas, forças inerciais, força gravitacional e força de arraste, sendo que as forças gravitacionais num precipitador eletrostático são desprezíveis em relação às demais. Considerando que a partícula atingiu sua carga de saturação, um balanço das forças atuantes sobre a partícula é mostrado por Riehle (1997), de acordo com a Equação 2.15.

A segunda lei de Newton fornece:

$$\left| \vec{F}_T \right| = \left| \vec{F}_{el} \right| - \left| \vec{F}_w \right| \quad (2.15)$$

sendo:

$|\vec{F}_T|$ = forças resultantes, responsáveis pela aceleração da partícula;

$|\vec{F}_{el}|$ = forças elétricas;

$|\vec{F}_w|$ = forças de arraste.

A partir dessas considerações, a Equação 2.15 pode ser escrita como:

$$m \frac{dw}{dt} = Q_{\infty p} E - \frac{3 \pi \mu d_p}{Cu} w \quad (2.16)$$

sendo:

m = massa da partícula;

Cu = fator de correção de Cunningham;

w = velocidade de migração da partícula.

O fator de Cunningham é dado segundo Riehle (1997) por:

$$Cu = 1 + 1,246 \frac{2\lambda}{d_p} + 0,42 \frac{2\lambda}{d_p} \cdot \exp\left(-0,87 \frac{d_p}{2\lambda}\right) \quad (2.17)$$

Adotando como condição inicial $w_{(t=0)} = 0$, a Equação 2.16 pode ser resolvida, resultando na Equação 2.18:

$$w(t) = w_{th} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) \right\} \quad (2.18)$$

sendo:

$$\tau_p = \frac{m Cu}{3 \pi \mu d_p} = \frac{\rho_p d_p^2 Cu}{18 \mu} \quad (2.19)$$

Riehle (1997), define a velocidade de migração teórica como:

$$w_{th} = \frac{Q_{\infty p} E Cu}{3 \pi \mu d_p} \quad (2.20)$$

sendo:

ρ_p = densidade da partícula;

τ_p = tempo de relaxação da partícula em comportamento dinâmico;
 w_{th} = velocidade teórica de migração (velocidade da partícula em estado estacionário).

2.5 Eficiência de coleta.

A eficiência global de coleta (η) é definida como a razão entre a massa de material coletado e a massa alimentada, e também pode ser definida em termos de concentração, sendo apresentada na Equação 2.21:

$$\eta = \frac{C_e - C_s}{C_e} = 1 - \frac{C_s}{C_e} \quad (2.21)$$

sendo:

C_e = concentração de partículas na entrada do sistema;

C_s = concentração de partículas na saída do sistema.

2.6 Modelos teóricos de perfil de concentração.

Vários modelos teóricos foram baseados em diferentes considerações e simplificações para descrever o comportamento da partícula no interior do precipitador e conseqüentemente explicar o processo de coleta.

2.6.1 Modelo de Deutsch

Considerando que a maioria dos precipitadores apresenta um escoamento turbulento, Deutsch (1922) apud Oglesby e Nichols (1978) derivou a equação desenvolvida por Anderson (1919), assumindo as seguintes hipóteses:

1. Considera-se que as partículas estejam completamente carregadas ao entrar ao sistema, ou seja, atingem sua carga de saturação.
2. As forças de turbulência e difusivas fazem com que as partículas estejam uniformemente distribuídas em qualquer seção transversal do precipitador.
3. A velocidade horizontal do gás não afeta a velocidade de migração das partículas em direção às placas coletoras.
4. A ação da força de arraste pode ser descrita pela Lei de Stokes.
5. As partículas se movimentam com velocidade de migração constante.

6. As partículas estão suficientemente separadas e as suas forças de repulsão são desprezadas.
7. Os efeitos da colisão entre os íons e as moléculas de gás neutrais são desprezados.
8. Os efeitos de distúrbios de erosão, reentrada das partículas e corona reversas não são considerados.

Uma visualização esquemática do perfil de velocidade, segundo o modelo de Deutsch, é mostrada na Figura 2.9, na qual observa-se um fluxo pistonado para a corrente de gás. Com isto, a concentração é uniforme na seção transversal do equipamento. Esta consideração é a mais questionada por modelos posteriores, que apresentaram variações de concentração na secção transversal do duto.

A partir destas considerações, uma partícula suspensa em uma corrente de gás, sob a influência de um campo elétrico, adquire uma velocidade (V_o) e uma velocidade de migração (W_{th}) na direção das placas.

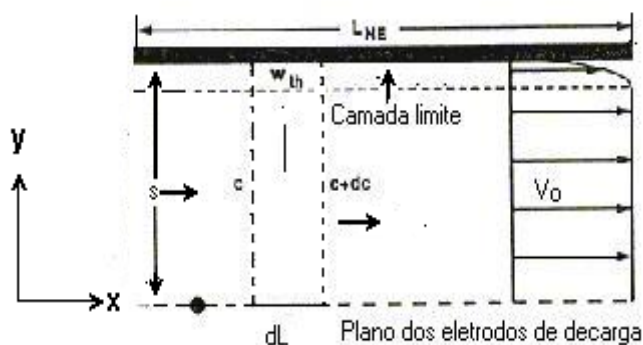


Figura 2.9: Ilustração do modelo de Deutsch (Riehle, 1997)

Um balanço sobre o volume de controle, em um precipitador é apresentado na Figura 2.10, resultando na Equação 2.22

$$dC_{(dp)} = C_{(L, dp)} \cdot - \frac{W_{th}(dp) dL}{V_o s} \quad (2.22)$$

sendo:

- dC = variação infinitesimal de concentração;
- s = distância entre placa coletora e o eletrodo de carga;
- dL = variação infinitesimal longitudinal;
- d_p = diâmetro de partícula;
- V_o = velocidade do gás.

A solução da Equação 2.22, obtida por Deutsch para um precipitador placa-fio, é dada pela Equação 2.23:

$$C_{(L, dp)} = C_{(0, dp)} \exp \left(- \frac{w_{th} (dp, E) L_{NE}}{V_o s} \right) \quad (2.23)$$

Combinando-se as Equações 2.21 e 2.23, tem-se:

$$\eta_{dpi} = 1 - \exp \left(- \frac{w_{th} L_{NE}}{V_o s} \right) = 1 - \exp \left(- \frac{w_{th} A}{Q} \right) \quad (2.24)$$

sendo:

η_{dpi} = eficiência de coleta fracionária;

L_{NE} = comprimento característico da placa de coleta;

A = área total de coleta;

Q = vazão volumétrica da corrente de gás;

V_o = velocidade de gás.

Normalmente, o valor mostrado dentro da exponencial da Equação 2.24 é chamado de número de Deutsch, definido pela Equação 2.25.

$$De = \frac{w_{th} L_{NE}}{V_o s} \quad (2.25)$$

2.6.2 Estudo qualitativo de Riehle

Riehle e Loffler (1993) apresentaram um estudo qualitativo do comportamento da partícula no interior de um precipitador, mostrando um comportamento diferente das partículas ao proposto por Deutsch, como mostra a Figura 2.10.

Nesta Figura apresentada por Riehle, observa-se que as partículas não estão uniformemente distribuídas no precipitador tendendo a sua concentração diminuir no centro e aumentar nas placas na medida em que estas avançam ao longo do duto.

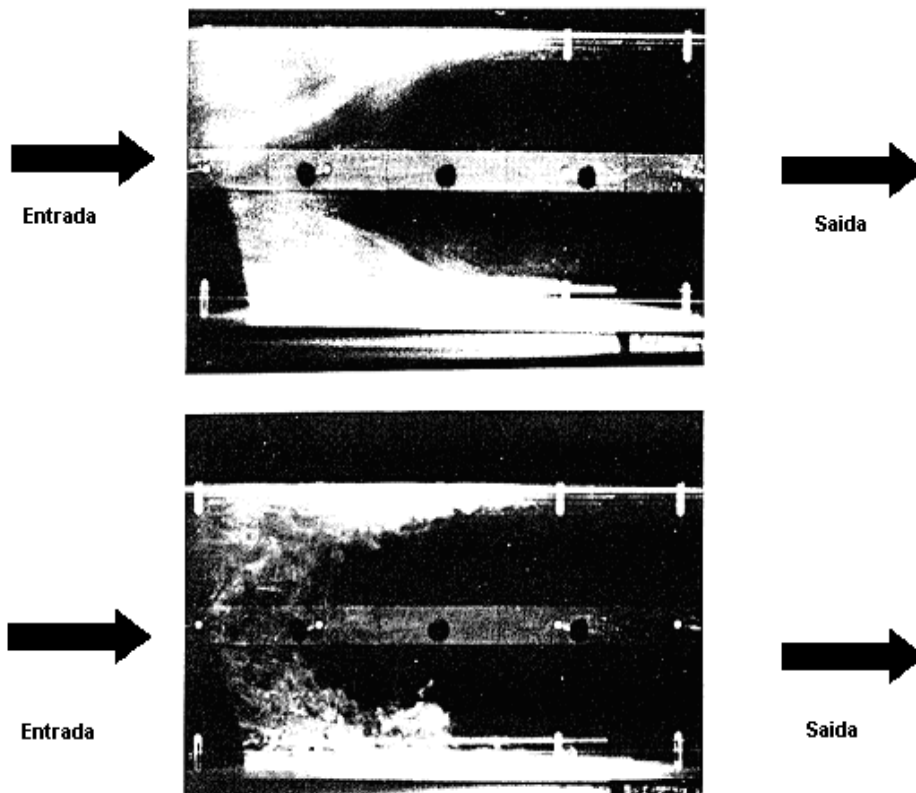


Figura 2.10: Concentração não homogênea das partículas de fumaça com diâmetro entre 0,5 e 1,0 μm . em um ESP ($2s=0,2\text{ m}$; $E=40\text{ kV}$; $V=1\text{ m/s}$, Riehle e Löffler, 1993)

2.6.3 Modelo laminar

Kihm et al. (1985) fazem a suposição de escoamento laminar em precipitadores eletrostáticos, sendo a sua eficiência dada pela trajetória linear da partícula, que é determinada pelo perfil de velocidade parabólico proposto, como mostrado na Figura 2.11.

Para a resolução da Equação 2.15, Kihm et al (1985) fazem as seguintes considerações:

1. A força de arraste pode ser especificada pela Lei de Stokes uma vez que para Reynolds (Re) $\ll 1$.
2. Válida para tamanho de partículas menores que 20 μm .
3. Para partículas com diâmetros sub-micrônicos, usa-se o fator de correção de Cunningham (Cu) para compensar o efeito da descontinuidade do meio.
4. A partícula é considerada como sendo uma esfera.
5. Desprezam-se os componentes transversais de movimento.
6. Todas as partículas estão carregadas eletricamente.

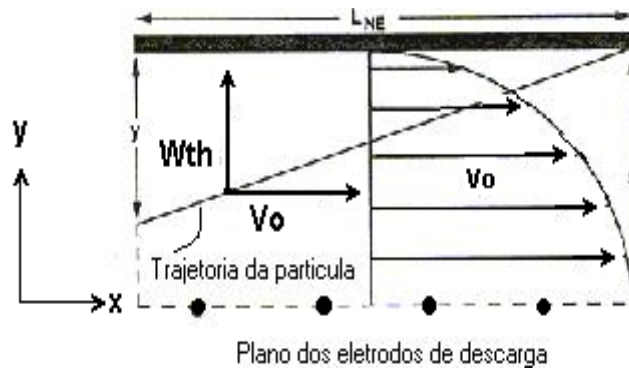


Figura 2.11: Modelo laminar idealizado. (Riehle,1997)

A partir das considerações acima, a equação proposta para a eficiência é:

$$\eta_{dpi} = \frac{w_{th} (dp, E) L_{NE}}{V_o s} \quad (2.26)$$

Como conseqüência desse modelo, o perfil de concentrações previsto apresenta um mínimo no centro e um máximo nas paredes que é produto do perfil parabólico de velocidade proposto.

2.6.4 Modelo numérico de Leonard et al.

Na modelagem matemática de Leonard et al. (1980), assumem-se as seguintes hipóteses para um material polidisperso.

- 1.- A velocidade do gás é uniforme, existindo flutuações de valores pelo escoamento turbulento.
- 2.- As partículas atingem instantaneamente a velocidade do gás.
- 3.- Existe uma difusividade turbulenta para as partículas.

A Figura 2.12 esquematiza os perfis de concentrações obtidos, que são função do coeficiente de difusão D_p . Nota-se que, no limite $D_p \rightarrow \infty$, tem-se a aproximação de Deutsch enquanto no limite $D_p \rightarrow 0$, tende-se ao laminar.

A equação analítica proposta é:

$$\eta_{dp} = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} C_m \exp(-DeF_m) \frac{\text{sen}\Theta_m}{\Theta_m} \exp\left(\frac{Pe}{2}\right) \quad (2.27)$$

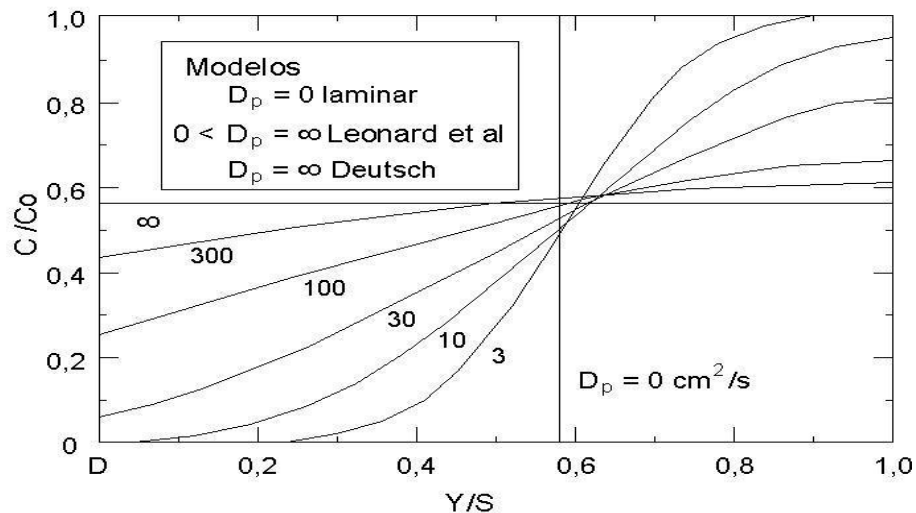


Figura 2.12: Modelo numérico de Leonard. (Riehle,1994)

sendo:

Pe = número de Peclet

$$Pe = \frac{W_{th} S}{dp} \quad (2.28)$$

$$C_m = C_z/C_N \quad (2.29)$$

$$C_z = \frac{\exp(-Pe/2)}{\Theta_m^2 + \frac{Pe^2}{4}} \left\{ -Pe \cos(\Theta_m) + \left(\Theta_m - \frac{Pe^2}{4\Theta_m} \right) \text{sen}(\Theta_m) + \frac{Pe}{\exp(-Pe/2)} \right\} \quad (2.30)$$

$$C_N = \frac{1}{2} + \frac{Pe}{4\Theta_m^2} + \frac{Pe^2}{8\Theta_m^2} + \frac{1}{4} \left(1 - \frac{Pe^2}{4\Theta_m^2} \right) \text{sen}(2\Theta_m) - \frac{Pe}{4\Theta_m^2} \cos(2\Theta_m) \quad (2.31)$$

$$Fm \left(\frac{W_{th}}{V_o}, Pe \right) = \frac{1}{\left(\frac{W_{th}}{V_o} \right)^2} \frac{Pe}{2} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{W_{th}}{V_o} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{2\Theta_m}{Pe} \right)^2 \right]} - 1 \right\} \quad (2.32)$$

$$\Theta_m = \frac{Pe}{2} \left(\frac{4DK_m}{w_{th}^2} - 1 \right)^{1/2}$$

Sendo:

K_m = variáveis de separação para m funções;

D = difusividade turbulenta;

W_{th} = velocidade de migração teórica.

2.6.5 Modelo de Zhibin e Guoquan.

Zhibin e Guoquan (1992,1994) fizeram um estudo para determinar um modelo para o cálculo da eficiência de coleta em um precipitador do tipo placa-fio. Os autores consideraram a influência dos efeitos difusivos, eletrostáticos e desprezaram o efeito gravitacional, obtendo a Equação 2.33. A Figura 2.13 mostra o perfil proposto Zhibin, obtido por Nóbrega em seus estudos experimentais, onde se observa uma leve variação da concentração na seção transversal, tendendo a um valor constante. Para este modelo consideraram que:

- Há um máximo de concentração próxima às placas coletoras e um mínimo nas regiões dos fios de descarga.

A equação proposta por Zhibin e Guoquan é dada por.

$$E_y \frac{\partial^2 C_{dpi}}{\partial y^2} = V_o \frac{\partial C_{dpi}}{\partial x} + W_{th} \frac{\partial C_{dpi}}{\partial y} \quad (2.33)$$

com:

C_{dpi} = concentração da partícula de tamanho i ;

E_y = difusividade turbulenta da partícula;

y = direção transversal ao escoamento;

x = direção longitudinal ao escoamento.

O primeiro termo da Equação 2.33 considera o transporte por difusão turbulenta da partícula na direção transversal do escoamento, o segundo termo considera o transporte convectivo na direção do escoamento e o terceiro termo ao transporte devido a forças eletrostáticas.

