

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**AMOSTRAGEM DE PARTÍCULAS DISPERSAS EM CORRENTES
GASOSAS CONFINADAS**

MARIA ANGÉLICA MARTINS COSTA
Engenheiro Químico, UEM, 1994.

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Luiz Gimenes

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química, área Desenvolvimento de Processos.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Esta é a versão definitiva da Dissertação de Mestrado submetida por Maria Angélica Martins Costas, à Comissão Julgadora do Curso de Mestrado em Engenharia Química, na data de 12 de maio de 1998.

COMISSÃO JULGADORA



Prof. Dr. Marcelino Luiz Gimenes
Orientador



Profª Drª Meuris Gurgel Carlos da Silva
Membro



Profª Drª Elisabete Scolin Mendes
Membro

À minha tão amada filha, Ana Flávia
Pelo seu amor, como grande incentivo.

À Deus

Cujo nome é glorioso em toda a terra e cuja majestade se estende, triunfante,
por cima de todos os céus (Sl 8, 2).

Àquele que, com sabedoria e amor infinitos, após criar o universo,
“contemplou toda a sua obra e viu que tudo era muito bom” (Gn 1, 31).

Ao senhor que “lançou os fundamentos da terra”, que “abre um canal para os
aguaceiros, e uma rota para o relâmpago, fazendo chover sobre a
terra...para regar regiões vastas e desoladas, a fim de nelas fazer germinar a
erva verdejante” (Jó 38, 4.25-25).

A Ele devo a força nas longas horas em que o desânimo ameaçou a
continuidade desse trabalho que agora, humildemente, entrego como
contribuição para melhorar a vida que dEle provém.

Pe: Orivaldo

Agradecimentos

À minha querida filha,

Eu sem você não tenho porque
Porque sem você não sei nem chorar
Sou chama sem luz, jardim sem luar
Luar sem amor, amor sem se dá
E eu sem você sou só desamor
Um barco sem mar, um campo sem flor
Tristeza que vai tristeza que vem
Sem você meu amor eu não sou ninguém...

(Vinícius de Moraes)

Gostaria de deixar à você uns dos meus maiores aprendizados: o respeito à natureza, e a preservação à vida.

Filha sem o meio ambiente nós não somos ninguém.

Pai,

“De todos os títulos da terra o único que vale a pena receber é de
“Homem bom”

(Leocádio J. Correia)

E este você tem. Te amo muito!

Mãe,

Você me ensinou o amor à Deus e a força da fé.

“A felicidade do homem será sempre do tamanho da sua fé.”

(Leocádio J. Correia)

Saiba que seu amor me faz feliz. Te amo muito!

Ao meu querido Dudu,

“A ausência diminui
as pequenas paixões
e aumenta as grandes,
da mesma forma como
o vento apaga as velas
e atíça as fogueiras”

(François de La Rochefoucault)

Obrigada meu amor por ter se doado para a realização deste sonho.
Te amo muito!

Aos meus irmãos, Cláudio e Alécio, e aos meus queridos Kátia, Yago,
Dirce e Naiara,

“É sem querer que na vida tornamo-nos
especialistas na arte do abandono
Pessoas, lugares, sentimentos
São gotículas lindas
Que lentamente deslizam pelas pétalas

Meus queridos, obrigada pela força apesar da saudade.

(Ivan Petrovitch)

À minha irmã adotada pelo coração, Elenice,

“As folhas caem
São vidas que se perdem
Levam e deixam de si
Marcas dos momentos criados, vividos
Nas noites sem fim.”

(Ivan Petrovitch)

Nega Vá, como esquecer momentos de tão puro amor. Te espero para
comermos as flores do céu!

Aos meus queridos Renata, Gabi e Paulinho,

“Feliz é o homem que sabe trocar
a superficialidade
pela essência das coisas na leveza do existir...”

(Ivan Petrovitch)

Obrigada pela força e pelos momentos de carinho.

Às minhas queridas meninas Lelê; Bia e Célia (magnânima),

“Um dia a gente chega, outro vai embora.
Cada um de nós compõe a sua história.
E cada ser em si carrega o dom de ser capaz
e ser feliz...”

(Almir Satter e Renato

Teixeira)

“Valeu” a agradável convivência. Vocês são especiais!

Àos meus queridos amigos, Ikeda, Joji, Paulinho, Alexandre, Fernanda, Duda, Bié, Angélica, Marcelo, Ana Claudia, Brasília, Luíza, Valmir, Eneida, Polon, Emerson, Marcos, Mauro, Ricardo Saraiva, Ricardo, Valéria, Vandrê, Jussara, Márcia, Mauro.

“A vida até parece uma festa
Em certas horas isso é o que nos resta...
Ficar bem ou mal acompanhado
Não importa se der tudo errado...
... Diversão é solução sim
Diversão é solução pra mim.”

(Sergio Britto e Nando Reis)

Ao meu orientador Marcelino,

“Aprender é modificar comportamento
Viver é ter opinião
Criticar é saber resguardar
A dignidade do ser humano.”

(Leocádio J. Correia)

Agradeço seu profissionalismo, atenção e paciência na orientação deste trabalho.

Aos professores,

Como educador sua missão é resgatar no homem e na mulher sua dignidade como cidadãos.

Ao Mestre Pedrão, Maria Sueli, Guerrinha, Doni, Fernando, Lauro, Luizinho, Orisvaldo e Sueleni agradeço a atenção.

Ao Rogério, Marcelo, André e Augusto pelo esforço e apoio durante o nosso trabalho.

A Universidade Federal de São Carlos e a Universidade de Campinas pelo apoio técnico.

Ao PEQ, DEQ e CAPES pelo apoio financeiro.

ÍNDICE GERAL

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E OBJETIVO	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 – INTRODUÇÃO	4
2.2 – CLASSIFICAÇÃO DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS	6
2.3 – POLUENTES PARTICULADOS	7
2.3.1 – Propriedades dos poluentes particulados	9
2.3.2 – Fontes de emissão	11
2.3.3 – Danos causados pela poluição de particulados	13
2.3.4 – Qualidade do ar em relação poluentes particulados	17
2.3.5 – Equipamentos de controle de emissão de poluentes particulados	21
2.4 – AMOSTRAGEM DE POLUENTES PARTICULADOS	
2.4.1 – Amostragem do ar ambiente	24
2.4.2 – Análise e medidas de poluentes particulados	25
2.4.3 – Amostragem de particulados em dutos	27
2.4.4 – Localização da amostragem no duto	30
2.4.5 – Números de pontos e tempo de amostragem	33
2.4.6 – Equipamentos de amostragem isocinética	37
2.4.7 – Amostragem isocinética	38
2.4.8 – Erros associados a amostragem anisocinética	40

2.5 – COMENTÁRIOS GERAIS	42
--------------------------	----

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – INTRODUÇÃO	44
3.2 – MÓDULO EXPERIMENTAL	44
3.2.1 – Duto de amostragem	46
3.2.2 – Dispensor / Alimentador de partículas	46
3.2.3 – Equipamento de controle	50
3.3 – MÉTODOS EXPERIMENTAIS	
3.3.1 – Medidas de velocidades	51
3.3.2 – Sistema de amostragem	51
3.3.2.1 – Contador de partículas	51
3.3.2.2 – Amostragem Isocinética	56
3.3.3 – Material particulado	58
3.3.4 – Planejamento experimental	61
3.4 – COMENTÁRIOS GERAIS	62

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Avaliação da influência da vazão na quebra dos aglomerados/dispersão das partículas e fator de diluição	65
4.2 – Avaliação do perfil de distribuição do pó no interior do duto	68
4.3 – Avaliação do número de contagens em cada ponto de amostragem	76
4.4 – Conversão da distribuição de tamanho por número para uma distribuição de tamanho por massa de partículas em cada ponto de amostragem	80
4.5 – Avaliação dos erros de velocidades não isocinéticas	84
4.6 – Taxas de emissão e concentração representativas da seção da seção transversal do duto	92
4.7 – Avaliação da taxa de alimentação em relação a concentração obtida através das contagens pelo contador	96

de partículas	
4.8 – Avaliação do tempo de amostragem para medidas gravimétricas	98
4.9 – Comentários gerais	98
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES E SUGESTÕES	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
APÊNDICES	
Apêndice A – Resultado das medidas de velocidade	108
Apêndice B – Resultados das contagens de números de partículas	115
Apêndice C – Resultados referentes à massa e concentração de partículas.	121
Apêndice D – Resultados do planejamento experimental	125
Apêndice E - Perfil de velocidade no interior do duto	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Deposição das partículas no sistema respiratório humano	14
Figura 2.2 – Interações das partículas suspensas com a luz	15
Figura 2.3 – Efeito da visibilidade	16
Figura 2.4 – Distâncias recomendadas para amostragem	31
Figura 2.5 – Localizações das amostras	33
Figura 2.6 – Pontos de amostragem segundo BS3405	34
Figura 2.7 – Pontos de amostragem segundo CETESB	35
Figura 2.8 – Pontos de amostragem segundo Air Pollution Control	37
Figura 2.9 – Bocais de amostragem	38

Figura 2.10 – Linhas de corrente ao redor do bocal de amostragem	40
Figura 3.1 – Módulo experimental	45
Figura 3.2.a – Sistema de alimentação do pó	47
Figura 3.2.b – Esquema detalhado do alimentador de partículas	48
Figura 3.3 – Esquema do filtro usado para controle de particulados	49
Figura 3.4 – Perfil de velocidade típico no interior do duto	138
Figura 3.5 – Diagrama simplificado do fluxo de ar mais partículas no contador	53
Figura 3.6 – Ilustração dos resultados típicos das contagens	55
Figura 3.7 – Alinhamento dos bocais em relação ao fluxo de ar nos dutos	57
Figura 3.8 – Esquema do bocal de amostragem	57
Figura 3.9 – Distribuição de tamanho de alumina	59
Figura 3.10 – Distribuição de tamanho do dióxido de titânio	60
Figura 3.11 – Foto ilustrativa da forma das partículas	60
Figura 4.1 – Distribuição do número de partículas da alumina obtidas num mesmo ponto de amostragem (ponto b).	61
Figura 4.2 - Distribuição do número de partículas da alumina num mesmo ponto de amostragem (ponto c).	65
Figura 4.3 - Distribuição do número de partículas de dióxido de titânio (ensaio 1) linha vertical. Vazão 0,65 m ³ /s.	69
Figura 4.4 - Distribuição do número de partículas de dióxido de titânio (ensaio 1) linha horizontal. Vazão 0,65 m ³ /s.	70
Figura 4.5 - Distribuição de tamanho por números de dióxido de titânio (ensaio 3) linha vertical. Vazão 0,45 m ³ /s.	72
Figura 4.6 - Distribuição de tamanho por números de dióxido de titânio (ensaio 3) linha horizontal. Vazão 0,45 m ³ /s.	72
Figura 4.7 - Distribuição de partículas da alumina (ensaio 4) linha vertical. Vazão 0,65 m ³ /s.	73
Figura 4.8 - Distribuição de partículas da alumina (ensaio 4) linha horizontal. Vazão 0,65 m ³ /s.	74
Figura 4.9 - Distribuição de partículas da alumina (ensaio 2) linha	75

vertical. Vazão 0,45 m ³ /s.	
Figura 4.10 - Distribuição de partículas da alumina (ensaio 2) linha horizontal. Vazão 0,45 m ³ /s.	76
Figura 4.11 – Contagens de partículas de dióxido de titânio realizadas no ponto de amostragem (c), linha vertical. Vazão 0,45 m ³ /s.	77
Figura 4.12 – Contagens de partículas de dióxido de titânio realizadas no ponto de amostragem (d), linha vertical. Vazão 0,45 m ³ /s.	77
Figura 4.13 – Contagens de partículas de dióxido de titânio realizadas no ponto de amostragem (e), linha vertical. Vazão 0,45 m ³ /s.	78
Figura 4.14 – Contagens de partículas de dióxido de titânio realizadas no ponto de amostragem (a), linha vertical. Vazão 0,45 m ³ /s.	79
Figura 4.15 – Contagens de partículas de dióxido de titânio realizadas no ponto de amostragem (a), linha horizontal. Vazão 0,45 m ³ /s.	80
Figura 4.16 - Distribuição de tamanho por número de distribuição de tamanho por massa.	83
Figura 4.17 - Distribuição numérica de partículas de alumina, linha vertical. Vazão 0,45 m ³ /s.	85
Figura 4.18 - Distribuição numérica de partículas de alumina, linha horizontal. Vazão 0,45 m ³ /s.	86

ÍNDICE DE TABELAS

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 2.1 – Poluentes atmosféricos	6
Tabela 2.2 – Padrões primários e secundários da qualidade do ar ambiental	20
Tabela 2.3 – Influência do tamanho das partículas na eficiência da coleta	21
Tabela 2.4 - Localização da velocidade de amostragem	36

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Tabela 3.1 – Faixas do contador de partículas	52
Tabela 3.2 – Diâmetro dos bocais de amostragem	56
Tabela 3.3 – Propriedades do material particulado	59
Tabela 3.4 - Determinação dos níveis das variáveis	62
Tabela 3.5 - Matriz do planejamento experimental	62

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 4.1 – Número de partículas contadas nos pontos de amostragem (vazão 0,48 m ³ /s)	66
Tabela 4.2 - Número de partículas contadas nos pontos de amostragem (vazão 0,30 m ³ /s)	66
Tabela 4.3 – Tabela de conversão de número para massa (alumina calcinada, na vazão 0,65 m ³ /s, amostragem no ponto a)	82
Tabela 4.4 – Velocidade locais, velocidade de amostragem e os respectivos bocais de amostragem isocinéticos	87
Tabela 4.5 – Concentração experimental e concentração isocinética (segundo correlação Samata), amostragemn no ponto (a).	89
Tabela 4.6 - Concentração experimental e concentração isocinética (segundo correlação Samata), amostragemn no ponto (b).	89
Tabela 4.7 - Concentração experimental e concentração isocinética (segundo Samata), amostragemn no ponto (c).	90
Tabela 4.8 - Concentração experimental e concentração isocinética (segundo correlação Samata), amostragemn no ponto (d).	91
Tabela 4.9 – Taxas de emissão e concentração de partículas de alumina para a vazão 0.65 m ³ /s.	93
Tabela 4.10 - Taxas de emissão e concentração de partículas de alumina para a vazão 0.45 m ³ /s.	95
Tabela 4.11 - Taxas de emissão e concentração de partículas de dióxido de titânio para a vazão 0.65 m ³ /s.	95
Tabela 4.12 – Taxas de alimentação das partículas utilizadas durante os experimentos (g/s).	96
Tabela 4.13 – Concentração de alimentação dos pós para as várias vazões experimentais, baseados na taxa de alimentação.	97

NOMENCLATURA

A	Área do duto (m^2)
A_0	Coefficiente relacionado com V e Stk
C	Concentração de partículas (g/m^3)
C^*	Concentração média de partículas (g/m^3)
C_e	Concentração de partículas na entrada do duto (g/m^3)
C_s	Concentração de partículas na saída do duto (g/m^3)
C_o	Concentração das partículas amostradas isocineticamente (g/m^3)
C_s	Concentração das partículas amostradas anisocinéticas (g/m^3)
c	Concentração mássica de aerossol (mg/m^3)
D	Diâmetro do duto (m)
D_s	Diâmetro do bocal (m)
d	Diâmetro geométrico da partícula
d_{ve}	Diâmetro do volume equivalente
d_{ae}	Diâmetro aerodinâmico
ΔH	Varição de posição (mm)
ΔP	Varição de pressão (mmH_2O)
g_c	Fator de conversão da Lei de Newton
K	Fator de calibração do tubo de Pitot

m	Massa (g)
M	Taxa de emissão (g/s)
N	Número de partículas
PST	Particulados Suspensos Totais
PM ₁₀	Material particulado menor que 10 μm
Q ₀	Vazão de gás no duto (m ³ /s)
Q _s	Vazão de gás na sonda de amostragem (m ³ /s)
Q	Vazão de gás no duto (m ³ /s)
V ₀	Velocidade do gás no duto (m/s)
V _s	Velocidade de sucção (m/s)
μ	Viscosidade cinemática do gás (m ² /s)
ρ	Densidade do gás (g/cm ³)
η	Eficiência de coleta
Stk	Número de Stokes

RESUMO

Neste trabalho estudou-se as técnicas de amostragem de particulados dispersos em corrente gasosa em dutos. Realizou-se o estudo da amostragem, a quantificação das concentrações por faixas de tamanho e as respectivas taxas de emissão de particulados.

O estudo das técnicas de amostragem foi realizada num duto circular de PVC de 12 m de comprimento e 0,1524 m de diâmetro. Foi produzido neste duto uma corrente gasosa de ar transportando partículas dispersas. A dispersão das partículas foi realizada com a introdução de uma corrente de ar com uma alta concentração de pó, produzida por um alimentador/dispersor de poeira. Sendo assim, simulou-se uma corrente de gás “suja” de partículas da qual foram coletadas pequenas amostras de ar com partículas dispersas. Utilizou-se como material particulado a alumina calcinada e dióxido de titânio, ambas partículas com diâmetro menor que 10μm.

A amostragem da corrente gasosa foi efetuada de acordo com os padrões britânicos (BS 3405), sendo efetuada com o auxílio de sondas isocinéticas inseridas alinhadamente no interior do duto. As amostras em corrente gasosa foram analisadas on - line por um contador de partículas a laser. Através deste equipamento determinou-se a concentração de partículas para cada faixa de tamanho, a qual é necessária para estimar as taxas de emissão e a eficiência de alguns equipamentos de controle.

As velocidades da corrente gasosa usadas no transporte das partículas variaram de 11 a 36 m/s, e as vazões do fluxo de gás no duto variaram de 0,30 a 0,60 m³/s.

A partir das concentrações por número, medida pelo contador, para o intervalo de tamanho calculou-se a concentração mássica de partículas para os mesmos intervalos, ou seja, entre 0.3 e 10 µm.

Concentrações locais obtidas no duto foram analisadas em função da amostragem quase isocinética realizada. Concentrações totais, que são representativas para toda a seção transversal do duto, foram determinadas para várias vazões de ar em que as partículas foram transportadas. Estas concentrações permitiram estimar possíveis as taxas de emissão de partículas PM₁₀ a atmosfera.

Os resultados obtidos indicam a viabilidade do uso do contador de partículas na amostragem em dutos, principalmente para baixas concentrações de particulados. A razão disto é baseado nos bons resultados obtidos em comparação a métodos gravimétricos que não longos tediosos para a determinação de taxas de emissão ou concentração de partículas.

ABSTRACT

In this work it was studied the sampling techniques of dispersed particulates into gaseous stream which are flowing ducts. A sampling study was carried out in order to determine concentration of each size of particle and the respective emission rates.

This study was took place in a circular PVC duct having 12m. long and 0,1524 m of diameter. A gaseous air stream was produced in the duct to transport dispersed particles. The dispersion of particles was made by adding to the duct stream another air stream coming from a dust feed/dispersor, which contained high particle concentration. This allowed obtaining a dust gas stream flowing in PVC duct where sampling was carried out. The dust

dispersed in the duct were alumina and titanium dioxide powders, which have particle size below $10\ \mu\text{m}$.

The gas stream sampling was performed under quasi-isokinetic conditions using probes aligned inside the duct. A laser particle counter was on-line used to analyse the sampled particles. This particle counter allows determining particle concentration for several size ranges, which can be used to estimate emission rates and efficiency of particle collection equipment.

Velocities used to transport particles ranged from 11 to 36 m/s being the respective gas flow rate varied from 0,30 to 0,60 m^3/s .

From the concentration of particles by number, measured by the counter for 6 sizes ranges, it was possible to calculate the mass concentration of particles in the same ranges, that is between 0.3 and $10\ \mu\text{m}$.

Local concentration obtain in the duct are analysed according to the quasi-isokinetic conditions used in the sampling procedure. Total concentrations, which are representative of the cross sectional duct area, were determined for several gas flow rate in which particles were dispersed. These concentrations allowed estimating eventual emission rate of PM_{10} to the atmosphere.

Obtained results indicate the feasibility of the particle counter to be used in duct sampling, particularly at low particle concentration. The reason for this is based on reliable obtained results in comparison to gravimetric methods which are time consuming, tedious to determine particle concentration and emission rates.

NOMENCLATURA

A	Área do duto (m ²)
A ₀	Coeficiente relacionado com V e Stk
C	Concentração de partículas (g/m ³)
C [*]	Concentração média de partículas (g/m ³)
C _e	Concentração de partículas na entrada do duto(g/m ³)
C _s	Concentração de partículas na saída do duto (g/m ³)
C _o	Concentração das partículas amostradas isocineticamente (g/m ³)
C _s	Concentração das partículas amostradas anisocinéticas (g/m ³)
c	Concentração mássica de aerossol (mg/m ³)
D	Diâmetro do duto (m)
D _s	Diâmetro do bocal (m)
d	Diâmetro geométrico da partícula
d _{ve}	Diâmetro do volume equivalente
d _{ae}	Diâmetro aerodinâmico
ΔH	Varição de posição (mm)
ΔP	Varição de pressão (mmH ₂ O)
g _c	Fator de conversão da Lei de Newton
K	Fator de calibração do tubo de Pitot
m	Massa (g)
M	Taxa de emissão (g/s)
N	Número de partículas
PST	Particulados Suspensos Totais
PM ₁₀	Material particulado menor que 10 μm
Q	Vazão de gás no duto (m ³ /s)
V _o	Velocidade do gás no duto (m/s)
V _s	Velocidade de sucção (m/s)
μ	Viscosidade cinemática do gás (m ² /s)
ρ	Densidade do gás (g/cm ³)
η	Eficiência de coleta
Stk	Número de Stokes

RESUMO

Neste trabalho estudou-se as técnicas de amostragem de particulados dispersos em corrente gasosa em dutos. Realizou-se o estudo da amostragem, a quantificação das concentrações por faixas de tamanho e as respectivas taxas de emissão de particulados.

O estudo das técnicas de amostragem foi realizada num duto circular de PVC de 12 m de comprimento e 0,1524 m de diâmetro. Foi produzido neste duto uma corrente gasosa de ar transportando partículas dispersas. A dispersão das partículas foi realizada com a introdução de uma corrente de ar com uma alta concentração de pó, produzida por um alimentador/dispersor de poeira. Sendo assim, simulou-se uma corrente de gás “suja” de partículas da qual foram coletadas pequenas amostras de ar com partículas dispersas. Utilizou-se como material particulado a alumina calcinada e dióxido de titânio, ambas partículas com diâmetro menor que 10 μ m.

A amostragem da corrente gasosa foi efetuada de acordo com os padrões britânicos (BS 3405), sendo efetuada com o auxílio de sondas isocinéticas inseridas alinhadamente no interior do duto. As amostras em corrente gasosa foram analisadas on - line por um contador de partículas a laser. Através deste equipamento determinou-se a concentração de partículas para cada faixa de tamanho, a qual é necessária para estimar as taxas de emissão e a eficiência de alguns equipamentos de controle.

As velocidades da corrente gasosa usadas no transporte das partículas variaram de 11 a 36 m/s, e as vazões do fluxo de gás no duto variaram de 0,30 a 0,60 m³/s.

A partir das concentrações por número, medida pelo contador, para o intervalo de tamanho calculou-se a concentração mássica de partículas para os mesmos intervalos, ou seja, entre 0.3 e 10 μ m.

Concentrações locais obtidas no duto foram analisadas em função da amostragem quase isocinética realizada. Concentrações totais, que são

representativas para toda a seção transversal do duto, foram determinadas para várias vazões de ar em que as partículas foram transportadas. Estas concentrações permitiram estimar possíveis as taxas de emissão de partículas PM_{10} a atmosfera.

Os resultados obtidos indicam a viabilidade do uso do contador de partículas na amostragem em dutos, principalmente para baixas concentrações de particulados. A razão disto é baseado nos bons resultados obtidos em comparação a métodos gravimétricos que não são longos e tediosos para a determinação de taxas de emissão ou concentração de partículas.

ABSTRACT

In this work it was studied the sampling techniques of dispersed particulates into gaseous stream which are flowing ducts. A sampling study was carried out in order to determine concentration of each size of particle and the respective emission rates.

This study was took place in a circular PVC duct having 12m. long and 0,1524 m of diameter. A gaseous air stream was produced in the duct to transport dispersed particles. The dispersion of particles was made by adding to the duct stream another air stream coming from a dust feed/dispersor, which contained high particle concentration. This allowed obtaining a dust gas stream flowing in PVC duct where sampling was carried out. The dust dispersed in the duct were alunima and titanium dioxide powders, which have particle size below 10 μ m.

The gas stream sampling was performed under quasi-isokinetic conditions using probes aligned inside the duct. A laser particle counter was on-line used to analyse the sampled particles. This particle counter allows determining particle concentration for several size ranges, which can be used to estimate emission rates and efficiency of particle collection equipment.

Velocities used to transport particles ranged from 11 to 36 m/s being the respective gas flow rate varied from 0,30 to 0,60 m^3/s .

From the concentration of particles by number, measured by the counter for 6 sizes ranges, it was possible to calculate the mass concentration of particles in the same ranges, that is between 0.3 and 10 μ m.

Local concentration obtain in the duct are analysed according to the quasi-isokinetic conditions used in the sampling procedure. Total concentrations, which are representative of the cross sectional duct area,

were determined for several gas flow rate in which particles were dispersed. These concentrations allowed estimating eventual emission rate of PM₁₀ to the atmosphere.

Obtained results indicate the feasibility of the particle counter to be used in duct sampling, particularly at low particle concentration. The reason for this is based on reliable obtained results in comparison to gravimetric methods which are time consuming, tedious to determine particle concentration and emission rates.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O interesse na amostragem de aerossóis está na necessidade prática de estimar as propriedades de partículas carregadas pelo ar. Tais necessidades incluem o monitoramento de emissões de material particulado para a atmosfera por processos industriais, o monitoramento de material particulado suspenso na atmosfera e nos locais de trabalho, o monitoramento e controle de certos tipos de processos industriais, incluindo ambientes limpos (Oliveira 1995).

Para Gonçalves (1997) são muitas as razões para se remover partículas de gases provenientes de processos industriais; uma delas de ordem econômica, que se refere a recuperação de produtos ou matérias primas através de equipamentos de controle ambiental com o objetivo de evitar perdas desnecessárias nas indústrias. Uma outra de ordem social, esta relacionada à proteção do indivíduo trabalhando na indústria, público em geral, vida vegetal e aos materiais. A poluição do ar é um fator causador de várias doenças crônicas no homem e animais, principalmente aquelas relacionadas ao sistema respiratório.

Várias razões motivam uma indústria a investir no controle de suas emissões para a atmosfera:

- ✓ Proteção da vida animal e vegetal.
- ✓ Proteção dos bens materiais, móveis ou imóveis.
- ✓ Melhoria da imagem da indústria perante o público consumidor.
- ✓ Obtenção de certificados internacionais de qualidade ambiente (selos verdes)
- ✓ Cumprimento das leis ambientais estabelecidas pelas sociedades.

Os particulados não são química e fisicamente uniformes, e alguns são mais prejudiciais à saúde, às propriedades e à visibilidade do ar do que

outros. As partículas que mais causam danos à saúde, e também as de maior dificuldade de serem coletadas em equipamentos de controle, são aquelas de tamanho menor que $10\ \mu\text{m}$ ou seja PM_{10} .

A propriedade de maior interesse é a concentração de massa dos aerossóis (C), definida como a massa de material particulado contida num volume unitário de ar. Relacionada a esta, outra propriedade de interesse prático em algumas regiões é a concentração numérica, assim como a distribuição de tamanhos e a composição química.

A distribuição de tamanhos é determinada pela classificação das partículas no ar, pelo diâmetro aerodinâmico, mobilidade elétrica, ou propriedades de dispersão da luz.

Propriedades da dispersão de luz são utilizadas na distribuição de tamanho de partículas por números. Partículas individuais interagem com um feixe de luz de um ângulo da direção original do feixe de luz. A intensidade da luz dispersa é uma função do diâmetro.

Dentro deste contexto, neste trabalho avaliou-se a viabilidade do uso do contador de partículas, a laser na amostragem de partículas dispersos em corrente gasosa em dutos.

A utilização deste equipamento nos estudos das técnicas de amostragem de particulados, nos permite obter dados de distribuição de tamanho por números, classificando as partículas por faixa de tamanho, que varia de $0,30$ a $10\ \mu\text{m}$, ou seja, faixa de partículas respiráveis. Possibilitando a determinação de concentração de partículas por faixas de tamanhos, e estes dados de concentração poderia ser comparados com normas ou padrões de qualidade do ar.

O contador de partículas fornece resultados rápidos e exatos, desde que se trabalhe em fluxos de gás com partículas bastante diluídos. Evitando com isso erros por coincidência nas contagens.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é o estudo das técnicas de amostragem de partículas dispersas em corrente gasosa, fluindo em dutos. Por meio deste trabalho, pode-se estabelecer comparações entre as normas de amostragem e estudos realizados com o monitoração de partículas e a avaliação da representatividade de dados obtidos durante as amostragens de dois tipos de materiais particulados: dióxido de titânio e alumina calcinada.

Os resultados das medidas deverão ser representativos quanto as condições do material particulado no interior do duto. Os resultados obtidos na amostragem, neste trabalho, permitem obter concentrações mássica de partículas confinadas em dutos e as respectivas de emissão, através de medidas da distribuição de tamanho de partículas.

Estrutura da tese :

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica. Nesse capítulo será apresentado as normas de monitoração de partículas em dutos e trabalhos que apresentam condições de amostragem e resultados experimentais.

O capítulo 3 descreve o módulo experimental e equipamentos auxiliares designados e construídos para desenvolver os experimentos de amostragens. As técnicas experimentais e metodologia são também descritos neste capítulo.

O capítulo 4 apresenta os resultados e discussão das amostragens dos particulados.

Finalmente o capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas neste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - INTRODUÇÃO

Segundo Nevers (1995) a poluição atmosférica é a presença de material indesejável no ar, em quantidades bastante grandes produzindo efeitos prejudiciais a saúde humana, vegetação, bens e propriedades, bem como ao desenvolvimento global. Sendo além disso causadora de efeitos estéticos, na forma de uma névoa marrom, ou aroma desagradável.

A poluição do ar tem sua história iniciada com os protestos causados pelo consumo do carvão mineral, já no século XII, na Inglaterra. Foi no século XV que a poluição do ar tornou-se um problema social, nas pequenas e populosas cidades européias, com a queima do carvão de má qualidade, o qual era utilizado com fonte de energia. Com o passar do tempo, o problema foi se agravando e ao chegar o crescimento industrial, tornou-se intolerável (Aguiar, 1995).

Desde a revolução industrial, em áreas do globo terrestre que possuem grandes concentrações industriais, a poluição atmosférica tornou-se um sério problema a saúde das populações que habitavam estas regiões, bem como na degradação do meio ambiente (Sagula, 1986).

Em muitas das grandes cidades do mundo e também do Brasil, a quantidade de gases, fumaça, cinzas e partículas de produtos químicos emitidos na atmosfera pelas chaminés das fábricas e pelos escapamentos dos automóveis está poluindo cada vez mais o ar e seus habitantes já estão sentindo os efeitos prejudiciais da poluição do ar sobre a saúde e bem estar: ardência nos olhos, tosse, alergias e doenças pulmonares (Embrapa, 1996).

A mortalidade provocada pela poluição do ar é difícil de ser estimada mas certamente, centenas de milhares de pessoas no mundo, morrem a cada ano, vítimas

de alguma doença em que o ar poluído tem um papel determinante. Na cidade de Cubatão, no ano 1980, 40 em cada 1000 crianças nasceram deformadas ou morreram antes de completar um ano de vida. Também na cidade do México, onde se tentou medir a influência da poluição sobre a saúde, os óbitos atribuídos ao câncer e a pneumonia multiplicaram-se por seis, desde 1956. Os óbitos causados por problema de coração multiplicaram-se por quatro, no mesmo período. Os mais atingidos são as crianças, os idosos, as mães que amamentam e as gestantes (EMBRAPA, 1996).