Adotando no instante inicial ($t=0$) que a concentração é C_o , a solução da Equação 2.33 fornece:

$$C(x, y) = \frac{C_{o, dpi} \cdot S \cdot V_o^{1/2}}{(\pi \cdot E_y \cdot x)^{1/2}} \exp \left(\frac{-V_o \left(y - \frac{W_{th}}{V_o} \cdot x \right)^2}{4 \cdot E_y \cdot x} \right) \quad (2.34)$$

Assim, a eficiência de coleta de Zhibin e Guoquan (1994) é obtida a partir das equações 2.21 e 2.34:

$$\eta_{dpi} = 1 - \sqrt{\frac{V_o}{4 \cdot \pi \cdot E_y \cdot L}} \int_0^b \exp \left[\frac{-V_o \left(y - \frac{W_{th}}{V_o} L \right)}{4 \cdot E_y \cdot L} \right] \quad (2.35)$$

O número de Peclet na equação de Zhibin e Guoquan é definindo como:

$$P_{e,z} = \frac{W_{th} \cdot S}{E_y} \quad (2.36)$$

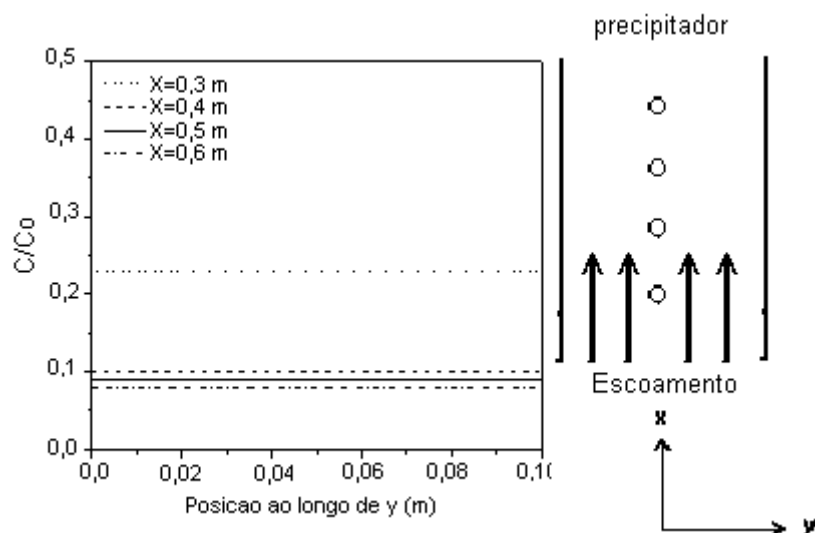


Figura 2.13 : Perfis de concentração teóricos do modelo de Zhibin e Guoquan Para $V_o = 1$ m/s; $V = 45$ kV/cm; $dp = 1,0 \mu\text{m}$; $2s = 0,20$ m (Nóbrega,2002).

adimensionalizando:

$$\xi = y/s \quad (2.37)$$

A equação 2.35 pode ser apresentada na sua forma adimensionalizada:

$$\eta_{dpi} = 1 - \sqrt{\frac{P_{e,z}}{4 \cdot \pi \cdot De}} \int_0^1 \exp \left[\frac{-P_{e,z}}{4 \cdot De} (\xi - De)^2 \right] d\xi \quad (2.38)$$

Segundo estes pesquisadores, o coeficiente de difusividade não é fácil de ser calculado. No entanto, eles apresentam a seguinte correlação para obtê-lo válida para velocidades entre 0,3 e 1,22 m/s e intensidade de campo de até 5,0 kV/cm:

$$E_y = \frac{0,3378 \cdot V_o \cdot s \cdot C_F}{\left[(1 + 2 N_{EHD}) R_E \right]^{0,04}} \quad (2.39)$$

Klianchko (1934) apud Zhibin (1992) apresenta as seguintes equações para o cálculo do coeficiente de resistência, C_F :

$$C_F = \frac{24}{R_{EP} + \frac{4}{(R_{EP})^{1/3}}} \quad (2.40)$$

$$R_{EP} = V_o \frac{d_{pi}}{\nu} \quad (2.41)$$

com:

ν = viscosidade cinemática;

R_{EP} = número de Reynolds para a partícula.

O termo N_{EHD} , da Equação 2.39 é um coeficiente eletrohidrodinâmico que considera os efeitos elétricos da partícula no escoamento, obtido da Equação 2.42:

$$N_{EHD} = \frac{i}{L \cdot \rho \cdot b \cdot V_o^2} \quad (2.42)$$

sendo:

i = corrente total da corona;

L = comprimento da corona no fio;

b = mobilidade iônica;

ρ = densidade do gás.

2.6.6 Modelo de Nóbrega

Nóbrega (2002) apresentou um desenvolvimento teórico distinto ao de Zhibin e Guoquan para obter uma equação de eficiência de coleta, que apresentou excelentes resultados na faixa de diâmetro de partícula entre 0,3 e 0,5 μm . Este modelo apresenta a máxima concentração de partículas nas paredes e o mínimo nos eletrodos, como é mostrado na Figura 2.14.

Supondo-se que a concentração de partículas seja nula no centro do duto obtém-se:

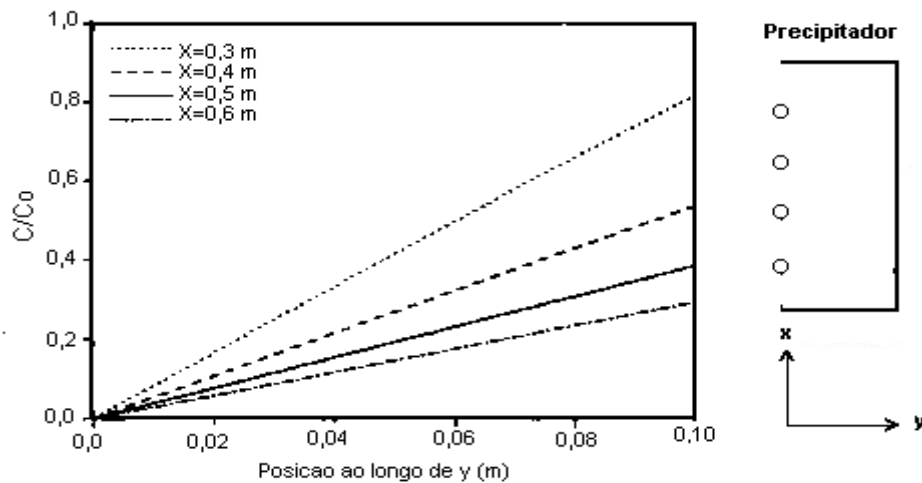


Figura 2.14 Perfis de concentração de Nóbrega para $V_0=1,0$ m/s, $V=4,5$ kV/cm, $dp=1,0$ μm , $2s=0,20$ m (Nóbrega, 2002).

$$C_{\text{dpi}} = \frac{V_0^{1,5} \cdot y \cdot C_0 \cdot s}{w_{\text{th}} \cdot x \cdot \sqrt{\pi \cdot E_y \cdot x}} \exp \left(- \frac{V_0 \left(y - \frac{w_{\text{th}} \cdot x}{V_0} \right)^2}{4 \cdot E_y \cdot x} \right) \quad (2.43)$$

Relacionando as Equações 2.21 e 2.43, obtém-se a equação de eficiência de coleta de Nóbrega (2002) para precipitadores placa-fio.

$$\eta_{\text{dpi}} = 1 - \frac{\sqrt{\frac{Pe}{\pi}}}{De^{1,5}} \int_0^{\xi} \xi \cdot e^{-\left[\frac{Pe}{4De} (\xi - De)^2 \right]} d\xi \quad (2.44)$$

2.7 Comparações experimentais dos modelos de eficiência.

Kim e Lee (1999) compararam os modelos de Deutsch, Leonard et al. (1982), Zhibin e Guoquan (1992) e Cooperman (1981). Este estudo buscou a melhor correlação para a eficiência de coleta, quando variada a diferença de potencial e espaçamento entre os fios, como mostra a Figura 2.15. A equação de Zhibin e Guoquan apresentou boa concordância, enquanto que a equação Deutsch subestimou valores de eficiência, assim como a de Leonard et al., superestimou a eficiência de coleta.

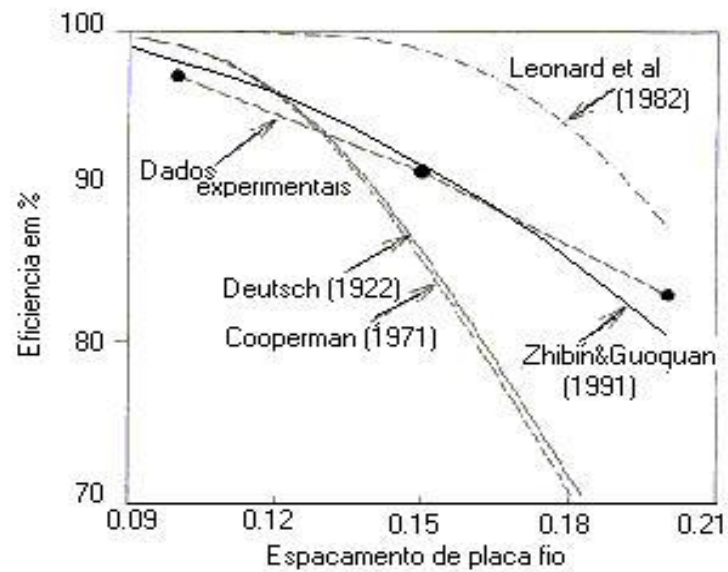


Figura 2.15 Eficiência de coleta com vários espaçamentos de fios em um PES. Condições experimentais: $2r_{SE} = 2$ mm, $E=5,0$ kV/cm, $V_o = 1,0$ m/s, $2c = 25$ mm (Kim Lee, 1999).

Quando a velocidade do gás foi variada, os resultados das correlações foram similares, como mostrado na Figura 2.16. Novamente, a eficiência do precipitador apresentou resultados melhores para a correlação Zhibin e Guoquan.

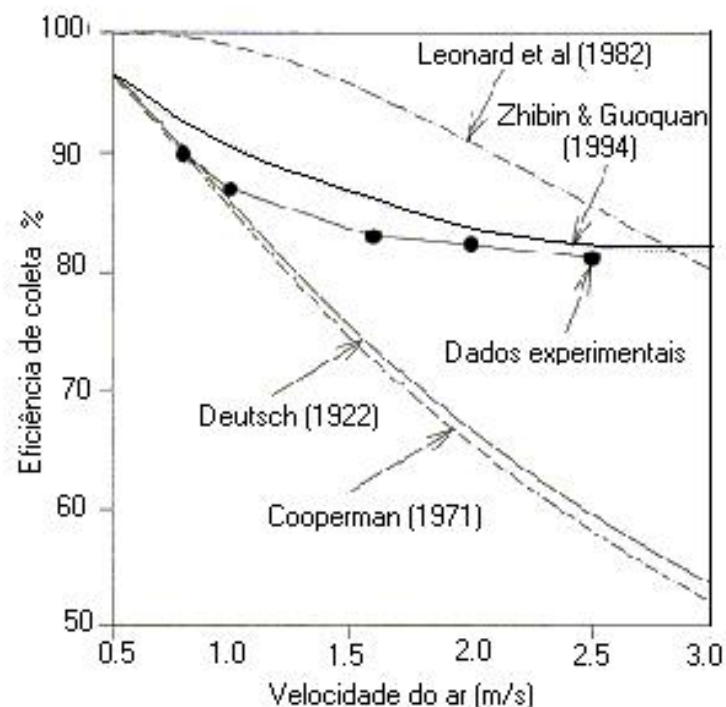


Figura 2.16 Comparação da eficiência total com varias velocidades de gás. Condições experimentais: $2r_{SE} = 2$ mm, $E=5,0$ kV/cm, $V_o = 1,0$ m/s, $2c = 25$ mm (Kim Lee, 1999).

2.8 Comparações dos modelos de eficiência

É importante destacar que não se encontrou informação na literatura de outros estudos experimentais para o comportamento do material particulado no interior de um precipitador eletrostático. Sendo estes trabalhos, em sua maioria, de natureza teórica para o desenvolvimento de uma equação de eficiência. Assim após mudanças nas variáveis de configuração geométrica e parâmetros elétricos, os resultados obtidos foram comparados com os fornecidos pelas equações teóricas propostas.

MATERIAIS E MÉTODOS.

No presente trabalho, realizaram-se medições experimentais do perfil de concentração no interior de um precipitador eletrostático do tipo placa-fio de simples estágio em escala laboratorial. Foram definidos cinco pontos de amostragem ao longo da placa coletora chamados de Filas e que por sua vez, possibilitam a realização de medidas laterais, definindo-se mais cinco medições transversais ao escoamento, que foram chamadas de Posições.

3.1 Unidade experimental

O sistema experimental utilizado foi o precipitador eletrostático do tipo placa-fio que consistia basicamente em uma caixa retangular, construída em acrílico transparente, cujas paredes laterais são constituídas de placas de cobre.

O precipitador possui equipamentos auxiliares que tornam possível a medição e controle das variáveis a serem estudadas. O esquema básico das unidades experimentais é mostrado na Figura 3.1.

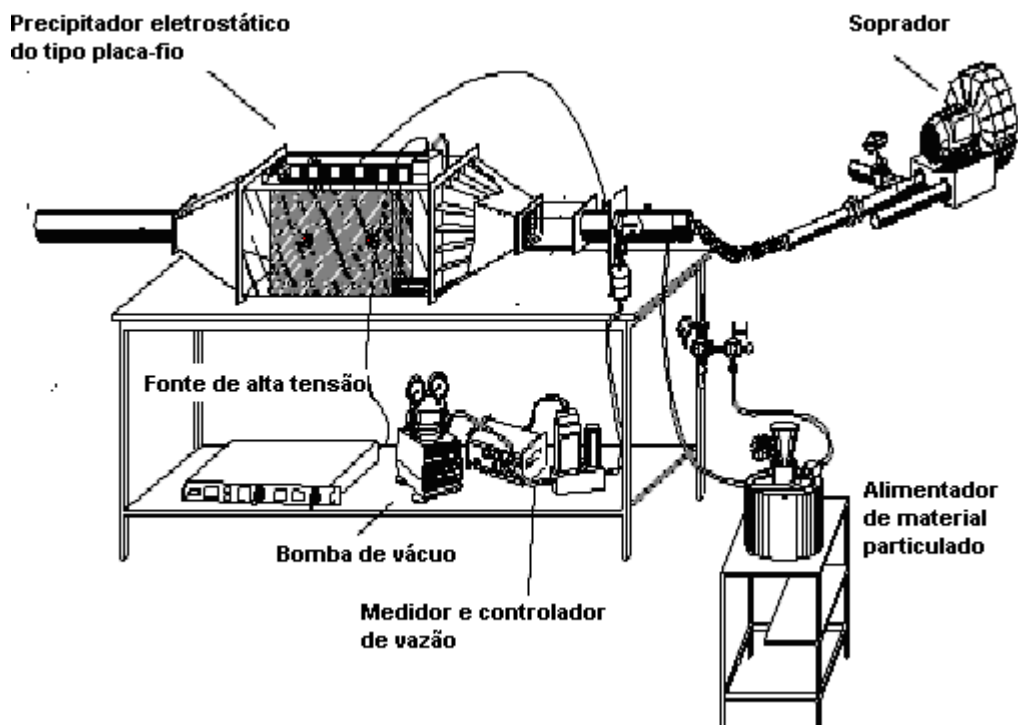


Figura 3.1 Esquema do precipitador eletrostático placa-fio de Controle Ambiental da UFSCar e seus equipamentos básicos.

A nomenclatura utilizada no estudo é apresentada na Figura 3.2, que mostra-se o precipitador eletrostático do tipo placa-fio experimental e suas principais dimensões:

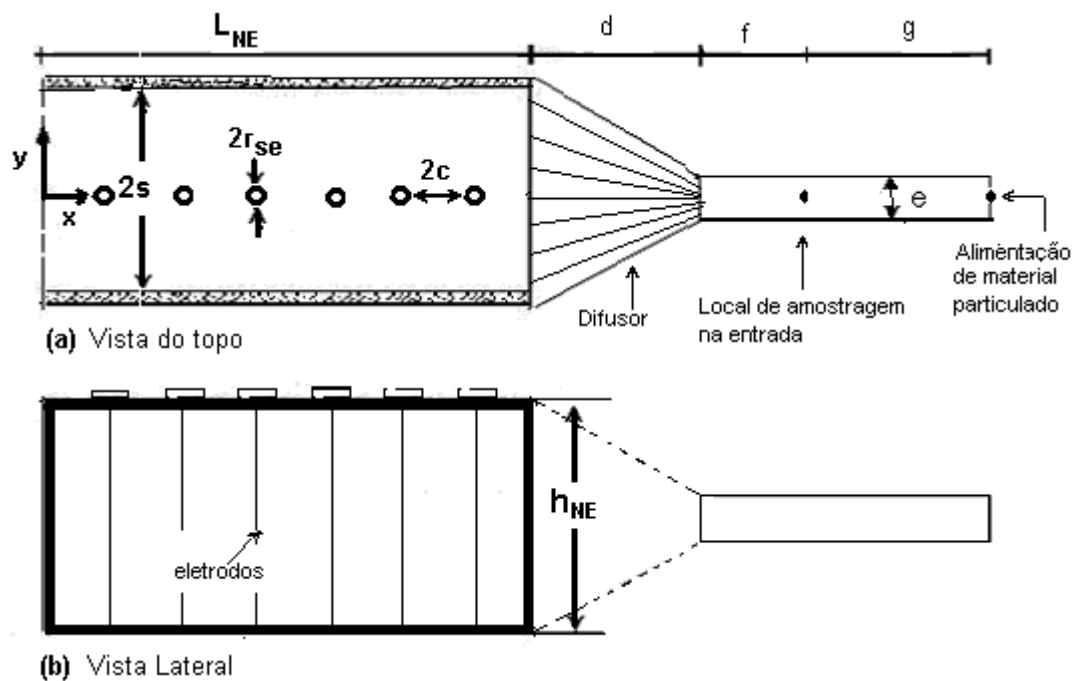


Figura 3.2 Dimensões básicas do precipitador eletrostático placa-fio (a): vista superior; (b) vista lateral.

Os valores das dimensões descritos são:

- $2s = 0,20$ m
- $2r_{se} = 1,0 \times 10^{-3}$ m
- $L_{NE} = 0,60$ m
- $h_{NE} = 0,30$ m
- $2c = 0,10$ m
- $d = 0,40$ m
- $e = 0,05$ m
- $f = 0,30$ m
- $g = 0,80$ m

Os equipamentos auxiliares utilizados que compõem a unidade experimental são descritos a seguir:

- **Fonte de Alta Tensão DC** da marca SPELLMAN modelo SL 1200 cuja faixa de operação é de 0 a 5,0 kV/cm de diferença de potencial e corrente de 0 a 20 mA, podendo produzir corrente de corona positiva ou negativa.

- **Soprador** da marca IBRAM com uma potencia de 7,5 hp com a vazão de ar é regulada por um sistema de “by-pass” com válvulas de controle.

- **Alimentador de material particulado** do tipo prato giratório, que consiste basicamente em:

- Ejetor;
- Cone de Alimentação;
- Vibrador;
- Prato giratório com 3 sulcos de diferentes larguras;
- Homogeneizador de material particulado.

A Figura 3.3 mostra um esquema do prato de alimentação usado:

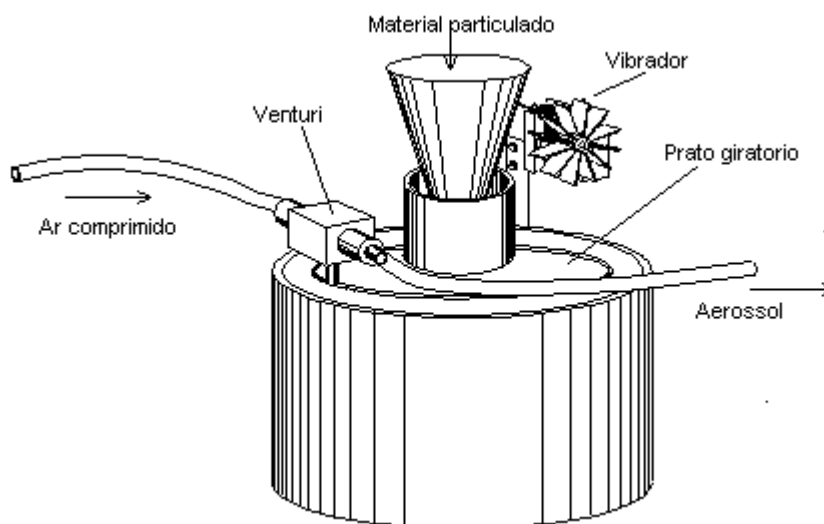


Figura 3.3 Desenho esquemático do alimentador.