Boubel (1994) comenta que o ar poluído provoca também muitos prejuízos ao corroer as paredes dos edifícios, a pintura e os metais, e danificando ainda a vegetação e as áreas verdes que existentes em torno de algumas cidades. Quando lançados no ar, os poluentes, mais cedo ou mais tarde, vão contaminar os rios e o solo, levados pelas águas das chuvas. Nos rios vão atingir os peixes e os seres vivos, que deles se alimentam.

Com o aumento desenfreado das emissões de poluentes das fontes para atmosfera, cresce também a preocupação com o monitoração e controle de resíduo lançados à atmosfera, de modo a serem evitados danos ao meio ambiente e a saúde humana.

Nos países desenvolvidos, que reúne o maior número de indústrias, assim como a maior frota automobilística, o controle da poluição atmosférica é mais rigoroso. Nesses países, como também no Brasil, existem leis de controle ambiental e também tecnologias, como filtros, que diminuem grandemente o problema da poluição do ar.

Dentro de um programa de controle ambiental, com suas leis e tecnologias disponíveis, para se atingir uma qualidade desejável do ar é necessário o monitoração do ar. Este monitoração pode indicar a necessidade de programas específicos para controle de emissão, nos quais esta sempre envolvido a determinação das taxas de emissão de poluentes para a atmosfera ou então a avaliação experimental da eficiência de equipamento de controle.

Neste capítulo de revisão dá-se ênfase aos poluentes particulados, tratando-se da amostragem de partículas confinadas em dutos objetivando-se a determinação de concentração de material particulado. A determinação dessas concentrações é necessária para obtenção das taxas de emissão de poluentes particulados para atmosfera, caso típico de uma chaminé que emite partículas. No caso de um equipamento de coleta de partículas a determinação de concentrações de partículas

confinadas na entrada e na saída do equipamento permite obter eficiência de coleta do equipamento.

2.2 - CLASSIFICAÇÃO DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Abril (1980) cita que os poluentes atmosféricos são divididos em: gases orgânicos, gases inorgânicos e particulados. Os gases orgânicos são hidrocarbonetos aromáticos, parafinas, aldeídos, acetonas, originados geralmente nos processos ou derivados de petróleo. Os gases inorgânicos mais comuns são óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre, monóxido de carbono. As fontes que originam esses poluentes são a combustão, as indústrias químicas e os veículos.

Cheremisinoff (1992) ilustra na tabela (2.1) as principais fontes de poluentes. Nesta tabela os poluentes são apresentados em classes relacionadas com suas fontes de emissão destacando-se em maior quantidade os óxidos de carbono (CO_x).

Tabela 2.1 - Fontes de emissão dos principais poluentes atmosférico

milhões de toneladas por ano						
Fonte original	CO _x	SO _x	Hidrocarbo netos	Partículas	No _x	Total
Veículos	66	1	12	1	6	86
Indústria	2	9	4	6	2	23
Termelétricas	1	12	1	3	3	20
Aquecedores de edifício	2	3	1	1	1	8
Queima de carvão	1	1	1	1	1	5
Total	72	26	19	12	13	119

Fonte: Air Pollution Control and design . Cheremisinoff (1992)

Segundo Boubel (1994) o monóxido de carbono dos motores de combustão é o descarregado em maior quantidade, mas desaparece rapidamente no ar ambiente. Somente onde é descarregado em grandes volumes, como nas áreas de tráfego intenso, notam-se os seus efeitos.

Dentro da classe SO_x tem-se como mais importante na baixa atmosfera o SO₂

que resulta sobretudo, da queima de combustíveis fósseis como o petróleo e seus derivados. Outros emissores de SO_2 são as fábricas de ácido sulfúrico e as instalações de processamento de minérios com enxofre. A maior quantidade de dióxido de enxofre, no entanto é descarregada pelas usinas térmicas que queimam carvão mineral ou óleos residuais.

Os hidrocarbonetos, emitidos principalmente das descargas de automóveis, aparecem também na forma de solventes voláteis em muitos processos industriais e na combustão do ar livre de lixo imprópriamente tratado.

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) são descarregados por todos os processos de combustão, a maior parte provindo dos motores de automóveis. Os óxidos de nitrogênio inclui o (N_2O) óxido nitroso, (NO) óxido nítrico, (N_2O_3) trióxido de nitrogênio, (N_2O_4) tetróxido de nitrogênio, (N_2O_5) pentóxido de nitrogênio, (HNO_3) ácido nítrico e (HNO_2) ácidos nitrosos. Estes poluentes são importantes, principalmente na reação fotoquímica de formação de “smog” (densa fumaça, que altera a visibilidade) .

Os poluentes particulados são emitidos por vários tipos de fontes e as emissões são usualmente sólidas, mas em alguns casos constituídas por gotículas líquidas. Embora não sejam os emitidos em maior quantidade, são mais responsáveis, que qualquer outro agente de poluição, pela baixa visibilidade, pelo enodoamento das superfícies. A sua presença em teores excessivos pode realçar os efeitos danosos dos poluentes gasosos sobre as vias respiratórias, mediante o transporte de gases adsorvidos para o interior do organismo(Boubel, 1994)

2.3 - POLUENTES PARTICULADOS

Os poluentes particulados podem ser tanto líquidos como sólidos . Cheremisonoff (1992) cita que quando o poluente particulado é um líquido (gotícula) que se encontra disperso no ar, sua denominação usual é nevoa ou spray, cujas partículas estão na faixa de diâmetro de 0,1 a 5,0 μm . Partículas sprays são freqüentemente formadas intencionalmente em operações de indústrias química. Vapores podem condensar-se durante o seu transporte, através do ar, dando origem à névoas.

Quando o poluente particulado é um sólido disperso no ar, diferentes são as denominação usadas:

Poeira: são partículas sólidas finas formadas em operação de pulverização, com diâmetro na faixa de 1,0 a 1000 μm . As poeiras sedimentam-se pela ação da gravidade.

Cinzas são materiais finamente dividido geralmente provenientes do arraste de gases da combustão, com faixa de tamanho abaixo de 1 μm . Estas não sedimentam facilmente com a ação da gravidade. Lavadores “Scrubbers” ou ciclones são geralmente usados no controle de cinzas. Em algumas aplicações são usados precipitadores eletrostáticos com alta eficiência.

Fumos são partículas sólidas finamente divididas que são geralmente condensação de vapores, com diâmetro na faixa de 0,1 a 1 μm . Fumos na maioria das vezes são produtos de sublimação, destilação e processos com metal.

Fumaças são constituídas de materiais sólidos finos que são produtos de combustão incompleta de materiais orgânicos (madeira, carvão e tabaco). Fumaças possuem partículas são extremamente pequenas, que variam no tamanho de 0.01 a 1 μm . Fumaças muitas vezes são referidas a uma mistura de névoa natural e fumaça industrial.

Aerosóis são partículas pequenas, que podem ser tanto sólido como líquido, suspensas no ar. O tamanho das partículas variam de 0.01 a 100 μm (Nevers,1995). Segundo Abril (1980), os aerosóis podem ser partículas sólidas metálicas, silicatos, fumos metálicos, poeira minerais, gotículas ácidas ou de óleos de pinturas.

Boubel (1994) cita que as partículas (líquidas ou sólidas) são agregados de muitas moléculas que se espalham no ar por vários processos diferentes, algumas partículas servem como núcleo de vapores condensados, outras reagem quimicamente com gases ou vapores na atmosfera para formar compostos diferentes. Quando duas partículas colidem no ar, elas tendem a aderir uma a outra pelas forças de atração na superfície, deste modo formando progressivamente partículas maiores por aglomeração. As partículas, quanto maior seu tamanho e densidade mais facilmente sedimentam no ar atmosférico pela ação da gravidade.

Na atmosfera a quantidade de poluentes presente é bastante dinâmica. Tem-se a emissão contínua de partículas no ar por fontes naturais e das atividades humanas.

Tem-se a formação de partículas no ar através da condensação de vapores e formação por reação química de gases de evaporação. A remoção das partículas da atmosfera ocorre por fenômenos naturais como a chuva, granizo, neblina e cerração.

A chuva e o granizo agem como uma forma de lavagem do ar atmosférico quando partículas dispersas no ar podem ser coletadas por impactação nas gotas de chuva ou pedras de granizo. A neblina e a cerração podem também levar a limpeza do ar quando promovem a aglomeração de partículas dispersas que depois sedimentam.

2.3.1 - PROPRIEDADES DOS POLUENTES PARTICULADOS

Boubel (1994) cita que a maioria dos poluentes particulados na atmosfera possuem forma esféricas pois geralmente são formados por condensação. Outras importantes formas de partículas existentes na atmosfera, são as fibras longas, as cinzas e partículas de processo de moagem que podem ser de forma irregular.

Nevers (1995) cita que o diâmetro é uma propriedade óbvia de uma partícula esférica, mas não tão óbvia para uma partícula cúbica ou cilíndrica ou ainda irregular.

Para Leith, (1981) o tamanho da partícula é a propriedade mais importante em relação a qualificação do poluente. Para uma partícula esférica, esta definição é direta envolvendo uma simples dimensão - diâmetro geométrico da partícula(d). Este é o que obteremos se a partícula for analisada em um microscópio.

Se a partícula não for esférica, não existe uma única simples dimensão. Então é apropriado definir o tamanho da partícula em termos de um ou mais diâmetro equivalente. Por exemplo, diâmetro do volume equivalente(d_v), o diâmetro da esfera, que tem o mesmo volume da partícula em questão. Similarmente, tem-se o diâmetro equivalente da área projetada e diâmetro equivalente da área superficial.

A partir de considerações físicas, envolvendo não só d_v , mas também a densidade e forma, o diâmetro aerodinâmico (d_{ae}) emerge como uma propriedade de grande importância.

Svarosvky (1990) comenta que somente em casos práticos usualmente em condições laboratoriais controladas, os aerossóis existentes consistem de todas partículas serem de um único tamanho. Quando isso ocorre, são referidos como sistemas monodispersos. Geralmente os aerossóis como poluente consistem de

partículas de muitos tamanhos diferentes como sistema polidispersos.

Segundo Vicent (1989) a propriedade de interesse mais comum é a concentração mássica do aerosol (c), definida como a massa do material particulado contida em uma unidade de volume de ar. Isto é usualmente expresso em unidade de mg/m^3 . Uma propriedade de interesse prático em alguns casos é a concentração numérica, e também a distribuição do tamanho das partículas e composição química.

Segundo Nevers (1995) os poluentes particulados no ar atmosférico são classificados como PST que se referem a quantidade de particulados suspensos totais. Os particulados suspensos totais (PST) podem permanecer no ar por segundos e até minutos dependendo do seu tamanho. Partículas finas, do PST são chamadas de PM_{10} (material particulado menor que $10 \mu\text{m}$).

Partículas maiores que $1 \mu\text{m}$ apresentam uma alta velocidade de sedimentação e se movem independentes do vento, enquanto partículas menores que $1 \mu\text{m}$ mostram uma baixa velocidade de sedimentação e movimenta-se com o vento. O movimento das partículas menores que $0.1 \mu\text{m}$ assemelha-se com o do gás, essas partículas adsorvem gases, sofrem colisão uma com a outra onde são aderidas.

As partículas que permanecem suspensas no ar causando poluição estão geralmente na faixa de tamanho entre 0.01 a 10.0μ , que são as poeiras e os fumos. A maioria das partículas finas (0.1 a 10.0μ), são obtidos por combustão, evaporação ou processo de condensação.

Boubel (1994) comenta que muitos combustíveis contém alguns materiais que não sofrem combustão, chamados cinzas. As cinzas após a combustão da madeira, carvão, contém geralmente sílicas oxidadas, cálcio e alumínio, com traços de outros minerais. As partículas de cinzas nos gases de exaustão consiste de 2 grupos. Um grupo tem diâmetro distribuído em torno de 0.02μ , e outro em torno de 10μ . As partículas finas atraídas pelo contato físico direto, geralmente estão unidas pelas forças eletrostáticas e de Van der Waals. Forças eletrostáticas e de Van der Waals são em geral proporcionais a área superficial das partículas. A aglomeração também ocorre espontaneamente na atmosfera, partículas de tamanho médio (0.1 a 1.0μ) são formadas pela aglomeração de finas partículas e parcialmente pela conversão química de gases e vapores com partículas na atmosfera.

Kikuo (1977) cita que a poluição por chumbo dos escapes dos automóveis

representava o maior problema social. Visto que cerca de 70 % do chumbo no ar está na forma de partículas menores que $0.5\mu\text{m}$, essas podem facilmente penetrar no alvéolo pulmonar. Felizmente com a retirada do chumbo tetraetila da gasolina as concentrações de chumbo no ar diminuiu.

2.3.2 - FONTES DE EMISSÃO DE POLUENTES PARTICULADOS

Da mesma forma que os demais poluentes do ar atmosférico, os poluentes particulados, podem ser emitidos para a atmosfera por meio de fontes naturais e fontes antropogênicas ou seja fontes de atividades humanas.

Fontes naturais

Scheible (1973) comenta que uma parte significativa das partículas encontradas no ar ambiente é proveniente de fontes naturais. Um vulcão em erupção emite material particulado e gases poluentes (SO_2 , H_2S e metano). A emissão de uma erupção pode ser transportada ao ambiente por uma grande distância à partir da fonte vulcânica. Nuvens de particulados vulcânicos, assim como gases permanecem no ar por longos períodos de tempo.

Segundo Boubel (1994) os incêndios florestais acidentais são usualmente classificados como fontes naturais, na maioria das vezes são originados de atividades humanas. Um grande incêndio florestal incontrolado emite grande quantidade de poluentes particulados (fumaça, cinzas) e gasosos (hidrocarbonetos, monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio).

Os oceanos são uma importante fonte natural de poluentes particulados. O oceano está continuamente emitindo aerossóis para a atmosfera, na forma de partículas, que são corrosivas para metais. Aerossóis provenientes do mar, pólenes, poeira levantada pelos ventos, fungos, algas, leveduras, bactérias, fragmentos resultantes de decomposição de plantas e animais; partículas carregadas pelo vento das praias, deserto, solo e poeira proveniente de outros processos naturais,

contribuem substancialmente para a carga de partículas presentes no ar.

Fontes de atividades humanas

Scheible (1973) cita que as fontes de emissão de partículas podem ser divididas em duas categorias. A primeira categoria inclui as emissões devidas aos processos de combustão industrial e constitui a principal fonte de emissão de partículas. A segunda categoria inclui as emissões resultantes da concentração das atividades humanas geralmente em zonas urbanas. A tabela 2.1 ilustra esta situação, encaixando-se na primeira categoria as emissões das termoelétricas e grande parte das indústrias.

Os incineradores prediais de lixo constituem uma importante fonte de emissão de partícula, através de chaminés. Queima de lixo ao ar livre, tanto em aterros como na agricultura, também contribui para a emissão de partículas

Um estudo, da emissão das indústrias consideradas com maior potencial de poluição, mostrou que a atividade industrial constitui a maior fonte de emissão de partículas (vide tabela 2.1). Os principais contribuintes são as pedreiras, fundição e produção de ferro e aço, fabricação de cimento, torrefação de café e fabricação de asfalto. Outros processos industriais como: carpintarias, fabricação de vidro e sabão, contribuem em menor escala para a emissão de partículas (Scheible M.H., 1973).

Boubel (1994) cita que as emissões provenientes de processos químicos podem ser relatadas como processos específicos. Dependendo do processo as emissões poderão ser de qualquer um ou uma combinação de poeiras, aerossóis, fumos, ou gases. As emissões podem ou não ser tóxicas ou possuir odores. Ácidos são usados como matéria-prima para muitos processos químicos e operações de manufaturas. Ácido sulfúrico é um dos poluentes químicos na indústria moderna. As descargas na atmosfera de uma indústria de ácido sulfúrico podem conter gases incluindo SO_2 e aerossol, contendo SO_3 e H_2SO_4 na faixa de tamanho submicron $10\mu\text{m}$. Outros processos que produzem ácido, como ácido nítrico, acético e fosfórico emitem poeira ácida bem como vários gases tóxicos e não tóxicos.

Tem-se também a emissão de partículas causada pela concentração das atividades humanas, em área urbana, tais como as emissões produzidas pela construção de novos prédios, operações de demolição e construção de estradas (Scheible M.H., 1973).

Verifica-se que a grande maioria de emissão de particulados (tabela 2.1) provem de processos envolvendo combustão industrial, sendo que a emissão desses poluentes na atmosfera ocorre pela descarga produzida por chaminés.

2.3.3 - DANOS CAUSADOS PELA POLUIÇÃO DE PARTICULADOS

Efeitos na saúde humana

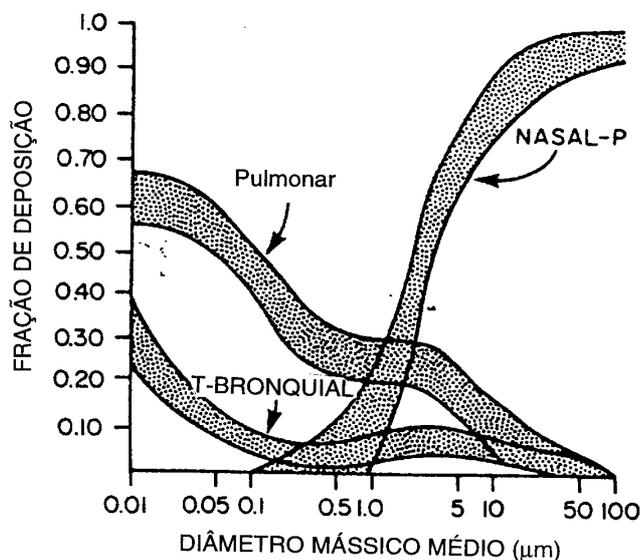
(Boubel,1994) comenta que o efeito da poluição do ar vem a ser a maior razão dos esforços para compreender e controlar suas fontes. Os danos causados na saúde humana pela poluição do ar são de muitos tipos diferentes. Os materiais envolvidos não são liberados em concentrações necessariamente altas, mas seus efeitos normalmente não resultam somente de uma simples exposição de baixas concentrações, mas por longo período.

A emissão de poluentes particulados, no caso dos aerossóis, já é danosa as vias respiratórias dos seres vivos. Este apresenta um agravante de servirem como veículo para entrada no organismo, de outros poluentes adsorvidos na superfície.

A ação das partículas no pulmão é dependente das características aerodinâmicas das partículas nas linhas de fluxo. Ao contrário, o maior fator para os gases é a solubilidade das moléculas gasosas nos revestimentos das diferentes regiões do sistema respiratórios. As propriedades aerodinâmicas das partículas são relatadas em relação ao seu tamanho, forma e densidade.

A deposição das partículas nas diferentes regiões do sistema respiratório depende do seu tamanho. Sabe-se que as partículas na atmosfera podem estar na faixa de menor que $0.01\mu\text{m}$ a maior que $50\mu\text{m}$ em diâmetro.

A relação entre o tamanho aerodinâmico das partículas e as regiões onde elas se depositam é mostrada na figura 2.1. Considerando a relação entre o diâmetro das partículas e sua precipitação no alvéolo pulmonar, sabe-se que as partículas grandes são incapazes de penetrar nas vias estreitas da garganta, mas as partículas pequenas facilmente atingem o alvéolo pulmonar.



Fonte : Fundamental of Air Pollution. (Boubel, R. 1994)

Figura 2.1 - Relação entre o tamanho aerodinâmico das partículas e as regiões e a deposição no sistema respiratório humano.

Segundo Kikuo (1977) as partículas grandes são depositadas na região nasal por impactação nos cabelos do nariz e nos desvios nas passagens nasal. Partículas pequenas passam através da região nasal e são depositadas na traquéia brônquial e regiões pulmonares. Partículas maiores que 10 µm são geralmente adsorvidas pela cavidade nasal e garganta, enquanto que 90% das partículas maiores que 5µm precipitam nas partes superiores das vias respiratórias. Partículas de tamanho entre 1 e 5µm precipitam na traquéia e brônquios. Partículas finas menores que 1µm alcançam os brônquios e os alvéolos.

Nevers (1995) cita que os efeitos atribuídos a poluição do ar varia desde irritação nos olhos até mortalidade. Um recente estudo epidemiológico, mostrou um significativo aumento na média da mortalidade com o aumento da concentração de partículas finas, incluindo neste estudo que eram concentração previamente supostas não produzir efeitos prejudiciais. Um exemplo recente desse tipo de estudo em uma pequena área metropolitana mostrou um aumento significativo na média diária de mortes com o aumento da concentração de partículas finas. Em muitos casos, os

efeitos são para agravar doenças ou desenvolver doenças respiratórias crônicas. Alguns efeitos associados também aos poluentes particulados são o aumento prevalente de doenças respiratórias agudas, tosses e alergias.

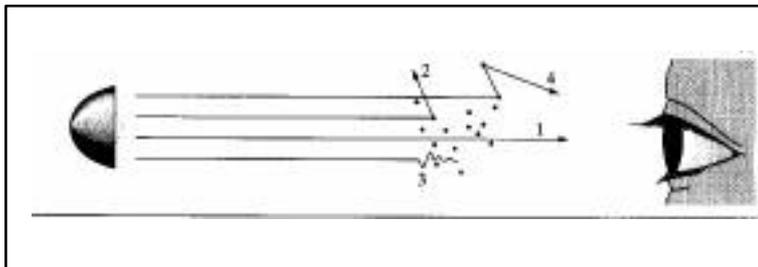
Efeitos nas estruturas

Nevers (1995) comenta que muitas estruturas (edifícios, monumentos) em cidades tem sido expostos a fumaça urbana. As partículas, os fumos, as cinzas se depositam nas superfícies das estruturas, causando manchas enegrecidas, que levam ao desgaste de sua superfície, devido a necessidade de lavagem para remover o material encrustado.

Se a superfície da estrutura for metálica e o material particulado que se deposita tiver caracter corrosivo este inicia um processo de deterioração do material em que se deposita, sendo que este processo é agravado pela umidade do ar.

Efeitos na visibilidade

Nevers (1995) destaca os efeitos visíveis da poluição do ar, que são causados pela interação da luz com partículas suspensas.



Fonte: Air Pollution Control Engineering. (Nevers,. 1995)

Figura 2.2 - Possíveis interações dos fótons de luz com as partículas: luz caminhando de uma fonte até os olhos.

A figura 2.2 mostra as possíveis interações de um fóton de luz com as partículas na atmosfera. Nesta figura ilustra-se a luz desde uma fonte até os olhos. Alguns dos fótons de luz (1) caminham diretamente para o olho; e os olhos podem vê-lo. Alguns (2) são dispersos pelas partículas existentes entre a fonte de luz e os olhos; e os olhos não podem ver os fótons. Alguns fótons (3) são absorvidos pelas partículas; e os olhos não podem ver esses outros fótons. Alguns (4) são dispersos pelas

partículas, uma vez que mais partículas dispersam esse fóton, esses caminham para o olho de uma direção diferente da fonte de luz. De certa forma, um fóton é absorvido ou disperso por uma partícula. Se o diâmetro da partícula é muito maior do que o comprimento de luz este será absorvido. Se o diâmetro da partícula é muito menor do que o comprimento este passará direto pela partícula, nenhum fóton será disperso ou absorvido. Se a partícula tiver aproximadamente o tamanho do fóton este será disperso.

Moléculas de gás, partículas muito pequenas ($d \approx 0.0005 \mu = 0.5\text{nm}$), elas também dispersam a luz (fenômeno chamado dispersão Rayleigh) mas não necessariamente tão eficiente como partículas com diâmetro obstruído para um comprimento de luz visível (≈ 0.3 a 0.6μ).

A figura 2.3 mostra a falta visibilidade causada por um “smog” urbano, cidade encontra-se rodeada por uma neblina pesada e contendo muitas partículas finas.



Fonte: Air Pollution Control Engineering. (Nevers,n. 1995)

Figura 2.3 - Duas vistas da cidade de Los Angeles: (a) um dia com ventos fortes numa área de edifícios não poluída uma região de ar limpo; (b) durante uma manhã com uma forte inversão térmica

Essa neblina pesada e visível dispersa a imagem dos edifícios e ruas, isto ocorre porque a luz do sol é dispersa dos olhos. As partículas finas na segunda foto são na maioria produzidas na atmosfera por reações químicas entre poluentes primários emitidos por atividade humanas. Há fontes não humanas de poluentes visíveis prejudiciais bem como, partículas secundárias formadas a partir de hidrocarbonetos emitidos pela vegetação, poeiras carregadas pelo vento e partículas finas de sal emitidas pelos oceanos. Na maioria das cidades particularmente durante períodos de poucos ventos, essas partículas, emitidas por atividade humana, pode causar uma neblina muito perceptível.

Visibilidade é normalmente melhor em climas secos que em climas úmidos, por que as partículas finas absorvem umidade da atmosfera e estas aumentam de tamanho, as quais são mais eficientes na dispersão da luz.

As propriedades de dispersão e absorção da luz das partículas são usadas como um meio de estimar as emissões de partículas em fumaças das chaminés e outras fontes. Esse fenômeno é chamado opacidade. Nas cidades, essas neblinas alertam o público ao fato de poluentes invisíveis estarem provavelmente também presentes.

Visibilidade também é afetada pela alteração do diâmetro das partículas devido ao crescimento das partículas higroscópicas. Boubel, (1994) apresentou um estudo da visibilidade e relatou que ambas, a umidade e ar de origem marinha, reduz a visibilidade do ar. Esse efeito é presumidamente devido a aerossóis higroscópicos de fontes de poluição do ar.

2.3.4 - QUALIDADE DO AR EM RELAÇÃO AOS POLUENTES PARTICULADOS

Critérios da qualidade do ar

Boubel (1994) cita os critérios da qualidade do ar como sendo relações de causa efeito, observados experimentalmente, epidemiologicamente ou em um campo visual,

da exposição de vários níveis de concentração de poluentes específicos.

Para alguns poluentes os critérios da qualidade do ar, pode encaminhar a diferentes tipos de efeito. Podemos observar na tabela 2.2, que lista os efeitos na saúde humana e visibilidade, causadas pela exposição do material particulado. Esses dados são à partir do critério da qualidade do ar para esse poluente, publicados pela “U.S. Environmental Protection Agency (EPA)”.

Os critérios descrevem os efeitos que podem ser esperados se o poluente exceder uma concentração específica para um período de tempo particular.

Padrões da qualidade do ar

Nevers (1995) cita os padrões da qualidade do ar que prescrevem níveis de poluentes que não podem legalmente ser excedidos durante um período de tempo específico em uma área específica. Os padrões são baseados nos critérios da qualidade do ar, que aumentam em fatores de segurança como se deseja.

No Brasil, segundo a legislação especificada pelo CONAMA (1990), são padrões da qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosférico que se, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

Nesta legislação, entende-se como poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que ou possam tornar o ar :

I - impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde:

II - inconveniente ao bem-estar público:

III - danoso aos materiais, à fauna e flora:

IV - prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

Estabelece-se os seguintes conceitos:

I - Padrões Primários da Qualidade do Ar são concentrações de poluentes que ultrapassadas poderão afetar a saúde da população.

II - Padrões Secundários de Qualidade do Ar são as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem - estar da população,

assim como o mínimo dano à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

Os Padrões de Qualidade do ar serão o objetivo a ser atingido mediante a estratégia de controle fixada pelos padrões de emissão e deverão orientar a elaboração de projetos de controle de poluição.

A lei número 8490 CONAMA (1990) estabelece os seguintes padrões de qualidade do ar para poluentes particulados:

I - Partículas Totais em Suspensão

a - Padrão Primário

1- concentração média geométrica anual de $80 \mu\text{m}/\text{m}^3$ de ar:

2- concentração média de 24 horas de $240 \mu\text{m}/\text{m}^3$ de ar:

b - Padrão Secundário

1 - concentração média geométrica anual de $60 \mu\text{m}/\text{m}^3$ de ar:

2- concentração média de 24 horas de $150 \mu\text{m}/\text{m}^3$ de ar, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

II - Fumaça:

a - Padrão Primário

1 - concentração média aritmética anual de $60 \mu\text{m}/\text{m}^3$ de ar, que não deve ser excedido mais de uma vez por ano.

2- concentração média de 24 horas de $150 \mu\text{m}/\text{m}^3$ de ar, que não deve ser excedido mais de uma vez por ano.

b - Padrão Secundário

1- concentração média aritmética anual de $40 \mu\text{m}/\text{m}^3$:

2- concentração média aritmética anual de 24 horas de $100 \mu\text{m}/\text{m}^3$ de ar, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

III - Partículas Inaláveis

a - Padrão Primário e Secundário

1 - concentração média aritmética anual de $50 \mu\text{m}/\text{m}^3$ de ar:

2 - concentração média de 24 horas de $150 \mu\text{m}/\text{m}^3$ de ar, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

Tabela 2.2 - Efeitos da poluição no ar na saúde humana e visibilidade

Concentração de material particulados no ar (μm)				
Total Susp. PTS > 25 μm	Torácico PT > 10 μm	Finas PF > 2,5 μm	Tempo de exposição	Sintomas humanos e efeitos na visibilidade
2000	-	-	2 h	Desconforto pessoal
1000	-	-	10 min.	Mudanças no mecanismo de direção respiratória
	350	-		Agravamento de bronquites
	150	-	24 h	1ª Lei Nacional Americana dos padrões de qualidade do ar ambiental em setembro de 1987
180	90	-		Aumento de sintomas de doenças respiratórias
	150	-	24 h	1ª Lei Nacional Americana dos padrões de qualidade do ar ambiental em setembro de 1987
110	55	-	24 h	Aumento dos riscos de doenças respiratórias
	50	-	Média geométrica anual	1ª Lei Nacional Americana dos padrões de qualidade do ar ambiental em setembro de 1987
	50	-	Média geométrica anual	2ª Lei Nacional Americana dos padrões de qualidade do ar ambiental em setembro de 1987
-	-	22	13 semanas	Usual visibilidade no verão do leste dos Estados, em áreas não urbanas

Fonte: Fundamentals of Air Pollution, Boubel, (1994)

2.3.5 - EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE EMISSÃO DE POLUENTES PARTICULADOS

Segundo Veeramani e Vasani (1983) para os processos industriais que emitem poluentes particulados, diversos são os equipamentos de controle existentes que podem evitar e ou minimizar a emissão de partículas.

A seleção desses equipamentos de controle é baseada na eficiência de coleta desejada, flexibilidade operacional, material de construção, custo capital, custo de instalação e de operação.

No caso de coleta de partículas em equipamentos cujos mecanismos gravitacionais e de impacto inercial se fazem presente tem-se que o aumento do diâmetro da partícula aumenta a eficiência de coleta. A tabela 2.3 ilustra este fato, também mostrando vários equipamentos que podem ser usados para controle de emissão de particulados.

Tabela 2.3 - Influência do tamanho de partícula na eficiência de coleta.

Equipamento	Eficiência %		
	50 μm^*	5 μm^*	1 μm^*
Câmara de sedimentação	95	16	3
Ciclone(média eficiência)	94	27	8
ciclone (alta eficiência)	96	73	27
Filtro	100	99	99
Venturi Scrubber	100	99	97
Scrubber leito	100	99	60

fluidizado

 Fonte: Sampling Methodology and control Strategy for Particulates Emissions. (Veeramany 1983)

 μm^* = diâmetro equivalente

A câmara de sedimentação e ciclones são usados como pré-separadores e na remoção de partículas finas (1-20 μm) aconselha-se o uso de equipamentos de mais eficiência. Observa-se que partículas pequenas são mais difíceis de ser coletadas, em equipamento de controle, e justamente essas são as mais prejudiciais a saúde humana.

Muitas vezes o projeto desses equipamentos especifica uma eficiência a ser atingida, para atender o padrão de qualidade do ar, o que não vem a ocorrer de fato, sendo então muitas vezes necessário determinar a eficiência de coleta desses equipamentos de forma experimental.

A determinação da eficiência de um equipamento qualquer de controle de emissão de partículas, é descrito pela equação:

$$h = 1 - \frac{C_s}{C_e} \quad (2.1)$$

Sendo a eficiência função do diâmetro da partícula tem-se:

$$h(d_p) = 1 - \frac{C_s(d_p)}{C_e(d_e)} = 1 - \frac{C_{Ts} f(d_p)_s}{C_{Te} f(d_p)_e} \quad (2.2)$$

Onde η é a eficiência de coleta ; C_s é a concentração de saída; C_e é a concentração de entrada; $f(d_p)$ é a freqüência de saída e entrada em relação distribuição de tamanho.

De acordo com as expressões (2.1) e (2.2), para a determinação da eficiência é necessário realizar-se amostragem na entrada e saída do equipamento de coleta, visando a obtenção das respectivas concentrações.

2.4 - AMOSTRAGEM DE POLUENTES PARTICULADOS

Num programa de controle de emissão de poluentes particulados, além da dificuldade de se adequar equipamentos de controle ambiental, depara-se também com a dificuldade de se monitorar a quantidade de poluentes emitidos na atmosfera.

A partir do monitoração/amostragem verifica-se a qualidade do ar. Se as concentrações de poluentes são inferiores a dos especificados em padrões secundários o ar possui qualidade. Se as concentrações dos poluentes encontram-se entre os limites primários e secundários a qualidade do ar em termos desejáveis não foi atingido. Para se atingir os níveis desejáveis de concentração, deve ser elaborado programas e projetos de controle junto as fontes, objetivando a redução das emissões.

Se a concentração de poluentes estão acima dos valores especificados pelos padrões primários tem-se situação de emergência, ou alerta sob essas condições providências por parte do governo, estado e município devem ser tomadas para prevenir graves e emitentes riscos a saúde das população e ao ambiente.

Nevers (1995) cita que existem basicamente dois grupos de amostragens, requeridos dentro de um programa de controle ambiental:

1 - amostragem do ar ambiente para monitoração da qualidade do ar;

2 - amostragem na fonte

No primeiro grupo objetiva-se a determinação da concentração do ar público, ou monitoração ambiental, geralmente para verificar se a concentração dos poluentes encontram-se dentro de padrão primário e secundário.

No segundo grupo objetiva-se a determinação de taxas de emissão de uma fonte poluidora.

Taxa de emissão = vazão • concentração

Taxa de emissão = [m³/h] • [g/m³]

[M/T] = [L³/T] • [M/L³]

No caso de processos que envolvem, por exemplo combustão, a taxa de emissão de partículas na atmosfera pode ser feita com medidas em loco em chaminés, determinando a concentração das partículas no gás efluente e vazão do mesmo:

A partir da taxa de emissão é possível verificar se o processo apresenta fator de emissão compatível com o programa de controle para atender os padrões estabelecidos para qualidade do ar.

2.4.1 - AMOSTRAGEM DO AR AMBIENTE

Segundo Boubel (1994) quando se realiza uma amostragem de partículas na atmosfera três tipos de informações são requeridas: a concentração mássica, o tamanho e composição das partículas. O maior interesse da amostragem de particulados no ambiente é para obter a concentração e dados de composição química, preferivelmente como uma função do diâmetro da partícula. Essa informação é valiosa para uma variedade de problemas que tem efeito na saúde humana, para identificação de fontes de material particulado, estudo da neblina atmosférica e processo de remoção de partículas.

A amostragem do ar ambiente para verificar as concentrações de partículas presentes consiste na sucção de um volume de ar através de um bocal amostrador e coletar estas partículas em um equipamento denominado coletor. A sucção de um volume de ar conhecido, por tempo determinado juntamente com o conhecimento da quantidade de material coletado permite determinar a concentração do material particulado presente no ar.

Allen (1981) e Veeramani e Vasani (1983) citam que o equipamento coletor para um sistema de amostragem pode ser por exemplo um filtro de partículas, ciclone ou qualquer outro equipamento de coleta, os quais são convenientemente agrupados por mecanismos de coleta em: separadores gravitacionais, separadores centrífugos, lavadores Scrubbers, filtros e precipitadores eletrostáticos, sendo a performance de coleta desses coletores dependente da distribuição de tamanhos das partículas.

Problemas relacionados com a amostragem de poluentes são apresentados na literatura. Segundo Nevers (1995) a amostragem no ar ambiente envolve dois problemas: a dificuldade em obter uma amostra representativa e a necessidade de determinar a concentração de poluente corretamente. Boubel (1994) cita a dificuldade de se obter uma representatividade do ar atmosférico em local específico por determinado tempo, para a avaliação da massa, ou volume ou concentração dos

poluentes. No caso de partículas, Garland e Nicholson (1977), comentam que na prática a amostragem do ar pode estimar concentrações errôneas pelas seguintes razões; durante o tempo de amostragem, as partículas podem se perder por sedimentação. Contudo o problema mais relevante para amostragem de partículas carregadas pelo ar é a quebra dessas no bocal de entrada do amostrador, devido aos efeitos inerciais.

2.4.2 - ANÁLISE E MEDIDAS DE POLUENTES PARTICULADOS

Com a amostra do material coletado no equipamento coletor pode-se determinar o tamanho, a concentração e a composição química do material particulado disperso no ar. Se o coletor é do tipo filtro, o material particulado coletado sobre a superfície do filtro pode ser analisado em termos de sua distribuição de tamanhos, usando-se técnica específica: pipeta de Andreasen, sedígrafo, microscopia etc. Entretanto, esse procedimento de analisar material coletado sobre filtro pode levar a alguns erros na distribuição obtida principalmente se o material é aglomerável ou friável em relação ao seu estado disperso.

Muitas vezes o equipamento coletor é tal que possibilita que as partículas sejam coletadas e ao mesmo tempo classificadas em diversas faixas de tamanho, permitindo dessa forma obter a concentração de partículas para diversos tamanhos de sua distribuição. Exemplo disto é o uso de impactadores de multiestágio, cada estágio remove partículas de faixa de diâmetros progressivamente menores. As partículas coletadas em cada estágio são pesadas, sendo obtida a distribuição de tamanho por massa em função de diâmetro de corte de cada estágio (Gimenes, 1992). Impactadores são utilizados para determinar distribuição de tamanho de partículas de aproximadamente 0,1 μm e maiores.

Na amostragem do ar industrial ou ar ambiente além dos impactadores de cascata ou multiestágio é muito comum a utilização de instrumento de análise direta que detecta partículas transportadas pelo ar "in situ". Estes instrumentos podem proporcionar a distribuição de tamanho das partículas envolvidas na amostragem através de um relacionamento com propriedades físicas ou óticas. Svarovsky (1990) e

Allen (1981) apresentam vários tipos de equipamentos que proporcionam a distribuição de tamanho de partículas transportadas pelo ar “in situ”. Dentre esses equipamentos são bastante comuns os que usam propriedades da dispersão da luz. Segundo Svarovsky (1990) os métodos mais modernos de medidas de tamanho de partículas são aqueles de respostas rápidas e instrumentação on-line. Em particular, instrumentos a laser é de grande importância dentro dessa categoria, apesar destes necessitarem de “suspensões diluídas” (suspensões cujo valor de concentração esteja abaixo de $0,999 \text{ g/m}^3$). Dentre estes se encontram os contadores de partículas, nos quais as partículas interagem individualmente com um feixe de luz dispersando-a de seu ângulo original. A intensidade da luz dispersa é uma função do diâmetro e do índice de refração da partícula. Este equipamento deve ser calibrado e pode ser usado para medidas de poluição do ar ambiente e medidas on-line.

Wileke e Baron (1990) sugere que o tipo de monitor a ser utilizado depende do interesse na amostra. Sendo assim numa amostragem de partículas pequenas, com o intuito de obter uma distribuição de tamanho por número, o uso de um contador de partículas é conveniente. O contador ótico de partícula utiliza propriedades óticas de partículas individuais para discriminação do seu tamanho. Baseado em específicas faixas de tamanho determina com precisão a distribuição de tamanho de partículas registradas. O tipo de resposta é dado por histogramas ou curvas cumulativas.

A distribuição do tamanho do aerosol e, o número registrado ou concentração, podem ser afetadas pelas condições da amostragem, características dos bocais de amostragem, pelo transporte da amostra até o sensor e o próprio sensor. Durante a amostragem o aerosol entra no bocal de amostragem conectado ao canal do monitor de partículas, a razão da velocidade do ar ambiente para a velocidade de amostragem, a turbulência do ar, o tamanho, a forma e a orientação do bocal pode afetar a eficiência de amostragem, ou seja as contagens das partículas. Tratando-se de instrumentos de medição ótica de partículas deve-se se atentar ao fato de que somente uma partícula deverá passar de tempo em tempo através do sensor. No caso de um sistema de fluxo de gás ser pouco diluído, e mais de uma partícula coincidente passar pelo sensor, este somente registra uma partícula, a qual tem maior tamanho. Se as partículas são coincidentes, ou seja, presença simultânea de duas ou mais partículas no visor pode resultar na detecção de uma única partícula grande, produzindo uma pequena alteração para grandes e reduzindo o número de partículas

pequenas, afetando toda a faixa de tamanho. Com o aumento da concentração aumenta o efeito de coincidência. Esse tipo de coincidência produz uma contagem deficiente de todos os tamanhos de partículas detectadas. Esse erro de contagem pode ser importante se a distribuição de tamanho por número é convertida para uma distribuição de tamanho por massa (umas poucas partículas grandes podem exceder um valor para o resto da distribuição) ou se isso é usado para comparação de medidas.

Considerando o uso de contador ótico para amostragem de partículas dispersas no ambiente ou em dutos tem-se a vantagem deste fornecer resultados com rapidez e de apresentar os resultados em forma de distribuição de tamanho de partículas diretamente, comparado a outros coletores que necessitam de análise gravimétrica. Como a maioria destes equipamentos fornecem resultados de distribuição de tamanho por número, uma desvantagem, está na necessidade de se converter este tipo de distribuição para uma distribuição por massa.

2.4 3 - AMOSTRAGEM DE POLUENTES PARTICULADOS EM DUTOS

Assim como a amostragem de poluentes particulados na atmosfera, a amostragem de partículas dispersas em correntes gasosas em dutos, também envolve a extração de um volume de gás transportando partículas. O volume de gás é aspirado por um sistema de amostragem, que consiste de bocais e sondas sendo levado a um coletor ou sensor para quantificação das partículas.

Mas tratando-se de amostragem em dutos, as técnicas utilizadas são mais elaboradas e exigem uma maior representatividade dos dados obtidos. Num processo de amostragem em dutos existem dificuldades na representatividade da amostra, na localização da amostragem ao longo do duto e nas medições dos pontos específicos de amostragem. Devido estar-se lidando com sistemas confinado (alta concentração e alta taxa de emissão) as variações locais da concentração no duto são muito importante no cômputo da taxa de emissão.

Santen (1987) relatou que a normalização do monitoração em dutos tem suas

origens nos Padrões Britânicos de 1940 (BS 893). Tratava-se especificamente de emissões de queima de carvão das estações de energia, mas nos informou sobre amostragem isocinética em múltiplos pontos. Esta norma se constituiu como base de numerosos outros padrões ou normas nacionais e internacionais. Com o aumento do controle das emissões de poluentes, notavelmente como um resultado de “Clean Air acts de 1956 e 1968” e do “Control Pollution Act de 1974”, as normas de 1940 foram revisadas para abranger o problema do monitoração em dutos com o título “Métodos de medidas de concentração de material particulado em dutos, carregados por gases”. As normas refletem suas origens de forma a ser trabalhosa e dispendiosa para aplicações industriais.

Um método simplificado dos padrões Britânicos (BS 3405), teve sua primeira edição em 1961 e uma nova edição em 1983, a qual é citada mais comumente. Este método difere principalmente por requerer menos pontos de amostragem. Como tal tem uma precisão mais baixa (25%) porém consome um tempo menor, por isso permite uma maior variabilidade entre as velocidades de pontos, é aplicável em uma larga faixa de processos e situações de monitoração.

As medidas de particulados em dutos não é realizada somente como amostragem em chaminé. Crescentemente isso envolve processos de monitoração de tamanho de partículas e concentração de partículas em dutos. Este pode ser contínuo e intermitente ou ocasional. As partículas dispersas em dutos podem ser sólidas líquidas ou misturas, e varrem uma faixa de tamanho de milímetros para tipicamente $0.01\mu\text{m}$.

Santen (1987) comenta que as principais razões para uma amostragem na fonte são para avaliar os níveis de emissão do ar, amostragem para determinar se um sistema adequado requer ou não um projeto de controle de poluição, amostragem para desenvolver uma base de dados para referências futuras.

Os testes de amostragem em dutos são necessários para garantir informações que podem selecionar um equipamento de controle apropriado, determinar a eficiência de um equipamento de controle instalado numa planta para reduzir as emissões (Nevers.1995).

Tratando-se de equipamentos de controle de poluição, no item 2.3.5 se demonstrou uma das aplicações de amostragem em dutos para a determinação da eficiências de coleta.

Segundo Nevers (1995) para particulados a caracterização das fontes é efetuada por amostragem dos gases transportando partículas, ao longo do duto. Em posições fixadas em locais específicos no duto (posições de amostragem), se insere uma sonda de amostragem alinhada perpendicularmente com as linhas de corrente.

As medidas do fluxo de gás são muito importante para os testes de emissão das fontes. O volume do efluente gasoso de uma fonte é determinado para obter a massa carregada para a atmosfera. Medida de fluxo durante a amostragem é necessário para obter o volume do gás, contendo o poluente de interesse.

Muitos projetos de amostragem usados para teste de fonte tem associados aos indicadores de fluxo de gás, os quais devem ser continuamente checados e calibrados.

A quantidade de resíduo de efluente gasoso em um processo é usualmente calculado a partir da equação da continuidade:

$$Q = A \cdot V \quad (2.3)$$

Onde : Q é a vazão de gás, nas condições específicas de temperatura, umidade e pressão; A é a área através do qual o fluxo esta escoando; V velocidade do efluente gasoso.

Boubel (1994) sugere determinar a velocidade em vários pontos, em áreas centrais e iguais no duto e calcular a velocidade média. Em muitos testes de fontes, as medidas de velocidade é feita com o tubo de Pitot de uso comum. As velocidades são averiguadas para todos os pontos da seção transversal para determinar a velocidade do gás no duto.

Cheremisinoff, (1993) cita que para dutos com velocidade menor que 10 ft/s, pode-se usar anemômetros como medidor de velocidade. Todavia, na maioria dos casos, as velocidades da mistura são maiores que isto, e deve usar preferivelmente um tubo de Pitot. Estes são inseridos perpendicularmente a direção do fluxo, no duto e mede a pressão estática. Estas são relacionados com as velocidades de gás por:

$$V = k * (2 * g_c * \Delta P / \rho) \quad (2.4)$$

Sendo que, V é a velocidade do gás; g_c é o fator de conversão da lei de Newton;

ρ é a densidade do gás; ΔP queda de pressão e k fator de calibração do tubo de Pitot.

Segundo Allen (1981) uns dos procedimentos básicos para uma amostragem de poeiras em corrente gasosa é a medida de velocidade e temperatura no interior do duto. A variação de temperatura medida nos pontos de amostragem não deve exceder a 10%.

Optando pelo uso de um Pitot padrão, este requer um sistema de limpeza constante pois os pequenos orifícios de medidas da pressão estática podem ser entupidos pelos particulados.

Santen (1987) recomenda uma inspeção preliminar dos perfis de velocidade e de temperatura. Geralmente cerca de 10 pontos igualmente espaçados ao longo de cada linha de amostragem proposta, são indicados na obtenção de valores representativos. As medidas de velocidade e temperatura ao longo de cada linha de amostragem deverá ser feita, em ordem para confirmar se as mudanças inesperadas no fluxo ou temperatura tenham ocorrido a partir da inspeção preliminar.

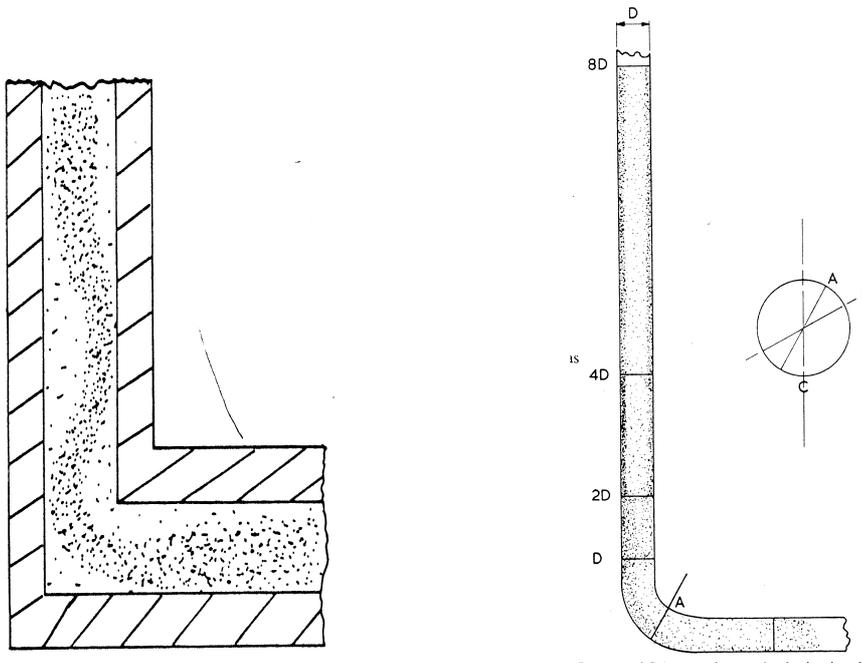
2.4.4 - LOCALIZAÇÃO DA AMOSTRA

Em um duto pode não existir uniformidade do fluxo de gás, conseqüentemente não uniformidade da concentração de partículas e de seu tamanho.

As amostras podem ser obtidas na seção transversal em uma posição ao longo do duto para representar o total de pó carregado, mas somente se o perfil de velocidade e concentração são uniformes eles representam o duto como um todo.

Allen (1981) cita que as amostras representativas são extremamente difíceis de se obter, pois quaisquer obstrução no escoamento pode criar turbulência e uma carga de poeira assimétrica. A figura 2.4 ilustra a uniformidade da poeira dentro de dutos.

A figura 2.4 ilustra como as partículas são transportadas em fluxo gasoso em dutos. À esquerda nesta figura tem-se um duto retangular, onde esta ilustrado o percurso das partículas próximo a uma curva. Nota-se a não uniformidade das partículas no interior do duto. Em um duto circular (figura à direita), tem-se as distâncias em termos de diâmetros, onde tem-se uniformidade no fluxo quanto a distribuição das partículas.



Fonte: Sampling of dust gases in gas streams. Allen, (1981)

Figura 2.4 ilustra as distâncias recomendadas para amostragem

Santen (1987) sugere a instalação de um “baffle” no interior do duto, para produzir perfis de velocidade e concentração suficientemente uniformes para obter valores exatos em um único ponto de amostragem, localizado entre 3 e 5 diâmetros do duto, corrente abaixo da localização do “baffle”.

Nevers (1995) e BS 3405 (1983) comentam que mesmo na ausência de obstáculos, a concentração de poeira pode não ser uniforme ao longo de todo o duto. Assim aconselha-se realizar a amostragem em várias posições ao longo do duto. A posição de amostragem ideal seria a mais próxima possível do ponto de descarga a fim de determinar a emissão total. Como isso seria impraticável, a posição deveria ser tão perto quando possível da saída. A carga de pó é raramente distribuída uniformemente na seção transversal do duto e esta não uniformidade é gerada pela turbulência do gás. Os distúrbios são causados pelas entradas, saídas, curvas e restrições, afim de minimizar os efeitos causados por estes, deve-se selecionar 8 a 10 diâmetros de fluxo corrente abaixo e 3 a 5 diâmetros acima do distúrbio.

As diferenças na velocidade e concentração das partículas de lugar para lugar no duto são substanciais. Se as medidas de velocidade e concentração forem feitas somente em um ponto do duto, ou próximo a uma curva o que seria contado é muito

abaixo da vazão total do gás e da taxa de emissão com os valores verdadeiros.

Santen (1987) sugere como forma de evitar a não uniformidade do fluxo no duto causado por flanges, curvas, restrições, cotovelos, etc..., que os soquetes de amostragem deverão ser localizados 8 diâmetros corrente acima e 2 corrente abaixo, desses distúrbios de fluxo. Caso não seja possível de conseguir essa localização ideal, os soquetes de amostragem, poderão ser localizados o mais longe possível em linha reta do duto avaliado, e uma razão de 4:1 mantida entre as distancias da corrente acima e corrente abaixo próxima de uma curva, ou distúrbios e fluxos.

Na seleção da localização das medidas, a amostragem do gás com medidas de velocidade é melhor localizados a 8 diâmetros do duto corrente abaixo e 2 diâmetros corrente de algum distúrbio de fluxo como uma curva, expansão, ou contração no duto, se necessário, uma localização alternativa pode ser selecionada, numa posição a 2 diâmetros do duto corrente abaixo e uma metade de diâmetro corrente acima para algum distúrbio de fluxo (Normas americanas "Code of federal standards", 1993).

A norma da CETESB (1990) indica que em dutos de seção circular, deve-se escolher uma posição no duto em que as medidas efetuadas na seção transversal, fique pelo menos a 8 diâmetros interno a jusante e a pelo menos 2 diâmetros interno a montante de qualquer distúrbio de fluxo como curvas, expansão, contrações, entradas e saídas. Caso seja impraticável deve ser selecionado uma posição a pelo menos 2 diâmetros internos a jusante e 0,5 diâmetros interno a montante dos distúrbios de fluxo. Nota-se que esta norma, em relação a localização da posição de amostragem segue exatamente as normas americanas.

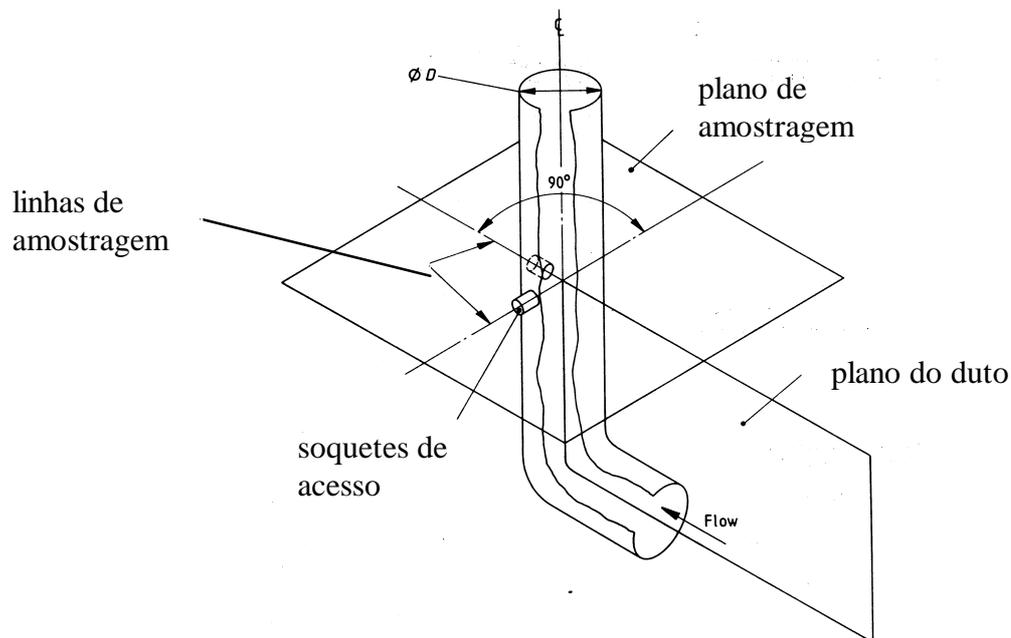
2.4.5 - NÚMEROS DE PONTOS E TEMPO DE AMOSTRAGEM

Na seção anterior mostrou-se que a amostragem em dutos deve ser realizada onde tem-se maior uniformidade possível no fluxo gasoso transportando partículas. Com o intuito de se obter representatividade nos valores de concentração ou taxas de emissão pode ser necessário ainda a escolha de locais na seção transversal para realização da amostragem.

A norma britânica BS 3405 define o ponto de amostragem como sendo o local específico na linha de amostragem onde a amostra é extraída.

Para esta norma, a figura 2.5 ilustra as posições e planos de amostragem em um duto circular que contém curvatura. Observa-se nesta figura o plano de amostragem, o plano normal a linha central do duto nas posições de amostragem. Tem-se as linhas de amostragem onde ao longo da qual estão fixados os pontos de amostragem.

Num sistema de amostragem em dutos se introduz o tubo da sonda através dos soquetes de acesso até ser localizado o primeiro ponto de amostragem. A sonda percorrerá todos os pontos contidos nas linhas de amostragem, de modo a permanecer durante todo o processo de medida devidamente alinhada, ou seja mantendo um ângulo reto na direção do fluxo.



Fonte: Normas BS 3405

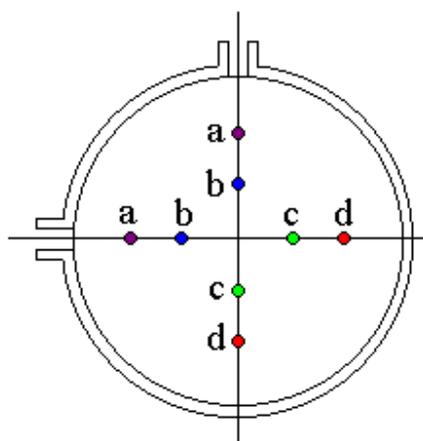
Figura 2.5: Localização das amostras

Esta figura ilustra a situação de um duto localizado na posição vertical, sendo assim pode ocorrer o que é chamado de efeito de parede, ou seja a distribuição de partículas no interior do duto pode não ser homogêneo, devido a maior concentração das partículas se localizarem próximas a parede do duto. Sendo assim deve-se amostrar o duto em vários pontos de amostragem.

O número de pontos de amostragem na seção transversal do duto ou mesmo o número de linha de amostragem tem sido bastante discutido por vários autores, entre eles Allen (1981), Santen e Cannon (1987), Nevers (1995) e Boubel (1996), em

relação as normas vigentes.

Para BS 3405 (1983) a amostragem pode ser efetuada com 4 ou 8 pontos de amostragem localizados em 2 ou 4 linhas de amostragem e os pontos vão do centro de 4 ou 8 áreas iguais. Se a área do duto exceder $2,5 \text{ m}^2$ no plano de amostragem ou se a razão do mais alto valor para o mais baixo valor da medida de Pitot estático no duto exceder 4:1 (ou a razão da velocidade do gás exceder 2:1), oito pontos de amostragem devem ser usados. A localização dos pontos de amostragem pode ser determinada a partir das dimensões internas do duto e pela figura 2.6.



Pontos de amostragem	Distancia da parede
a	0.065 D
b	0.250 D
c	0.750 D
d	0.935 D

D = Diâmetro do duto (0.1524 m)

Figura 2.6 – Pontos de amostragem na seção transversal do duto (BS 3405).

O período de tempo de amostragem para cada ponto não deve ser menor que 3 minutos, de forma a minimizar erros de medidas. Sendo esse tempo suficiente para restabelecer o perfil das linhas de corrente no interior do duto, que fora desalinhado pela movimentação da sonda de um ponto a outro durante a amostragem, e também para poder coletar massa suficiente a ser pesada.

Allen (1981) sugere realizar as amostragens de acordo com as normas BS 893, caso se deseje amostrar com 24 pontos, distribuídos em pelo menos 3 soquetes de acesso ou linhas de amostragem. Sugere a utilização da norma BS 3405 caso se deseje um mínimo de 4 pontos. Porém Allen (1990) considera que o tempo de amostragem de 2 minutos sendo suficiente para assegurar uma quantidade de poeira a ser pesada com exatidão no caso de usar um filtro como equipamento coletor.

As normas da CETESB (1990) e as normas americanas (1993) fixam as condições exigíveis para determinação de pontos de amostragem numa seção selecionada do duto. Caso essa seção selecionada seja circular, o número mínimo de pontos deve ser igual a 8 pontos para dutos com diâmetro interno entre 0,30 e 0,60 m, e 12 pontos para dutos com diâmetro interno maior que 0,60 m. Quando a localização da seção transversal estiver fora da faixa de 8 e 2 diâmetros internos, o número mínimo de pontos é obtido pela figura 2.7. O número de pontos devem ser sempre múltiplo de 4.

Também Sparks (1984), Chereminisoff (1993) e Code Federal Regulations (1993) sugerem para uma boa amostragem o número de pontos de amostragem igual a 12.

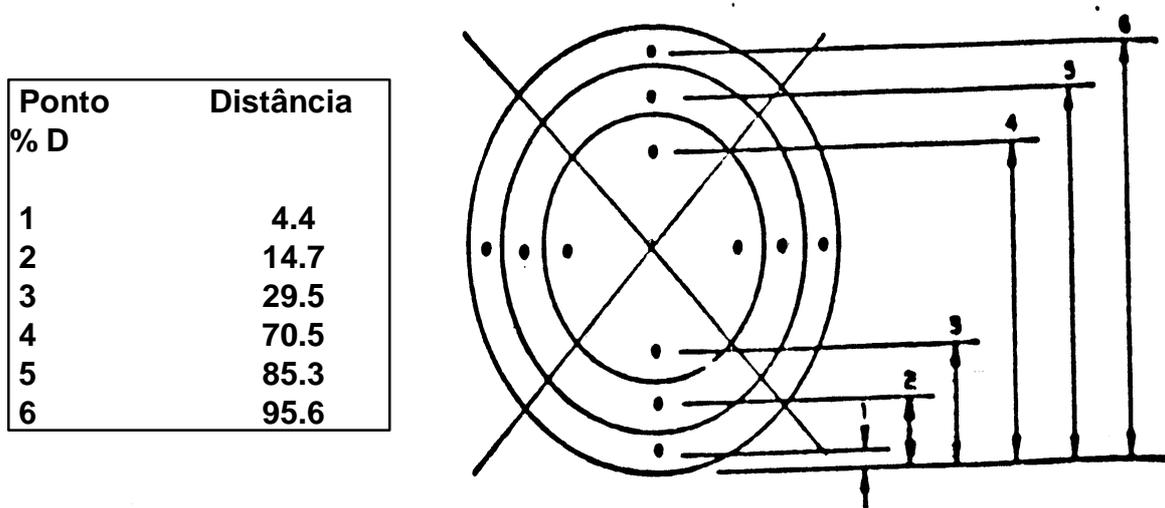


Figura 2.7 - Pontos de amostragem segundo CETESB (1990)

Boubel, (1994) sugeriu para dutos circulares, que a tabela 2.4 poderia ser usada para determinar a localização dos pontos transversais. A tabela 2.4 ilustra um método comumente aceitável de divisão de dutos em áreas iguais para determinadas

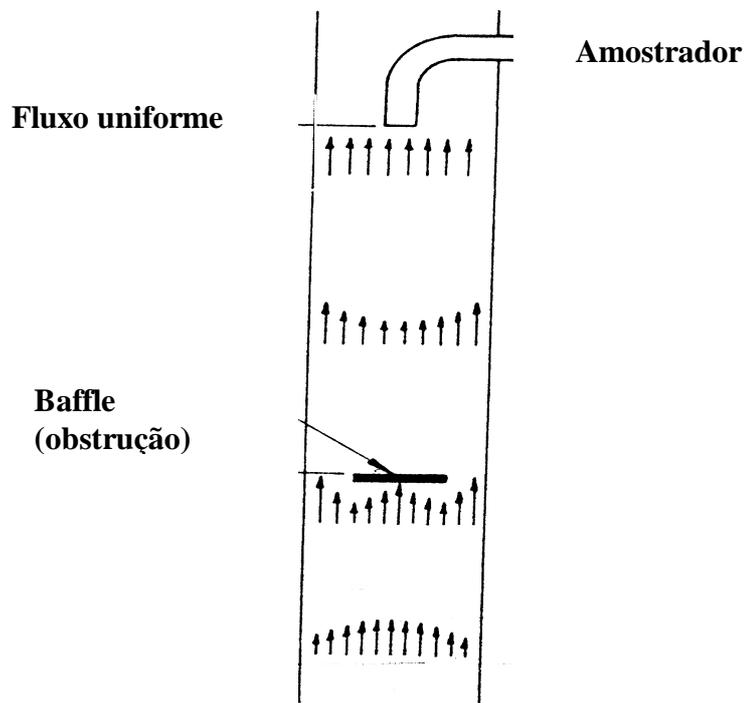
velocidades. Usando a tabela 2.4 a localização dos pontos transversais é feita ao longo de 2 diâmetros com angulo reto.