- **Sistema de amostragem isocinética** para a obtenção da concentração das partículas na corrente era composto por:

- **Sonda metálica** para amostrar a concentração de material particulado na entrada do precipitador. A Figura 3.4 mostra um detalhe desta sonda.

- **Sonda de vidro** para medir a concentração no interior do precipitador. Este material foi escolhido por suas características isolantes, fácil construção, além de ser transparente, o que permitia observar possíveis deposições de material particulado no interior. As sondas tinham dois formatos uma reta e uma curva, sendo esta última usada para as medições próximas dos eletrodos, chamado de posição zero. Possuíam bicos de silicone na entrada para evitar distúrbios no escoamento. Um esquema das mesmas é mostrado na Figura 3.5.

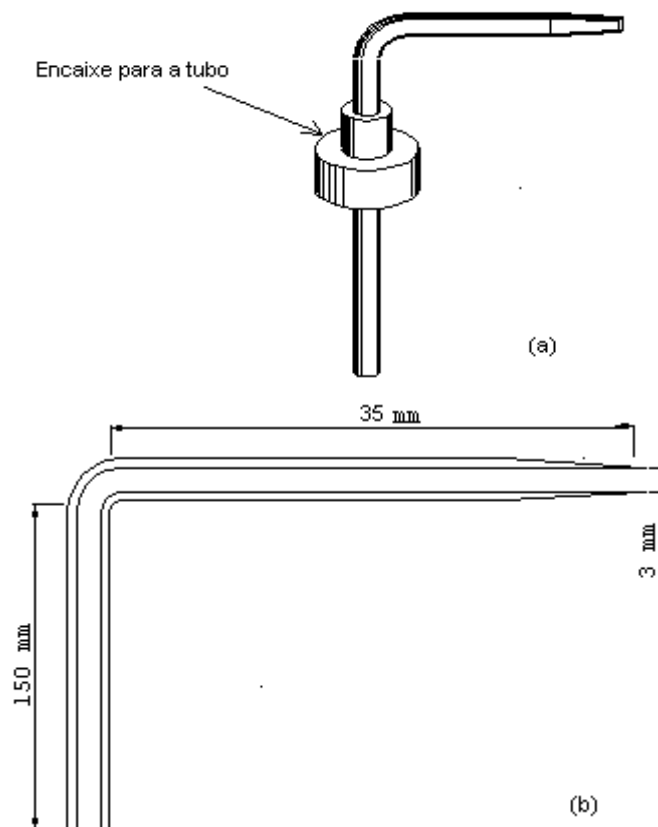


Figura 3.4 (a) Sonda usada para amostragem isocinética de entrada do material particulado e (b) Principais dimensões.

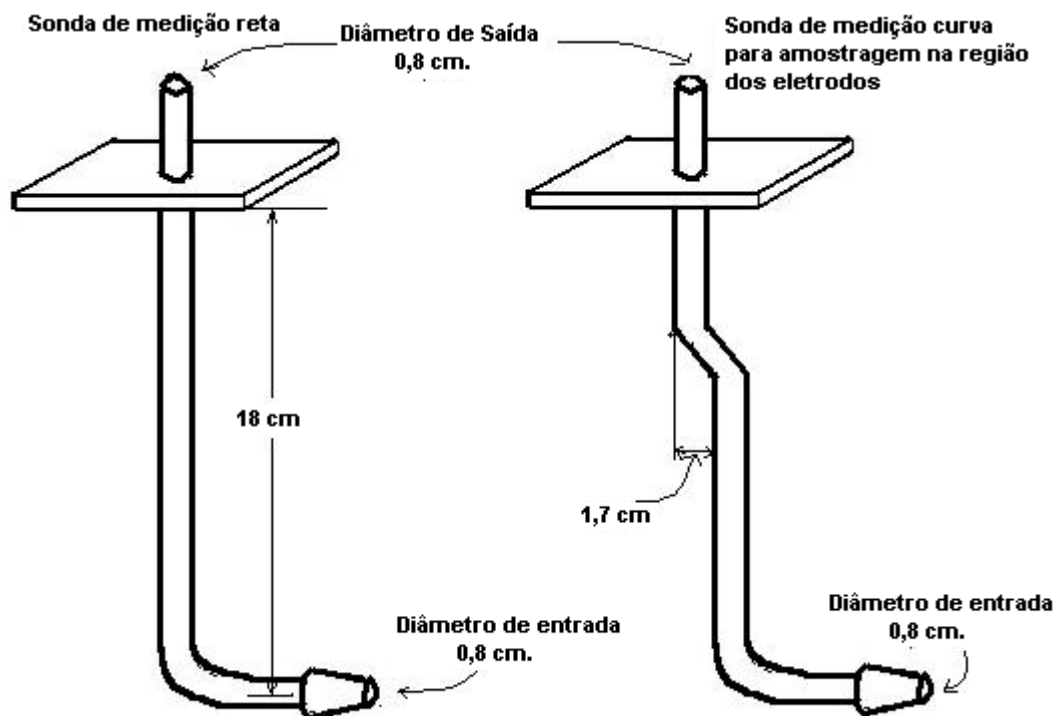


Figura 3.5 Esquema das sondas de vidro para medições internas.

- **Filtro** da SCHEICHER & SCHEUELL e **Porta filtro**, como mostrado na Figura 3.6.

- **Bomba de vácuo** Edwards modelo SPEEDIVAC-2, mostrada na Figura 3.7.

- **Medidor e controlador de vazão** eletrônico da AALBORG Modelo GFC37, mostrado na Figura 3.7.

- **Medidor de vazão manual**, válvulas e um rotâmetro da GILMONT INSTRUMENT INC. tamanho 3.

Um esquema do sistema de amostragem está apresentado na Figura 3.7. Um detalhamento da medida de concentração no interior do precipitador é dado na seção 3.3.2.

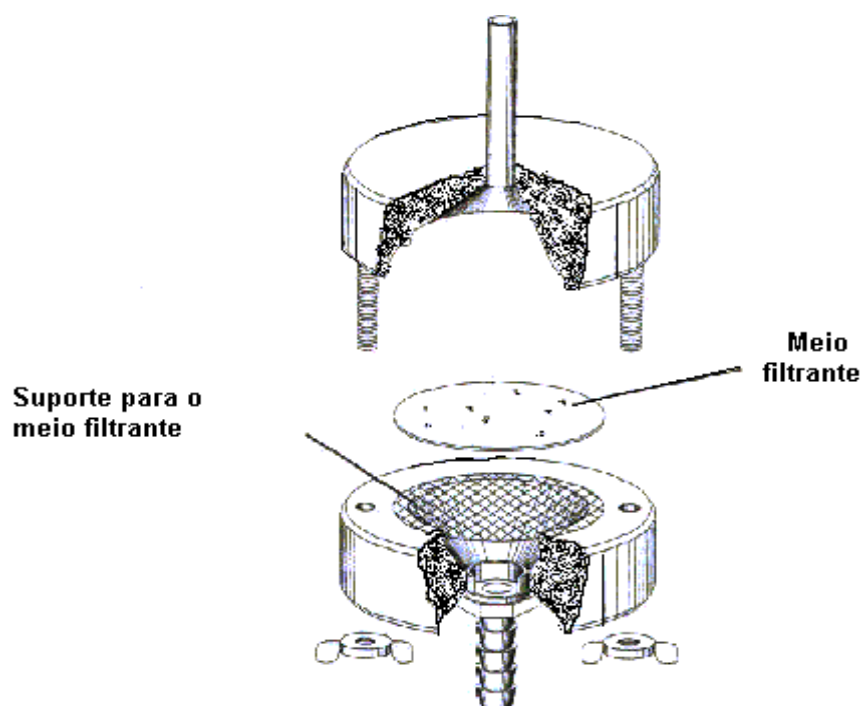


Figura 3.6 Esquema do porta filtro.

Também se utilizaram os seguintes acessórios de medição.

- **Medidor de umidade** da MINIPA INDUSTRIA E COMERCIO modelo MTH-1360

- **Medição de temperatura** da corrente com um termômetro manual

- **Medidor da velocidade do gás** no precipitador através de um tubo de Pitotconectado a um micromanómetro da FURNES CONTROL LIMITED modelo FCO-14

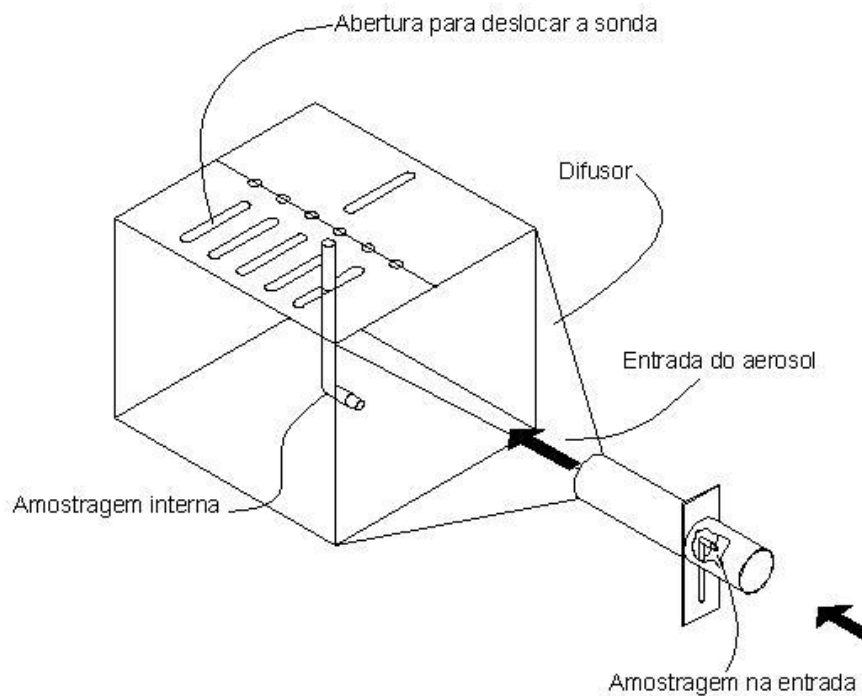


Figura 3.7 Esquema do sistema de medição de concentração com os pontos de medição no interior do precipitador.

3.2 Material particulado

O material particulado utilizado nos testes experimentais foi um concentrado fosfático, cujas principais características eram:

- Diâmetro médio (d_p)

O diâmetro médio foi de $4,5 \mu\text{m}$, medido no MALVERN MASTERSIZER, cuja distribuição granulométrica é mostrada na Tabela 3.1.

- Constante dielétrica e resistividade elétrica (ρ)

Os valores adotados para a constante dielétrica e para a resistividade elétrica foram de 6,5 e $8,3 \times 10^8 \Omega\text{m}$ respectivamente (Nóbrega, 2002).

Tabela 3.1- Distribuição granulométrica da material particulado

Faixa de diâmetro (μm)	% em massa
0,00 - 2,28	39,73
2,28 - 5,69	13,70
5,69 - 9,00	8,48
9,00 - 14,22	9,88
14,22 - 22,49	11,91
22,49 - 35,56	10,88
35,56 - 48,27	4,02
48,27 - 65,51	1,38

- Densidade do Material particulado

A densidade foi medida no Picnômetro da MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION modelo AccuPyc 1330, obtendo-se o valor de 3,0 g/cm³

3.3 Condições operacionais

3.3.1 - Perfil de velocidade do gás

Previamente aos ensaios experimentais, fez-se um estudo da variação da velocidade do gás no interior do precipitador para comprovar se existiam regiões com diferentes valores de velocidade de corrente no interior do equipamento.

As medidas foram feitas em três filas ao longo do precipitador e a sonda movimentou-se transversalmente ao escoamento. Operou-se com a corrente de gás limpo, sem material particulado, com uma velocidade de 1,4 m/s no duto do precipitador.

3.3.2 Determinação dos pontos de medição na unidade

Com o objetivo de obter os dados experimentais de concentração do material particulado na corrente gasosa no interior do precipitador, foram determinados, previamente os locais de amostragem no seu interior. Usou-se uma metade do duto para as amostragens uma vez que este era simétrico, de acordo com medições feitas para isto. Assim, definiram-se cinco posições longitudinais fixas e igualmente espaçadas, entre o início e o fim da placa coletora. Estes cinco pontos possuem uma

abertura que permitiu movimentar lateralmente as sondas, definindo-se assim mais cinco posições transversais de amostragem, o que permitiu vinte e cinco medidas de concentração para cada variável estudada.

Os pontos longitudinais foram chamados de Filas e os transversais de Posições. A Figura 3.8 mostra os pontos de amostragem.

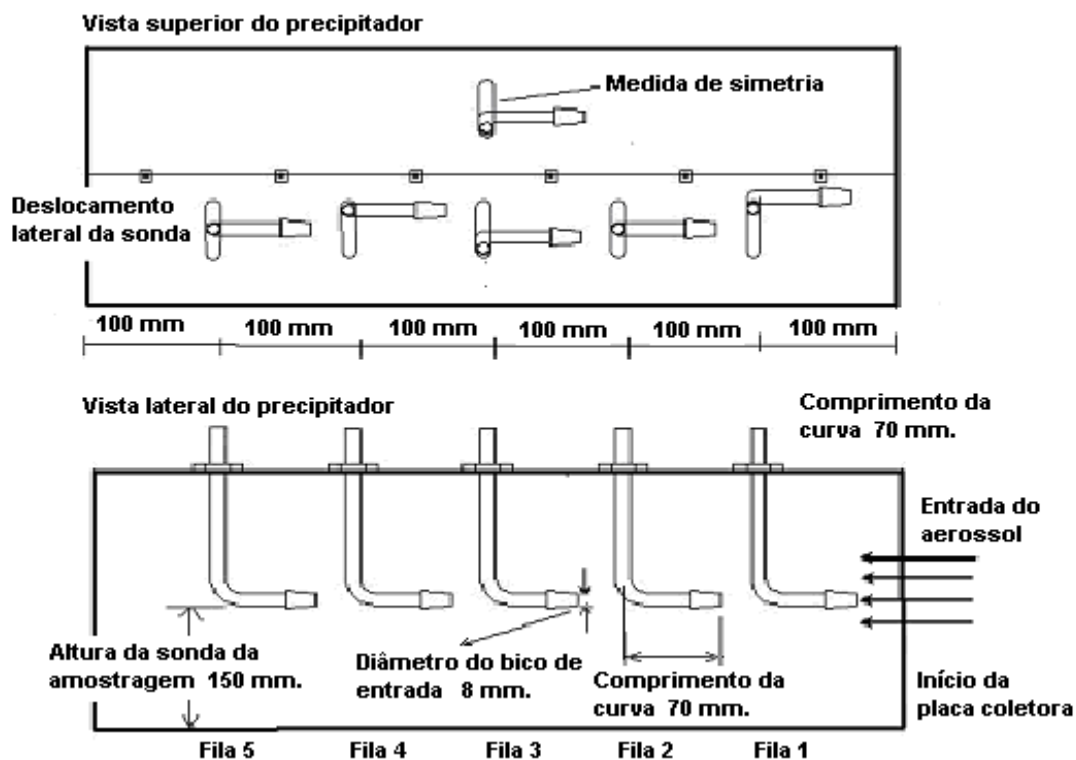


Figura 3.8 Pontos de medição de concentração no interior do precipitador.

A Tabela 3.2 mostra os pontos de amostragem das concentrações no interior do precipitador. A Fila 1 corresponde ao ponto mais próximo ao início da placa coletora e assim por diante, e a posição 0 correspondente à região mais próxima do eletrodo.

Tabela 3.2: Pontos de medidas no precipitador, a partir da placa coletora

Medidas			
Longitudinais (cm)		Transversais (cm)	
Fila 1	3,00	Posição 0	1,80
Fila 2	13,00	Posição 1	3,50
Fila 3	23,00	Posição 2	5,20
Fila 4	33,00	Posição 3	6,90
Fila 5	43,00	Posição 4	8,60

3.3.3 - Determinação das medidas isocinéticas

As medidas isocinéticas foram realizadas considerando um volume de controle no precipitador, como mostrado na Figura 3.9.

Considerando que:

$$Q = V_i A_c = V_e A_e \quad (3.1a)$$

$$Q_s = A_s V_e \quad (3.1b)$$

$$Q_i = A_i V_i \quad (3.1c)$$

sendo:

Q = vazão de operação;

Q_s = vazão de amostragem do gás na sonda de entrada;

Q_i = vazão de amostragem do gás da sonda no interior do precipitador;

A_e = área da seção transversal do duto de entrada no precipitador;

A_i = área transversal do bocal da sonda de amostragem interna do precipitador;

A_c = área transversal do duto do precipitador;

A_s = área transversal do bocal da sonda de amostragem na entrada do precipitador;

V_e = velocidade do gás na entrada;

V_i = velocidade do gás no interior do precipitador.

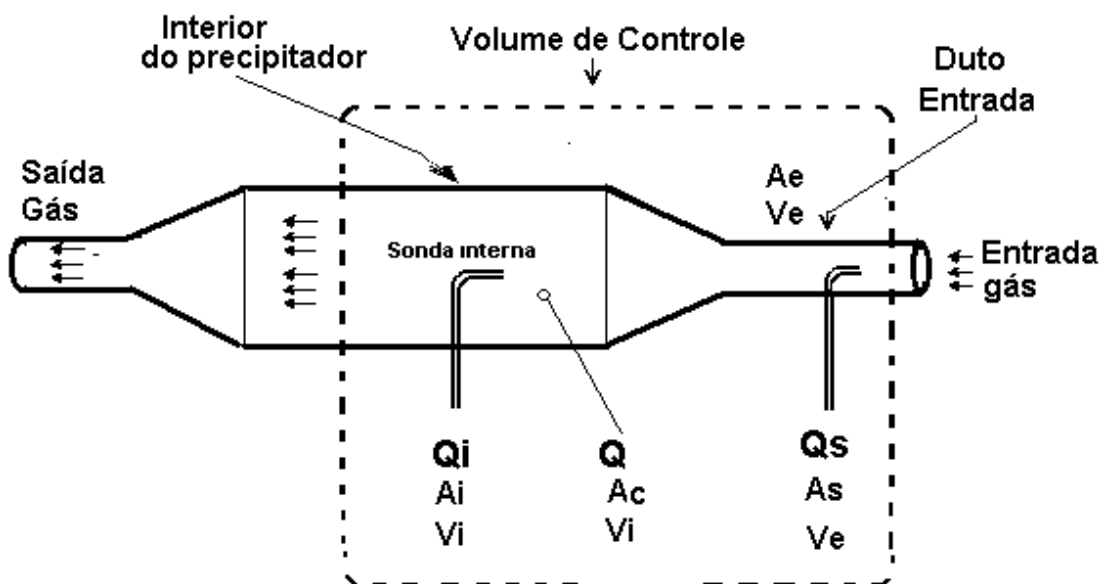


Figura 3.9 Esquema do volume de controle no precipitador para as medidas isocinéticas.