Tabela 2.4 - Localização da velocidade de amostragem, diâmetros à partir da parede interna para os pontos transversais

Número de pontos	Número de áreas iguais a ser amostrada				
	2	3	4	5	6
1	0.067	0.044	0.033	0.025	0.021
2	0.250	0.147	0.105	0.082	0.067
3	0.750	0.295	0.194	0.146	0.118
4	0.933	0.705	0.323	0.226	0.177
5		0.853	0.677	0.324	0.250
6		0.956	0.806	0.658	0.355
7			0.895	0.774	0.645
8			0.967	0.854	0.750
9				0.918	0.823
10				0.975	0.882
11					0.933
12					0.979

Fonte: Fundamental of Air Pollution. Boubel, (1994)

Em um sistema de amostragem onde o fluxo de gás no interior do duto é uniforme, a amostragem pode ser realizada em um único ponto e assim obter-se medidas representativas. Assim Allen (1981) e Santen (1987) sugerem a utilização de um obstáculo de fluxo (tipo Baffle), como aquele utilizado por Staimand (apud Allen 1981) (figura 2.8), para uniformizar o perfil das linhas de corrente. Assim a amostragem em um único ponto utilizando uma obstrução, deve ser localizada na metade da área centrada no duto, com 3 diâmetros (ou 2 no mínimo) corrente acima fixa a posição de amostragem onde se insere a sonda em um único ponto. Staimand (apud Allen 1981) afirma que a obstrução (efeito baffle) faz com que a concentração de pó na posição da amostragem seja uniforme.



Fonte: Sampling of Dust Gas Stream. Allen, (1981)

Figura 2.8 - Efeito baffle

2.4.6 - EQUIPAMENTOS PARA AMOSTRAGEM ISOCINÉTICA

Um sistema de amostragem em dutos envolve vários aparatos destinados a medidas locais de particulados. Dentre estes equipamentos se encontram as sondas de amostragem, nas quais os específicos bocais são acoplados.

Estas sondas de amostragem, consistem de um pequeno tubo metálico, em forma de L. Na extremidade da sonda que entra em contato com o fluxo de gás com partículas, conecta-se um bocal de amostragem (ver figura 2.9), projetado para uma certa vazão de gás no duto. Com esse bocal de diâmetro específico amostra-se o fluxo de gás isocineticamente, desde que a velocidade de sucção da amostra seja a mesma que a do fluxo. A saída da sonda é conectada a um canal, ou duto que arrasta as partículas amostradas para um equipamento coletor ou até o sensor do monitor, onde este efetua a contagem de partículas. O equipamento que faz a sucção deverá consistir de meios para remover isocineticamente uma porção mínima de um volume

de amostra do gás no duto, onde estão dispersos o material particulado. Um bocal de amostragem de seção transversal circular, deve ter a entrada, saída, com parede de espessura não excedendo 1.3 mm (BS 3405 1983).

Segundo Boubel,(1994) o uso de bocais de parede fina é essencial. Porém não há um acordo geral entre os padrões no que se refere aos ângulos de corte internamente ou externamente dos bocais.

Balyaev e Levin, (1974) propuseram uma espessura da parede limite do ângulo de 15° . Na prática qualquer bocal com ângulo maior que 30° deveriam ser descartados. Deve-se tomar um cuidado essencial durante o manejo do bocal em relação ao alinhamento. Os bocais podem variar na forma e tamanho e construção mas eles deveriam ser circulares na seção transversal e a espessura da parede não ser maior que 1,3 mm e superfície externa ou interna tendo inclinação não maior que 45° para o eixo do bico. O tamanho do bocal deve ser escolhido, com amostra isocinética, a partir do fluxo e velocidade no duto. A equação (3.1), mostrada no capítulo 3 é usada para dimensionamento do diâmetro do bocal (D_s).

Sondas são posicionadas perpendicularmente no interior do duto, movendo-se nas linhas de corrente. E conveniente acoplar a sonda um direcionador, visando indicar a orientação do bocal de amostragem, no interior do duto. Um princípio geral é que as sondas de amostragem não devem ocupar mais de 10% da área do duto.

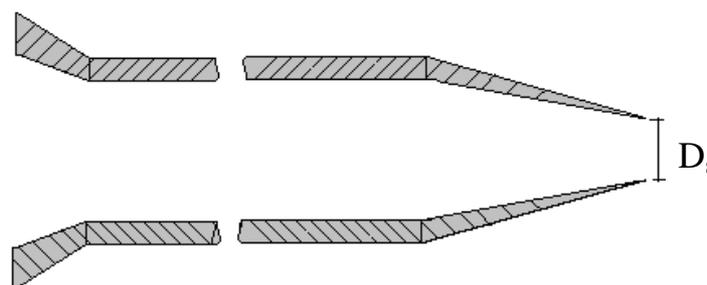


Figura 2.9 - Bocais de amostragem

2.4.7 - AMOSTRAGEM ISOCINÉTICA

Santen (1987) cita que a amostragem de partículas dispersas em gás quando requerida, deve ser efetuada isocineticamente. Assim o bocal conectado a sonda de amostragem, deve ter sua vazão de amostragem ajustada, tal que a velocidade de amostragem seja a mesma da velocidade local do fluxo. Esse tipo de amostragem é difícil de conseguir e manter, e alguns erros são inevitáveis. Apesar que isso é de pequena importância quando se trata de partículas pequenas o bastante para seguirem as linhas de corrente.

Vários são os autores que discutem a questão da amostragem de partículas enfocando a necessidade de realização de amostragem sob condição isocinética, Veeramani e Vasani (1987) e Allen (1981). Também para Nevers (1995) na amostragem de partículas dispersas em gases fluindo num duto ou chaminé, deve manter-se um fluxo isocinético no bocal de amostragem. A figura 2.10 ilustra a trajetória de várias partículas e as possíveis situações de amostragem.

Se a velocidade do gás no bocal de amostragem é a mesma da velocidade na chaminé ou duto onde a amostragem é efetuada, a condição de amostragem é isocinética (figura 2.10 B) e as medidas de concentração serão representativas. As concentrações medidas serão a mesma que a concentração real.

Todavia, se a velocidade do bocal exceder a velocidade do duto (figura 2.10 D), o bocal captura mais linhas de corrente, mas as partículas grandes próximas a borda do bocal podem ser incapazes de seguir as linhas de corrente e escapam da coleta do bocal, e desta forma a concentração medida será menor que a concentração verdadeira, ou seja a concentração de partículas medidas sob condição isocinética. Neste caso tem-se uma amostragem preferencial das partículas de menor tamanho em relação as de maior tamanho.

Se a velocidade no bocal de amostragem é menor que a velocidade no duto (figura 2.10 C) as linhas de corrente começam a divergir ao redor das bordas do bocal e as partículas grandes de muita inércia são incapazes de seguir as linhas de corrente e são capturadas pelo bocal de amostragem. A medida de concentração será então maior do que a concentração verdadeira. Neste caso a amostragem é preferencial

para as partículas de maior tamanho.

A figura 2.10 A mostra que quando o ar não está em condições a fluir para dentro do bocal, o fluxo da linha de corrente move-se ao redor da borda do bocal. Neste caso algumas partículas de tamanho grande poderiam entrar no bocal. Se a velocidade no bocal não for suficiente para transportá-las, elas se depositarão ainda no bocal.

A situação A, C e D da figura 2.10 são chamadas de amostragem anisocinética.

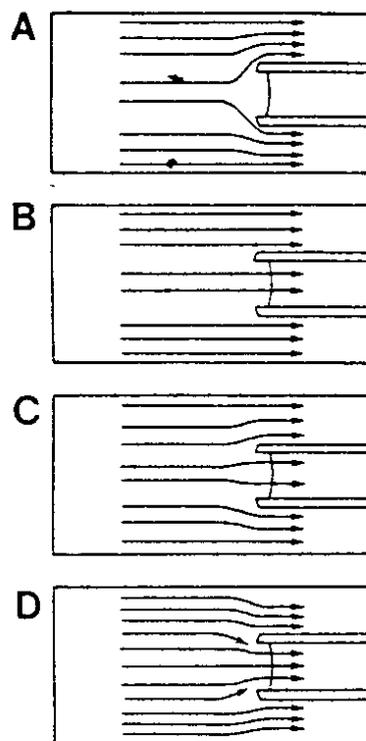


Figura 2.11 - Ilustra as linhas de corrente ao redor do bocal de amostragem :

2.4.8 - ERROS ASSOCIADOS A AMOSTRAGEM ANISOCINÉTICAS

Quando a velocidade da amostra difere daquela do fluxo de gás (amostra anisocinética), as linhas de corrente são deturpadas, causando deflexão de algumas partículas de sua direção original, então a quantidade de partículas entrando no bocal por unidade de tempo diferenciará daquelas que entraram sob condições isocinéticas.

Se as partículas cobrem uma faixa de tamanho, a amostragem anisocinética não

afeta somente a massa das partículas na amostra, mas também em suas distribuições de tamanho. Durante uma amostragem prolongada a vazão da corrente gasosa, pode variar durante o teste, pode não ser possível variar a vazão de amostragem para compensar a variação da corrente gasosa. Um método para corrigir isto está descrito a seguir:

Samata (1993) cita que a amostragem isocinética é necessária quando efetua-se medidas de concentração de partículas fluindo em dutos, mas técnicas de amostragem muitas vezes são realizadas sob condições anisocinética. Samata (1993) examinou o tamanho das partículas fluindo em gases no interior de dutos, as quais são predominantemente da ordem de microm, e apresentou a derivação de uma equação para erros associados com amostragem anisocinética,

$$C = C_s/C_0 \quad (2.4)$$

$$V = V_o/V_s \quad (2.5)$$

$$C = \alpha V + (1 - \alpha) \quad (2.6)$$

$$\alpha = (5V + 3)A_0^2 Stk^2 / 1 + (5V + 3)A_0^2 Stk^2 \quad (2.6)$$

$$Stk = D_{pp}^2 V_o / 9\mu D_n \quad (2.7)$$

Em que:

C_0 é a concentração das partículas amostradas isocineticamente

C_s é a concentração das partículas amostradas anisocinéticas

V_0 é a velocidade de gás do duto

V_s é a velocidade de gás de sucção na sonda

D_n é o diâmetro do bocal

μ é a viscosidade do gás

O coeficiente A_0 é relacionado com V e o número de Stokes Stk , como segue:

Quando:

$$Stk \leq 1/(5V + 3)^{0.5} \quad (2.8)$$

$$A_0 = 1$$

Quando:

$$1/(5V + 3) < Stk < 16/(5V + 3) \quad (2.9)$$

$$\alpha = 0.5 \text{ e } A_0 = 1/ Stk (5V + 3)$$

E quando:

$$\text{Stk} \geq 16/(5V + 3) \quad (2.10)$$

$$A_0 = 0.0625$$

Para partículas menores que $10\mu\text{m}$ o número de Stk foi de 0,1 - 0,5, para partículas maiores que $10\mu\text{m}$ tem-se $\text{Stk} > 1$. A aplicabilidade desta equação foi testada, de acordo com os teste conduzidos usando vários tamanhos de partículas, a equação derivada é válida numa extensa faixa de Números de Stokes. Todos os experimentos foram realizados com concentração de poeira no duto de 50 mg/m^3 e uma velocidade 5 m/s.

O efeito da perda de partículas grandes aderidas na parede do duto e pelo assentamento gravitacional foi estudado por comparação de peso dos resíduos alimentados e a concentração no ponto medido; a perda de peso no duto não foi maior que 10%, que é a mesma para partículas finas, indicando que esse efeito pode ser desconsiderado nesse experimento.

2.5 - COMENTÁRIOS GERAIS

Neste capítulo foi apresentado uma revisão sobre os poluentes particulados, bem como suas propriedades, seus efeitos danosos sobre a saúde humana, materiais, estruturas e sua interação com a luz alterando a visibilidade. Em seguida, para os poluentes particulados, apresentou-se os critérios e padrões da qualidade do ar, incluindo os padrões primários e secundários estabelecidos no Brasil.

Foram citadas as principais fontes de emissão de poluentes particulados e os seus principais equipamentos de controle de emissão.

Discutiu-se a necessidade de amostragem de particulados dispersos em dutos, de forma a determinar a eficiência experimental do equipamento de controle. Isto envolve a determinação da concentração de partículas locais no duto, que é o objetivo deste trabalho, e as respectivas taxas de emissão de particulados.

Assim, as técnicas de amostragem e determinação da concentração de partículas dispersas em corrente gasosa em dutos foram apresentadas e discutidas. Quanto às técnicas verificou-se nos trabalhos uma diversidade de sugestões sobre a

localização das posições de número de pontos de amostragem para obtenção de medidas representativas, de concentração e conseqüentemente da taxa de emissão. Dado essa diversidade decidiu-se utilizar as normas de amostragem do BS 3405.

Definiu-se e ilustrou-se condições de amostragem isocinética e anisocinética, apresentando uma correlação da literatura para estimar os erros de uma amostragem anisocinética.

Discutiu-se a necessidade de amostragem de partículas confinadas em dutos, tanto para determinação da eficiência experimental dos equipamentos de controle como para a determinação das taxas de emissões desses poluentes fluindo de dutos ou chaminés para a atmosfera. Nestes procedimentos tem-se o envolvimento da determinação da concentração de particulados confinados em dutos, que é o escopo deste trabalho.

CAPÍTULO 3

PARTE EXPERIMENTAL

3.1- INTRODUÇÃO

Com o objetivo de determinar concentrações de partículas, presentes numa corrente gasosa, e determinar as taxas de emissão de particulados para a atmosfera, foi realizado um estudo utilizando técnicas de amostragem de partículas.

Para este estudo foi projetado e construído um módulo experimental, que produz uma corrente gasosa de ar contendo particulados. Nesta corrente gasosa realizou-se a dispersão de aerossol (particulados), produzindo um gás “sujo” de partículas. Efetuou-se a amostragem no gás, quantificando as concentrações de partículas e taxas de emissão de particulados.

Nesse capítulo será descrito o módulo experimental, suas condições de operação e as técnicas experimentais utilizadas para medidas de concentração de partículas dispersas na corrente gasosa e taxas de emissão de particulados.

3.2 - MÓDULO EXPERIMENTAL

O módulo experimental foi projetado e construído no Departamento de Engenharia Química. Uma vista geral do módulo experimental é mostrado na figura 3.1.

A seguir são apresentados detalhes dos equipamentos e acessórios que constituem o módulo experimental.

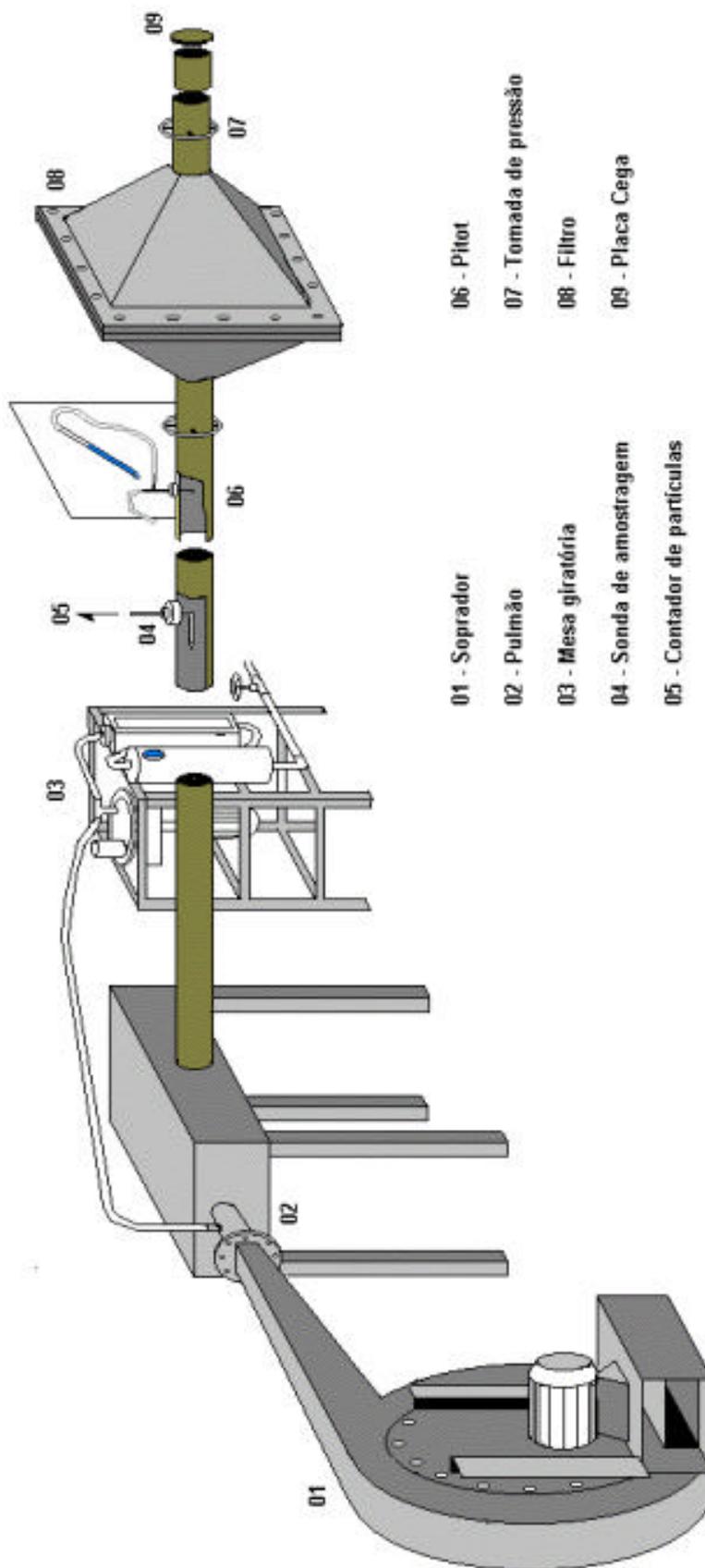


Figura 3.1 - Módulo Experimental

3.2.1 - DUTO DE AMOSTRAGEM

O estudo das técnicas de amostragem foi realizado em um duto circular de PVC de 12 m de comprimento e 0,1524 m de diâmetro interno, conforme ilustra a figura 3.1. Para a realização dos experimentos de amostragem foi produzida neste duto uma corrente gasosa de ar transportando partículas dispersas. A corrente de ar foi produzida por um soprador, a qual injetava o ar em um reservatório "pulmão". Este reservatório serviu para homogeneizar o fluxo de ar entrando no duto como também auxiliou na dispersão de partículas.

As amostragens foram realizadas de acordo com as normas Britânicas, descritas no capítulo 2. Utilizou-se como amostrador da corrente gasosa, um contador de partículas, para sucção de amostras e contagem de partículas. Tal contador será apresentado no item 3.3.2.1 deste capítulo.

As posições de amostragem (ponto 4 - figura 3.1) foram fixadas a uma distância de 31,5 vezes o diâmetro do duto a partir da entrada de ar no duto. Nesta posição soquetes de tamanho e forma apropriado foram acoplados na posição horizontal e vertical para a inserção de sondas de amostragem, as quais são apresentadas no item 3.3.2.2.

3.2.2- DISPERSOR / ALIMENTADOR DE PARTÍCULAS

A dispersão de partículas foi efetuada com a introdução de uma corrente de ar, contendo alta concentração de partículas, na saída do soprador. Esta corrente foi gerada por um sistema alimentador/dispersor de partículas e foi injetada em sentido contra corrente ao fluxo de ar do soprador de forma que as partículas pudessem ser desaglomerados e homogeneizadas na corrente transportadora.

A figura 3.2.a apresenta o sistema de alimentação de partículas, utilizado para produção da corrente de ar contendo alta concentração de partículas. Um detalhamento da alimentação de partículas é apresentado na figura 3.2.b. O alimentador consiste de disco plano de madeira dura, de 30 cm de diâmetro, que gira com velocidades de 1rpm e de ½ rpm.

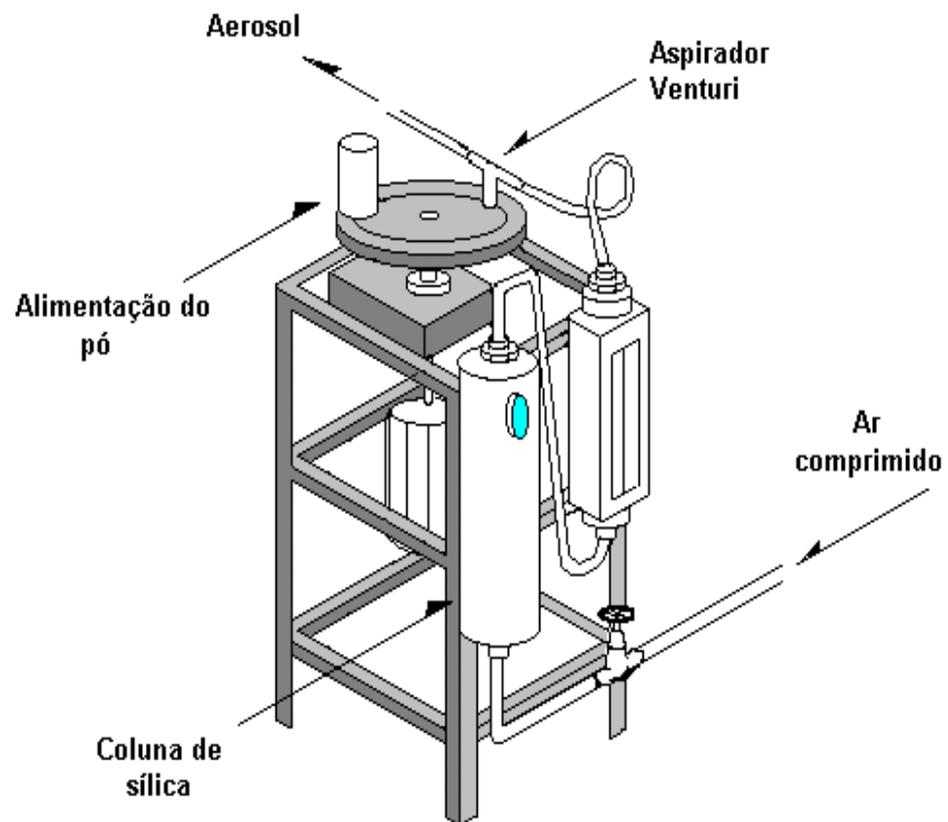


Figura 3.2.a - Sistema de alimentação

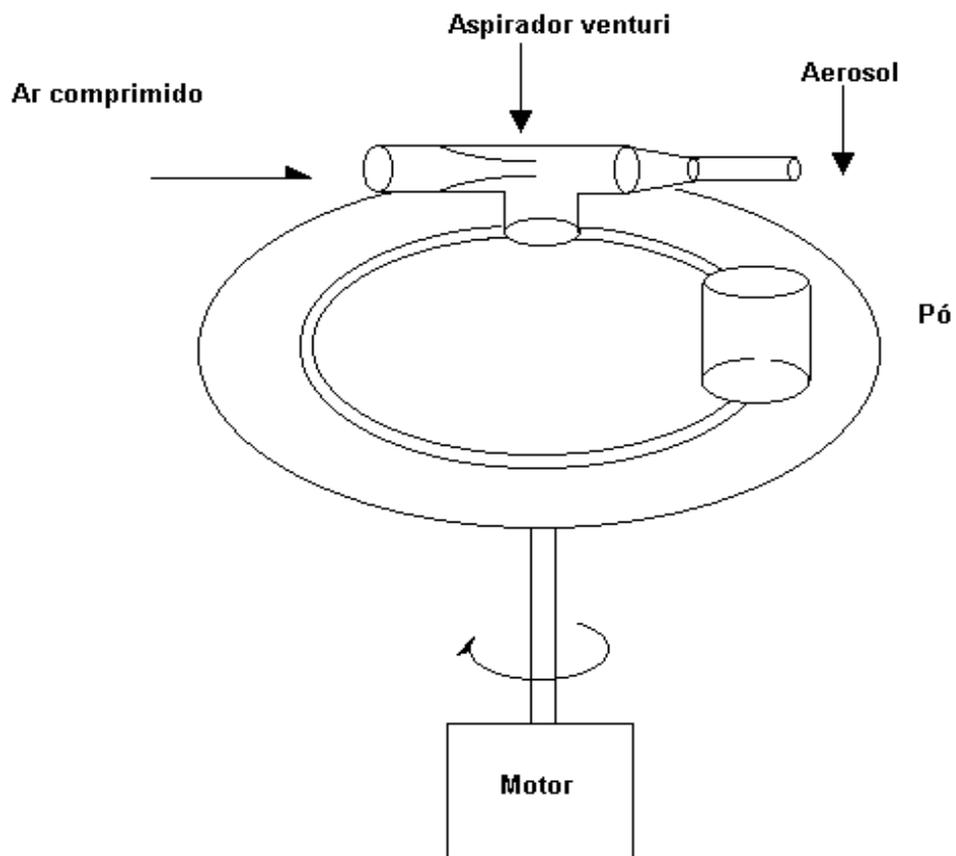


Figura 3.2.b - Esquema detalhada do alimentador de partículas

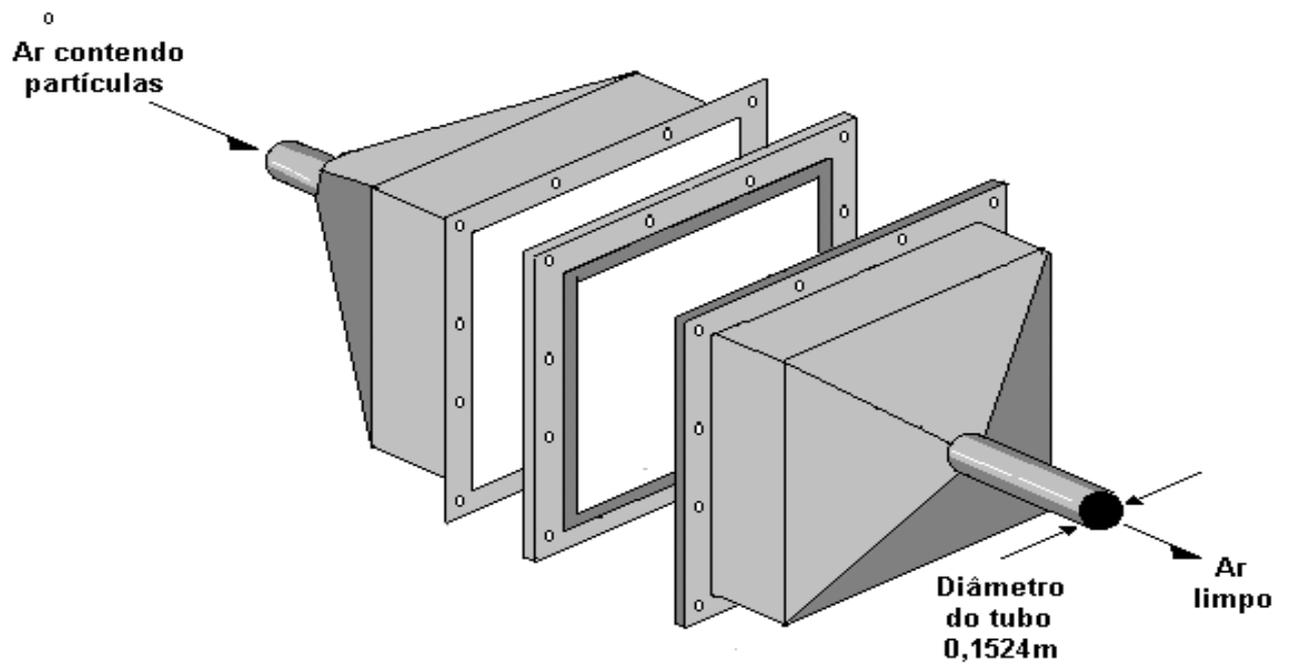


Figura 3.3 - Esquema do filtro usado para controle de particulados

No disco foi moldado um sulco estreito circular, sobre o qual um tubo cilíndrico é fixado. Neste tubo é introduzido e mantido sob agitação o material particulado, na forma de (pó). Na medida em que o disco gira, a agitação do pó faz com que o mesmo preencha este sulco. O pó contido no sulco é então aspirado por meio de um Venturi, fixado na extremidade oposta do disco. A aspiração do pó é feita pela passagem de ar comprimido através do Venturi, produzindo a corrente gasosa com alta concentração de partículas.

As vazões de ar comprimido que faz a aspiração no Venturi são controladas de forma nominal por meio de um rotâmetro.

Para se conseguir boa dispersão do material particulado na corrente gasosa, secou-se previamente o pó a ser disperso e utilizou-se o ar comprimido seco, através da passagem do mesmo em uma coluna de sílica gel. Além disso, o ar aspirado pelo Venturi, contendo alta concentração foi injetado de forma contra - corrente na saída do soprador, como já descrito.

3.2.3 - EQUIPAMENTO DE CONTROLE

Durante todo o experimento, procurou-se evitar problemas com a poluição de particulados no ambiente, grandes partes das partículas na corrente gasosa não foram emitidas para a atmosfera, mas sim coletadas em um filtro de tecido fixado na extremidade do duto de teste.

Este filtro consiste de uma tela plana, com grande área livre de filtração. Como meio filtrante foi utilizado uma manta PA 560G10, fornecida pela VEMAG, constituída de fibras de poliéster inquebráveis, com retenção de 97% para partículas de 10 μ m de diâmetro. O meio filtrante encontra-se suportado por uma tela de alumínio mantida fixa a uma moldura de chapa preta, que por sua vez foram fixadas no interior de uma caixa de filtração como mostra a figura 3.3.

A caixa de filtração (número 8 da figura 3.1) consiste de duas tampas de chapa preta toda revestida com borracha macia na parte quadrada (moldura) de modo a permitir a vedação do sistema. Em suas extremidades, tais tampas reduzem-

se a tubos de seis polegadas de diâmetro que são conectadas no duto de amostragem.

3.3 - MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.3.1 - MEDIDAS DE VELOCIDADE

Construído o módulo experimental, os primeiros testes necessários foram em relação as velocidades do fluxo gasoso, para se conhecer o perfil de velocidade no interior do duto.

Com o auxílio de tubo de Pitot (marca Airflow), foi efetuada a calibração, realizou-se medidas de velocidade em vários raios do duto, nas posições vertical e horizontal, mantendo-se um trecho reto de 50 vezes o diâmetro do duto ajusante a entrada de ar do duto, conforme indica a literatura comentada no capítulo II. Verificou-se que o perfil de velocidade para este trecho é o mesmo que o trecho reto de distância de 31,5 vezes o diâmetro do duto. O apêndice E mostra o perfil de velocidade típico obtido nas posições vertical e horizontal no duto de amostragem, para a distância de trecho reto de 31,5 vezes o diâmetro do duto.

Para cada ponto de amostragem necessita-se da medida da velocidade, tanto para obtenção da vazão no duto como para a determinação da velocidade local necessária para a realização de amostragem isocinética. Estas velocidades foram medidas com o tubo de Pitot descrito acima.