Definida a Equação 3.1 e fixando-se as velocidades internas de operação do precipitador em 0,6, 1,0 e 1,4 m/s, a sequência para o cálculo foi:

- Definida velocidade de operação no interior do precipitador V_i , e sabendo-se a área do mesmo, A_c , determinou-se a vazão de operação Q , e como esta é a mesma em todo o precipitador, e sabendo a área do duto de entrada A_e , determinava-se a velocidade do gás no duto de entrada V_e .

- Uma vez determinada a velocidade de entrada do gás e conhecida a área da sonda de amostragem de entrada, A_s , determinou-se a vazão da amostragem necessária para que a medida experimental na entrada, Q_e , fosse isocinética;

- Um procedimento análogo ao anterior foi feito para calcular a vazão de amostragem isocinética no interior do precipitador, Q_i , uma vez que se conhece a área do sonda interna, A_i , e a velocidade no duto de coleta V_i ;

- Posteriormente, fez-se uma correção nos cálculos da vazão de operação com a finalidade de considerar a expansão do gás devido à temperatura de operação, pois os medidores, tanto de velocidade como os de vazão, estão calibrados para 25° C e 1 atm.

A equação de correção foi a seguinte:

$$Q_{\text{real}} = Q_{\text{teor}} \frac{T^{\circ}_{\text{real}} P_{\text{teor}}}{T^{\circ}_{\text{teor}} P_{\text{real}}} \quad (3.2)$$

sendo

Q_{real} = vazão de operação nas condições de trabalho;

P_{real} = pressão atmosférica nas condições de trabalho;

T°_{real} = temperatura da corrente de gás nas condições de trabalho;

Q_{teor} = vazão de operação calculada para operar;

P_{teor} = pressão de calibração do medidor;

T°_{teor} = temperatura da corrente de gás calibrada no medidor.

3.3.4- Metodologia de amostragem

As variáveis de operação foram: intensidade de campo elétrico, com valores de 2,5, 3,0, 4,0 e 5,0 kV/cm, e velocidade de escoamento do gás no interior do duto de coleta, cujos valores foram 0,6, 1,0 e 1,4 m/s.

O alimentador de material particulado foi mantido fixo, utilizando as mesmas rotações, assim como o sulco de alimentação nos diversos ensaios.

Para evitar a aglomeração da rocha fosfática no alimentador e o rompimento elétrico do gás, operou-se sempre com valores de umidade do ar menores que 60%. Além do que, Tardos et al. (1990) mencionam que o carregamento das partículas é quase nulo com umidade relativa do ar superior a 70%.

Definidas as variáveis de operação, campo elétrico e velocidade do gás, iniciava-se a corrida experimental medindo-se a concentração do material particulado na entrada do precipitador, com a sonda de entrada. O material particulado era filtrado isocineticamente durante cinco minutos. Após o ensaio, este era pesado em uma balança analítica. A tabela 3.3 mostra as concentrações de entrada para cada condição de velocidade de escoamento.

Tabela 3.3 Valores da concentração de entrada

Velocidade (m/s)	Concentração (g/m ³)
0.6	1,04
1.0	0,62
1.4	0,44

As medidas de concentração no interior do precipitador foram realizadas com as sondas de vidro, sendo que cada amostragem isocinética tinha um tempo de coleta de quinze minutos, após isto, cada amostra era pesada.

Definidos os vinte e cinco pontos de medição no interior do equipamento, operou-se o precipitador inicialmente com a velocidade menor e variou-se o campo em quatro valores de 2,5 kV/cm até 5,0 kV/cm, assim tinham-se cem leituras para cada velocidade de operação e como a mesma foi avaliada com três valores diferentes, o total de leituras foi de trezentos pontos.

Para evitar o efeito de variações nas condições ambientais foram realizadas duas medidas simultâneas de concentração no interior do precipitador. Para os diferentes ensaios foram feitas replicas em que as tendências foram mantidas e para resultados pontuais discordantes, foi feita uma terceira medição daquele ponto, ficando como definitiva as medidas mais próximas em valor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Os resultados e as discussões apresentados a seguir foram mostrados na forma de gráficos para cada uma das velocidades e campos elétricos utilizados na operação.

4.1 Medições das velocidades internas

Previamente, comprovou-se experimentalmente a estabilidade das velocidades internas quando operado sem material particulado, para 1,4 m/s no duto do precipitador. Foram feitas três medidas longitudinais movimentando lateralmente a sonda interna em cinco posições como mostrado a Figura 4.1

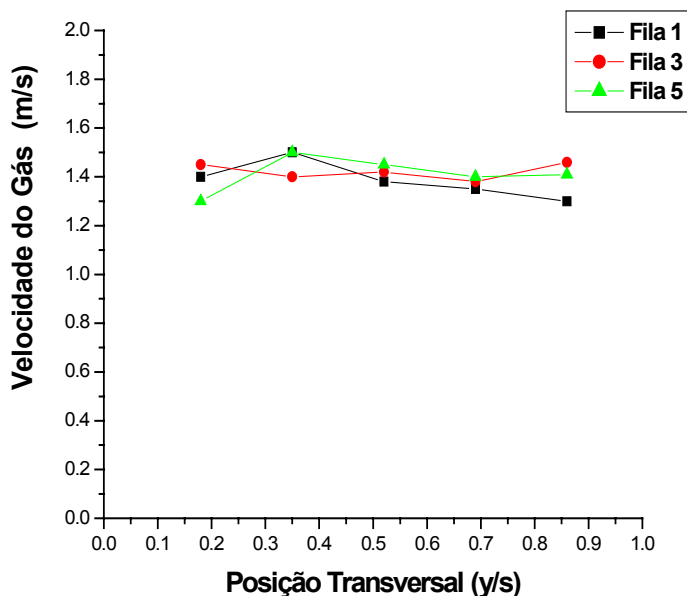


Figura 4.1 Medidas isocinéticas no interior do precipitador eletrostático para $V_0=1,4$ m/s.

A partir da Figura 4.1, observa-se medidas de velocidade em diferentes pontos do duto do precipitador, velocidades para um referencial de operação de 1,4 m/s. As três curvas mantiveram-se em uma faixa oscilatória de 0,1 m/s, podendo-se adotar um perfil constante em toda a seção. Para as demais velocidades de 1,0 m/s e 0,6 m/s, não foram realizadas por problemas de limitação na leitura do instrumento de medida. Admitiu-se perfil constante nas três velocidades. Os numero de Reynolds do duto

para as velocidades de 1,4, 1,0 e 0,6 m/s foram de 9.000, 6.000 e 4.000 respectivamente.

4.2 Concentrações no precipitador sem tensão aplicada.

As Figuras 4.2 a 4.4 mostram os perfis transversais de concentração das partículas no interior do duto nas velocidades de 0,6, 1,0 e 1,4 m/s, no caso em que nenhuma tensão foi aplicada aos eletrodos de descarga. Verifica-se que, em todos os casos, as concentrações medidas são muito próximas as de entrada. Portanto, os decréscimos de concentração medidas após a aplicação de tensão, que serão apresentados nos testes subseqüentes, são devido à ação coletora do campo elétrico.

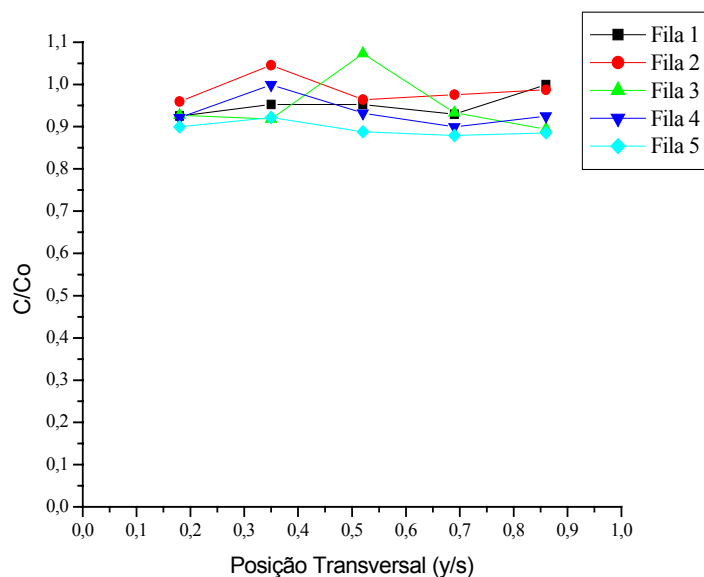


Figura 4.2 Medidas do perfil de concentração no interior do precipitador eletrostático sem tensão aplicada para $V_0=0,6$ m/s.

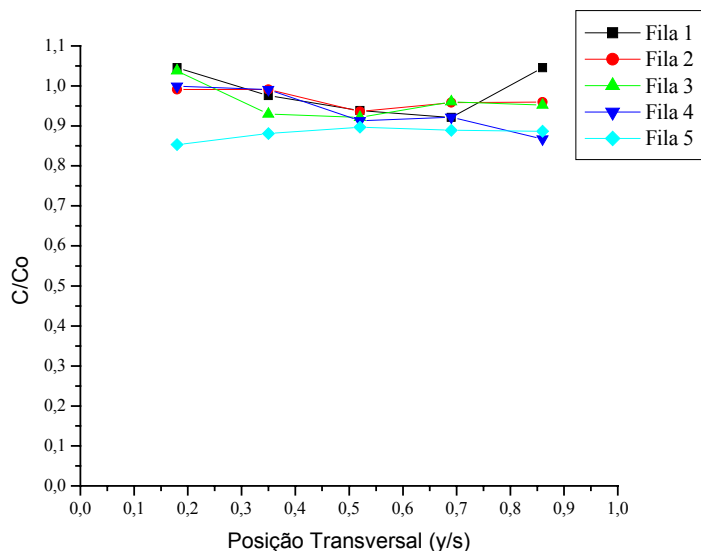


Figura 4.3 Medidas do perfil de concentração no interior do precipitador eletrostático sem tensão aplicada para $V_0=1,0$ m/s.

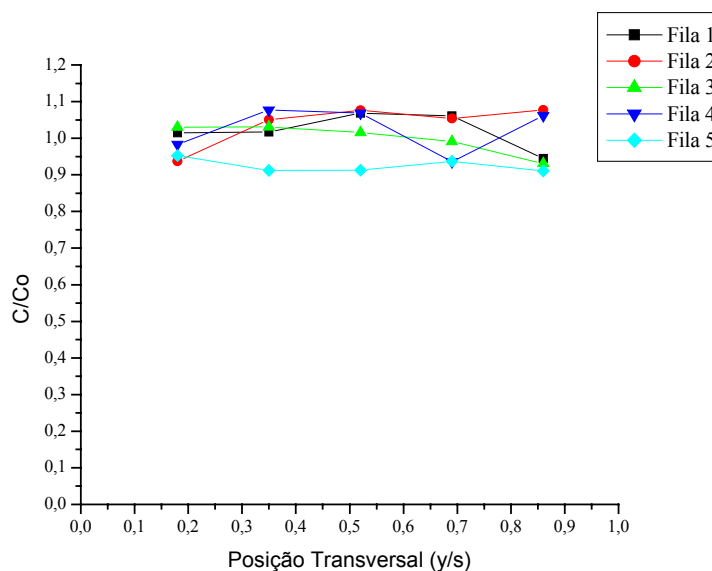


Figura 4.4 Medidas do perfil de concentração no interior do precipitador eletrostático sem tensão aplicada para $V_0=1,4$ m/s.

4.3 Variação da concentração longitudinal

A variação de concentração longitudinal no precipitador para a velocidade do gás de 1,0 m/s, quando o campo elétrico assume os valores de 2,5, 3,0, 4,0 e 5,0 kV/cm, estão apresentados nas figuras a seguir.

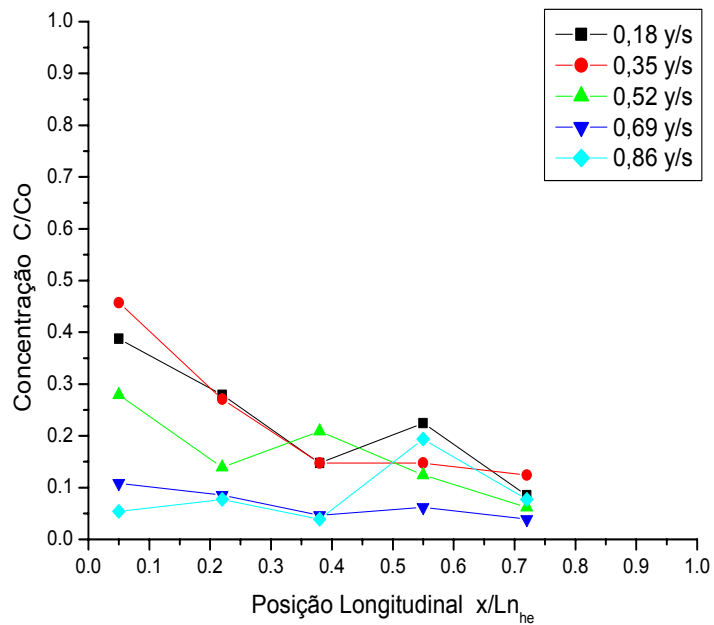


Figura 4.5 Variação de concentração ao longo do duto para $V_0=1,0$ m/s e $E=2,5$ kV/cm.

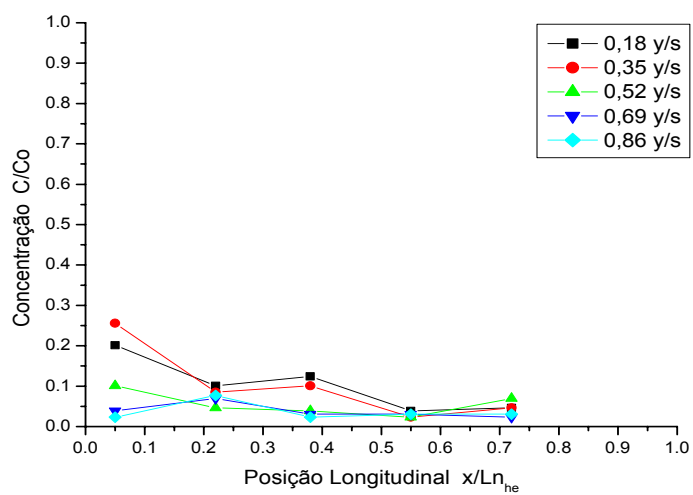


Figura 4.6 Variação de concentração ao longo do duto para $V_0=1,0$ m/s e $E=3,0$ kV/cm.

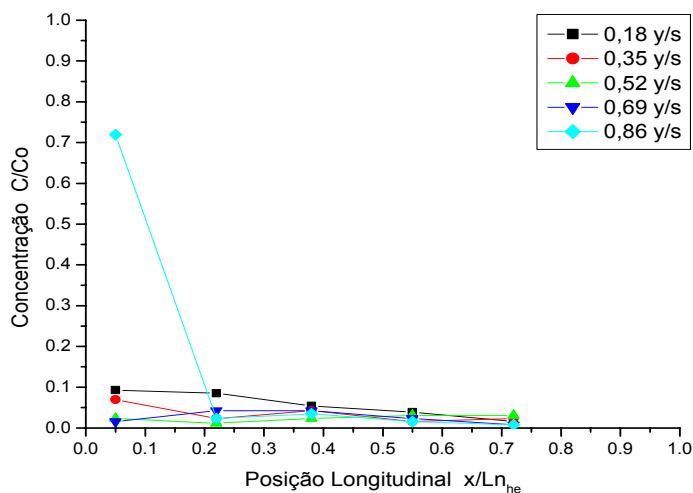


Figura 4.7 Variação de concentração ao longo do duto para $V_o=1,0$ m/s e $E=4,0$ kV/cm.

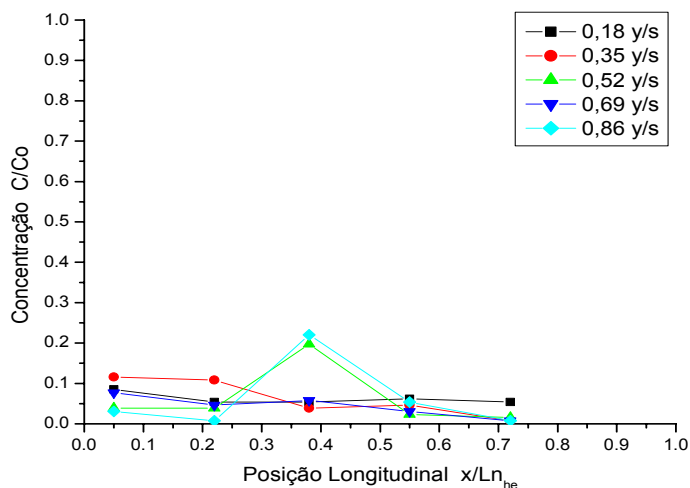


Figura 4.8 Variação de concentração ao longo do duto para $V_o=1,0$ m/s e $E=5,0$ kV/cm.

A partir desses resultados, pode-se observar que a concentração do material particulado na corrente diminui longitudinalmente a medida que se avança pelo duto, sendo este decréscimo mais acentuado nas primeiras duas Filas. Após isto, a tendência à diminuição se mantém, porém com menor intensidade. Quando se compara esta tendência para as diferentes tensões aplicadas, observa-se que, para os maiores campos, as diferenças de concentração ao longo do duto são menores. Nas Figuras 4.6 a 4.8, observa-se que, com a exceção de um ponto na Figura 4.7 e dois pontos na Figura 4.8, a concentração tende a ser constante com a posição longitudinal.

4.4 Variação da concentração com a velocidade do gás

As Figuras 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 apresentadas a seguir, mostram a variação de concentração da corrente gasosa longitudinal no duto do precipitador com três diferentes velocidades. Cada uma das figuras mostra as cinco posições transversais. As variações de concentração são comparadas para dois campos, 3,0 e 4,0 kV/cm.

A seguir são mostradas as variações longitudinais da concentração com a tensão de 3,0 kV/cm, desde a posição transversal zero, que é mais perto do eletrodo de descarga, até a posição quatro, que é mais próxima da placa coletora.

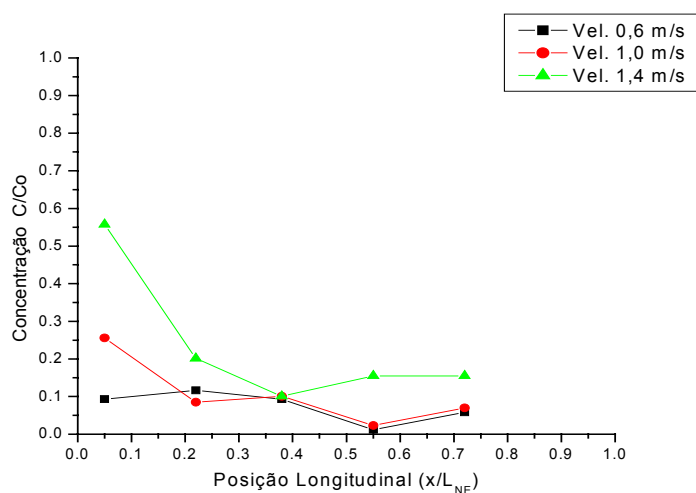


Figura 4.9 Variação de concentração em função da velocidade do gás para $E=3,0$ kV/cm e Posição axial 0.

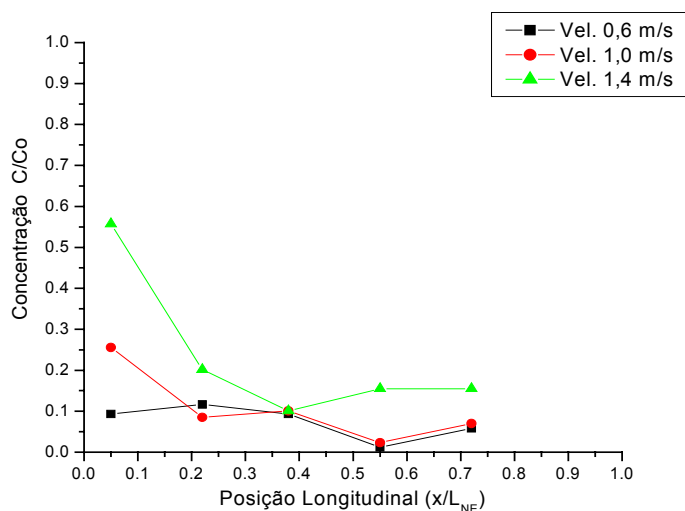


Figura 4.10 Variação de concentração em função da velocidade do gás para $E=3,0$ kV/cm e Posição axial 1.

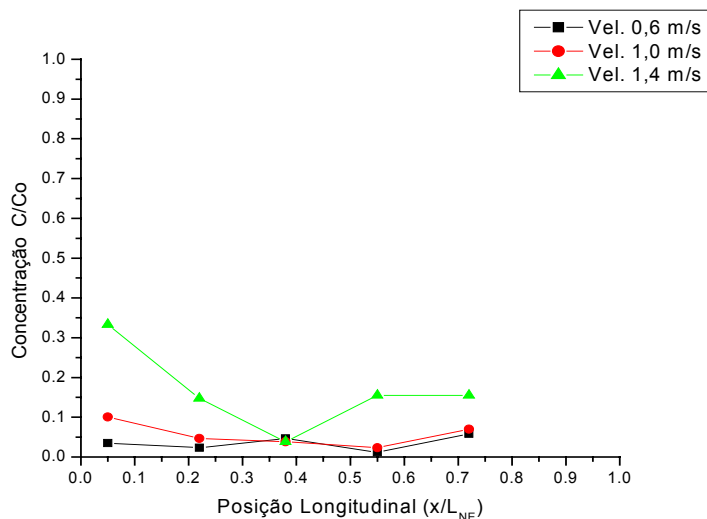


Figura 4.11 Variação de concentração em função da velocidade do gás para $E=3,0$ kV/cm e Posição axial 2.

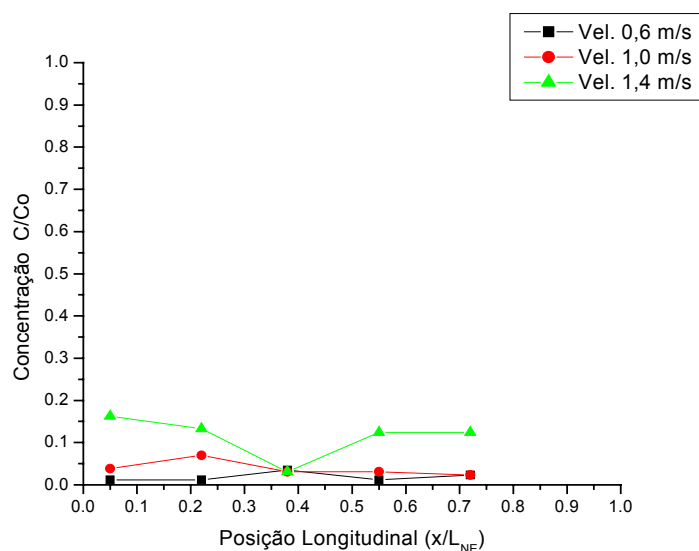


Figura 4.12 Variação de concentração em função da velocidade do gás para $E=3,0$ kV/cm e Posição axial 3.

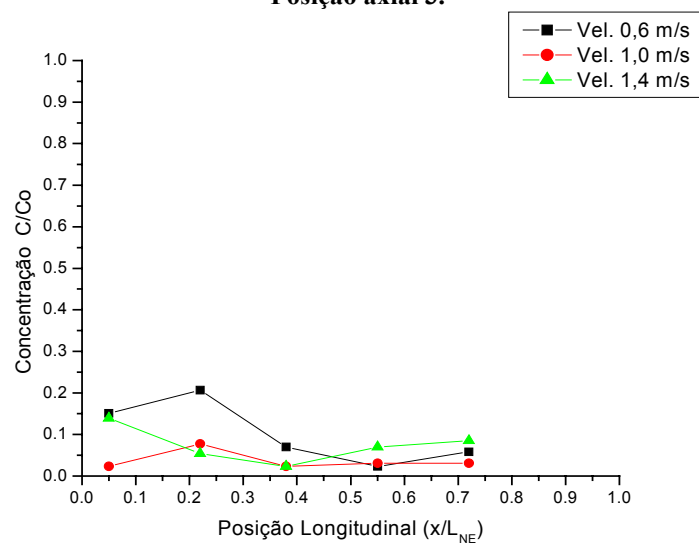


Figura 4.13 Variação de concentração em função da velocidade do gás para $E=3,0$ kV/cm e Posição axial 4.

Observa-se a partir das Figuras 4.9 a 4.13 que os valores de concentração próximos dos eletrodos de descarga decrescem à medida (vide principalmente Figuras 4.9 a 4.11) que o escoamento avança pelo duto do precipitador. Isto não é tão notório nas posições próximas das paredes (Figura 4.12 e 4.13)

Quando comparadas às curvas, observa-se ainda, que na maior velocidade (1,4 m/s) a diminuição entre as primeiras filas é mais intensa os perfis são praticamente constantes. Esta tendência é menos visível nas outras duas curvas, devido aos menores valores de concentração.

Uma análise similar foi feita para os experimentos realizados a 4,0 kV/cm. As Figuras 4,14 a 4,18, apresentam os resultados obtidos.

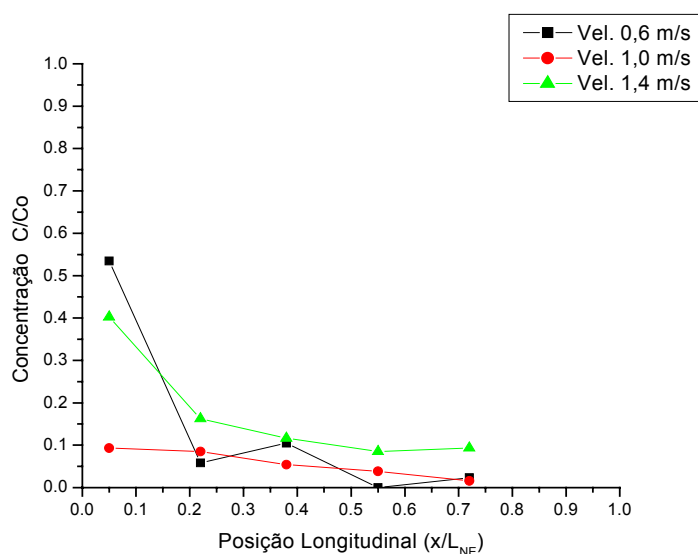


Figura 4.14 Variação de concentração em função da velocidade do gás para $E=4,0$ kV/cm e Posição axial 0.

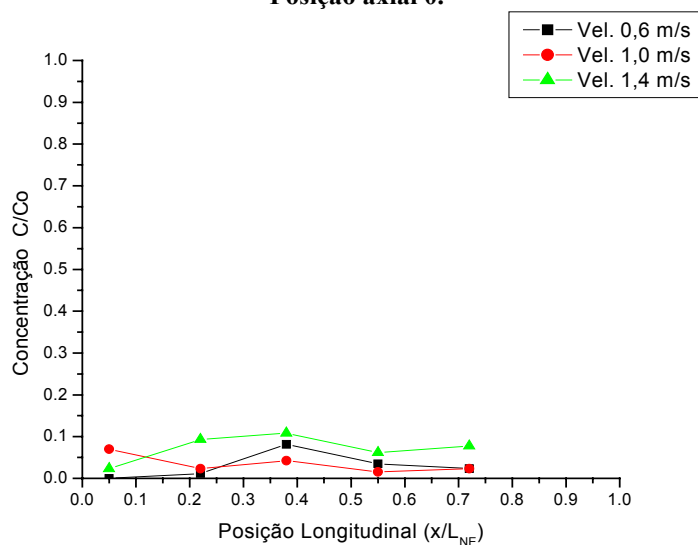


Figura 4.15 Variação de concentração em função da velocidade do gás para $E=4,0$ kV/cm e Posição axial 1.

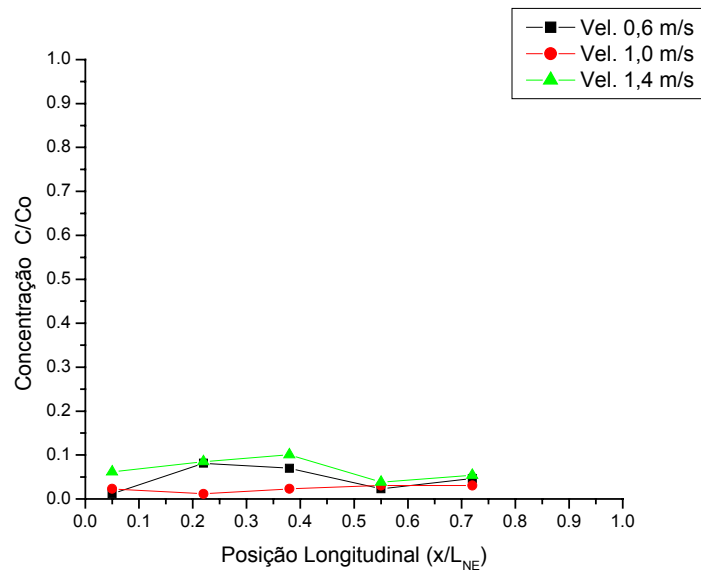


Figura 4.16 Variação de concentração em função da velocidade do gás para $E=4,0$ kV/cm e Posição axial 2.

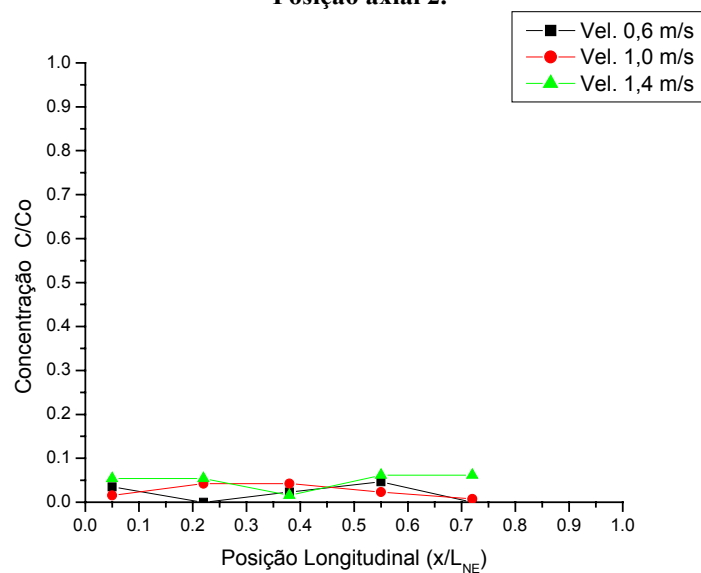


Figura 4.17 Variação de concentração em função da velocidade do gás para $E=4,0$ kV/cm e Posição axial 3.

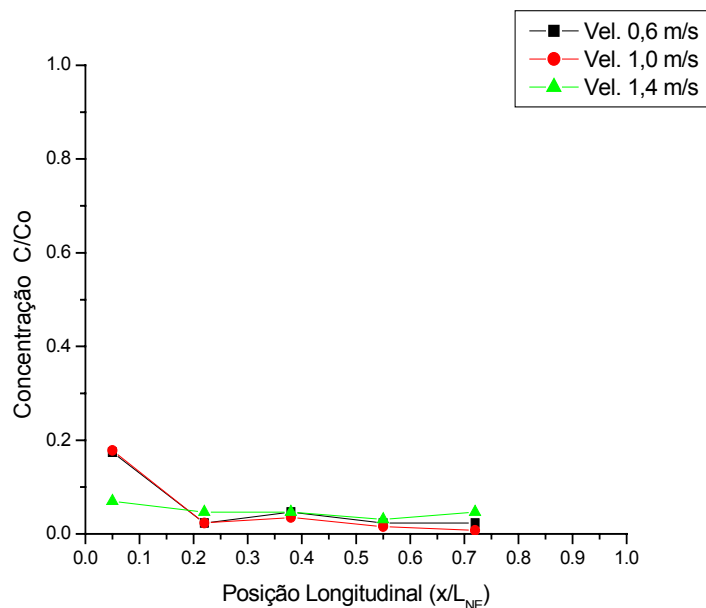


Figura 4.18 Variação de concentração em função da velocidade do gás para $E=4,0$ kV/cm e Posição axial 4.

A Figura 4.14 corresponde à posição mais próxima do eletrodo de descarga e mostra uma tendência similar ao item descrito anteriormente, no qual a concentração no centro do duto e no início da região de coleta diminui notavelmente entre as Filas um e dois, após as quais a diminuição da concentração é menor.

As posições transversais intermediárias mostradas nas Figuras 4.15, 4.16, e 4.17 apresentam valores próximos, porém a curva de maior velocidade apresenta os maiores valores de concentração e sua diminuição ao longo de duto é mais suave.

Quando se compara a concentração no interior do precipitador para cada uma das tensões mostradas, observamos que esta variação longitudinal é mais notória no menor campo mostrado. Isto porque as forças elétricas são menores, tendo uma diminuição no efeito difusivo da partícula no escoamento, portanto, uma menor incidência na somatória de forças atuantes para o transporte da partícula no interior do precipitador.

No campo de $4,0$ kV/cm, a diminuição de concentração é facilmente observada somente na posição zero, correspondente à região central do duto. Nas outras posições há uma diminuição menos acentuada.

As curvas de velocidade não apresentam grandes variações entre si, fato que pode ser explicado pela maior relevância das forças elétricas do que a atuação da velocidade do gás ou da turbulência sobre as partículas.

4.5 Perfil de concentração

As Figuras 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22 apresentam os diferentes perfis transversais de concentrações transversais medidos entre as placas do precipitador eletrostático quando submetido à velocidade do gás de 0,6 m/s e valores de campo de 2,5, 3,0, 4,0 e 5,0 kV/cm.

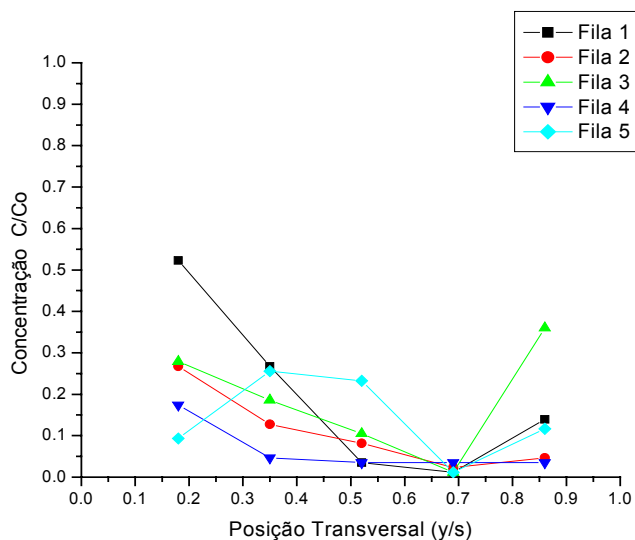


Figura 4.19 Perfil de concentração experimental para $V_0=0,6$ m/s e $E=2,5$ kV/cm.

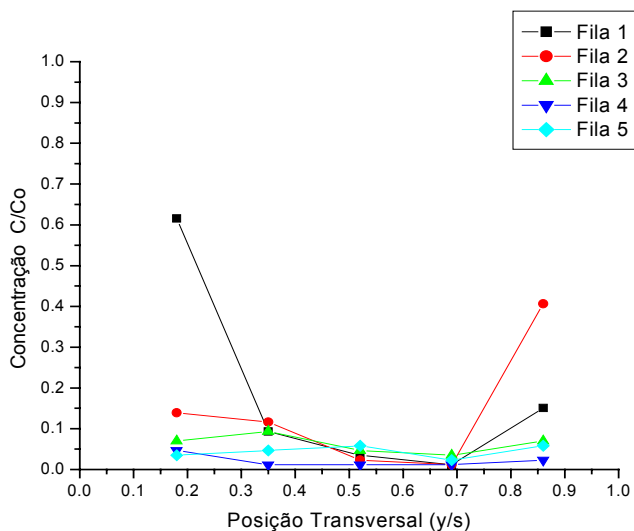


Figura 4.20 Perfil de concentração experimental para $V_0=0,6$ m/s e $E=3,0$ kV/cm.

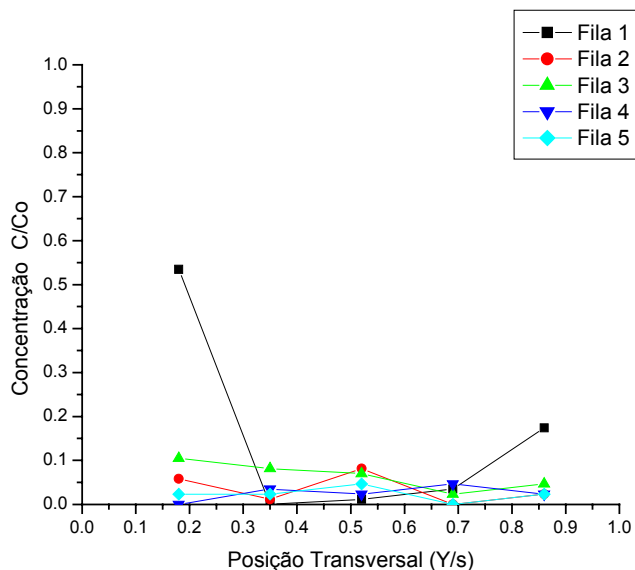


Figura 4.21 Perfil de concentração experimental para $V_0=0,6$ m/s e $E=4,0$ kV/cm.