As vazões de operações no duto de amostragem variaram na faixa de 0,30 m³/s e 0,64 m³/s (tabela 3.2). Sendo que para vazões maiores que 0,48 m³/s foi necessário a utilização de dois sopradores em paralelo.

As medidas de velocidade efetuada esta apresentada no anexo A.

3.3.2 - SISTEMA DE AMOSTRAGEM

A corrente gasosa no interior do duto transportando partículas foi amostrado através de sondas, de forma “on-line” com o uso do contador de partículas.

3.3.2.1 - CONTADOR DE PARTÍCULAS

Os contadores de partículas geralmente requerem amostragem extrativa. Neste experimento utilizou-se um contador de partículas a laser, cujo procedimento geral de amostragem em dutos envolve a extração de um determinado volume de gás que passa através de detector por um dado período de tempo.

Com medidas de volume de gás, tempo de amostragem e com a contagem das partículas pode-se determinar as concentrações do material particulado dispersos no gás amostrado.

Com o uso do contador a possibilidade de operação “on-line”, confere uma grande rapidez nas amostragens e análises. Em adição a confiabilidade das contagens fornecidas pelo contador viabiliza-se as amostragens em dutos em termos de economia de tempo e gastos, comparado com outras formas de amostragem, que por exemplo envolvam gravimetria .

O contador de partículas usado neste experimento, é um contador de diodo a laser, modelo A2408 da METONE. Possui 6 canais para contagem do número de partículas nas faixas de tamanho, apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Faixas do contador de partículas

Canal	Faixa de tamanho	Tamanho médio μm
1	0,3 - 0,49	0,40
2	0,5 - 0,99	0,75
3	1,0 - 2,99	2,00
4	3,0 - 4,99	4,00
5	5,0 - 9,9	7,50
6	>10	10,0

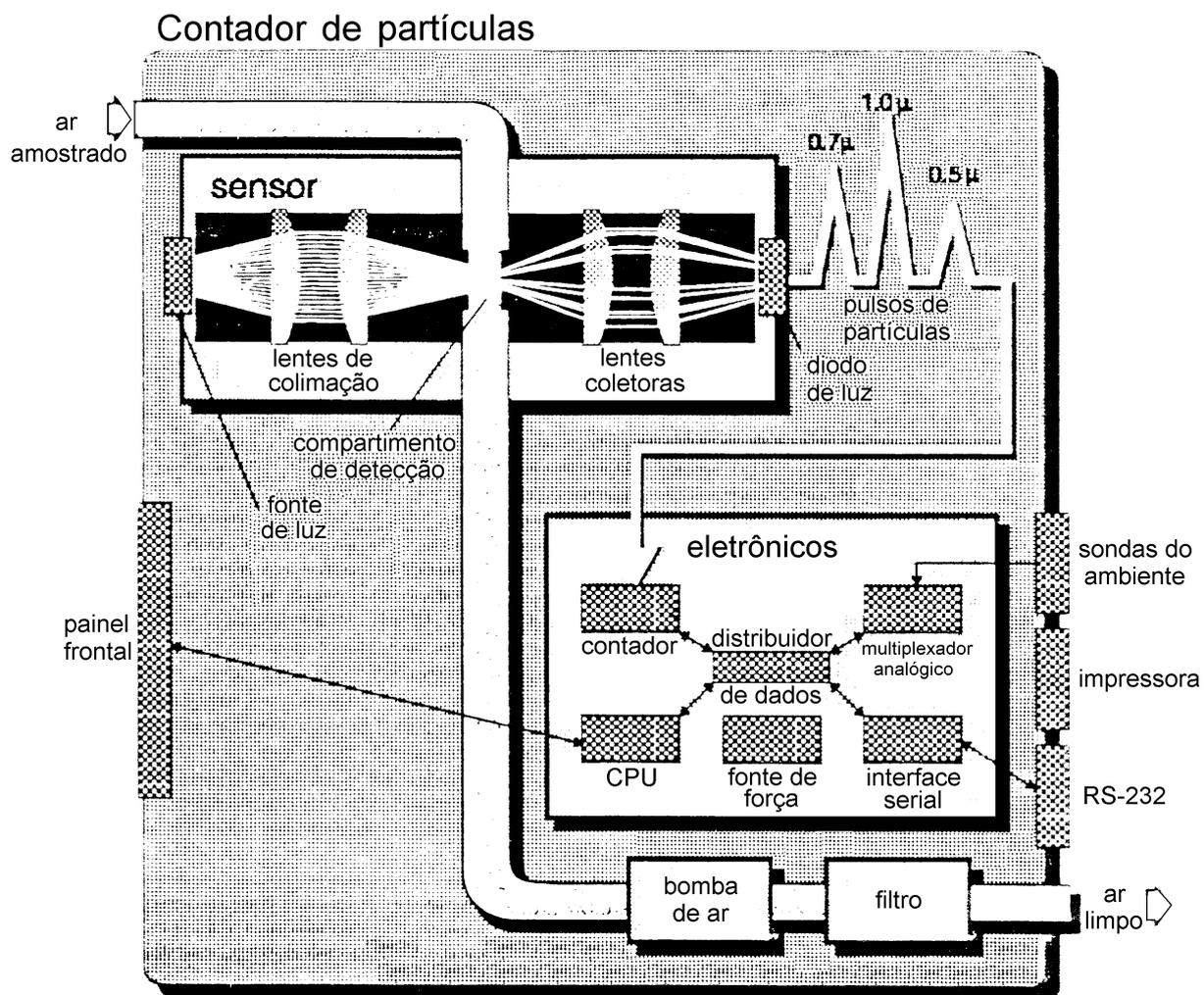


Figura 3.5 - Diagrama simplificado do fluxo de ar mais partículas no contador de partículas.

As partículas dispersas na corrente de gás, são succionadas através de sondas alinhadas no interior do duto, por meio de uma bomba que aspira a amostra para o interior do sensor. As partículas presentes na amostra passam através do detector óptico onde a fonte de luz laser é concentrada. As partículas dispersam a luz que é então focada em um foto diodo. Este detecta e converte o sinal da luz em pulsos elétricos. A altura desses pulsos elétricos é diretamente proporcional ao tamanho da partícula. O circuitos usam comparações para as medidas da alturas dos pulsos e o tipo dos sinais nos canais de acordo com o tamanho de partículas. Contadores contam os pulsos em cada canal. Os resultados são então mostrados como partículas contadas para os seus canais de acordo com os seus tamanhos.

Através de sondas de amostragens, o contador amostra com uma vazão de 1cfm (1ft³/min), por meio de uma bomba à vácuo interna, durante toda a amostragem deve-se manter invariável essa vazão, para assim se amostrar isocineticamente, para isso possui uma válvula controladora dessa vazão. Para uma concentração de 200000 partículas/ft³, a perda da confiabilidade é menor que 5% (dados retirados do manual do contador de partículas).

Os resultados da contagem podem ser na forma diferencial e cumulativa. Resultados na forma cumulativa é o total de partículas contadas para um canal selecionado e todos os canais de grande tamanho. Isso é usado na determinação do nível total de partículas. Já na forma diferencial é o número de partículas no canal selecionado. Isto é útil para comparar uma distribuição de partículas por faixa de tamanho, ajudando na determinação de fontes de contaminação de partícula. Os resultados são impressos pelo próprio equipamento para cada ciclo e tempo de contagem, programados de acordo com o objetivo da amostragem. Um resultado típico é mostrado pela figura 3.6, onde pode-se verificar a localização da contagem, o tempo, a data, o número do ciclo, o período de amostragem, a temperatura e umidade do ar da corrente amostrada. Observa-se na figura 3.6 os valores de contagem cumulativa e contagem diferencial.

```
***** COUNT ALARM *****
LOCATION 001, 17:46:16 MAY 9, 93
CYCLES = 002, PERIOD 00:00:30
TEMP. = 71.3 F RH = 29.5%
SIZE CUMULATIVE DIFFERENTIAL
0.3µ 21934 12578
0.5µ 9356 6625
1.0µ 2731 2301
3.0µ 430 264
5.0µ 166 122
10.µ 44 44
```

Figura 3.6 - Ilustração dos resultados típicos fornecidos pelo contador

3.3.2.2. - AMOSTRAGEM ISOCINÉTICA E BOCAIS DE AMOSTRAGEM

Conforme apresentado no capítulo 2, para uma amostragem representativa da concentração e tamanho de partículas dispersas na corrente gasosa, se faz necessário que a amostragem seja conduzida sob condição isocinética. Para tal se faz necessário a utilização de sondas cujos bocais produzam a condição de isocineticidade. Ou seja, que a velocidade de amostragem através do bocal da sonda seja igual a velocidade local do fluxo do gás no ponto de amostragem.

Em todos os testes realizados neste trabalho a sucção do ar pelo contador foi conduzida sob condições quase isocinéticas.

Utilizando-se da vazão de sucção na amostragem do contador, constante no valor de 1 cfm, e a equação 3.21 abaixo (Gimenes, 1992), dimensionou-se diâmetros dos bocais para amostragem isocinética.

$$\frac{Q_s}{Q_0} = \left(\frac{D_s}{D_0} \right)^2 \quad (3.1)$$

Sendo que: Q_s e Q_0 são vazões de amostragem e vazão do fluxo de ar no duto e D_s e D_0 são os diâmetros do bocal de amostragem e diâmetro do duto no qual se realizou os testes de amostragem.

Várias sondas foram confeccionadas, de acordo com especificações da norma BS(3405), para obter amostragem isocinética nas velocidades e vazões de testes neste trabalho. A tabela 3.1 mostra os diferentes valores de diâmetros de bocais das sondas usadas.

Tabela 3.2 - Diâmetros dos bocais de amostragem

Q_0 (vazão m ³ /s)	D (diâmetro cm)
0.64	0.41
0.59	0.43
0.54	0.45
0.46	0.47
0.37	0.54
0.30	0.56

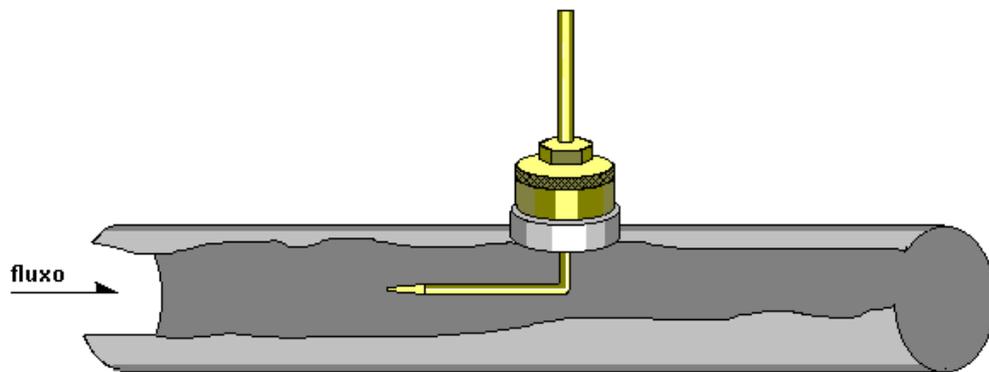


Figura 3.7 - Alinhamento dos bocais em relação ao fluxo de ar no duto

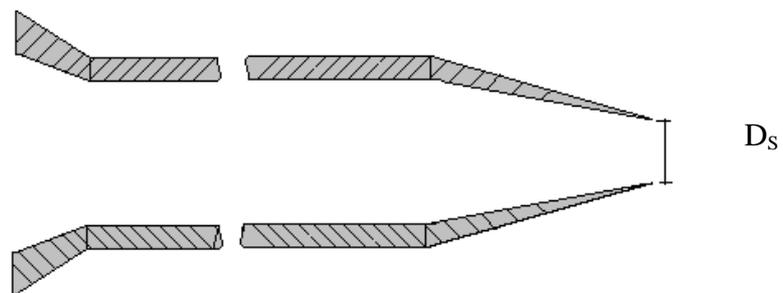


Figura 3.8: Esquema do bocal de amostragem

Os testes de amostragens de partículas dispersas na corrente gasosa para a determinação das distribuições de concentração e as respectivas taxas de emissão, seguiram as normas descritas no capítulo 2. Estas normas especificam o número de pontos de amostragem, na seção transversal do duto, necessários para medidas representativas. A utilização da sonda na amostragem, exige certos cuidados com o alinhamento perpendicular desta com a seção transversal do duto, ou seja manter-se perpendicular as linhas de corrente do fluxo de gás. Evitando um provável desvio das partículas, que seguem as linhas de corrente, na entrada da sonda.

Os tempos de amostragem foram de 3 minutos para cada ponto amostrado, com um intervalo de tempo de 3 minutos e 20 segundos entre um ponto e outro, para se restabelecer os perfis de velocidade no interior do duto antes de iniciar a próxima medida.

A figura 3.7 apresenta uma ilustração do alinhamento da sonda no interior do duto, utilizada nas amostragens. A figura 3.8 ilustra os bocais das sondas utilizados nas amostragens.

3.3.3 - MATERIAL PARTICULADO

Como material particulado a ser disperso na corrente gasosa, utilizou-se o dióxido de titânio e alumina calcinada. Efetuou-se análise granulométricas desses materiais com o concentrado tal qual recebido do fornecedor, estas distribuições foram obtidas em aparelho sedígrafo. As figuras 3.9 e 3.10 ilustram as distribuições de tamanho de partículas do dióxido de titânio e alumina respectivamente, obtidas em aparelho sedígrafo.

Realizou-se secagem do material particulado antes de sua dispersão na corrente gasosa. De modo que as partículas foram alimentadas com o mínimo de umidade possível, com isso garantiu-se uma boa dispersão das partículas no interior do duto. Em todos os experimentos o material particulado foi previamente seco, durante o tempo de 12 horas, numa estufa a 100 °C, e mantido num dessecador até o momento de iniciar a alimentação das partículas.

A tabela a seguir mostra as propriedades das partículas de dióxido de titânio e alumina.

Tabela 3.3 - Propriedades dos materiais particulados

Material	Forma	Densidade g/cm ³	D ₅₀ diâmetro
Dióxido de titânio	esférica	0,41	3.90 µm
Alumina	esférica	0.90	4.49µm

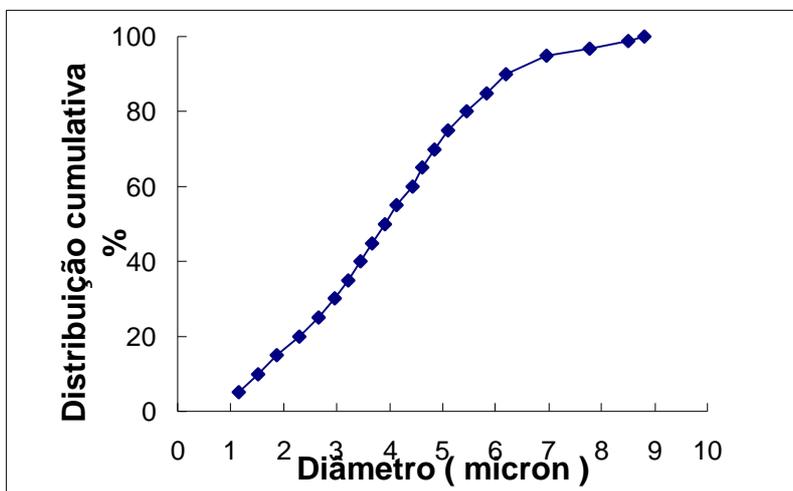


Figura 3.9 - Distribuição do tamanho das partículas para o dióxido de titânio, obtido por sedigraph.

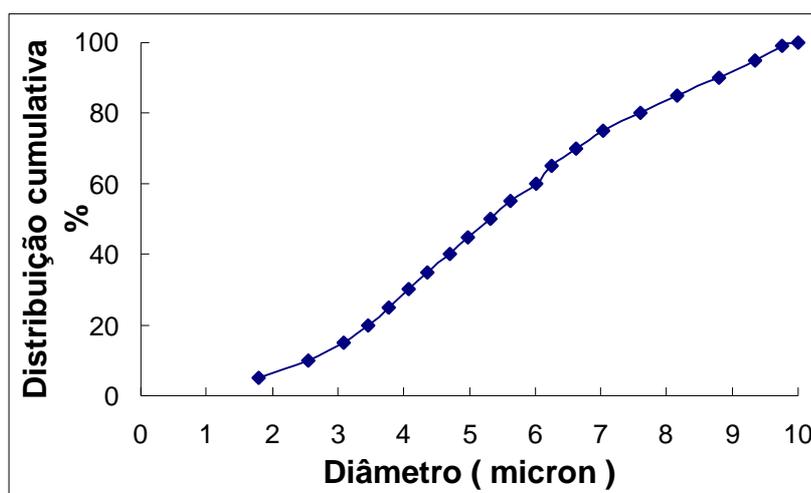


Figura3.10 - Distribuição do tamanho das partículas da alumina, obtida por sedigraph

3.3.4- PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Após vários testes de amostragem de particulados dispersos nas vazões de 0,48, 0,45, 0,37 e 0,30 m³/s de gás no duto, modificou-se as condições de teste de amostragem, diluindo-se a concentração de partículas no fluxo do gás. Isto foi realizado para melhor funcionamento do contador de partículas, visando uma diminuição dos erros de leitura do sensor.

Usando-se de planejamentos experimentais baseados em procedimentos estatísticos pode-se extrair de um sistema em estudo o máximo de informações úteis, fazendo um número mínimo de experimentos. A essência de um planejamento consiste em planejar um experimento de forma que ele seja capaz de fornecer exatamente o tipo de informação que procuramos. Nesta segunda etapa do trabalho, deseja-se estudar os efeitos das variações sobre a resposta, para isso é variar e observar o resultado dessa variação. Isto implica na realização de ensaios em pelo menos dois níveis desse fator. Em um planejamento fatorial todas as variáveis são estudadas em apenas dois níveis é portanto o mais simples de todos. Havendo k fatores, isto é k variáveis controladas pelo experimentador, o planejamento de dois níveis irá requerer a realização de 2^k ensaios diferentes, sendo chamado por isso de planejamento fatorial 2^k. Para cada variável, deve-se escolher dois níveis de valores, um maior e um menor. Ao maior será atribuído o sinal + menor o sinal -. Isso será importante na hora de construir a Matriz de Planejamento.

O número mínimo de experimentos foi de 2³, ou seja 8 experimentos

Tabela 3.4 - Determinação dos níveis das variáveis.

Variáveis	Representação da variável
Vazão do gás	A
Tipo de material	B

Número de contagens	C
---------------------	---

Obs: vazão do fluxo de gás = m^3/s

Este método ilustra claramente os efeitos principais e de interação e poucos experimentos, são necessários para entender as relações de causa e efeito entre as variáveis de resposta e as variáveis controladas. Determinando assim as variáveis crítica ao processo.

Tabela 4.5 - Matriz do planejamento experimental

Ensaio	A	B	C	D
1	-	-	-	-
2	+	-	-	+
3	-	+	-	+
4	+	+	-	-
5	-	-	+	+
6	+	-	+	+
7	-	+	+	-
8	+	+	+	+

As vazões do fluxo de gás utilizadas durante os experimentos no transporte das partículas foram de: (-) $0,45 m^3/s$ e (+) $0,65 m^3/s$.

Utilizou-se como material particulado a ser disperso no fluxo de gás o dióxido de titânio (-) e alumina calcinada (+).

Para obtenção de dados representativos nas contagens realizadas em cada ponto de amostragem numa chaminé ou duto, as normas indicam mais de uma contagem para cada ponto, devido as variações que possam ocorrer durante o período de amostragem. Durante os testes usando o contador de partículas variou-se o número de contagens, de uma única contagem (-) para duas contagens (+) em cada ponto avaliando a necessidade de mais de uma medida por ponto.

Os testes foram realizados com o planejamento estão mostradas no apêndice D.

O apêndice B mostra resultados das contagens de números de partículas realizadas durante a amostragem com o contador. Algumas destas contagens são transformadas em concentração mássicas, as quais são apresentadas no apêndice C.

3.4 - COMENTÁRIOS GERAIS

Neste capítulo foi apresentado um módulo experimental construído especialmente para realizar estudos de amostragem de partículas em corrente gasosas.

Os procedimentos de operação para obtenção de correntes gasosas contendo partículas dispersas, que representam situações reais, de interesse para realização de amostragem e quantificação de partículas foram apresentadas.

Apresentou-se neste capítulo as técnicas, equipamentos, condições de operações e material particulado no estudo de amostragem proposto.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VAZÃO NA QUEBRA DOS AGLOMERADOS/DISPERSÃO DAS PARTÍCULAS E FATOR DE DILUIÇÃO

Nestes experimentos procurou-se estudar a qualidade da dispersão das partículas no gás, sendo avaliado os seguintes parâmetros: a influência da vazão na quebra dos aglomerados e o fator de diluição, mantendo-se constante a taxa de alimentação do pó. Variou-se a vazão no intuito de encontrar condições adequadas de operação do módulo experimental para uma posterior análise da viabilidade do uso contador de partículas para a amostragem.

Os resultados dos experimentos com relação a variação das vazões e o influência da diluição nas concentrações de partículas, são ilustrados pelas figuras 4.1, 4.2. As figuras mostram o número de partículas detectadas pelo contador de partículas quando estas são dispersadas na corrente gasosa, para um único ponto de amostragem.

As tabelas 4.1 e 4.2 mostram resultados dos números de partículas detectadas para as vazões de 0,48 e 0,30 m³/s respectivamente, para os pontos de amostragem recomendadas, no caso de duto circular, de acordo com BS 3405.

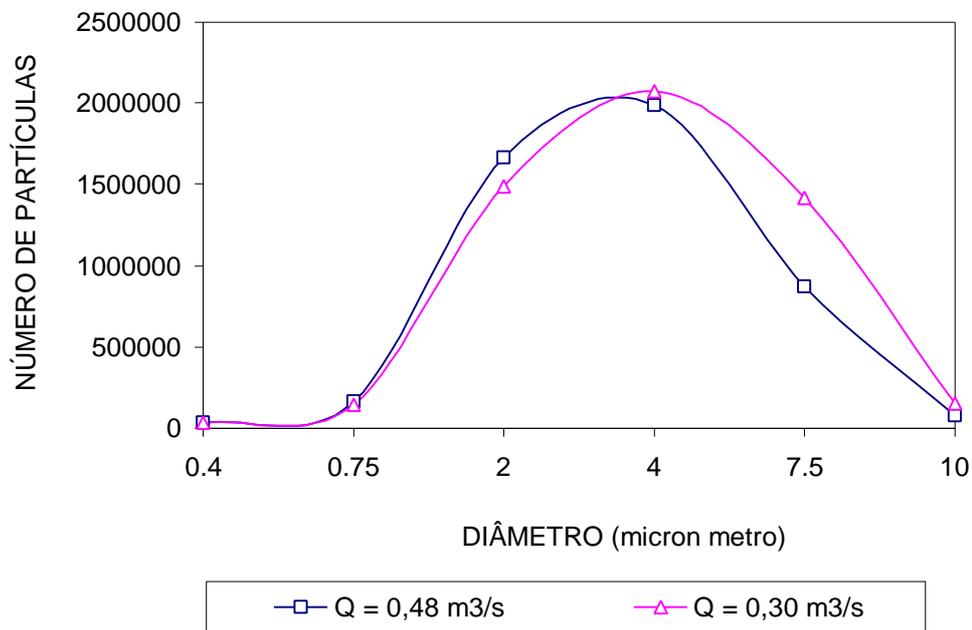
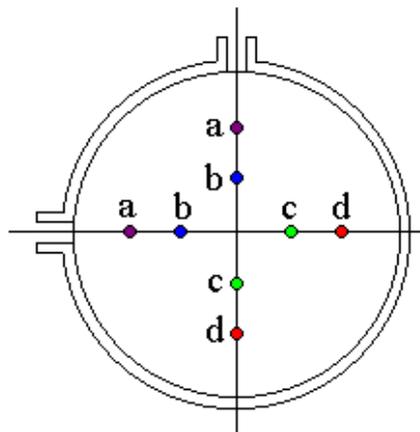


Figura 4.1: Distribuição do número de partículas da alumina obtidas num mesmo ponto de amostragem (ponto **b**)



Pontos de amostragem	Distancia da parede
a	0.065 D
b	0.250 D
c	0.750 D
d	0.935 D

Figura 2. 7 - Pontos de amostragem segundo BS3405 (referente ao capítulo 2)

A tabela 4.1 mostra os números de partículas de alumina contadas pelo contador e o número total de partículas.

Tabela 4. 1: Número de partículas de alumina contadas nos pontos de amostragem (vazão 0,48m³/s).

Diâmetro (µm)	Ponto a	Ponto b	Ponto c	Ponto d
0.3	17891	32880	24928	30323
0.5	123959	164728	180989	189121
1.0	1230860	1666140	1744095	1819918
3.0	1768113	1988522	1998511	1988962
5.0	1191768	869923	858477	812439
10	107117	81283	89437	99916
total	4439708	4803476	4896437	4940679

Tabela 4. 2: Número de partículas de alumina contadas nos pontos de amostragem (vazão 0,30m³/s).

Diâmetro (µm)	Ponto a	Ponto b	Ponto c	Ponto d
0.3	35472	32273	43175	32186
0.5	129708	147000	141581	138411
1.0	1375953	1487533	1453241	1378704
3.0	1975986	2076507	2052280	1975838
5.0	1513843	1414066	1481847	1579475
10	183189	152347	161288	189994
total	5214118	5309726	5333412	5294608

Como durante o experimento foi mantida constante a taxa de alimentação do pó, constatou-se que com o aumento da vazão do gás o número de partículas diminuiu. Isto pode ser verificado pelo total de partículas contadas, apresentadas nas tabelas 4.1 e 4.2.

As figuras 4.1 e 4.2 ilustram ainda que o efeito do aumento da vazão de gás contribuiu ainda para melhorar a dispersão. Nota-se nestas figuras que com o aumento da vazão aumenta-se o número de partículas menores e descreve-se o número das partículas de aglomerados com o aumento da vazão.

Nota-se que este efeito de quebra de aglomerado com o aumento da vazão de gás, não aumenta o número total de partículas ao contrário diminui, como ilustra as tabelas 4.1 e 4.2. O efeito da diluição sobrepõe-se ao efeito da quebra resultando num menor número de partículas.

Verifica-se que o aumento da vazão, quando se mantém constante a taxa de alimentação, serve para diluir a concentração em termos de números de partículas.

O efeito de diluição é também apresentado nas figuras 4.1 e 4.2. Verifica-se nestas figuras uma maior área abaixo da curva para menor vazão, significando o maior número de partículas, para a menor vazão. Estes resultados estão associados com os apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2.

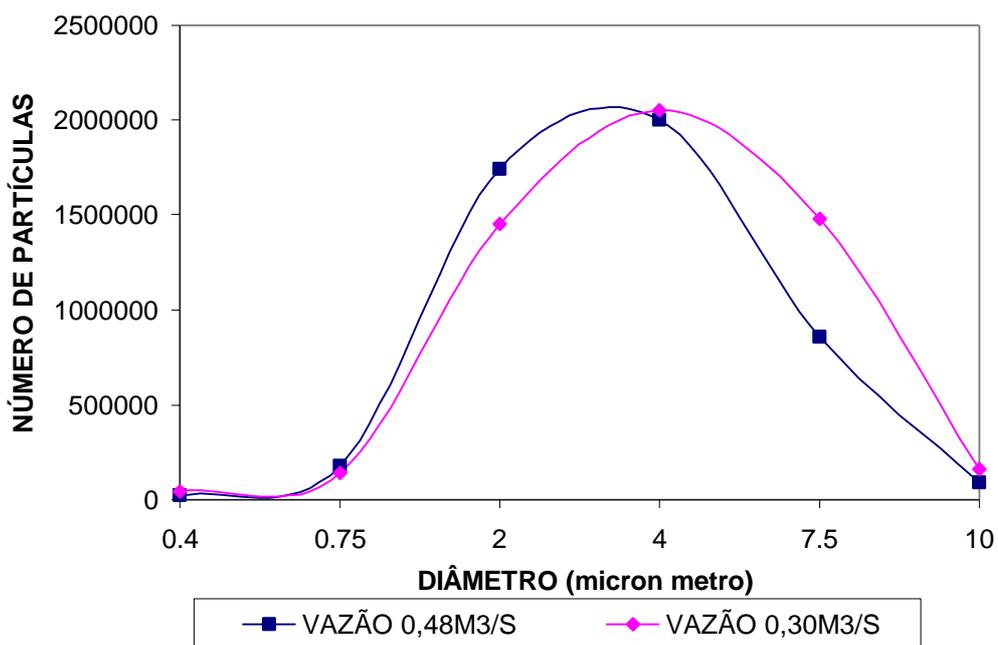


Figura 4.2: Distribuição do número de partículas da alumina num mesmo ponto de amostragem (ponto c)

Observa-se nas figuras acima, como também nas tabelas 4.1 e 4.2 que um pequeno número de partículas com tamanho de 10 μ m ou ligeiramente acima deste sendo detectado pelo contador de partículas.

Se observarmos as figuras 3.11, - distribuição de tamanho de partículas de alumina, as quais contém as maiores partículas testadas, verificamos não conter partículas maiores que 10 μm .

Embora o diâmetro em questão nas figuras 3.11 versus 4.1 e 4.2 não seja o mesmo, os resultados do contador são coerentes no tocante ao reduzido número de partículas com diâmetro menores que 10 μm . A figura 3.11 trata do diâmetro de Stokes enquanto a 4.1 e 4.2 tratam de diâmetro óptico médio para uma faixa de tamanho.

4.2 - AVALIAÇÃO DO PERFIL DE DISTRIBUIÇÃO DO PÓ NO INTERIOR DO DUTO

Em um duto pode se esperar uma não uniformidade do fluxo de gás, conseqüentemente concentração de partículas e distribuição de tamanho não uniforme. As amostras devem ser obtidas na seção transversal do duto de forma a representar o total de material transportado. Se o perfil de velocidade e concentração são uniformes um único ponto de amostragem é suficiente para quantificar a concentração e tamanhos de materiais transportados.

Allen (1983), comenta que amostras representativas são difíceis de obter, devido às obstruções no escoamento que podem criar turbulência e uma carga de poeira assimétrica. Mesmo na ausência de obstáculos a concentração de poeira poderá não ser uniforme, sendo assim, deve-se fazer a amostragem em vários pontos da seção transversal.

De acordo com a norma BS 3405, selecionou-se posições de amostragem localizadas na seção transversal do duto, perpendicularmente a direção do fluxo de gás, como mostradas no capítulo 2.

Nestes experimentos avaliaram-se a distribuição do pó no interior do duto, variando-se as vazões do fluxo de gás, o material particulado, o número de contagem, de modo que foram extraídas amostras em cada ponto de amostragem como indicado na BS 3405, tomadas em duas linhas de amostragem localizadas perpendicularmente no duto.

As figura 4.3 e 4.4 mostram as distribuições de tamanho de partículas do dióxido de titânio para a vazão de $0.65 \text{ m}^3/\text{s}$, extraídas nos pontos de amostragem **a**, **b**, **c**, **d**, e como indicado na BS 3405 nas linhas horizontal e vertical de amostragem.