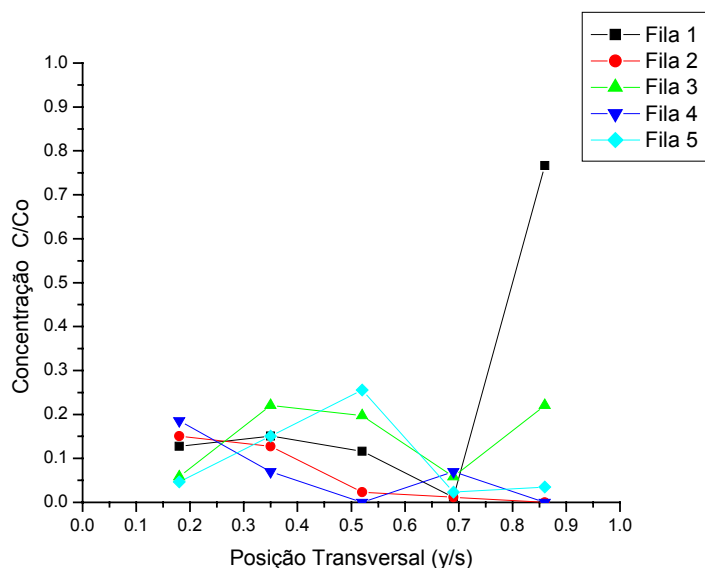


Figura 4.22 Perfil de concentração experimental para $V_0=0,6$ m/s e $E=5,0$ kV/cm.

Analisando-se essas figuras, é possível observar uma tendência de maior concentração no centro do precipitador do que nas paredes. Este valor diminui transversalmente com maior intensidade entre a primeira e a segunda posição. Na Figura 4.19, verifica-se este comportamento claramente até a Fila quatro, sendo que na Fila cinco os valores são oscilantes, e em alguns casos há um aumento da concentração.

Na Figura 4.22, para o campo de 5,0 kV/cm, observa-se uma oscilação nos valores de concentração medidos. Isto se explica porque nesta faixa de operação da tensão, observou-se com maior frequência os efeitos de centelhas no precipitador causando a ressuspensão do material já coletado.

Analisando estes resultados, pode-se observar que em vários testes, na região próxima à parede, há um aumento da concentração. Este fato pode ser explicado pela diminuição da velocidade do gás junto à placa do equipamento, pois o escoamento era em regime de transição (número de Reynolds na faixa de 4.000). Estas diferentes velocidades podem ocasionar erros de amostragem, como sugerido por Hinds (1999), pois as medidas de coleta nesta região provavelmente não foram isocinéticas.

A seguir nas Figuras 4.23 a 4.26, apresentam-se os quatro perfis de concentração para a velocidade de escoamento do gás de 1,0 m/s, variando a intensidade de campo elétrico de 2,5 kV/cm até 5,0 kV/cm.

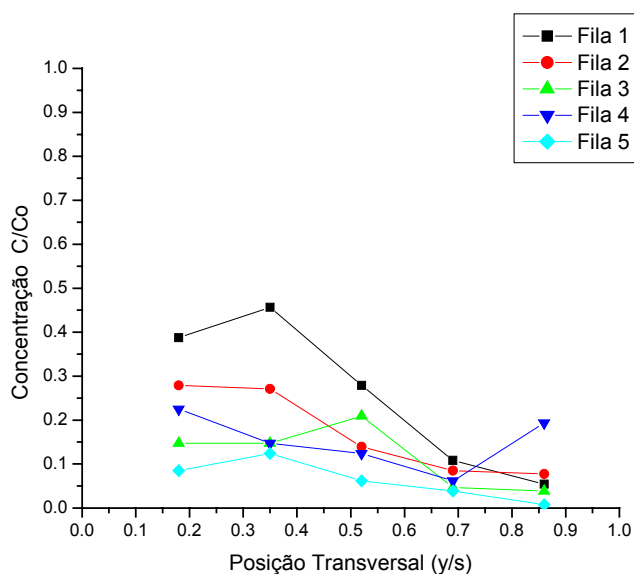


Figura 4.23 Perfil de concentração experimental para $V_0=1,0$ m/s e $V=2,5$ kV/cm.

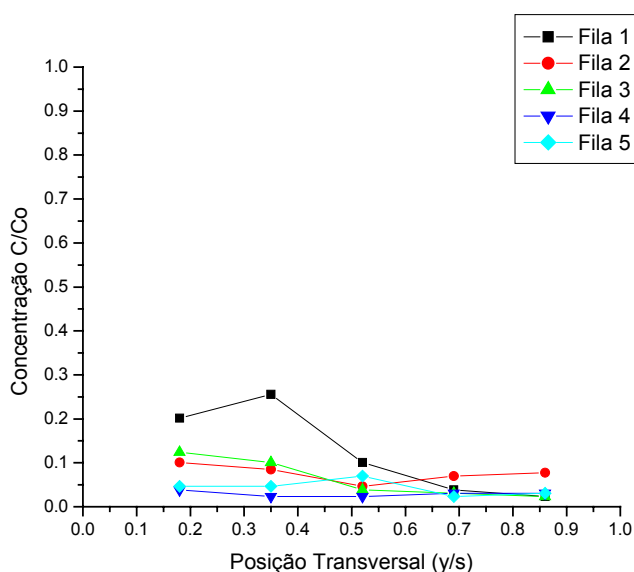


Figura 4.24 Perfil de concentração experimental para $V_0=1,0$ m/s e $V=3,0$ kV/cm.

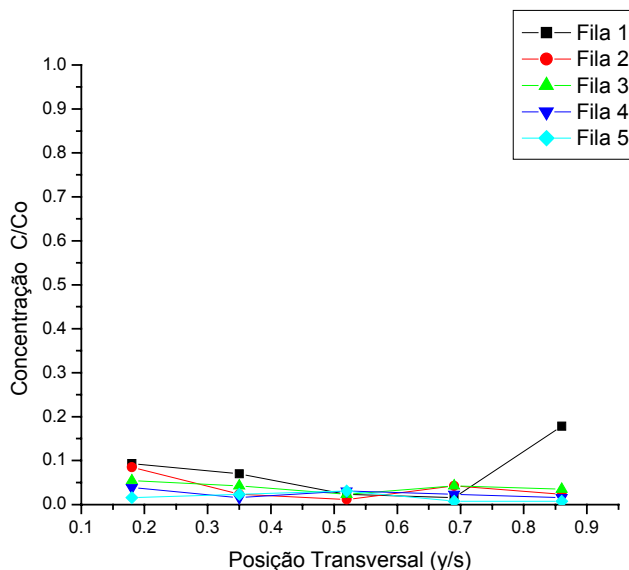


Figura 4.25 Perfil de concentração experimental para $V_0=1,0$ m/s e $V=4,0$ kV/cm.

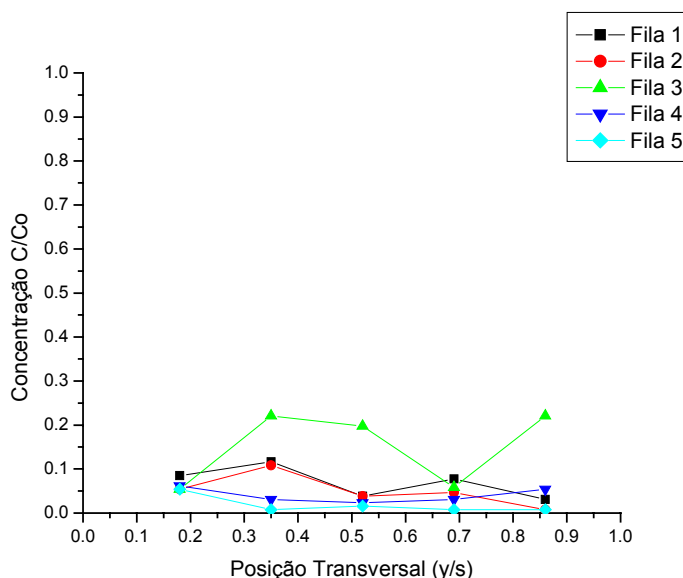


Figura 4.26 Perfil de concentração experimental para $V_0=1,0$ m/s e $V=5,0$ kV/cm.

Na Figura 4.23, tem-se uma concentração maior no centro do que nas paredes. Ao aumentar os valores do campo, nota-se que esta diferença não é tão visível, sendo que para os maiores valores de campos a concentração transversal tende a permanecer constante. Como consequência, a variação entre os valores das curvas correspondentes a cada Filas não é tão notória.

Na Figura 4.26, para um valor de campo de 5,0 kV/cm há um comportamento oscilatório da concentração, explicado pelos fenômenos de arco observado.

Ao comparar estas figuras com as mostradas para velocidade de 0,6 m/s, não se observou um aumento da concentração na região perto das placas coletoras, explicado pelo aumento do regime turbulento, o número de Reynolds nesta velocidade era de 6.000.

Os valores de concentração para uma velocidade de operação de 1,4 m/s são mostrados nas Figuras 4.27 a 4.30 para as quatro tensões de campo elétrico de 2,5 a 5,0 kV/cm.

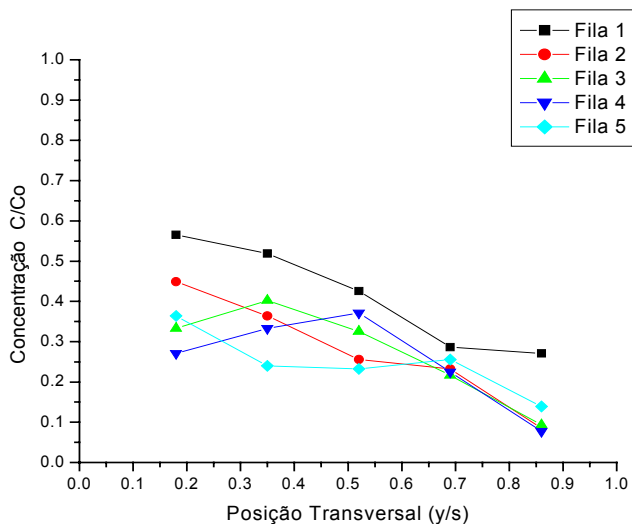


Figura 4.27 Perfil de concentração experimental para $V_0=1,4$ m/s e $V=2,5$ kV/cm.

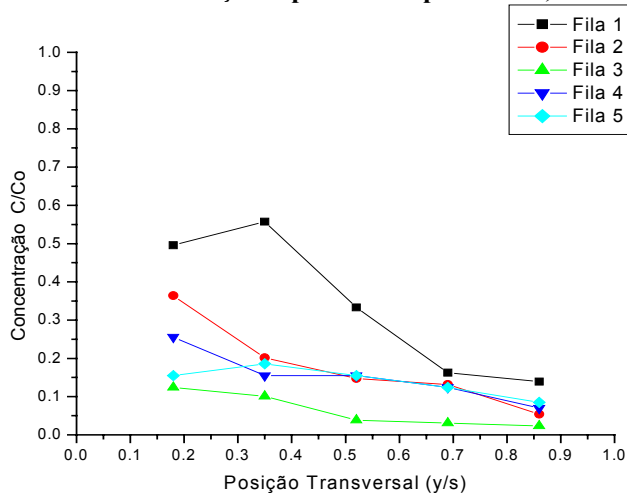


Figura 4.28 Perfil de concentração experimental para $V_0=1,4$ m/s e $V=3,0$ kV/cm.

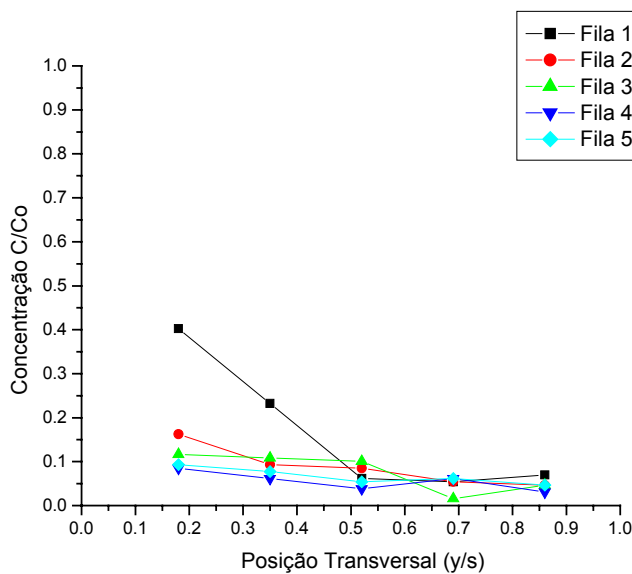


Figura 4.29 Perfil de concentração experimental para $V_0=1,4$ m/s e $V=4,0$ kV/cm.

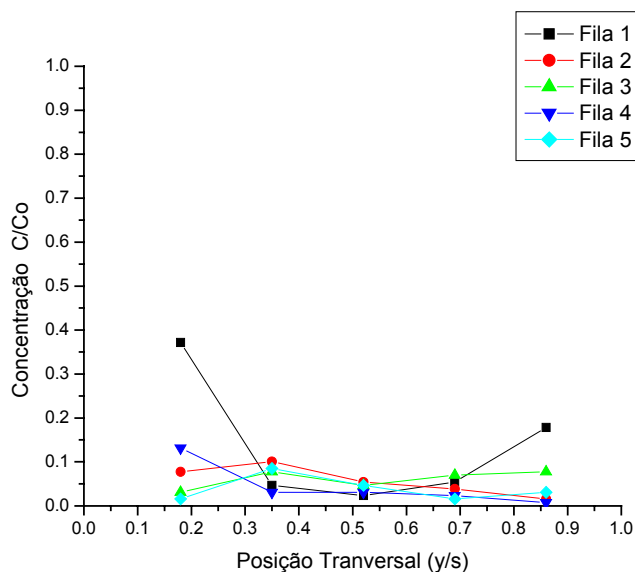


Figura 4.30: Perfil de concentração experimental para $V_0=1,4$ m/s e $V=5,0$ kV/cm.

Estes resultados mostram que a concentração continua sendo maior no centro do que nas paredes. Com o maior campo, a tendência de diminuir a concentração ainda é observada, porém, é mais visível nas tensões de 2,5 e 3,0 kV/cm.

Contudo, para esta condição é observada uma maior atuação do efeito inercial, uma vez que as concentrações foram maiores na entrada do precipitador em função de uma maior turbulência do escoamento. Também se pode observar a grande influência do campo elétrico sobre esses perfis a partir da segunda fila para testes com maiores campos, havendo uma compensação do efeito inercial pelo efeito elétrico.

4.6 Comparação dos perfis experimentais com relatos da literatura

Tendo em vista a escassa informação encontrada na literatura sobre estudos experimentais do comportamento do perfil de concentração no interior de um precipitador eletrostático, não houve possibilidade de comparar os resultados obtidos.

O comportamento de maior concentração observado no centro do duto é bastante surpreendente, uma vez não é previsto em nenhuma das correlações teóricas encontradas na literatura (vide seção 2.5). Esse efeito necessita ser melhor estudado e entre suas possíveis causas, pode-se citar efeito de turbulência adicional próximo ao eletrodo de descarga, causado tanto pelo efeito inercial (presença do eletrodo) como pelo efeito do campo elétrico aplicado e dos íons e partículas carregadas como

descrito por Leonard et al. (1981) que afetaria com mais intensidade as partículas de maior tamanho.

Entretanto, comparando-se os diferentes perfis de concentração teóricos com os obtidos experimentalmente, observa-se das figuras 4.19 a 4.30 que, de uma forma geral, aquele que descreve mais satisfatoriamente o perfil de concentração obtido é o modelo de Deutsch (perfil constante, mistura perfeita) ainda que este se ajuste melhor aos dados a partir da segunda Fila.

4.7- Eficiências no precipitador

As Figuras 4.32 a 4.35 foram construídas com base nos perfis de concentração, mencionados anteriormente. A metodologia de cálculo é descrita a seguir:

Tomando a Figura 4.31 como modelo para o cálculo da eficiência, tem-se:

- Considerando-se a forma adimensional apresentada, a área total da Figura 4.31 é unitária.

- A concentração total de partículas no gás é então calculada pela área abaixo da curva.

- Essa área é estimada pela soma dos retângulos A1 a A6, que interpolam as medidas pontuais de concentração.

- Para os retângulos A1 e A6, pela falta de dados no centro e na parede, aproximou-se os retângulos na forma apresentada como mostrada na Figura 4.31.

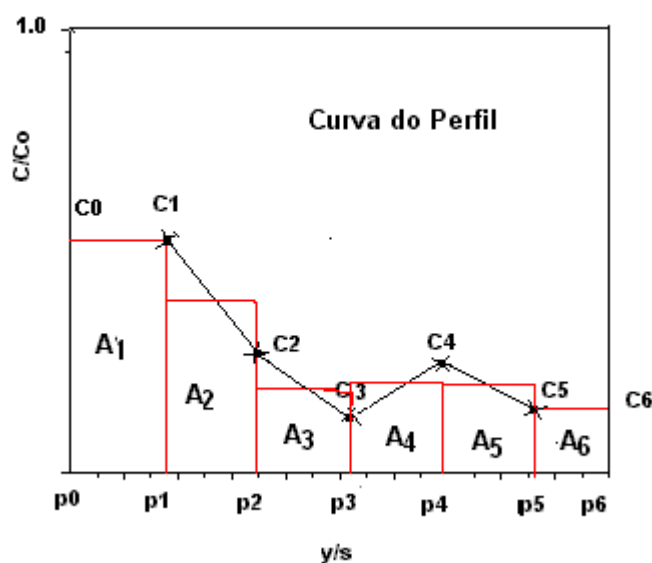


Figura 4.31 Esquema de cálculo da eficiência.

Portanto, considerando-se a definição de eficiência da equação 2.21 pode-se escrever:

$$\eta_{\text{Fila } j} = 1 - \left[\sum_{i=1}^6 (P_i - P_{i-1}) \left(\frac{C_i + C_{i-1}}{2} \right) \right] \quad 4.1$$

Da equação 4.1, obtêm-se as Figuras 4.32 a 4.35, onde a eficiência média é mostrada em função da posição longitudinal para as três velocidades estudadas. Cada figura corresponde a uma das tensões aplicadas:

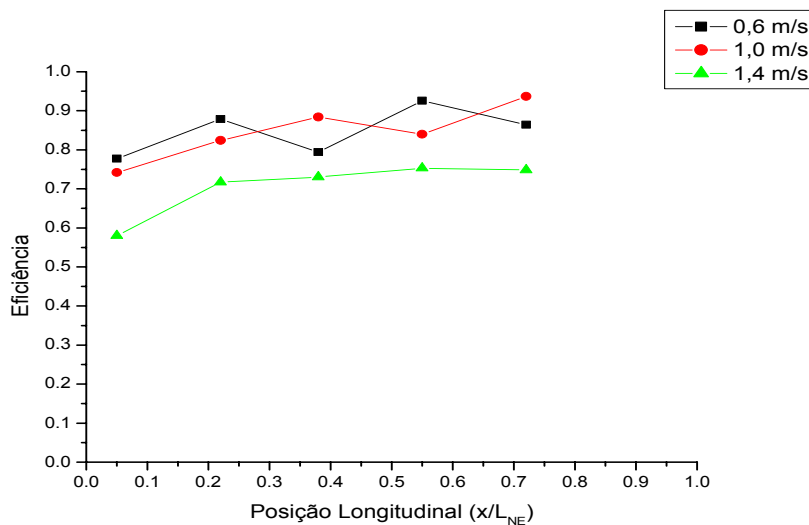


Figura 4.32 Eficiência ao longo do precipitador para V=2,5 kV/cm.