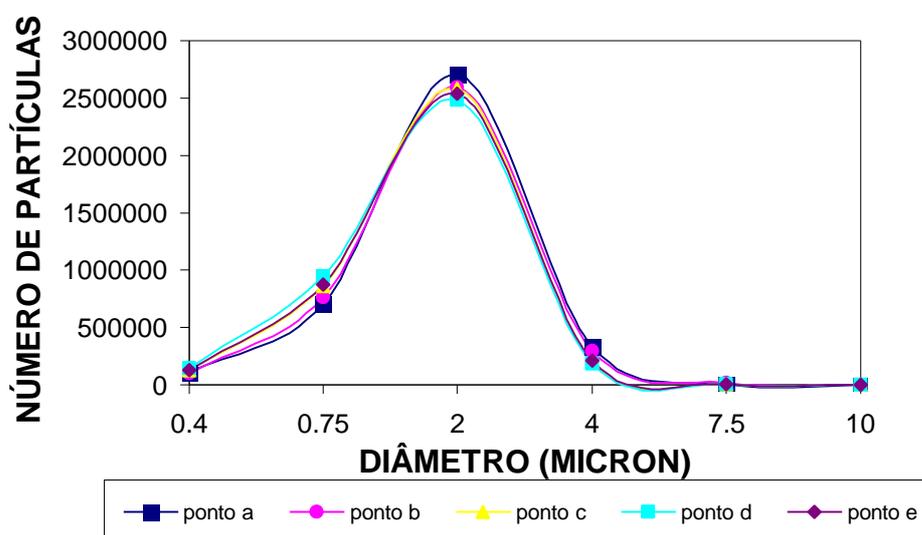


Figura 4.3: Distribuição do número de partículas de dióxido de titânio (ensaio 1), linha vertical. Vazão $0.65 \text{ m}^3/\text{s}$.

Durante este experimento, foi mantida constante a taxa de alimentação, as coletas foram realizadas numa vazão de sucção de 1 cfm. O tempo de contagem foi de 3 minutos, e o intervalo nas contagens entre um ponto e outro foi de 3 minutos e 20 segundos, visando a limpeza do contador, e em restabelecimento do perfil dentro do duto, possivelmente perturbado pela movimentação da sonda de amostragem.

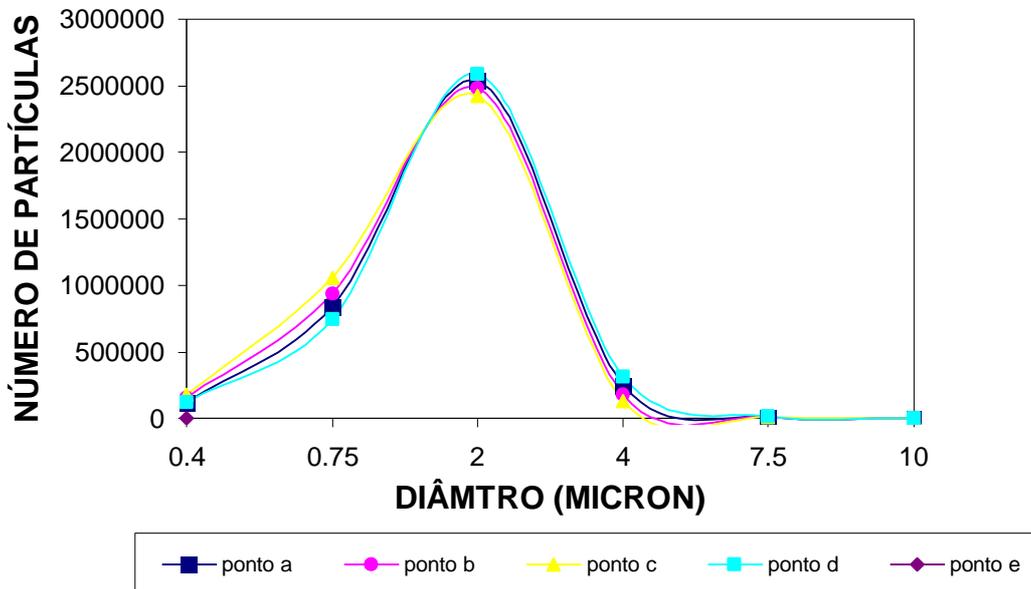


Figura 4.4: Distribuição do número de partículas de dióxido de titânio (ensaio 1), linha horizontal. Vazão $0.65 \text{ m}^3/\text{s}$.

A figura 4.3 mostra a distribuição numérica de partículas, obtidas por amostragem nos pontos **a**, **b**, **c**, **d**, **e**, contidos na linha de amostragem vertical, com uma contagem em cada ponto de amostragem, realizadas pelo contador de partículas a laser em condições isocinéticas.

Os resultados dos experimentos com relação a distribuição do pó (TiO_2) no interior, ilustrados nas figuras acima, indicam que no interior do duto as partículas estão distribuídas homoganeamente, pois observamos a sobreposição das curvas que representam os pontos de amostragem, nas várias posições de amostragem.

Comparando-se a distribuição obtida pelo contador durante este experimento com o dióxido de titânio, com a distribuição original da mesma partícula obtida pelo sedígrafo, embora as curvas não se referem ao mesmo tipo de diâmetro o contador detecta partículas compatíveis com os apresentados

nota-se que as curvas estão deslocadas para a região de menores diâmetros no gráfico, e para os diâmetros maiores 7,5 μm até 10 μm o número de partículas é praticamente zero, de acordo com a distribuição original do pó.

A figura 4.4 mostra a distribuição numérica do dióxido de titânio, obtidas por amostragem nos mesmos pontos de amostragem, na mesma vazão de 0.65 m^3/s , mas na linha de amostragem horizontal, as contagens também foram realizadas pelo contador em condições quase isocinéticas. Na figura 4.4, igualmente a figura 4.3, nota-se a distribuição homogênea do pó no interior do duto. Comparando as duas curvas observa-se na figura 4.4 que as curvas estão bem pouco melhor localizadas umas sobre as outras do que a figura 4.3.

Na continuidade deste teste efetuou-se a amostragem do mesmo material particulado, mas variou-se a vazão e os números de contagens. Com uma vazão de 0.45 m^3/s e a média de duas contagens em cada ponto de amostragem, obteve-se a distribuição de números de partículas de dióxido de titânio para ambas as linhas de amostragem. A figura 4.5 mostra a distribuição de números de partículas para o dióxido de titânio na vazão de 0.45 m^3/s , com duas contagens em cada ponto de amostragem

Observa-se na figura 4.5 que as curvas que representam os pontos de amostragem estão sobrepostas, mas não para toda faixa de tamanho de partículas, como nota-se para partículas com tamanho acima de 2 μm . A distribuição do pó no interior do duto é uniforme, principalmente para partículas menores que 2 μm .

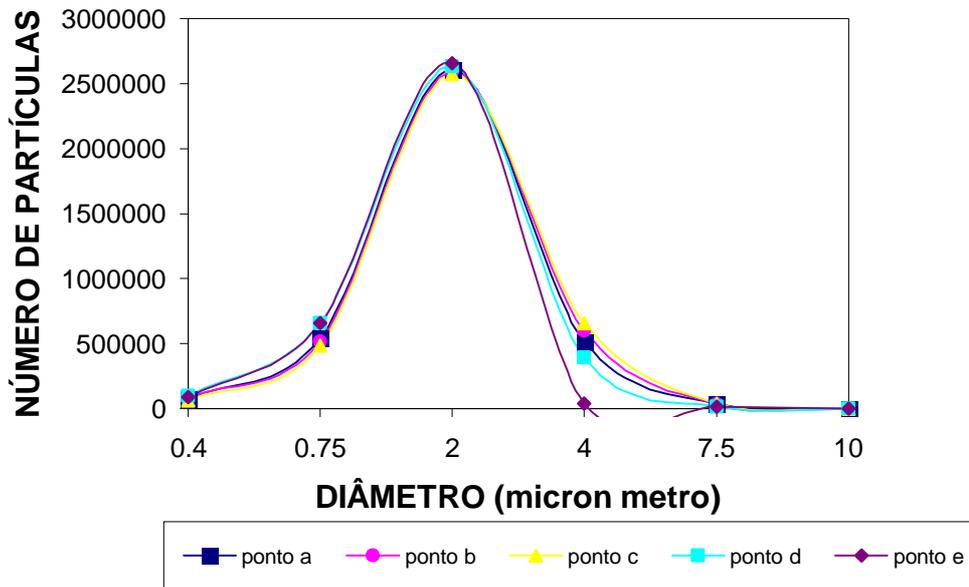


Figura 4.5: Distribuição de tamanho por números do dióxido de titânio (ensaio 3), linha vertical. Vazão $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$.

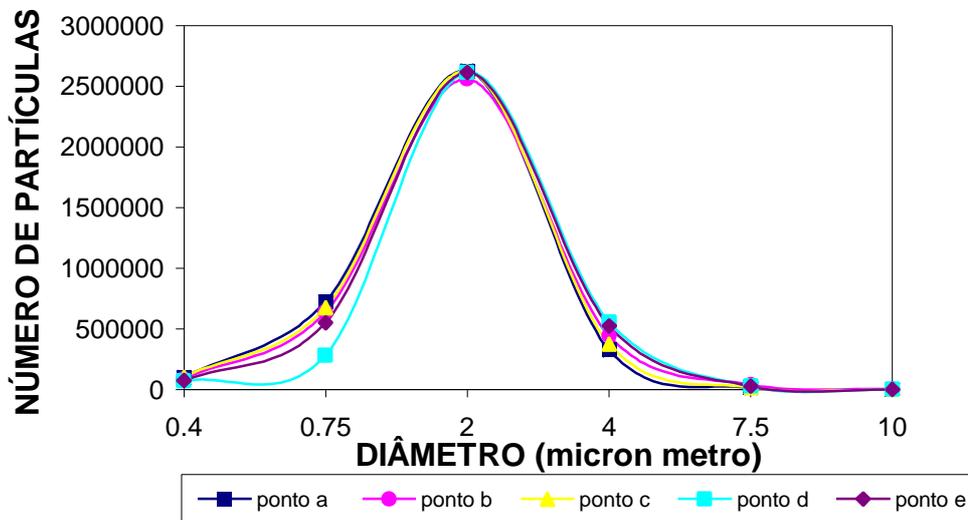


Figura 4.6 Distribuição de tamanho por números de dióxido de titânio (ensaio3), linha horizontal. Vazão $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$.

Na figura 4.6 observa-se a situação inversa, para partículas em torno de $2 \mu\text{m}$ a distribuição do pó no interior do duto esta homogênea, o mesmo não

acontece para partículas na faixa de tamanho menores que $1\ \mu\text{m}$ e na faixa acima de $4\ \mu\text{m}$ até $7,5\ \mu\text{m}$. Nota-se que para partículas em torno de $10\ \mu\text{m}$ o número de partículas registrados pelo contador é praticamente zero.

Buscando-se maiores informações sobre a dispersão de material no interior do duto, realizou-se o mesmo experimento, mas substituindo-se o material particulado anterior pela alumina calcinada. Continuando a mesma taxa constante de alimentação de pó, as mesmas vazões de $0,65$ e $0,45\ \text{m}^3/\text{s}$ e as mesmas variações de contagens. Tomou-se o devido cuidado em manter condições de amostragens isocinéticas.

As figuras 4.7 e 4.8 mostram as distribuições numéricas de partículas da alumina calcinada para as vazões de $0,65$ e $0,45\ \text{m}^3/\text{s}$, respectivamente.

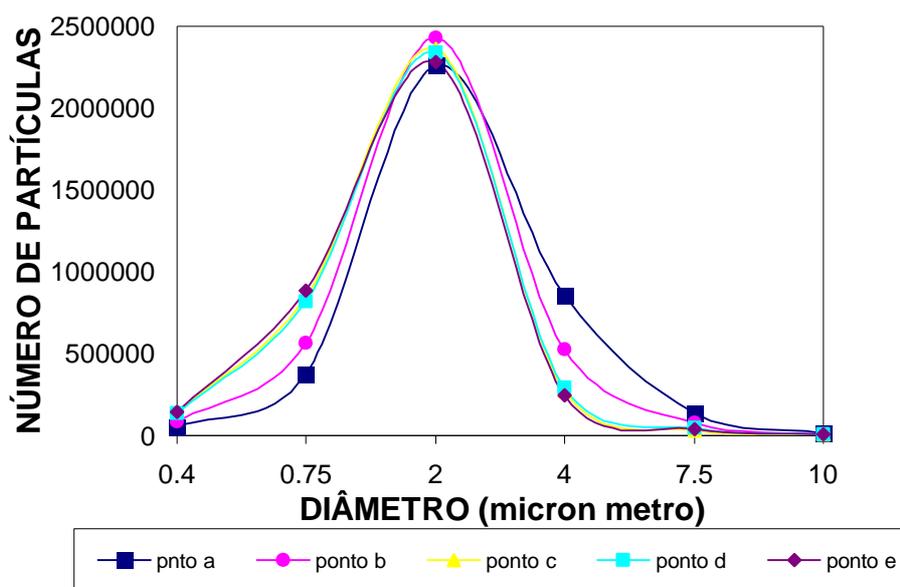


Figura 4.7: Distribuição de partículas da alumina (ensaio 4), linha vertical.
Vazão $0,65\ \text{m}^3/\text{s}$.

A figura 4.7 ilustra a amostragem da alumina calcinada realizada pelo contador de partícula nos pontos de amostragem a, b, c, d, e, referentes a linha vertical. Observa-se nesta figura que as curvas não estão sobrepostas, o que

sugere que neste caso o pó não está distribuído homogeneamente no interior do duto. Este resultado pode indicar que o perfil ainda não estava estabelecido, pois tratando-se de ser a linha vertical a primeira a ser amostrada, não foi esperado o tempo suficiente para estabelecer o perfil para se iniciar a amostragem. Se compararmos com a distribuição obtida na amostragem da alumina na linha horizontal, ilustrada na figura 4.7, podemos observar que após certo tempo o perfil se encontrava estabelecido e a distribuição do pó no interior do duto estava homogênea.

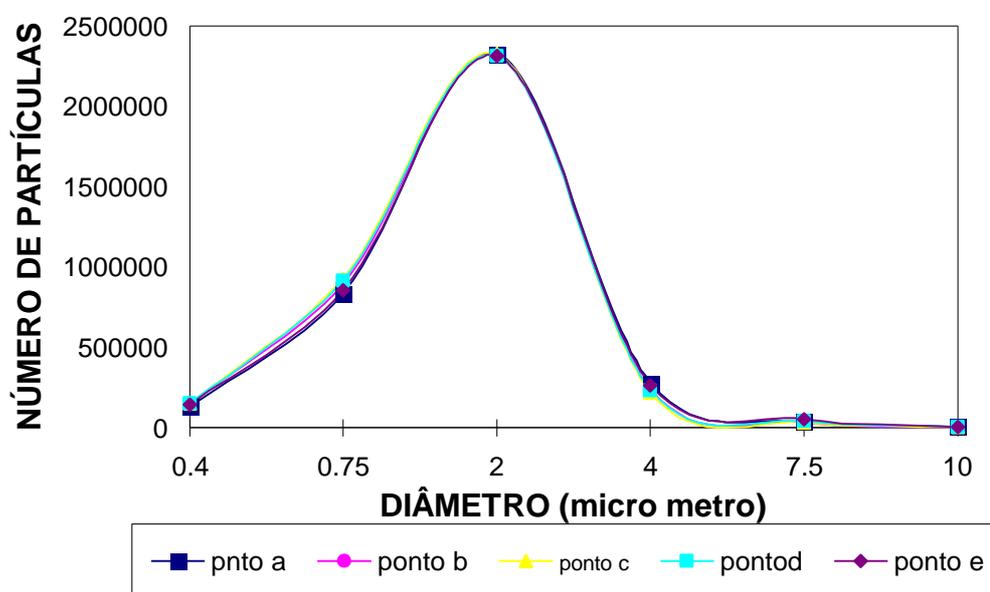


Figura 4.8: Distribuição de partículas da alumina (ensaio 4), linha horizontal.

Vazão $0,65\text{m}^3/\text{s}$.

Os resultados deste teste mostram que as curvas relacionadas com os pontos de amostragem de encontram sobrepostas indicando que a distribuição do pó para esta vazão nesta linha de amostragem é homogênea. Excetuando os resultados da figura 4.8.

As figuras 4.9 e 4.10 apresentam resultados de amostragem de partículas dispersas no gás escoando com a vazão de $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$, as linhas vertical e horizontal respectivamente. Verifica-se para este caso melhor homogeneidade na linha horizontal.

Nas figuras 4.3 a 4.10 apresentou-se as distribuições de tamanho de partículas de dióxido de titânio e alumina detectados na corrente gasosa em vários pontos de amostragem (**a**, **b**, **c**, **d** e **e**) nas direções vertical e horizontal.

De uma maneira geral observa-se que o perfil de distribuição por número de partículas não é muito variado na seção transversal do duto. Os perfis horizontais e verticais são bastante próximos.

As maiores variações nos perfis ocorreram com o material particulado o dióxido de titânio. Para a concentração da alumina observou-se uma não homogeneidade na direção vertical quando se efetua a amostragem de material sendo transportando em altas vazão. Este resultado parece ser atípico em decorrência de que melhores resultados de homogeneizações são observados com menor vazão.

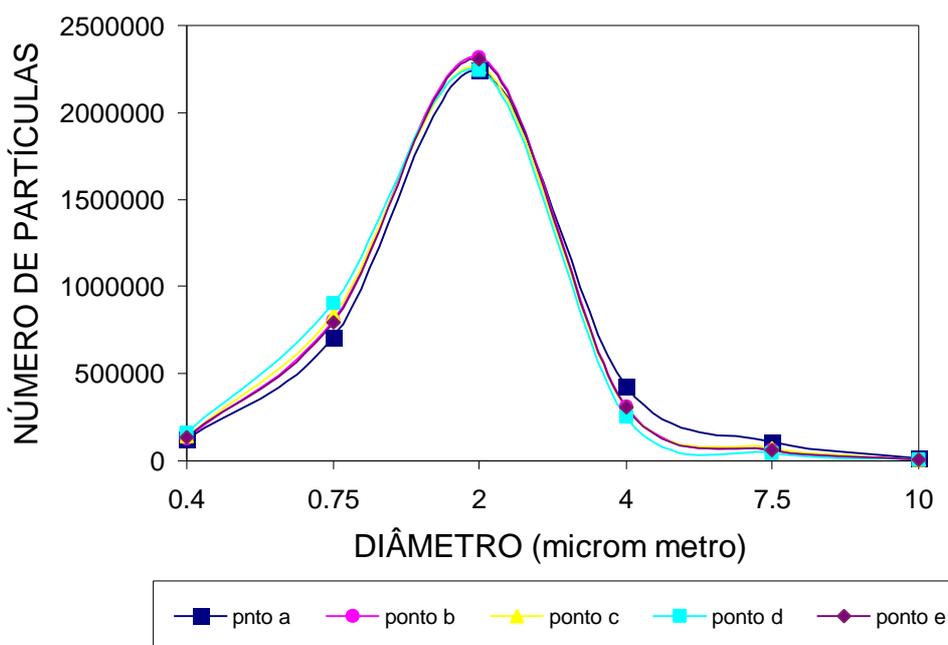


Figura 4.9: Distribuição de partículas da alumina (ensaio 2), linha vertical.

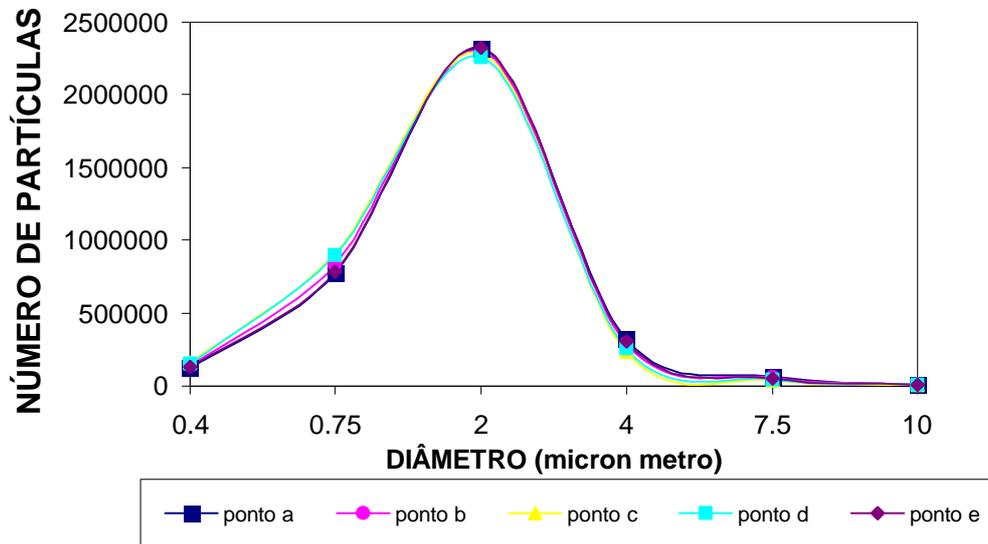
Vazão 0,45 m³/s.

Figura 4.10 - Distribuição de partículas da alumina (ensaio 2), linha horizontal.

Vazão de 0,45 m³/s.

4.3 - AVALIAÇÃO DO NÚMERO DE CONTAGENS EM CADA DE PONTO AMOSTRAGEM

A norma BS 3405 (1983) define ponto de amostragem como o local específico na linha de amostragem onde a amostra é extraída. A duração da amostragem para cada ponto não deve ser menor que três minutos, para minimizar erros com a estabilização do perfil das linhas de corrente no interior do duto. Isto é necessário para assegurar que o tempo de amostragem seja adequado para extrair uma quantidade necessária de partícula a ser analisada. Em cada ponto, é realizada a contagem das partículas. Para medidas representativas torna-se necessária realizar mais de uma contagem em cada

ponto e trabalha-se com a médias aritmética dos valores obtidos nas contagens, principalmente se o regime é transiente.

Neste experimento avaliou-se a influência do número de contagens em cada ponto, pois como as contagens são realizadas por um contador a laser de precisão investiga-se a necessidade de mais de uma contagem em cada ponto.

Para a realização desse experimento amostrou-se uma corrente gasosa, contendo particulados dispersos, de vazão conhecida, taxa de alimentação também constante e realizou-se duas contagens em cada ponto de amostragem.

As figuras 4.11 a 4.15 mostram números de partículas observadas em duas contagens realizadas e a média correspondente.

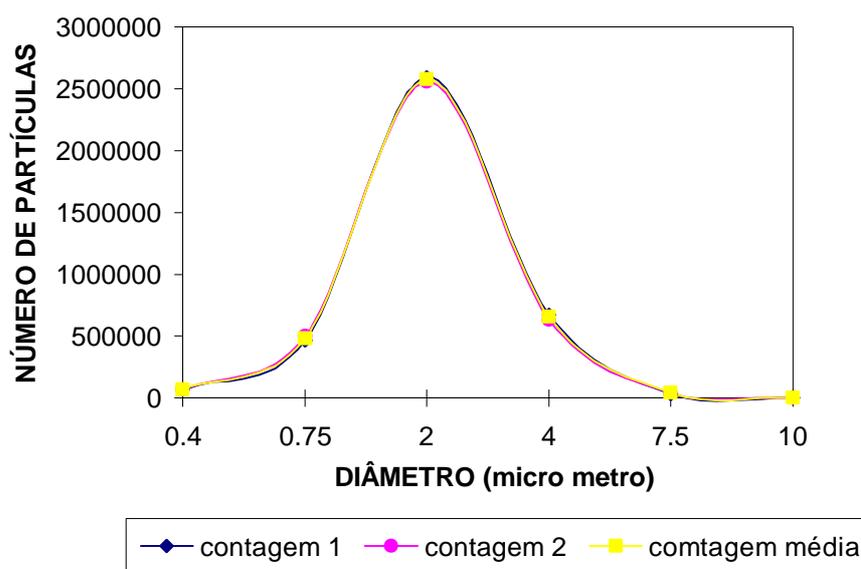


Figura 4.11 - Contagens de partículas de dióxido de titânio realizadas no ponto de amostragem (c), linha vertical. Vazão $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$.

Os resultados mostram as duas contagens e a respectiva média realizadas ponto c, localizado na linha vertical, próximo a parede, amostradas por um tempo de 3 minutos numa vazão de gás de $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$. Observa-se que as curvas

estão coincidentes, o que indica que apenas uma medida representaria a contagem naquele local, nota-se que não houve variações consideráveis nos valores das contagens.

As figuras 4.12 a 4.15 mostram resultados sobre a influência do número de contagem para outros pontos de amostragem na seção transversal do duto.

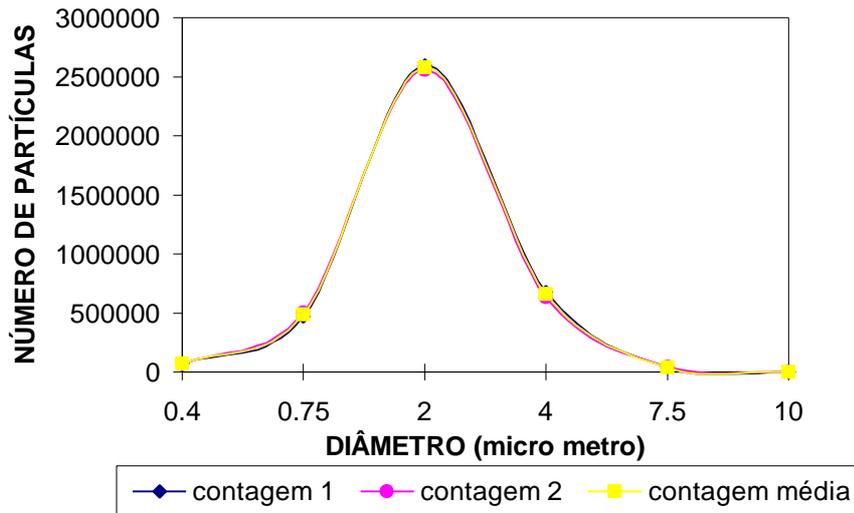


Figura 4.12 - Contagens de partículas de dióxido de titânio, realizadas no ponto de amostragem (d), linha vertical. Vazão $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$.

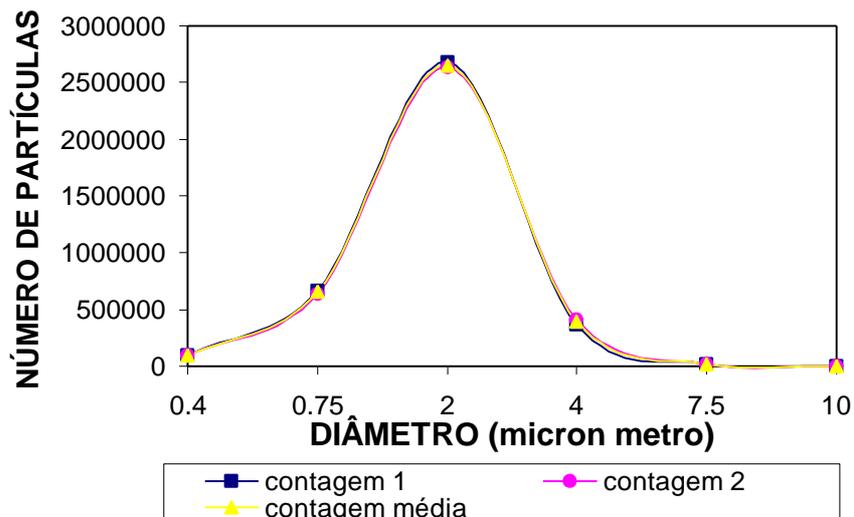


Figura 4.13 - Contagens de partículas de dióxido de titânio realizadas no ponto de amostragem (e), linha vertical. Vazão $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$.

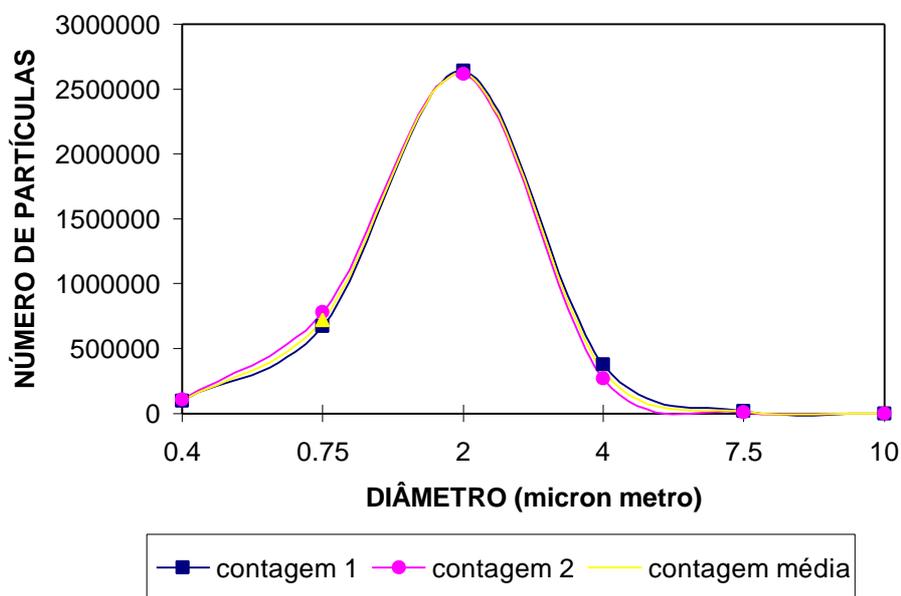


Figura 4.14 - Contagens de partículas de dióxido de titânio realizadas no ponto de amostragem (a), linha vertical. Vazão $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$.

Observando-se os resultados, nos quais mudou-se apenas os pontos de amostragem, verifica-se também que as variações de uma contagem a outra são desprezíveis. Nota-se que para os pontos localizados tanto na linha horizontal como na linha horizontal apenas uma contagem realizada pelo contador representaria os valores obtidos.

A obtenção de praticamente o mesmo perfil de distribuição de tamanho e concentração de partículas no mesmo local de amostragem como demonstrou as figuras 4.11 a 4.15, deve-se a taxa de alimentação de partículas no duto ter sido constante durante os experimentos, caracterizando em regime estacionário.

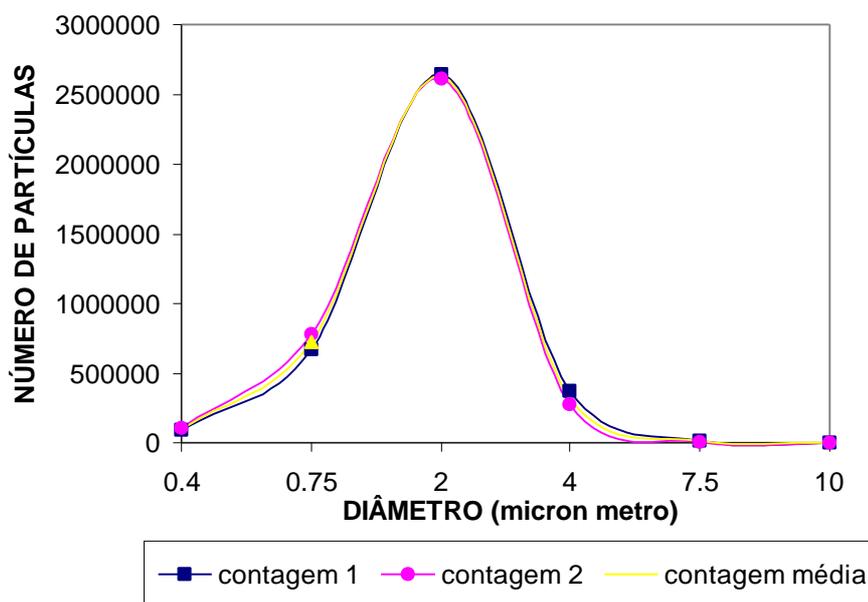


Figura 4.15 - Contagens de partículas do dióxido de titânio realizadas no ponto de amostragem (a), linha horizontal. Vazão $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$,

4.4 - CONVERSÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO POR NÚMERO PARA UMA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO POR MASSA

Neste experimento avaliaram - se as distribuições por massa obtidas à partir das distribuições por número resultante das contagens obtidas pelo contador de partículas.

Boubel (1994) cita umas das mais importantes características dos poluentes particulados como sendo a concentração mássica e a distribuição de tamanhos. Distribuições de tamanho são determinadas pela classificação das partículas pelo diâmetro aerodinâmico, ou propriedades de dispersão de luz. As propriedades da dispersão de luz são utilizadas para determinar a distribuição de tamanho por números. Segundo Svarovsky (1990), a maioria dos equipamentos modernos, particularmente aqueles que contam partículas e

medem a distribuição de partículas por número. Este tipo de distribuição raramente é utilizada diretamente, pois os regulamentos e leis relacionam o controle de poluentes particulados com concentração de partículas em unidades de massa, com isso avalia-se a possibilidade de uma conversão de distribuição numérica para uma distribuição por massa. A conversão de um tipo de distribuição é teoricamente possível mas isso assume um fator de forma constante por toda extensão da distribuição, a qual freqüentemente pode não ser verdade e cada conversão pode resultar em um erro.

O contador de partículas tal como o modelo A2408 METONE utilizado neste trabalho, usa as propriedades ópticas das partículas individuais para discriminação do tamanho, fornecendo distribuição de tamanho por números. As conversões dessas distribuições para outro tipo de distribuição são apresentadas em detalhe na literatura (Svarovsky, 1990).

Para o caso da transformação da distribuição por número para a distribuição por massa tem-se:

$$f_m(d) = k_2 \cdot D^3 \cdot f_n(d) \quad (4.1)$$

Sendo que $f_m(d)$ é a freqüência da distribuição por massa

$f_n(d)$ é a freqüência da distribuição por número

d é o diâmetro da partícula

K_2 é a constante que contém o parâmetro de forma ou seja

$$k_2 = b \cdot \rho$$

Dessa forma utilizando uma analogia à equação acima podemos obter a massa m_i de cada classe ou seja intervalo de tamanho de partículas Gomide (1983).

$$M_i = b \cdot \rho \cdot d^3 \cdot N_i \quad (4.2)$$

Em que N_i é o número de partículas no intervalo de tamanho, d_i é o diâmetro médio das partículas ou da classe, b é o parâmetro de forma e ρ é a densidade da partícula. A densidade das partículas analisadas é independentes do tamanho, por se tratar de um material homogêneo em termos de constituição química e estrutura interna. Considerando a forma esférica para as partículas $b = \pi/6$, pode-se calcular a massa total da amostra.

$$M_t = \pi/6 \cdot \rho \cdot \sum (d_i)^3 \cdot N_i \quad (4.3)$$

A tabela 4.3 mostra os resultados dos cálculos das conversões das distribuições por número obtidas com o contador de partículas para a respectivamente distribuições por massa para a alumina calcinada, realizadas com vazão de $0,65 \text{ m}^3/\text{s}$, no ponto **a** da linha vertical de amostragem (figura 2.7). O número de partículas N contadas em cada ponto, para cada faixa de tamanho fornecido pelo contador, é convertido em quantidade de massa, segundo equação (4.2), considerando que as partículas de alumina tenham forma esférica, assumiu-se o parâmetro de forma igual a $\pi/6$.

Tabela 4.3 - Tabela de conversão de número para massa (alumina calcinada, na vazão $0.65 \text{ m}^3/\text{s}$, amostragem no ponto **a**).

Diâmetro(μm)	N	m(g)	C (g/m^3)
0.4	89089	2.68.E-9	3.174E-8
0.75	551937	1.09E-7	1.296E-6
2	2428887	9.15E-6	1.082E-4
4	517132	1.55E-5	1.842E-4
7.5	86718	1.72E-5	2.036E-4
10	9008	4.25E-6	5.013E-5

A concentração mostrada na tabela 4.3 é obtida de :

$$C(d_p) = \frac{\text{massa}_{\text{partícula contadas}}}{\text{vazão}_{\text{amostra}} * \text{tempo}_{\text{amostra}}} \quad (4.4)$$

A figura 4.16 ilustra a distribuição de concentrações obtidas a partir da distribuição po número.

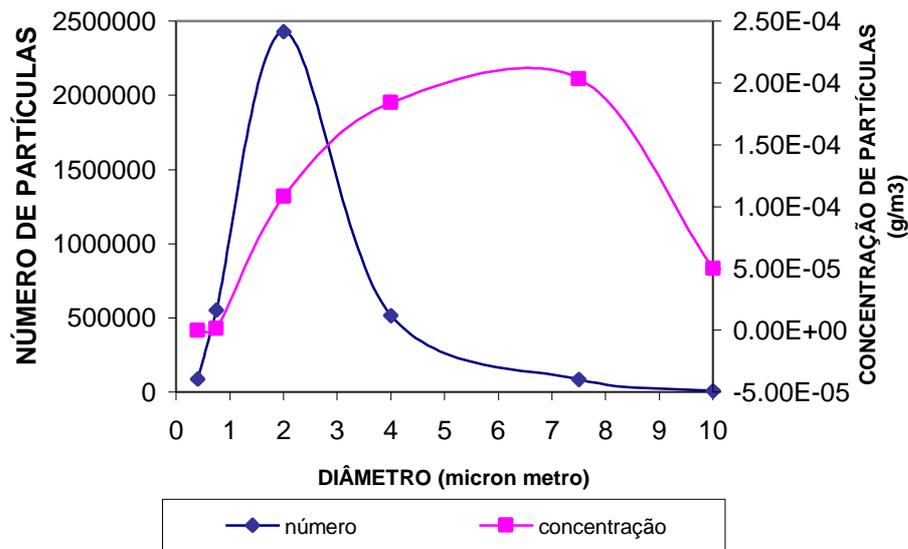


Figura 4.16 - Distribuição de tamanho por número e distribuição de tamanho por massa .

Svarovavsky (1990) cita que na conversão de distribuição de tamanho por números para uma distribuição tamanho por massa, necessita-se conhecer o fator de forma da partícula. Como assumiu-se que as partículas possuem forma esférica, sendo $b = \pi/6$. Esta consideração é bastante aproximada e os valores obtidos de concentração mássica podem portanto não serem tão reais.

Uma comparação da distribuição de tamanhos por massa pode ser feita com a distribuição por número, mostradas na figura 4.16. É evidente que na transformação da distribuição por número para uma distribuição por massa, tem-se o deslocamento da curva de distribuição por massa em direção aos maiores valores de tamanho de partículas.

Segundo Wileke (1990) através de medidas por número de por um sensor ótico, o volume ou massa podem ser calculados para cada tamanho de partículas. Convertendo a “medida” obtida à partir de uma contagem para uma distribuição de volume e massa, de modo que a distribuição de tamanho de partículas número para um dado aerosol, enfatiza na faixa de tamanho de partículas pequenas, enquanto a distribuição de tamanho por volume ou massa é enfatiza na faixa de tamanho de partículas grandes. O contador de partículas a laser utiliza 6 canais na contagem das partículas, nas faixas de tamanho como ilustrado na tabela 3.1. O intervalo de tamanhos das partículas é representado pelo seu tamanho médio. Nota-se que para as primeiras faixas de tamanho o intervalo é menor o que implica numa maior representatividade comparado as últimas faixas onde os intervalos são maiores. Isto também contribuir para um desvio da concentração mássica de seu valor real.

As transformação das distribuição de concentração numérica para massas embora não reais mas sim aproximações servem como parâmetro na avaliação de concentração para estimação de taxas de emissão.

4.5 - AVALIAÇÃO DOS ERROS DE VELOCIDADES NÃO ISOCINÉTICAS

Para a realização da amostragem sob condição isocinética, conhecendo os valores das velocidades do fluxo de gás, bem como a vazão de amostragem, projetou-se bocais de amostragem baseados na equação 3.1(item3.3.2).

$$\frac{Q_s}{Q_0} = \left(\frac{D_s}{D_0} \right)^2 \quad (3.1)$$

Sendo que Q_s é a vazão de amostragem, Q_0 é a vazão de gás no duto, D_s é o diâmetro do bocal de amostragem e D_0 é o diâmetro do duto. De acordo com a equação (3.1) o diâmetro do bocal é baseado na velocidade média através do duto

A condição de amostragem isocinética na realidade especifica que a velocidade de amostragem deve ser igual a velocidade local no duto no ponto de amostragem.

Considerando que a velocidade no duto pode apresentar variações, o dimensionamento do diâmetro do bocal pela equação 3.1, não garantirá condição isocinética se a vazão de amostragem é constante, como foi nos testes realizados.

A figura 4.17 e 4.18 ilustram a distribuição de tamanho por número obtidas, para a vazão de $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$, por meio de amostragem realizada nos pontos estabelecidos no duto.

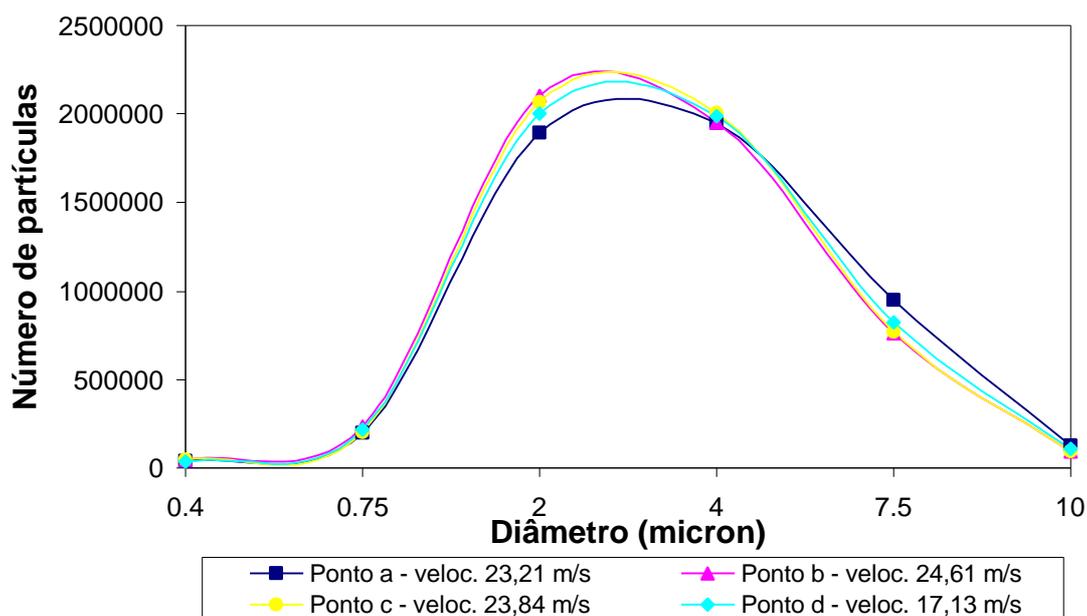


Figura 4.17 - Distribuição numérica de partículas de alumina, linha vertical.
Vazão $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$.

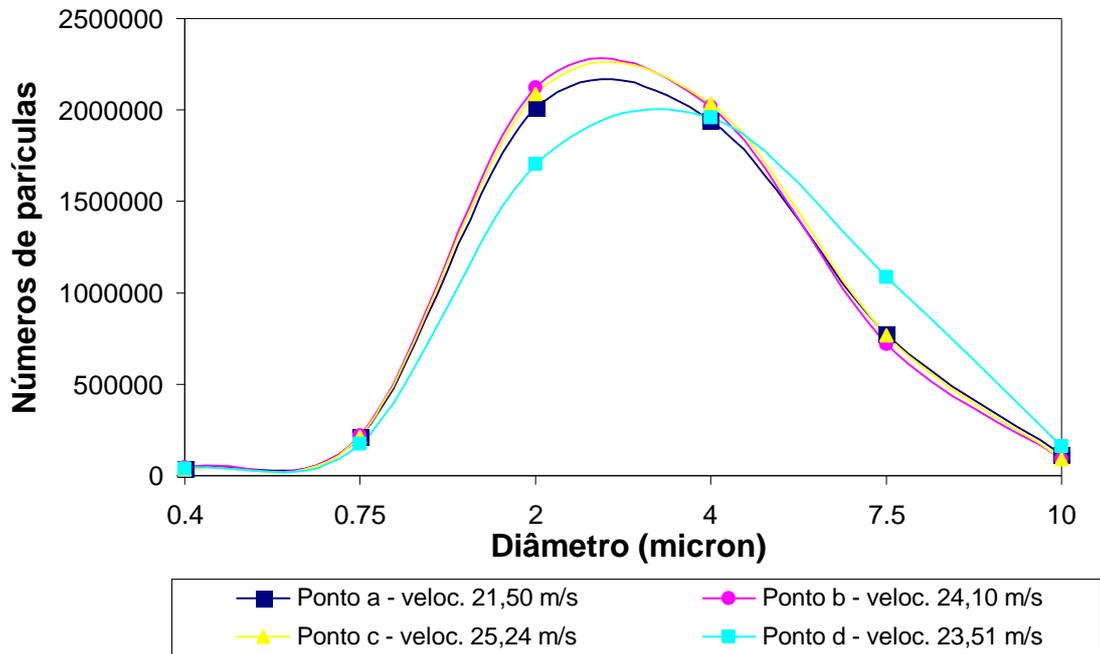


Figura 4.18 - Distribuição numérica de partículas de alumina, linha horizontal.
Vazão $0,45\text{m}^3/\text{s}$.

Observa-se na figura 4.17 e 4.18, as velocidades locais para cada ponto amostrado ao longo da seção transversal. Sendo que o bocal de amostragem foi construído baseado na velocidade média do fluxo.

O diâmetro do bocal usado para vazão de $0,45\text{m}^3/\text{s}$ é de $0,49\text{cm}$ (tabela 3.2). Para vazão constante de amostragem no contador de 1cfm , tem-se que a velocidade de amostragem é $25,02\text{m/s}$.

A tabela 4.4 mostra as velocidades locais nos pontos de amostragem a, b, c, d, nas linhas vertical e horizontal, a velocidade de amostragem baseada na vazão constante do contador e no diâmetro do bocal, quando se opera no duto com vazão de $0,45\text{m}^3/\text{s}$.

Tabela 4.4 - Velocidades locais, velocidade de amostragem e os respectivos bocais de amostragem isocinéticos.

Ponto de amostragem	velocidade local(m/s)	velocidade de amostra(m/s)	diâmetro bocal (cm)	diâmetro bocal ideal (cm)
a	23.21	25.02	0.49	0.50
b	24.61	25.02	0.49	0.49
c	23.84	25.02	0.49	0.50
d	17.13	25.02	0.49	0.59
a*	21.50	25.02	0.49	0.52
b*	24.10	25.02	0.49	0.49
c*	25.24	25.02	0.49	0.48
d*	23.51	25.02	0.49	0.50

* linha de amostragem horizontal

Então para uma amostragem isocinética a velocidade de sucção na entrada do bocal deverá ser a mesma, da velocidade de ar local no duto. No entanto como pode ser visto nas figuras 4.17 e 4.18 e tabela 4.4, as velocidades nos pontos de amostragem diferem um pouco dessa velocidade, significando que não são velocidades isocinéticas, mas sim anisocinéticas, pois para amostrar isocineticamente nestes pontos, a velocidade de sucção no bocal deveria ser a mesma velocidade que é indicada naquele ponto.

Cada ponto de amostragem deveria ter um bocal de acordo com a velocidade local, o que não ocorreu na realidade, nem seria viável, então um certo erro de amostragem anisocinético pode ser considerado.

Como a velocidade de amostragem é de 25,02 m/s, para uma amostragem sob condições isocinéticas, a velocidade do gás nos pontos de amostragem deveriam ser igual a velocidade a velocidade de amostragem. Mas observando-

se a tabela 4.4 tem-se que para os pontos a, b, c, d, a*, b* as velocidades do fluxo de gás estão abaixo da velocidade de amostragem. Sendo assim durante a amostragem o bocal coleta mais linhas de corrente, mas as partículas grandes próximas a borda do bocal são incapazes de seguir as linhas de corrente e escapam da coleta do bocal. Se observarmos o ponto c*, este possui o valor de velocidade mais próximo ao da velocidade de amostragem, então este ponto é o que mais se aproxima da condição de amostragem isocinética. No caso do ponto d* , observa-se que o valor da velocidade é maior que a velocidade de amostragem, para esse caso tem-se que as linhas de corrente começam a divergir ao redor das bordas do bocal e as partículas grandes de muita inércia são incapazes de seguir as linhas de corrente e são capturadas pelo bocal de amostragem.

Cálculo do erro associado com amostragem anisocinética

Erros associados com a amostragem isocinética foram discutidos no capítulo 2, onde a correlação de Samata (1993) é apresentada. A partir do valor da concentração obtida sob condições anisocinéticas (medidas experimentais), esta correlação permite obter o valor da concentração das partículas que seriam obtidas para a condição isocinética, que é a condição recomendada para realização de amostragem representativa em dutos.

Como já apresentado no capítulo 2 usaremos as correlações de Samata (1993) para estimar as concentrações que seriam obtidas se a amostragem fosse conduzida isocineticamente.

As tabela 4.5 e 4.6 mostram os valores dos parâmetros das correlações de Samata (1993) e as concentrações de alumina calcinada obtidas experimentalmente na condição anisocinética (C_s) e as concentrações isocineticamente (C_o), que seriam medidas no ponto de amostragem (a) e (b) respectivamente, para a vazão de $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$. No ponto (a), temos que a velocidade local no duto, $V_o = 23.21 \text{ m/s}$ e a velocidade de amostragem $V_s =$

25.02m/s, que resulta em $V = 0.9276$. No ponto (b), temos que a velocidade local no duto e $V_o = 24.61$ m/s, sabendo-se que $V_s = 25.02$, tem-se $V = 0.9836$.

Tabela 4.5 - Concentração experimental e concentração isocinética (segundo correlação de Samata), partículas da alumina, amostragem no ponto (a).

D_p (μm)	C	$C_s(\text{g}/\text{m}^3)$	$C_o(\text{g}/\text{m}^3)$
0,4	0.999	3.17E-8	3.17E-8
0,75	0.999	1.30E-6	1.30E-6
2,0	0.994	1.08E-4	1.09E-4
4,0	0.963	1.84E-4	1.91E-4
7,5	0.964	2.04E-4	2.11E-4
10	0.964	5.01E-5	5.20E-5

Tabela 4.6 - Concentração experimental e concentração isocinética (segundo correlação de Samata), partículas de alumina, amostragem no ponto (b).

D_p (μm)	C	$C_s(\text{g}/\text{m}^3)$	$C_o(\text{g}/\text{m}^3)$
0,4	0.999	4.88E-8	4.88E-8
0,75	0.999	1.99E-6	1.99E-6
2,0	0.998	1.66E-4	1.67E-4
4,0	0.992	2.83E-4	2.86E-4
7,5	0.992	3.13E-4	3.16E-4

10	0.992	7.71E-5	7.78E-5
----	-------	---------	---------

Da mesma forma que as tabelas 4.5 e 4.6, as tabelas 4.7 e 4.8 mostram os valores obtidos no ponto (c) e (d), para a vazão de $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$, de alumina calcinada. No ponto (c), temos $V_o = 23.84 \text{ m/s}$, sabendo-se que $V_s = 25.02 \text{ m/s}$, tem-se pela correlação que $V = 0.9528$. Para o ponto (d), temos $V_o = 17.13 \text{ m/s}$, tem-se que $V = 0.6846$.

Quando a condição de amostragem é isocinética o valor de V é igual a 1, ou seja $V_s = V_o$. Nota-se claramente que pelo valor de $V = 0,6846$ a amostragem no ponto (d), foi mais anisocinética em comparação aos pontos a, b, c, cujos valores de V se aproximam mais da unidade.

Tabela 4.7 - Concentração experimental e concentração isocinética (segundo correlação de Samata), partículas de alumina, amostragem no ponto (c).

$D_p (\mu\text{m})$	C	$C_s(\text{g}/\text{m}^3)$	$C_o(\text{g}/\text{m}^3)$
0.,4	0.999	7.51E-8	7.51E-8
0,75	0.999	3.07E-6	3.07E-6
2,0	0.996	2.56E-4	2.57E-4
4,0	0.976	4.36E-4	4.47E-4
7,5	0.976	4.82E-4	4.94E-4
10	0.976	1.19E-4	1.22E-4

Observando-se as concentrações obtidas experimentalmente em condições quase isocinéticas (C_s), comparadas com as concentrações obtidas nas correlações para condições isocinéticas (C_o), ilustradas nas tabelas acima,

nota-se que a variação entre (Cs) e (Co) é extremamente pequena. As diferenças entre as concentrações (Cs) e (Co) se tornam marginalmente maiores para o caso da amostragem no ponto d (vide valores de $C = Cs/Co$). Para este ponto a condição de amostragem foi mais anisocinética que as demais.

Tabela 4.8 - Concentração experimental e concentração isocinética (segundo correlação de Samata), partículas de alumina, amostragem no ponto (d).

D_p (μm)	C	Cs(g/m^3)	Co(g/m^3)
0,4	0.999	1.16E-7	1.16E-7
0,75	0.999	4.72E-6	4.72E-6
2,0	0.988	3.94E-4	3.99E-4
4,0	0.879	6.71E-4	7.63E-4
7,5	0.8423	7.41E-4	8.80E-4
10	0.8423	1.83E-4	2.17E-4

Por se tratar de uma amostragem de partículas em condição quase isocinética, obteve-se valores de concentração experimentais e concentrações obtidas pelas correlações levemente diferentes. Nota-se que para as partículas com diâmetro menor que 4 μm os valores de concentração foi igual, pois para esses diâmetros o efeito inercial durante amostragem tem menor importância. Os erros de amostragem anisocinética não ocorre para esses tamanhos e são negligenciáveis para os demais tamanhos.

Vários são os autores (Allen (1981), Boubel (1994), Nevers (1995)) que afirmam que para partículas de diâmetros menores que 5 μm os efeitos da

amostragem conduzida anisocinética, sobre concentração e distribuição de tamanhos são desprezíveis. Este fato é observado neste trabalho. As pequenas diferenças entre concentração estimada para condição isocinética versus aquela concentração experimental medida para as partículas maiores, justificam-se pela condição quase isocinética usada nos experimentos.

Para o material particulado dióxido de titânio a princípio poderia se esperar que os erros associados a amostragem anisocinética sejam menores que os para a alumina, porque o material particulado dióxido de titânio possui tamanhos menores que a alumina.

A tabela 4.5* mostra os valores dos parâmetros das correlações de Samata (1993) e as concentrações de dióxido de titânio obtidas experimentalmente na condição anisocinética (C_s) e as concentrações isocineticamente (C_o), que seriam medidas no ponto de amostragem (a) e (b) respectivamente, para a vazão de $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$. No ponto (a), temos que a velocidade local no duto, $V_o = 23.21 \text{ m/s}$ e a velocidade de amostragem $V_s = 25.02 \text{ m/s}$, que resulta em $V = 0.9276$. No ponto (b), temos que a velocidade local no duto e $V_o = 24.61 \text{ m/s}$, sabendo-se que $V_s = 25.02$, tem-se $V = 0.9836$.

Tabela 4.5*- Concentração experimental e concentração isocinética (segundo correlação de Samata), para partículas de dióxido de titânio, amostragem no ponto (a).

$D_p (\mu\text{m})$	C	$C_s(\text{g}/\text{m}^3)$	$C_o(\text{g}/\text{m}^3)$
0.,4	0.9998	3.06E-8	3.06E-8
0,75	0.9976	1.35E-6	1.35E-6
2,0	0.9636	1.18E-4	1.22E-4
4,0	0.9989	1.68E-4	1.68E-4

7,5	0.9589	6.64E-5	6.92E-5
10	0.9415	6.78E-6	7.20E-5

Na verdade estes erros podem até ser maiores porque o dióxido de titânio possui mais inércia e devido sua maior densidade. Dessa forma a inércia (ou densidade) e o tamanho podem se contrabalançar e estes erros serem da mesma grandeza que os observados para a alumina.

4.6 - TAXAS DE EMISSÃO E CONCENTRAÇÃO REPRESENTATIVAS DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO DUTO.

A norma BS 3405 determina para a obtenção da taxa de emissão das partículas(M), a utilização da expressão:

$$M = \frac{A}{n} * \sum_{r=1}^{r=n} \frac{m_r}{a_r * q_r} \quad (4.5)$$

Sendo m_r a massa de sólidos coletadas para um ponto n de amostragem, A e a_n são as áreas da seção transversal do duto e do bocal de amostragem respectivamente; θ_r é o tempo de duração da amostragem e n é o número de pontos de amostragem. No capítulo 2 encontra-se descrito os locais e números de pontos de amostragem (4 para linha vertical e 4 para linha horizontal), totalizando em 8 pontos de amostragem para obter uma taxa de emissão respectivamente.

Quando se efetua-se as amostragens com um único diâmetro de bocal e com a obtenção de uma massa cumulativa a expressão (4.5) se reduz à:

$$M = \frac{A * m}{n * a * q} \quad (4.6)$$

A concentração representativa da seção transversal é calculada através da seguinte expressão:

$$C = \frac{M}{Q} \quad (4.7)$$

Sendo que: Q a vazão de ar no duto.

A tabela 4.9 ilustra as taxas de emissão (M) e respectiva concentração de partículas para cada tamanho, e as emissões e concentrações totais para a vazão de gás no duto igual 0,65 m³/s. Os valores apresentados referem-se as 8 amostragem realizadas nos pontos a, b, c, d das linhas verticais e horizontais, conforme norma BS 3405 (1983).

Os valores da massa de partículas (m), nesta tabela, foram obtidas a partir dos valores de números de partículas utilizando relações e considerações apresentadas no item 4.4.

Tabela 4.9 - Taxas de emissão e concentração de partículas de alumina para vazão 0.65 m³/s.

Diâmetro (µm)	N*	m*. (g)	M (g/s)	C (g/m ³)
0.4	123143	3,71E-9	2,85E-8	4,38E-8
0.75	777272	1,55E-7	1,18E-6	1,82E-6
2	2379095	8,96E-6	6,88E-5	1,05E-4
4	319088	9,63E-6	7,32E-5	1,14E-4
7.5	50800	1,00E-5	7,75E-5	1,19E-4
10	5905	2,78E-6	2,14E-5	3,29E-5
Emissão total			2,43E-4	
Concentração total			3,73E-4	

(*) valores médios obtidos de todos os pontos de amostragem

Além dos 8 pontos mínimos exigidos pela norma BS 3405, amostrou-se também em mais um ponto, no centro do duto, efetuou-se os cálculos da concentração total de partículas de todos os tamanhos, neste ponto. O valor da concentração nesse ponto central foi de $3,68E-4 \text{ g/m}^3$, valor que praticamente não difere da concentração representativa do duto ($3,73E-4 \text{ g/m}^3$).

A tabela 4.3 apresenta os valores de concentração de partículas local no ponto de amostragem (a). Uma comparação destes valores com os da tabela 4.9 não apresenta diferenças significativas. Além disso observa-se que o valor da concentração total de partículas no duto está bem próximo do valor total de concentração de partículas no centro do duto (valor local).

Para este caso uma única amostragem pode ser significativa para se obter concentração representativa e as respectivas taxas de emissão. Entretanto este fato pode com muita frequência não ocorrer em casos práticos.

Na tabela 4.10 tem-se a medida das concentrações e taxas de emissão para a alumina quando a mesma é dispersa na vazão de $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$. A concentração total representativa do duto é $8,80 E-4 \text{ g/m}^3$. Medidas no centro do duto demonstram que essa concentração é $9,24 E-4 \text{ g/m}^3$, valores que são muito aproximados.

De forma similar a tabela 4.11 mostra dados para o dióxido de titânio disperso na vazão de $0,65 \text{ m}^3/\text{s}$. Também se verifica aqui que a concentração total representativa no duto ($9,77 E-4 \text{ g/m}^3$) é bastante próxima daquela do ponto central ($9,14 E-4 \text{ g/m}^3$).

Uma comparação entre as tabelas 4.9 e 4.11 pode ser feita. Os dados nestas duas tabelas referem-se as mesmas condições de operação, isto é mesma vazão mesmo tipo de amostragem. Observa-se que a concentração total de alumina é menor que a de dióxido de titânio. A razão disso está no fato do dióxido de titânio ser mais denso que a alumina.

Tabela 4.10 - Taxas de emissão e concentração de partículas de alumina para vazão 0.45 m³/s.

Diâmetro μm	N*	m* (g)	M (g/s)	C (g/m ³)
0.4	56655	1,71E-9	9,17E-9	2,04E-8
0.75	386079	7,67E-8	4,12E-7	9,16E-7
2.0	2281574	8,60E-6	4,62E-5	1,03E-4
4.0	901527	2,71E-5	1,45E-4	3,24E-4
7.5	157474	3,13E-5	1,68E-4	3,73E-4
10	13919	6,55E-6	3,52E-5	7,83E-5
Emissão total			3,90E-4	
				Concentração total — 8,80E-4

Tabela 4.11 - Taxas de emissão e concentração de partículas de dióxido de titânio para vazão 0.65 m³/s.

Diâmetro μm	N*	m* (g)	M (g/s)	C (g/m ³)
0.4	56656	1,71E-9	1,31E-8	2,02E-8
0.75	386079	7,68E-8	5,89E-7	9,07E-7
2.0	2281574	8,60E-6	6,60E-5	1,02E-4
4.0	947449	2,86E-5	2,19E-4	3,38E-4
7.5	199844	3,97E-5	3,05E-4	4,69E-4
10	12273	5,78E-6	4,44E-5	6,83E-5
Emissão total			6,35E-4	
				Concentração total — 9,77E-4

4.7 - AVALIAÇÃO DA TAXA DE ALIMENTAÇÃO EM RELAÇÃO A CONCENTRAÇÃO OBTIDA ATRAVÉS DAS CONTAGENS PELO CONTADOR DE PARTÍCULAS

Nestes experimentos a dispersão do material particulado no interior do duto de amostragem foi efetuada por um alimentador/dispersor de partícula. Este continha um disco giratório no qual foi moldado um sulco, onde o pó se depositava e posteriormente era aspirado e finalmente ejetado em contra corrente ao fluxo de ar, como descrito em detalhes no capítulo 3. Procurou-se estimar a taxa de alimentação de pó, ou seja a quantidade de pó que entrava no duto em relação a rotação do disco giratório.

Os testes de amostragens foram realizados com o sistema de alimentação operando com o disco em duas rotações (1rpm e ½ rpm). Considerando uma taxa de alimentação constante de ambos os materiais particulados (dióxido de titânio e alumina calcinada), calculou-se as seguintes taxas de alimentação como mostra a tabela abaixo.

Tabela 4.12 - Taxas de alimentação das partículas em utilizadas durante os experimentos (g/s).

Material particulado	1 rpm	½ rpm
Dióxido de titânium	0,0078	0,0039
Alumina calcinada	0,0115	0,0058

Para as vazões no fluxo de gás, nas quais realizou-se os experimentos, com as taxas de alimentação obtém-se as concentrações nominais dos pós de

alumina e dióxido de titânio respectivamente. A tabela 4.13 mostra as concentrações dos pós que seriam esperadas no duto para cada vazão nas duas rotações do disco giratório, se todo o material fosse disperso e permanecesse na corrente gasosa..

Tabela 4.13 - Concentração de alimentação dos pós para as várias vazões experimentais, baseados na taxa de alimentação.

Vazão m ³ /s	Alumina		Dióxido	
	1 rpm	½ rpm	1 rpm	½ rpm
0,48	0,023	0,012	0,016	0,008
0,45	0,025	0,013	0,017	0,009
0,37	0,031	0,015	0,022	0,011
0,30	0,038	0,019	0,026	0,013

Entretanto verificou-se que da alimentação muito pouco material era realmente disperso, ficando grande parte deste acumulado no Venturi, e no reservatório pulmão, em suas paredes e conexões. Parte deste material também ficavam depositados nas paredes das tubulações de forma que as concentrações foram de fato no duto para bem menores que os valores da tabela 4.12. Para exemplificar: os dados da tabela 4.10 demonstram que a concentração no duto foi de 8,80 E-4 g/m³, ao passo que aquela baseada na alimentação é de 0.013 g/m³.

Infelizmente não foi possível quantificar exatamente o quanto da porção da alimentação ficou retido na tubulação de forma a averiguar a quantidade medida através do contador.