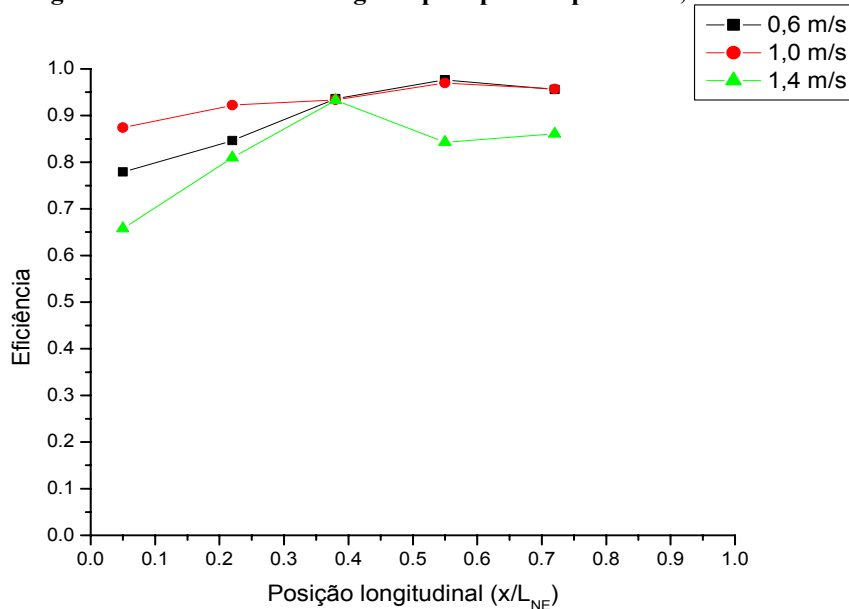


Figura 4.33 Eficiência ao longo do precipitador para V=3,0 kV/cm.

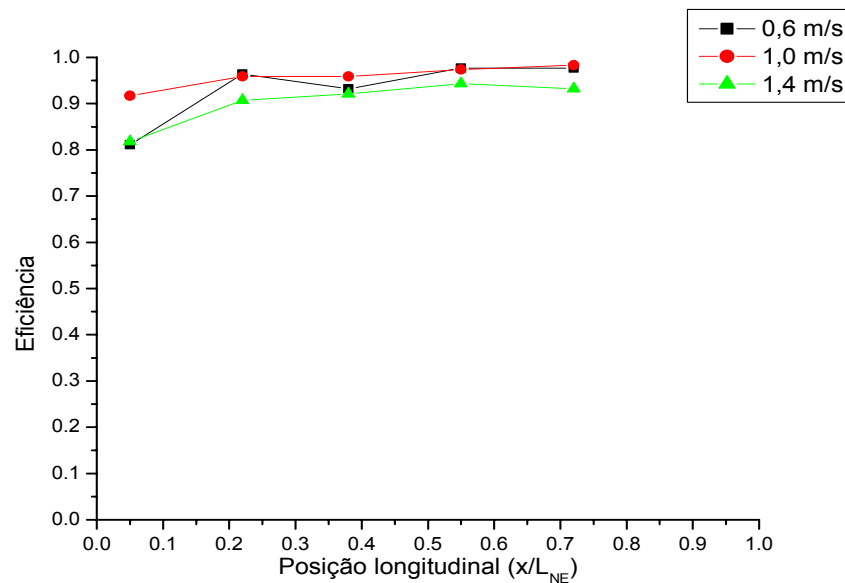


Figura 4.34 Eficiência ao longo do precipitador para $V=4,0$ kV/cm.

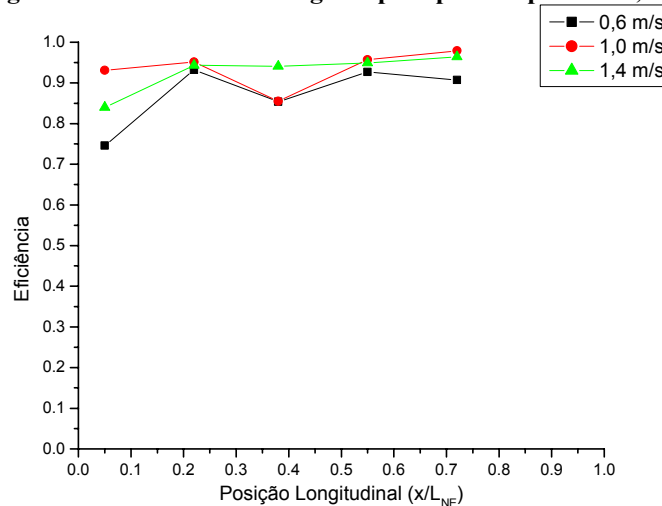


Figura 4.35 Eficiência ao longo do precipitador para $V=5,0$ kV/cm.

Na Figura 4.32, para $V=2,5$ kV/cm, observa-se que a eficiência do precipitador foi menor com a maior velocidade. Já nas outras duas velocidades, o comportamento da eficiência foi oscilante. Esta atingiu valores acima de noventa por cento, na posição longitudinal 0,55, correspondente a Fila quatro para a curva de menor velocidade.

As Figuras 4.33 e 4.34, para $V=3,0$ e $4,0$ kV/cm respectivamente, mostram que a eficiência ao longo do duto alcançou valores superiores a noventa por cento na posição 0,38 e 0,22, correspondentes as Filas três e dois, no campo de $4,0$ kV/cm.

A Figura 4.35 mostra a eficiência para a maior tensão de operação, $V=5,0$ kV/cm, onde se observa que nos valores 0,05 e 0,22 correspondentes às Filas 1 e 2, se está com uma eficiência acima de noventa por cento. No entanto, nesta tensão existe uma flutuação devido aos efeitos de arco no equipamento.

Da observação geral dessas curvas de eficiência, pode-se também ressaltar:

- A principal região de coleta é a região de entrada, nota-se também, que na maioria dos casos, a eficiência pouco se altera após o segundo eletrodo.

- As forças elétricas (proporcionais ao campo elétrico aplicado) mostraram-se mais influentes na eficiência de coleta, que as condições de escoamento (proporcionais à velocidade do gás), nas condições experimentais desse trabalho.

Finalmente, cabe ressaltar que os valores de eficiência aqui apresentados são aproximados, uma vez que a metodologia de cálculo utilizada em sua estimativa é limitada. Isso se reflete nos valores de eficiência obtidos (cerca de 90%), que são baixos quando comparados com o esperado de um precipitador nessas condições. No entanto, os dados são úteis em termos comparativos.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na avaliação experimental dos perfis de concentração no precipitador eletrostático tipo placa-fio permite concluir que:

- A concentração apresentou-se como sendo maior no centro do duto do precipitador, tendendo a diminuir no sentidos das placas coletoras.

- Existe uma diminuição da concentração ao longo do precipitador, isto ocorrendo com maior intensidade no centro do duto e nas primeiras duas Filas.

- Com o aumento da tensão aplicada, há uma diminuição da concentração de partículas ao longo do duto.

- Uma alta eficiência do precipitador é obtida logo na entrada do duto de coleta. Entre a primeira e segunda Fila a maior parte das partículas é coletada.

- Dos modelos teóricos propostos na literatura, o de Deutsch é aquele que melhor representa os dados experimentais, ainda que este se ajuste melhor aos dados a partir da segunda Fila.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

Como uma maneira de dar continuidade ao trabalho, sugere-se:

- Efetuar outros ensaios com o concentrado fosfático estudado e medir a distribuição granulométrica do material coletado nas diferentes posições de amostragem. Este estudo pode ser feito com outros materiais polidispersos uma vez que se tenha caracterizado seu comportamento no seu interior do equipamento.

- Realizar os mesmos ensaios de perfil de concentração usando-se outros materiais particulados tais como cimento, resíduos do processo de cítricos, materiais orgânicos.

- Dividir a placa coletora em áreas fixas, considerando a mesma quantidade de eletrodos, para assim medir a distribuição granulométrica do material depositado nos eletrodos.

- Estudar o fenômeno de maior concentração no centro do precipitador. Esta tendência ficaria um pouco mais definida medindo-se a distribuição granulométrica do material particulado coletado nas primeiras Filas como sugerido anteriormente.

- Melhorar as técnicas de medição de concentração no interior do precipitador a traves da implementação de medidas de velocidades do gás com instrumentos de leituras menores e maior tempo de amostragem no interior do precipitador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CASS, G.R.; HUGHES, L.S.; GONE, J.; AMES, M.; OLMES, I.(1998). Physical and chemical characterization of atmospheric ultrafine particle in the Los Angeles area. **Environmental Science & Technology**, v.32, n.9, p.1153-1161.

COOPERMAN, G. (1981). New current-voltage relation for duct precipitators valid for low and high current densities. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v.IA-17 n.5 p.496-501, September /October

EPA (1999). Controles de material particulado. Environmental Protection Agency ,USA **Precipitadores electrostaticos** Cap.3 sección 6.

GALLIMBERT, I. (1998). Recent advancements in the physical modelling of electrostatic precipitator. **Journal of Electrostatics** , v.43, p.219-247.

HINDS, W.C. Aerosol Technology Properties, Behaviour, and Measurement Airborne Particles Ed. John Wiley & Sons, 1999.

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

KIHM, S.H.; MITCHNER, M.; SELF, S.A. (1985). Comparison of wire-plate and plate-plate electrostatic precipitators in laminar flow, **Journal of Electrostatics**, v.17, p.193-208.

KIM , S.H.; LEE, K.W. (1999). Experimental study of electrostatic precipitator performance and comparison with existing theoretical prediction mode. **Journal of Electrostatic**, v.50, p.177-190

LEONARD, G.;MITCHNER, M.; SELF, S.A.(1980). An experimental study of the electrohydrodynamics flow in electrostatic precipitators. **Journal Fluid mechanics** v.127, p.123-140

LINDLEY, K.S.; ROWSON, N.A. (1997). Electrostatic separation – a review. **Proceedings of Innovation in Physical Separation Technologies**, IMM, pp 263-270.

NÓBREGA S.W. (2002). Estudo do desempenho de um precipitador eletrostático do tipo placa fio na remoção de um material particulado polidisperso. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal de São Carlos.

OGLESBY, S. NICHOLS, G.B. (1978). **Electrostatic Precipitation, Pollution engineering and technology**. Cap. 5 p.81-100. Marcel Decker, New York, NY.

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

RIEHLE, C. LÖFFLER, F (1993). Grade efficiency and Eddy diffusivity models, **Journal of Electrostatic**, v.34, p.401-413

ROBINSON, M. (1971). **Electrostatic precipitation**, Ed E Strauß, **Air Pollution Control**, Cap 1, John Wiley, New York

TARDOS, G.I.; PFEFFER; SHAO, Z.M. (1990). The influence of Dust loading on the performance of electrostatically enhanced fibrous filter. IN: 21 ST MEETING OF THE FINE PARTICLES SOCIETY, San Diego.

ZHIBIN, Z.; GUOQUAN, Z. (1992). New model of electrostatic precipitation efficiency accounting for turbulent mixing. **Journal of Aerosol Science**, v.23, p.115-121.

ZHIBIN, Z.; GUOQUAN, Z. (1994). Investigations of the collection efficiency of an electrostatic precipitation with turbulent effects. **Aerosol Science and Technology**, v.20, p.169-176

APÊNDICE A

Tabela A.1 – Dados experimentais para uma velocidade no interior de precipitador:
 $V=0,6$ m/s e Tensão de corrente $E = 2,5$ kV/cm

Posição	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4	Fila 5
0,180	0,523	0,267	0,279	0,174	0,093
0,350	0,267	0,128	0,186	0,047	0,256
0,520	0,035	0,081	0,105	0,035	0,232
0,690	0,012	0,023	0,012	0,035	0,012
0,860	0,139	0,047	0,360	0,035	0,116

Tabela A.2 – Dados experimentais para uma velocidade no interior de precipitador:
 $V=0,6$ m/s e Tensão de corrente $E = 3,0$ kV/cm

Posição	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4	Fila 5
0,180	0,616	0,139	0,070	0,047	0,035
0,350	0,093	0,116	0,093	0,012	0,047
0,520	0,035	0,023	0,047	0,012	0,058
0,690	0,012	0,012	0,035	0,012	0,023
0,860	0,151	0,407	0,070	0,023	0,058

Tabela A.3 – Dados experimentais para uma velocidade no interior de precipitador:
 $V=0,6$ m/s e Tensão de corrente $E = 4,0$ kV/cm

Posição	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4	Fila 5
0,180	0,534	0,058	0,105	0,000	0,023
0,350	0,000	0,012	0,081	0,035	0,023
0,520	0,012	0,081	0,070	0,023	0,047
0,690	0,035	0,000	0,023	0,047	0,000
0,860	0,174	0,023	0,047	0,023	0,023

Tabela A.4 – Dados experimentais para uma velocidade no interior de precipitador:
 $V=0,6$ m/s e Tensão de corrente $E = 5,0$ kV/cm

Posição	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4	Fila 5
0,180	0,128	0,151	0,058	0,186	0,047
0,350	0,151	0,128	0,221	0,697	0,151
0,520	0,116	0,023	0,198	0,000	0,256
0,690	0,012	0,012	0,058	0,070	0,023
0,860	0,767	0,000	0,221	0,000	0,035

Tabela A.5 – Dados experimentais para uma velocidade no interior de precipitador :
 $V=1,0$ m/s e Tensão de corrente $E = 2,5$ kV/cm

Posição	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4	Fila 5
0,180	0,387	0,279	0,147	0,225	0,085
0,350	0,457	0,271	0,174	0,147	0,124
0,520	0,279	0,139	0,209	0,124	0,062
0,690	0,108	0,085	0,047	0,062	0,039
0,860	0,054	0,077	0,039	0,194	0,008

Tabela A.6 – Dados experimentais para uma velocidade no interior de precipitador :
 $V=1,0$ m/s e Tensão de corrente $E = 3,0$ kV/cm

Posição	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4	Fila 5
0,180	0,201	0,101	0,124	0,039	0,047
0,350	0,256	0,085	0,101	0,023	0,047
0,520	0,101	0,047	0,039	0,023	0,070
0,690	0,039	0,070	0,031	0,031	0,023
0,860	0,023	0,077	0,023	0,031	0,031

Tabela A.7 – Dados experimentais para uma velocidade no interior de precipitador :
 $V=1,0$ m/s e Tensão de corrente $E = 4,0$ kV/cm

Posição	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4	Fila 5
0,180	0,093	0,085	0,054	0,039	0,016
0,350	0,070	0,023	0,043	0,016	0,023
0,520	0,023	0,012	0,023	0,031	0,031
0,690	0,016	0,043	0,043	0,023	0,008
0,860	0,178	0,023	0,035	0,016	0,008

Tabela A.8 – Dados experimentais para uma velocidade no interior de precipitador :
 $V=1,0$ m/s e Tensão de corrente $E = 5,0$ kV/cm

Posição	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4	Fila 5
0,180	0,085	0,054	0,054	0,062	0,054
0,350	0,116	0,108	0,221	0,031	0,008
0,520	0,039	0,039	0,198	0,023	0,016
0,690	0,077	0,047	0,058	0,031	0,008
0,860	0,031	0,008	0,221	0,054	0,008

Tabela A.9 – Dados experimentais para uma velocidade no interior de precipitador :
 $V=1,4$ m/s e Tensão de corrente $E = 2,5$ kV/cm

Posição	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4	Fila 5
0,180	0,565	0,449	0,333	0,271	0,364
0,350	0,519	0,364	0,403	0,333	0,240
0,520	0,426	0,256	0,325	0,372	0,232
0,690	0,287	0,232	0,217	0,225	0,256
0,860	0,271	0,085	0,093	0,077	0,139

Tabela A.10 – Dados experimentais para uma velocidade no interior de precipitador
: $V=1,4$ m/s e Tensão de corrente $E = 3,0$ kV/cm

Posição	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4	Fila 5
0,180	0,496	0,364	0,124	0,256	0,155
0,350	0,558	0,201	0,101	0,155	0,186
0,520	0,333	0,147	0,039	0,155	0,155
0,690	0,163	0,132	0,031	0,124	0,124
0,860	0,139	0,054	0,023	0,070	0,085

Tabela A.11 – Dados experimentais para uma velocidade no interior de precipitador
: $V=1,4$ m/s e Tensão de corrente $E = 4,0$ kV/cm

Posição	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4	Fila 5
0,180	0,403	0,163	0,116	0,085	0,093
0,350	0,232	0,093	0,108	0,062	0,077
0,520	0,062	0,085	0,101	0,039	0,054
0,690	0,054	0,054	0,016	0,062	0,062
0,860	0,070	0,047	0,047	0,031	0,047

Tabela A.12 – Dados experimentais para uma velocidade no interior de precipitador
: $V=1,4$ m/s e Tensão de corrente $E = 5,0$ kV/cm

Posição	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4	Fila 5
0,180	0,372	0,077	0,031	0,132	0,016
0,350	0,047	0,101	0,077	0,031	0,085
0,520	0,023	0,054	0,047	0,031	0,047
0,690	0,054	0,039	0,070	0,023	0,016
0,860	0,178	0,016	0,077	0,008	0,031

APÊNDICE B

Tabela B.1 – Tabela de eficiência longitudinal para campo de 2,5 kV/cm

Eficiência Global Acumulada por Fila			
Intensidade de Campo 2,5 kV/cm			
Velocidades	0,6	1	1,4
Fila 1	0,777	0,742	0,580
Fila 2	0,879	0,824	0,717
Fila 3	0,794	0,884	0,73
Fila 4	0,926	0,84	0,753
Fila 5	0,864	0,937	0,748

Tabela B.2 – Tabela de eficiência longitudinal para campo de 3,0 kV/cm

Eficiência Global Acumulada por Fila			
Intensidade de Campo 3,0 kV/cm			
Velocidades	0,6	1	1,4
Fila 1	0,779	0,874	0,658
Fila 2	0,846	0,922	0,81
Fila 3	0,936	0,934	0,933
Fila 4	0,977	0,97	0,843
Fila 5	0,956	0,957	0,861

Tabela B.3 – Tabela de eficiência longitudinal para campo de 4,0 kV/cm

Eficiência Global Acumulada por Fila			
Intensidade de Campo 4,0 kV/cm			
Velocidades	0,6	1	1,4
Fila 1	0,811	0,917	0,818
Fila 2	0,964	0,959	0,907
Fila 3	0,932	0,959	0,921
Fila 4	0,977	0,974	0,943
Fila 5	0,977	0,983	0,932

Tabela B.4 – Tabela de eficiência longitudinal para campo de 5,0 kV/cm

Eficiência Global Acumulada por Fila			
Intensidade de Campo 5,0 kV/cm			
Velocidades	0,6	1	1,4
Fila 1	0,746	0,931	0,840
Fila 2	0,932	0,951	0,943
Fila 3	0,854	0,855	0,941
Fila 4	0,927	0,957	0,949
Fila 5	0,907	0,979	0,964

APÊNDICE C

Tabela C.1 Tabela das corridas para $V_0 = 0,6$ m/s e $E = 2,5$ kV/cm.

1ª Amostragem					
Velocidade do gás no precipitador	0,6		m/s		
Campo elétrico	2,5		kV/cm		
Massa na entrada em 5 min	0,0340		g		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás	35		°C		
Umidade relativa do ar	62,8-58,6		%		
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0120	0,0084	0,0084	0,0039	0,0024
1	0,0069	0,0033	0,0060	0,0021	0,0066
2	0,0009	0,0009	0,0030	0,0018	0,0060
3	0,0003	0,0012	0,0000	0,0003	0,0003
4	0,0036	0,0021	0,0090	0,0003	0,0030

Tabela C.2 Tabela das replicas para $V_0 = 0,6$ m/s e $E = 2,5$ kV/cm.

Replica					
Velocidade do gás no precipitador	0,6		m/s		
Campo elétrico	2,5		kV/cm		
Massa na entrada em 5 min	0,0342		g		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás	35		°C		
Umidade relativa do ar	62,8-58,6		%		
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0150	0,0054	0,0060	0,0051	0,0030
1	0,0069	0,0045	0,0039	0,0012	0,0051
2	0,0009	0,0021	0,0024	0,0000	0,0054
3	0,0003	0,0006	0,0006	0,0009	0,0003
4	0,0036	0,0003	0,0096	0,0006	0,0018

Tabela C.3 Tabela das corridas para $V_0 = 0,6$ m/s e $E = 3,0$ kV/cm.

1ª Amostragem					
Velocidade do gás no precipitador		0,6	m/s		
Campo elétrico		3,0	kV/cm		
Massa na entrada em 5 min		0,0348	gr		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás		35	°C		
Umidade relativa do ar		39,2	%		
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0159	0,0036	0,0018	0,0012	0,0009
1	0,0024	0,0030	0,0024	0,0003	0,0012
2	0,0009	0,0006	0,0012	0,0003	0,0015
3	0,0003	0,0003	0,0009	0,0003	0,0006
4	0,0039	0,0105	0,0018	0,0006	0,0015

Tabela C.4 Tabela das replicas para $V_0 = 0,6$ m/s e $E = 3,0$ kV/cm.

Replica					
Velocidade do gás no precipitador		0,6	m/s		
Campo elétrico		3,0	kV/cm		
Massa na entrada em 5 min		0,0378	g		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás		35	°C		
Umidade relativa do ar		39,2	%		
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0165	0,0033	0,0021	0,0015	0,0012
1	0,0018	0,0027	0,0027	0,0003	0,0009
2	0,0006	0,0006	0,0012	0,0003	0,0018
3	0,0003	0,0003	0,0006	0,0003	0,0006
4	0,0033	0,0090	0,0015	0,0009	0,0012

Tabela C.5 Tabela das corridas para $V_0=0,6$ m/s e $E=4,0$ kV/cm.

1ª Amostragem					
Velocidade do gás no precipitador		0,6	m/s		
Campo elétrico		4,0	kV/cm		
Massa na entrada em 5 min		0,0335	g		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás		39	°C		
Umidade relativa do ar		67.3	%		
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0138	0,0015	0,0027	0,0000	0,0006
1	0,0000	0,0003	0,0021	0,0009	0,0006
2	0,0003	0,0021	0,0018	0,0006	0,0012
3	0,0009	0,0000	0,0006	0,0012	0,0000
4	0,0045	0,0006	0,0012	0,0006	0,0006

Tabela C.6 Tabela das replicas para $V_0=0,6$ m/s e $E=4,0$ kV/cm.

Replica					
Velocidade do gás no precipitador		0,6	m/s		
Campo elétrico		4,0	kV/cm		
Massa na entrada em 5 min		0,0335	g		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás			°C		
Umidade relativa do ar			%		
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0123	0,0018	0,0030	0,0000	0,0009
1	0,0000	0,0003	0,0018	0,0009	0,0009
2	0,0009	0,0024	0,0021	0,0006	0,0009
3	0,0015	0,0000	0,0003	0,0012	0,0000
4	0,0048	0,0006	0,0009	0,0006	0,0009

Tabela C.7 Tabela das corridas para $V_0 = 0,6$ m/s e $E = 5,0$ kV/cm.

1ª Amostragem					
Velocidade do gás no precipitador		0,6	m/s		
Campo elétrico		5,0	kV/cm		
Massa na entrada em 5 min		0,0365	g		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás		45	°C		
Umidade relativa do ar		47,2	%		
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0033	0,0039	0,0015	0,0048	0,0012
1	0,0039	0,0033	0,0057	0,0018	0,0039
2	0,0030	0,0006	0,0051	0,0000	0,0066
3	0,0003	0,0003	0,0015	0,0018	0,0006
4	0,0198	0,0000	0,0057	0,0000	0,0009

Tabela C.8 Tabela das replicas para $V_0 = 0,6$ m/s e $E = 5,0$ kV/cm.

Replica					
Velocidade do gás no precipitador		0,6	m/s		
Campo elétrico		5,0	kV/cm		
Massa na entrada em 5 min		0,0355	g		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás			°C		
Umidade relativa do ar			%		
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0039	0,0033	0,0015	0,0051	0,0012
1	0,0042	0,0036	0,0066	0,0021	0,0039
2	0,0033	0,0006	0,0042	0,0000	0,0072
3	0,0003	0,0003	0,0012	0,0021	0,0006
4	0,0186	0,0000	0,0051	0,0000	0,0009

Tabela C.9 Tabela da massa amostrada nas corridas para $V_0 = 1,0$ m/s e $E = 2,5$ kV/cm.

1ª Amostragem					
Velocidade do gás no precipitador	1	m/s			
Campo elétrico	2.5	kV/cm			
Massa na entrada em 5 min	0,0342	g			
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás	36	°C			
Umidade relativa do ar	50	%			
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0156	0,0088	0,0048	0,0094	0,0028
1	0,0196	0,0088	0,0044	0,0044	0,0042
2	0,0112	0,0040	0,0088	0,0048	0,0016
3	0,0040	0,0026	0,0006	0,0012	0,0010
4	0,0024	0,0030	0,0010	0,0064	0,0002

Tabela C.10 Tabela da massa amostrada nas replicas para $V_0 = 1,0$ m/s e $E = 2,5$ kV/cm.

Replica					
Velocidade do gás no precipitador	1	m/s			
Campo elétrico	2.5	kV/cm			
Massa na entrada em 5 min	0.0330	g			
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás	39.5	°C			
Umidade relativa do ar	52-43,8	%			
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0044	0,0056	0,0028	0,0020	0,0014
1	0,0038	0,0054	0,0034	0,0030	0,0020
2	0,0032	0,0032	0,0020	0,0016	0,0016
3	0,0016	0,0016	0,0016	0,0020	0,0010
4	0,0004	0,0010	0,0008	0,0036	0,0004

Tabela C.11 Tabela da massa amostrada nas corridas para $V_0 = 1,0$ m/s e $E = 3,0$ kV/cm.

1ª Amostragem					
Velocidade do gás no precipitador		1,0	m/s		
Campo elétrico		3,0	kV/cm		
Massa na entrada em 5 min		0,0351	g		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás		36	°C		
Umidade relativa do ar		50	%		
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0102	0,0028	0,0032	0,0010	0,0006
1	0,0094	0,0022	0,0014	0,0002	0,0002
2	0,0032	0,0010	0,0008	0,0008	0,0001
3	0,0010	0,0024	0,0008	0,0012	0,0001
4	0,0000	0,0020	0,0002	0,0006	0,0000

Tabela C.12 Tabela da massa amostrada nas replicas para $V_0 = 1,0$ m/s e $E = 3,0$ kV/cm.

Replica					
Velocidade do gás no precipitador		1,0	m/s		
Campo elétrico		3,0	kV/cm		
Massa na entrada em 5 min		0,0340	g		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás		45	°C		
Umidade relativa do ar		54,5-30	%		
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0054	0,0022	0,0032	0,0012	0,0016
1	0,0038	0,0024	0,0038	0,0012	0,0016
2	0,0020	0,0014	0,0014	0,0006	0,0028
3	0,0012	0,0012	0,0010	0,0004	0,0008
4	0,0012	0,0018	0,0008	0,0010	0,0010

Tabela C.13 Tabela da massa amostrada nas corridas para $V_0= 1,0$ m/s e $E=4,0$ kV/cm.

1ª Amostragem					
Velocidade do gás no precipitador	1,0	m/s			
Campo elétrico	4,0	kV/cm			
Massa na entrada em 5 min	0,0331	g			
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás	37	°C			
Umidade relativa do ar	52	%			
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0024	0,0024	0,0016	0,0012	0,0010
1	0,0014	0,0008	0,0014	0,0008	0,0012
2	0,0012	0,0006	0,0010	0,0012	0,0016
3	0,0010	0,0022	0,0016	0,0010	0,0004
4	0,0050	0,0008	0,0010	0,0004	0,0004

Tabela C.14 Tabela da massa amostrada nas replicas para $V_0= 1,0$ m/s e $E=4,0$ kV/cm.

Replica					
Velocidade do gás no precipitador	1,0	m/s			
Campo elétrico	4,0	kV/cm			
Massa na entrada em 5 min	0,0311	g			
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás	41	°C			
Umidade relativa do ar	60,9-38,7	%			
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0024	0,0020	0,0012	0,0010	0,0002
1	0,0020	0,0004	0,0008	0,0000	0,0001
2	0,0002	0,0000	0,0002	0,0004	0,0001
3	0,0000	0,0000	0,0006	0,0002	0,0002
4	0,0042	0,0004	0,0008	0,0004	0,0000

Tabela C.15 Tabela da massa amostrada nas corridas para $V_0 = 1,0$ m/s e $E = 5,0$ kV/cm.

1ª Amostragem					
Velocidade do gás no precipitador	1,0	m/s			
Campo elétrico	5,0	kV/cm			
Massa na entrada em 5 min	0,0382	g			
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás	36	°C			
Umidade relativa do ar	50	%			
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0018	0,0012	0,0008	0,0010	0,0008
1	0,0042	0,0046	0,0004	0,0012	0,0002
2	0,0004	0,0006	0,0022	0,0004	0,0001
3	0,0030	0,0016	0,0000	0,0006	0,0000
4	0,0008	0,0000	0,0000	0,0094	0,0000

Tabela C.16 Tabela da massa amostrada nas replicas para $V_0 = 1,0$ m/s e $E = 5,0$ kV/cm.

Replica					
Velocidade do gás no precipitador	1,0	m/s			
Campo elétrico	5,0	kV/cm			
Massa na entrada em 5 min	0,0332	g			
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás	39	°C			
Umidade relativa do ar	45,2-30,3	%			
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0024	0,0016	0,0020	0,0020	0,0020
1	0,0018	0,0012	0,0010	0,0004	0,0004
2	0,0016	0,0014	0,0012	0,0008	0,0010
3	0,0008	0,0008	0,0012	0,0008	0,0004
4	0,0006	0,0006	0,0018	0,0006	0,0004

Tabela C.17 Tabela da massa amostrada nas corridas para $V_0 = 1,4$ m/s e $E = 2,5$ kV/cm.

1ª Amostragem					
Velocidade do gás no precipitador		1,4	m/s		
Campo elétrico		2,5	kV/cm		
Massa na entrada em 5 min		0,0366	gr/min		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás		39 °C			
Umidade relativa do ar		46,8 %			
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0138	0,0108	0,0086	0,0064	0,0096
1	0,0007	0,0100	0,0098	0,0088	0,0046
2	0,0009	0,0072	0,0082	0,0090	0,0060
3	0,0007	0,0068	0,0062	0,0084	0,0088
4	0,0007	0,0026	0,0012	0,0020	0,0028

Tabela C.18 Tabela da massa amostrada nas replicas para $V_0 = 1,4$ m/s e $E = 2,5$ kV/cm.

Replica					
Velocidade do gás no precipitador		1,4	m/s		
Campo elétrico		2,5	kV/cm		
Massa na entrada em 5 min		0,0351	gr/min		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás		43 °C			
Umidade relativa do ar		63-45 %			
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0156	0,0122	0,0086	0,0076	0,0090
1	0,0156	0,0090	0,0108	0,0084	0,0076
2	0,0088	0,0058	0,0088	0,0100	0,0062
3	0,0042	0,0052	0,0048	0,0032	0,0044
4	0,0036	0,0016	0,0038	0,0018	0,0044

Tabela C.19 Tabela da massa amostrada nas corridas para $V_0 = 1,4$ m/s e $E = 3,0$ kV/cm.

1ª Amostragem					
Velocidade do gás no precipitador		1,4	m/s		
Campo elétrico		3,0	kV/cm		
Massa na entrada em 5 min		0,0333	gr/min		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás		44 °C			
Umidade relativa do ar		43,8-39,4 %			
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0150	0,0108	0,0102	0,0094	0,0050
1	0,0142	0,0064	0,0108	0,0054	0,0076
2	0,0110	0,0044	0,0076	0,0062	0,0052
3	0,0076	0,0044	0,0034	0,0046	0,0048
4	0,0044	0,0016	0,0026	0,0014	0,0014

Tabela C.20 Tabela da massa amostrada nas replicas para $V_0 = 1,4$ m/s e $E = 3,0$ kV/cm.

Replica					
Velocidade do gás no precipitador		1,4	m/s		
Campo elétrico		3,0	kV/cm		
Massa na entrada em 5 min		0,0386	gr/min		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás		43 °C			
Umidade relativa do ar		63,6-45 %			
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0108	0,0078	0,0034	0,0040	0,0030
1	0,0146	0,0038	0,0104	0,0024	0,0022
2	0,0062	0,0032	0,0054	0,0018	0,0028
3	0,0010	0,0024	0,0006	0,0018	0,0016
4	0,0026	0,0012	0,0002	0,0020	0,0030

Tabela C.21 Tabela da massa amostrada nas corridas para $V_0 = 1,4$ m/s e $E = 4,0$ kV/cm.

1ª Amostragem					
Velocidade do gás no precipitador		1,4	m/s		
Campo elétrico		4,0	kV/cm		
Massa na entrada em 5 min		0,0350	gr/min		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás		40 °C			
Umidade relativa do ar		57-37 %			
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0100	0,0030	0,0036	0,0040	0,0040
1	0,0082	0,0036	0,0044	0,0012	0,0012
2	0,0020	0,0026	0,0040	0,0018	0,0018
3	0,0006	0,0012	0,0004	0,0024	0,0024
4	0,0012	0,0012	0,0008	0,0022	0,0022

Tabela C.22 Tabela da massa amostrada nas replicas para $V_0 = 1,4$ m/s e $E = 4,0$ kV/cm.

Replica					
Velocidade do gás no precipitador		1,4	m/s		
Campo elétrico		4,0	kV/cm		
Massa na entrada em 5 min		0,0367	gr/min		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás		40 °C			
Umidade relativa do ar		48,6-40,9 %			
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0110	0,0052	0,0024	0,0014	0,0008
1	0,0038	0,0014	0,0010	0,0012	0,0028
2	0,0012	0,0020	0,0012	0,0010	0,0008
3	0,0022	0,0014	0,0004	0,0006	0,0008
4	0,0022	0,0012	0,0018	0,0002	0,0000

Tabela C.23 Tabela da massa amostrada nas corridas para $V_0 = 1,4$ m/s e $E = 5,0$ kV/cm.

1ª Amostragem					
Velocidade do gás no precipitador	1,4	m/s			
Campo elétrico	5,0	kV/cm			
Massa na entrada em 5 min	0,0340	gr/min			
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás	39	°C			
Umidade relativa do ar	58,3-52,3	%			
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0080	0,0024	0,0010	0,0064	0,0004
1	0,0014	0,0022	0,0020	0,0014	0,0020
2	0,0010	0,0014	0,0020	0,0014	0,0016
3	0,0016	0,0010	0,0018	0,0008	0,0002
4	0,0060	0,0006	0,0018	0,0006	0,0010

Tabela C.24 Tabela da massa amostrada nas replicas para $V_0 = 1,4$ m/s e $E = 5,0$ kV/cm.

Replica					
Velocidade do gás no precipitador	1,4	m/s			
Campo elétrico	5,0	kV/cm			
Massa na entrada em 5 min	0,0425	gr/min			
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás	43	°C			
Umidade relativa do ar	65,2-58	%			
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0,0110	0,0016	0,0006	0,0004	0,0006
1	0,0008	0,0030	0,0020	0,0002	0,0024
2	0,0002	0,0014	0,0004	0,0002	0,0010
3	0,0012	0,0010	0,0018	0,0006	0,0004
4	0,0032	0,0002	0,0020	0,0000	0,0006

APÊNDICE D

Tabela D.1 Tabela da massa amostrada nas corridas com testes em branco para $V_0 = 0,6$ m/s.

Velocidade do gás no precipitador		0,6	m/s		
Massa na entrada em 5 min		0,0342	g		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás		38	°C		
Umidade relativa do ar		55	%		
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0.0080	0.0082	0.0079	0.0080	0.0077
1	0.0082	0.0090	0.0079	0.0086	0.0079
2	0.0082	0.0083	0.0092	0.0080	0.0076
3	0.0080	0.0084	0.0080	0.0077	0.0075
4	0.0086	0.0085	0.0077	0.0080	0.0076

Tabela D.2 Tabela da massa amostrada nas corridas com testes em branco para $V_0 = 1,0$ m/s.

Velocidade do gás no precipitador		1,0	m/s		
Massa na entrada em 5 min		0,0352	g		
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás		37	°C		
Umidade relativa do ar		51	%		
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0.0135	0.0128	0.0134	0.0129	0.0110
1	0.0126	0.0128	0.0120	0.0128	0.0114
2	0.0121	0.0120	0.0118	0.0118	0.0116
3	0.0119	0.0123	0.0124	0.0119	0.0115
4	0.0135	0.0124	0.0123	0.0112	0.0114

Tabela D.3 Tabela da massa amostrada nas corridas com testes em branco para $V_0 = 1,4$ m/s.

Velocidade do gás no precipitador	1,4	m/s			
Massa na entrada em 5 min	0,0370	g			
Condições de operação					
Temperatura da corrente gás	38	°C			
Umidade relativa do ar	58	%			
Medidas internas durante 15 min					
Fila (g)					
Posição	1	2	3	4	5
0	0.0131	0.0121	0.0133	0.0127	0.0123
1	0.0131	0.0136	0.0146	0.0139	0.0118
2	0.0138	0.0139	0.0131	0.0138	0.0118
3	0.0137	0.0136	0.0128	0.0121	0.0121
4	0.0122	0.0140	0.0120	0.0127	0.0118