4.8 - AVALIAÇÃO DO TEMPO DE AMOSTRAGEM PARA MEDIDAS GRAVIMÉTRICAS

Considerando os dados da tabela 4.10 temos que para a vazão de 0,45 m³/s a concentração medida através do contador foi de 8,80 E-4 g/m³. É interessante demonstrar aqui qual seria o tempo envolvido para medir essa concentração de partículas utilizando um filtro como equipamento coletor.

Para essas condições usando o máximo tamanho de bocal possível teremos D_s = 0.0153 m (10% do diâmetro do duto), utilizando a equação (3.1) a vazão a ser amostrada isocineticamente será 4,53 E-3 m³/s. Se admitirmos usar uma balança para pesagens com a seguinte precisão (balança analítica) a massa mínima que deveríamos pesar é de 0,0100 g. Sendo:

$$C = \frac{\textit{massa}}{Q_A * t_A} \quad (4.8)$$

Em que: Q_A é a vazão de amostragem e t_A é o tempo de amostragem.

Assim obtém-se que o tempo de amostragem é:

$$t_A = \frac{\textit{massa}}{Q_A * C} \quad (4.9)$$

Para os valores em questão resulta em t_A ≈ 41,75 min.

Verifica-se ser esse tempo muito longo. No caso de concentração ainda onde é possível e mais indicado o uso do contador este tempo se torna maior ainda.

4.9 - COMENTÁRIOS GERAIS

No presente trabalho os parâmetros vazão ou velocidade do gás foi utilizado como forma de transportar as partículas. Para uma taxa de alimentação constante verificou-se ocorrer uma diluição da concentração com o aumento da vazão. Tal fato é ilustrado nas tabelas 4.9 e 4.10 quanto as concentrações mássicas. Verificou-se que o aumento da vazão proporciona a quebra dos aglomerados, tendo um aumento no número de partículas que é suprimido pelo efeito diluidor da vazão. Assim o número de partículas também decresce com o aumento da vazão (tabela 4.1 e 4.2). Utilizando-se dois tipos de material particulado o dióxido de titânio e alumina, verificou-se neste trabalho que em face as condições experimentais produzidas, a distribuição e concentrações desses materiais foram uniformes em toda seção transversal na posição onde se realizou a amostragem. Esta posição foi determinada de acordo com normas técnicas apresentadas no capítulo 2 neste trabalho.

Verificou-se que resultados de contagem apresentados pelo contador apresentou repetitividade. Foi demonstrado que com uso do contador uma só amostra em cada ponto é suficiente para exprimir os valores obtidos, se as condições experimentais estão em regime estacionário.

A partir das concentrações e respectivas distribuições de tamanho por número, medidas através de um contador ótico a laser, obteve-se as respectivas concentração e distribuição de tamanhos por massa. Estes valores embora aproximados são importantes para a determinação de taxas de emissão que influem diretamente na qualidade do ar.

As amostragens para determinação de concentração foram realizadas sempre em condição quase isocinética, mesmo assim avaliou-se os efeitos causados pela condição anisocinética em amostragem de pontos localizados na seção transversal do duto. Verificou-se que as condições quase isocinéticas usadas na amostragem não apresentam erros ou diferenças de concentração para as partículas menores que 4 μm , em relação a correta amostragem

isocinética. Diferenças, embora não significativas, aumentam a partir do tamanho de 4 μm .

A partir dos experimentos de amostragem em 8 pontos, seguindo-se a norma BS 3405, determinou-se as concentrações mássicas de partículas e taxas de emissão representativas da seção transversal do duto, para várias condições. Os resultados destas concentrações são coerentes com os efeitos de diluição causado pelo aumento da vazão do gás.

Verificou-se que, em função da concentração estar distribuída uniforme no duto, um só ponto de amostragem é representativo para obter informação quanto concentração e taxa de emissão.

As concentrações mássicas determinadas no presente trabalho, utilizando o contador de partículas, envolve considerações de se assumir uma forma da partícula e o uso de um valor médio para representar uma faixa de tamanho de partículas. Tais simplificações na realidade necessitariam de uma verificação por meio de métodos gravimétricos das concentrações medidas com o uso do contador. Como demonstrado no item 4.8 a utilização desses métodos é muito mais longo que o uso do contador que tem a vantagem de fornecer a distribuição de tamanhos juntamente com a contagem de partículas. Testes gravimétricos não foram realizados pelo fato de não se conseguir manter a alimentação ou concentração no duto em regime estacionário por longo tempo de forma poder avaliar resultados comparativas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES E SUGESTÕES

Neste trabalho com material particulado tratou-se as técnicas de amostragem de poluentes dispersos em corrente gasosa confinadas em dutos e utilizando-se das mesmas, determinou-se as concentrações e respectivas taxas de emissão de particulados. Os resultados permitiram as seguintes conclusões:

- ✓ Nos experimentos em que procurou-se avaliar a qualidade da dispersão de partículas no gás, e mantendo-se constante a taxa de alimentação, constatou-se o efeito diluidor da vazão, diminuindo o número total de partículas e a concentração mássica.

- ✓ O efeito do aumento da vazão de gás contribuiu para melhorar a dispersão. Com o aumento da vazão aumenta-se o número de partículas menores e nota-se que este efeito de quebra de aglomerado, não aumenta o número total de partículas ao contrário diminui. Pois o efeito da diluição sobrepõe-se ao efeito da quebra resultando num menor número total de partículas.

- ✓ Em relação a dispersão e a distribuição dos materiais particulados (dióxido de titânio e alumina), no interior do duto, para várias vazões do fluxo de gás e várias concentrações de partículas, os resultados mostram que a concentração de partículas no interior do duto no local de amostragem realizada é homogênea.

- ✓ Os resultados dos testes de avaliação do número de contagem em cada ponto de amostragem, demonstram que na condição de regime estacionário, as variações de uma contagem para outra são desprezíveis demonstrando

repetitividade do contador. Dessa forma, apenas uma medida em cada ponto de amostragem fornece valores representativos.

✓ Os resultados da conversão de distribuição de tamanho por número obtidas pelo contador de partículas, para uma conversão de distribuição por massa, fornecem dados de massa de partículas. Indicando a possibilidade do uso de contador de partículas para determinar a massa de particulados dispersos em dutos, principalmente pela rapidez no fornecimento dos resultados comparado a outros métodos gravimétricos.

✓ Os resultados obtidos na amostragem permitem concluir que o uso da amostragem quase isocinética não apresenta diferença significativa nas concentrações obtidas para partículas de tamanho maiores que 4 μm . Na amostragem de partículas menores que esse diâmetro os resultados concordam com a literatura, não sendo necessário a amostragem isocinética.

✓ Em relação aos cálculos das taxas de emissão e concentração representativa da seção transversal do duto, de acordo com as normas BS 3405, os resultados mostram que medidas de concentração total de partículas são representativas do material sendo transportado pelo ar no duto e esta medida está bem próxima do valor da concentração local de partículas, indicando que os perfis de velocidade e concentração são uniformes no duto.

✓ Em relação a comparação do tempo de amostragem realizado pelo contador de partículas e o tempo de amostragem necessário para medidas gravimétricas, os resultados mostram a viabilidade do uso do contador de partículas devido a rapidez no fornecimento dos dados em relação a medidas gravimétricas, que para sistemas diluídos levam muito tempo para obter massa suficiente para pesagem.

Desejando continuar com trabalhos futuros de controle e amostragem de poluentes particulados, tem-se:

⇒ Os resultados deste trabalho permitem obter concentração mássica de partículas confinadas em dutos e respectivas taxas de emissão, através de consideração sobre forma e distribuição de tamanho das partículas envolvidas. Se torna importante verificar a validade dessas considerações e se for o caso propor formas mais eficientes para a transformação das concentrações numéricas obtidas no contador para concentrações mássicas, que são as formas requeridas por leis e especificação de poluentes.

⇒ Utilizar maiores vazões do fluxo de ar no interior do duto, objetivando sistema mais diluídos de partículas diluídas em corrente gasosa, avaliando o contador de partículas em relação aos erros de coincidência.

⇒ Realizar os testes de amostragem num perfil de velocidade não uniforme, obtendo medidas de concentração e respectivas taxas de emissão.

⇒ Produzir um sistema de dispersão sólido - gás concentrado, dentro da possível faixa do contador, efetuar amostragem desse sistema, consecutivamente extrair parte dessa corrente de fluxo contendo partículas e dispersá-la em outro sistema resultando num sistema mais diluído, com isso determinar os possíveis erros ocorridos do contador.

⇒ Estudar o efeito da umidade das partículas na dispersão destas no interior do duto.

⇒ Variar o diâmetro do duto para avaliar o “efeito de parede”.

⇒ Avaliar as medidas do contador por meio de métodos gravimétricos.

⇒ Efetuar as amostragens de partículas dispersas em corrente gasosa em dutos verticais.

⇒ Realizar a amostragem também na posição axial.

BIBLIOGRAFIA

- Abril, J., "Controle de emissão de material e partículas na atmosfera".
Engenharia Sanitária, 19(3): 332-335 (1980).
- Allen, T., Particle Size Measurement, 4th ed. Powder Technology, Chapman and Hall (1990).
- Boubel, R. W. *et.al* – Fundamentals of Air Pollution – Academic Press, 553p, (1994).
- British Standard Method, (BS 3405), Measure of Particulate emission including grit and dust (simplified method), (1983).
- CETESB, Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias. Determinação da velocidade e vazão dos gases, L 9.222, (1992).
- CETESB, Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias. Determinação de Material Particulado com o Sistema Filtrante no interior do Duto ou Chaminé, L9.217, (1989).
- CETESB, Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias. Determinação de material Particulado L9.255, (1995).
- CETESB, Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias. Determinação dos pontos de amostragem, L9.221, (1990).
- Code of Federal Regulations: Protection of Environment - Office og the Federal Register National Archives and Records Administration, 482 – 559, (1993).
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Atlas do Meio Ambiente do Brasil- 2ª Edição, Brasília, (1996).
- Gonçalves, J.A.V., Um modelo matemático para lavadores de gases tipo Venturi. Dissertação de Doutorado, Universidade Federal de São carlos São Carlos, (1997).
- Nevers, N, Air pollution Control Engineering – McGraw-Hill New York 506p, (1995).
- Oliveira, C.A. e Coury, J.R., "Desempenho de um lavador Ventury". São Carlos, (1995).

- Samata, M., "A model for evaluating the error associated with anisokinetic sampling in the measurement of particle concentrations in dusts emitted from stacks" – *International Chemical Engineering*, 33/1: 141 – 147, (1993).
- Santen, A. v. e Gannon, E.J., "In-Duct Measurement of Particulates" – *Filtration and Separation*, 24/5: 328-336, (1987).
- Sparks, L. E., Particulate Sampling and Analysis, in Handbook of Air Pollution Technology, Edites by Calvert, p 785, Wiley - Interscience Publication, (1984).
- Svarovsky, L., Particle Size Measurement and Sampling – The Institution of Chemical Engineers of University of Bradford, 329p, (1990).
- Veeramani, H. e Vasani, J.S.- "Sampling Methodology and Control Strategy for Particulates Emission" – *Indian J. Environmental Protection*, 3/2: 47-53, (1983).
- Vincent, J.H. – Aerosol Sampling: science and practice – British Library Cataloguing in Publication Data, (1989).
- Willeke, K. e Baron, P. A., "Sampling and Interpretation Errors in Aerosol Monitoring" – *Am.Ind.Hyg.Assoc.J* (51): 160 – 168, (1990).
- Aguiar, M.L., "Filtração de ar em filtros de tecido". Dissertação de Doutorado São Carlos, (1991).
- Scheible, M.H., "Poluição do ar por partícula na Guanabara ". VII congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária (18-23 Novembro de 1973), Salvador Bahia.
- Kikuo, O., Trace Analysis of Atmospheric Samples. New York - Toronto, (1977).
- CONAMA, Coletânea de Legislação Ambiental. Resolução CONAMA N° 003, 28 de Junho, (1990).

Santen, A.V. e Gannon E.J., "In-Duct Measurement of Particulates". Filtration & Separation, September/October, (1987).

Sagula, M.A.L," Características das Inersões Térmicas na região metropolitana de São Paulo". CETESB, (1987).

Garland, J.A. e Nicholson, K.W., "A Review of Methods for Sampling Large Airborne Particles and Associated Radioactivity", Journal of Aerosol Science, 22(4) : 479 - 499, (1991).

Chereminisinoff, P.N.C., Air Pollution and design for industry. New York, Ed. Marcel Dekar, 589p, (1993).

Gimenes, M.L., "Particulate Gaseous Emission Control Using Turbulent Fluidised Beds of Mobile Packings". Dissertação de Doutorado, Universidade de Leeds, Leeds, England, (1992)

APÊNDICE A

RESULTADOS DAS MEDIDAS DE VELOCIDADE

I – Alumina Calcificada

Tabela A.I.1 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes a Alumina Calcificada. Linha Vertical. Vazão: 0,48m³/s

VAZÃO 1				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	219	38,03	26,15	0,49
2	258	44,80	28,38	0,53
3	247	42,89	27,77	0,52
4	123	21,36	19,60	0,36
Média		36,77	25,48	0,48

Tabela A.I.2 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes a Alumina Calcificada. Linha Vertical. Vazão: 0,45m³/s

VAZÃO 2				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	161	29,95	23,21	0,43
2	194	33,68	24,61	0,46
3	182	31,60	23,84	0,45
4	94	16,32	17,13	0,32
Média		27,40	22,20	0,42

Tabela A.I.3 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes a Alumina Calcificada. Linha Vertical. Vazão: 0,37m³/s

VAZÃO 3				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	118	20,49	19,20	0,36
2	148	25,70	21,50	0,40
3	139	24,14	20,84	0,39
4	178	13,55	15,61	0,29
Média		20,97	19,28	0,36

Tabela A.I.4 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes a Alumina Calcificada. Linha Vertical. Vazão: 0,30m³/s.

VAZÃO 4				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	78	13,54	15,60	0,29
2	98	17,02	17,50	0,33
3	94	16,32	17,13	0,32
4	45	7,81	11,85	0,22
Média		13,67	15,52	0,29

Tabela A.I.5 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes a Alumina Calcificada. Linha Horizontal. Vazão: 0,48m³/s

VAZÃO 1				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	208	36,12	25,49	0,48
2	249	43,24	27,88	0,52
3	245	42,54	27,65	0,52
4	149	25,87	21,57	0,31
Média		36,94	25,65	0,46

Tabela A.I.6 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes a Alumina Calcificada. Linha Horizontal. Vazão: 0,45m³/s

VAZÃO 2				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	155	26,91	22,00	0,41
2	194	33,68	24,61	4,06
3	187	32,47	24,16	0,45
4	103	17,88	17,93	0,34
Média		27,74	22,18	0,41

Tabela A.I.7 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes a Alumina Calcificada. Linha Horizontal. Vazão: 0,37m³/s

VAZÃO 3				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	115	19,97	18,95	0,35
2	146	25,35	21,35	0,40
3	141	24,48	20,98	0,39
4	90	15,62	16,76	0,31

Média	21,36	19,51	0,36
-------	-------	-------	------

Tabela A.I.8 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes a Alumina Calcificada. Linha Horizontal. Vazão: 0,30m³/s

VAZÃO 4				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	75	13,02	15,30	0,29
2	99	17,19	17,58	0,33
3	95	16,49	17,22	0,32
4	55	9,55	13,10	0,25
Média		14,07	15,80	0,30

Tabela A.I.9 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes a Alumina Calcificada. Linha Vertical. Vazão: 0,48m³/s.

VAZÃO 1				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	184	31,95	23,97	0,45
2	222	38,55	26,33	0,49
3	218	37,85	26,09	0,49
4	128	22,22	19,99	0,37
Média		32,50	24,09	0,45

Tabela A.I.10 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes a Alumina Calcificada. Linha Vertical. Vazão: 0,45m³/s.

VAZÃO 2				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	155	26,91	22,00	0,41
2	185	32,13	24,04	0,45
3	185	32,13	24,04	0,45
4	105	18,23	18,11	0,39
Média		27,35	22,05	0,41

Tabela A.I.11 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes a Alumina Calcificada. Linha Vertical. Vazão: 0,37m³/s.

VAZÃO 3				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	109	18,93	18,50	0,35
2	142	24,65	21,05	0,39
3	135	23,44	20,53	0,38

4	79	13,72	15,71	0,29
Média		20,19	18,94	0,35

Tabela A.I.12 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes a Alumina Calcificada. Linha Vertical. Vazão: 0,30m³/s.

VAZÃO 4				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	75	13,02	15,30	0,29
2	94	16,32	17,13	0,32
3	90	15,63	16,77	0,31
4	48	8,33	12,24	0,23
Média		13,33	15,36	0,29

Tabela A.I.13 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes a Alumina Calcificada. Linha Horizontal. Vazão: 0,48m³/s.

VAZÃO 1				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	182	31,60	23,84	0,44
2	220	38,20	26,21	0,49
3	220	38,20	26,21	0,49
4	146	25,35	21,35	0,40
Média		33,34	24,40	0,46

Tabela A.I.14 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes a Alumina Calcificada. Linha Horizontal. Vazão: 0,45m³/s.

VAZÃO 2				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	153	26,56	21,86	0,41
2	180	31,26	23,71	0,44
3	178	30,90	23,57	0,44
4	131	22,70	20,23	0,38
Média		27,87	22,34	0,42

Tabela A.I.15 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes a Alumina Calcificada. Linha Horizontal. Vazão: 0,37m³/s.

VAZÃO 3				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	114	19,80	18,87	0,35
2	142	24,66	21,06	0,39

3	138	23,96	20,76	0,39
4	79	13,72	15,71	0,29
Média		20,53	19,10	0,36

Tabela A.I.16 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes a Alumina Calcificada. Linha Horizontal. Vazão: 0,30m³/s.

VAZÃO 4				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	71	12,33	14,89	0,28
2	93	16,15	17,05	0,32
3	89	15,45	16,67	0,31
4	50	8,68	12,49	0,23
Média		13,15	15,27	0,29

II – Dióxido de Titânio

Tabela A.II.1 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Dióxido de Titânio. Linha Vertical. Vazão: 0,48m³/s.

VAZÃO 1				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	195	33,86	24,68	0,46
2	250	39,93	26,80	0,50
3	231	40,11	26,86	0,50
4	140	24,31	20,91	0,39
Média		34,55	24,81	0,46

Tabela A.II.2 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Dióxido de Titânio. Linha Vertical. Vazão: 0,45m³/s.

VAZÃO 2				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	150	26,05	21,64	0,40
2	194	33,69	24,61	0,46
3	185	32,13	24,04	0,45
4	115	19,97	18,95	0,35
Média		27,95	22,31	0,42

Tabela A.II.3 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Dióxido de Titânio. Linha Vertical. Vazão: 0,37m³/s.

VAZÃO 3				
---------	--	--	--	--

Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	$V(\text{m/s})$	$Q(\text{m}^3/\text{s})$
1	115	19,97	18,95	0,35
2	142	24,66	21,06	0,39
3	138	23,96	20,76	0,39
4	79	13,72	15,71	0,29
Média		20,58	19,12	0,36

Tabela A.II.4 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Dióxido de Titânio. Linha Vertical. Vazão: $0.30\text{m}^3/\text{s}$.

VAZÃO 4				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	$V(\text{m/s})$	$Q(\text{m}^3/\text{s})$
1	75	13,02	15,30	0,29
2	95	16,50	17,23	0,32
3	90	15,62	16,76	0,31
4	50	8,68	12,49	0,23
Média		13,46	15,45	0,29

Tabela A.II.5 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Dióxido de Titânio. Linha Horizontal. Vazão: $0.48\text{m}^3/\text{s}$.

VAZÃO 1				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	$V(\text{m/s})$	$Q(\text{m}^3/\text{s})$
1	196	34,04	24,74	0,46
2	234	40,63	27,03	0,51
3	230	39,94	26,80	0,50
4	151	26,22	21,71	0,41
Média		35,20	25,07	0,47

Tabela A.II.6 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Dióxido de Titânio. Linha Horizontal. Vazão: $0.45\text{m}^3/\text{s}$.

VAZÃO 2				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	$V(\text{m/s})$	$Q(\text{m}^3/\text{s})$
1	149	25,87	21,57	0,40
2	195	33,86	24,68	0,46
3	185	32,13	24,03	0,45
4	125	21,70	19,75	0,37
Média		28,39	22,51	0,42

Tabela A.II.7 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Dióxido de Titânio. Linha Horizontal. Vazão: 0.37m³/s.

VAZÃO 3				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	111	12,27	14,85	0,28
2	140	24,31	20,91	0,39
3	138	23,96	20,76	0,39
4	84	14,58	16,19	0,30
Média		20,53	18,18	0,34

Tabela A.II.8 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Dióxido de Titânio. Linha Horizontal. Vazão: 0.30m³/s.

VAZÃO 4				
Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	72	12,50	14,99	0,28
2	94	16,32	17,13	0,32
3	90	15,62	16,76	0,31
4	50	8,68	12,49	0,23
Média		13,28	15,34	0,29

APÊNDICE B

RESULTADOS DAS CONTAGENS DE NÚMERO DE PARTÍCULAS

I – Alumina Calcificada

Tabela B.I.1 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para a Alumina Calcificada. Vazão 0,48m³/s - Linha Vertical.

Diâmetro	Número de partículas			
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
0,4	17891	32880	24928	30323
0,75	123959	164728	180989	189121
2,0	1230860	1666140	1744095	1819918
4,0	1768113	1988522	1998511	1988962
7,5	1191768	869923	858477	812439
10	107117	81283	89437	99916

Tabela B.I.2 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para a Alumina Calcificada. Vazão 0,45m³/s - Linha Vertical.

Diâmetro	Número de partículas			
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
0,4	39185	45319	46865	34092
0,75	199335	232900	207155	215998
2,0	1894392	2101253	2067123	2004139
4,0	1946696	1953972	2006268	1987420
7,5	946884	761020	769774	821771
10	128384	97970	97702	107093

Tabela B.I.3 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para a Alumina Calcificada. Vazão 0,37m³/s - Linha Vertical.

Diâmetro	Número de partículas			
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
0,4	20677	27107	40492	20517
0,75	143638	148583	166079	165246
2,0	1445896	1535414	1674802	1664365
4,0	1998192	2070251	2092978	2058186
7,5	1496536	1390963	1228193	1234640
10	179112	145880	126686	138697

Tabela B.I.4 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para a Alumina Calcificada. Vazão 0,30m³/s - Linha Vertical.

Diâmetro	Número de partículas			
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
0,4	35472	32273	43175	32186
0,75	129708	147000	141581	138411
2,0	1375953	1487533	1453241	1378704
4,0	1975986	2076507	2052280	1975838
7,5	1513843	1414066	1481847	1579475
10	183189	152347	161288	189994

Tabela B.I.5 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para a Alumina Calcificada. Vazão 0,48m³/s - Linha Horizontal.

Diâmetro	Número de partículas			
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
0,4	30414	37577	28965	31694
0,75	189200	205619	219918	239804
2,0	1766716	2034046	2027188	2164143
4,0	1897269	1986067	2004739	1961498
7,5	858272	718771	731370	656479
10	133192	95855	96741	87836

Tabela B.I.6 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para a Alumina Calcificada. Vazão 0,45m³/s - Linha Horizontal.

Diâmetro	Número de partículas			
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
0,4	39108	47138	37180	39084
0,75	216849	223461	215528	173477
2,0	2014269	2119509	2089562	1706387
4,0	1942565	2017528	2033718	1960005
7,5	771901	721653	766135	1088142
10	116850	91844	91318	161912

Tabela B.I.7 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para a Alumina Calcificada. Vazão 0,48m³/s - Linha Vertical.

Diâmetro	Número de partículas			
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
0,4	21585	38489	50833	27382
0,75	164179	187290	198391	210823
2,0	1499199	1790001	1912765	1934572
4,0	2101134	2125679	2134602	2101661
7,5	1586527	1213031	1062943	1018924
10	131412	110473	88578	90498

Tabela B.I.8 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para a Alumina Calcificada. Vazão 0,45m³/s - Linha Vertical.

Diâmetro	Número de partículas			
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
0,4	116118	25563	15963	36486
0,75	166475	212673	195744	170152
2,0	1581517	1905691	1825684	1634122
4,0	2071129	2080838	2126981	2082046
7,5	1396695	1054830	1120351	1309797
10	129291	89670	93526	126157

Tabela B.I.9 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para a Alumina Calcificada. Vazão 0,37m³/s - Linha Vertical.

Diâmetro	Número de partículas			
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
0,4	37907	17255	20035	34951
0,75	167582	181642	174534	158837
2,0	1588114	1691169	1670477	1609085
4,0	2041756	2106700	2118256	2096966
7,5	1358067	1259770	1273980	1318590
10	134599	113842	110530	123199

Tabela B.I.10 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para a Alumina Calcificada. Vazão 0,30m³/s - Linha Vertical.

Diâmetro	Número de partículas			
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
0,4	12753	34961	26632	30390
0,75	111482	125638	133814	118199
2,0	1178556	1273089	1316791	1358919
4,0	1874647	1970762	1937266	1986685
7,5	1915801	1762091	1745177	1641389
10	212454	176833	178107	166900

Tabela B.I.11 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para a Alumina Calcificada. Vazão 0,48m³/s - Linha Horizontal.

Diâmetro	Número de partículas			
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
0,4	44885	38731	47932	36422
0,75	149762	225062	255833	251830
2,0	1525037	2003379	2181902	2156392
4,0	1989442	2065917	2005346	1971490
7,5	1454371	916780	764338	794384
10	164477	92113	73962	79907

Tabela B.I.12 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para a Alumina Calcificada. Vazão 0,45m³/s - Linha Horizontal.

Diâmetro	Número de partículas			
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
0,4	54306	29610	32444	30707
0,75	173799	230328	218380	191671
2,0	1700682	1922619	1956178	1774065
4,0	2028457	2082009	2079960	2056846
7,5	1241804	995366	969332	1163682
10	123571	90321	87002	113726

II – Dióxido de Titânio

Tabela B.II.1 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para o Dióxido de Titânio. Vazão 0,48m³/s - Linha Vertical.

Diâmetro	Número de partículas			
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
0,4	16801	46543	38317	20599
0,75	117917	132517	133053	132070
2,0	1289872	1471572	1560353	1589118
4,0	2221820	2271227	2328117	2395982
7,5	1604004	1278465	1107319	1012377
10	26976	11111	9956	9313

Tabela B.II.2 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para o Dióxido de Titânio. Vazão 0,45m³/s - Linha Vertical.

Diâmetro	Número de partículas			
	dif. 2a1	dif. 2b1	dif. 2c1	dif. 2d1
0,4	14950	8838	16252	21735
0,75	92691	93259	102428	114211
2,0	1034009	1045171	1152029	1282717
4,0	1940788	1981847	2087854	2221504
7,5	2022855	1992276	1757586	1492143
10	25491	23570	18561	13318

Tabela B.II.3 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para o Dióxido de Titânio. Vazão 0,37m³/s - Linha Vertical.

Diâmetro	Número de partículas			
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
0,4	19817	15223	11112	12425
0,75	93064	104197	109158	108019
2,0	1053232	1107588	1228057	1272449
4,0	2007161	2045744	2199184	2261441
7,5	1983391	1766308	1670408	1591855
10	33026	26560	20995	18859

Tabela B.II.4 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para o Dióxido de Titânio. Vazão 0,30m³/s - Linha Vertical.

Diâmetro	Número de partículas			
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
0,4	18145	16752	19369	13977
0,75	89303	87945	86476	95928
2,0	1018534	989389	958055	1131294
4,0	1983152	1928139	1890676	2062750
7,5	2088652	2117083	2173536	1878312
10	32292	35893	37274	26844

Tabela B.II.5 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para o Dióxido de Titânio. Vazão 0,48m³/s - Linha Horizontal.

Diâmetro	Número de partículas			
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
0,4	5509	16462	15255	17333
0,75	138182	118846	164085	118923
2,0	1487828	1444116	1687301	1421292
4,0	2287329	2303148	2354757	2303222
7,5	1203143	1258888	913081	1289660
10	13192	9653	8959	9922

Tabela B.II.6 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para o Dióxido de Titânio. Vazão 0,45m³/s - Linha Horizontal.

Diâmetro	Número de partículas			
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D
0,4	11129	24976	28632	19113
0,75	94617	98946	111510	104641
2,0	1013771	1128100	1328293	1187209
4,0	1987694	2094803	2223003	2133305
7,5	2069394	1844779	1465969	1686451
10	28264	17487	13154	16669

Tabela B.II.7 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para o Dióxido de Titânio. Ensaio 1 - Linha Vertical – Vazão: 0,51m³/s.

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	108063	105915	132019	149187	131752
0,75	708174	758926	861101	942905	870810
2,0	2706007	2589367	2586496	2478657	2532086
4,0	338104	299811	208018	187266	211429
7,5	12195	15571	7355	9969	7614
10	725	365	482	266	422

Tabela B.II.8 - Resultados obtidos pelas contagens realizadas pelo contador para o Dióxido de Titânio. Ensaio 1 - Linha Horizontal – Vazão: 0,51m³/s.

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	121142	152413	174089	119247	143788
0,75	842893	932466	1056132	744633	899670
2,0	2538108	2483574	2422889	2580343	2459590
4,0	244587	173438	127887	313929	197271
7,5	9769	5912	4826	13926	9239
10	612	293	300	734	706

APÊNDICE C

RESULTADOS REFERENTES A MASSA E CONCENTRAÇÃO

I – Alumina Calcificada

Tabela C.I.1 - Massa e Concentração da Alumina Calcificada. Vazão: 0,48m³/s. Taxa de Emissão: 197,46 µg/s

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	26505,5	7,9938 .10 ⁻¹⁰	7,0617 .10 ⁻⁹	411,39
0,75	164699,3	3,2742 .10 ⁻⁸	2,8924 .10 ⁻⁷	
2	1205773,3	4,5456 .10 ⁻⁶	4,0156 .10 ⁻⁵	
4	1486362,0	4,4827 .10 ⁻⁵	3,9600 .10 ⁻⁴	
7,5	933151,8	1,855 .10 ⁻⁴	1,6388 .10 ⁻³	
10	94438,3	4,45030 .10 ⁻⁵	3,931 .10 ⁻⁴	

Tabela C.I.2 - Massa e Concentração da Alumina Calcificada. Vazão: 0,45 m³/s. Taxa de Emissão: 186,67 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	41365,3	1,2475 .10 ⁻⁹	1,1021 .10 ⁻⁸	414,82
0,75	213847,0	4,2513 .10 ⁻⁸	3,7556 .10 ⁻⁷	
2	2016726,8	7,60288 .10 ⁻⁶	6,7163 .10 ⁻⁵	
4	1973589,0	5,9522 .10 ⁻⁵	5,2581 .10 ⁻⁴	
7,5	824862,3	1,6398 .10 ⁻⁴	1,4486 .10 ⁻³	
10	107787,3	5,079 .10 ⁻⁵	4,4870 .10 ⁻⁴	

Tabela C.I.3 - Massa e Concentração da Alumina Calcificada. Vazão: 0,37m³/s. Taxa de Emissão: 219,8 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	32198,3	9,7107 .10 ⁻¹⁰	8,5784 .10 ⁻⁹	593,98
0,75	155886,5	3,0991 .10 ⁻⁸	2,7377 .10 ⁻⁷	
2	1580119,3	5,9569 .10 ⁻⁶	5,2623 .10 ⁻⁵	
4	2054901,8	6,1974 .10 ⁻⁵	5,4747 .10 ⁻⁴	
7,5	1337583,0	2,6591 .10 ⁻⁴	2,3491 .10 ⁻³	
10	147593,8	6,9551 .10 ⁻⁵	6,1441 .10 ⁻⁴	

Tabela C.I.4 - Massa e Concentração da Alumina Calcificada. Vazão: 0,30m³/s. Taxa de Emissão: 216,58 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	17703,8	5,339 .10 ⁻¹⁰	4,7167 .10 ⁻⁹	721,95
0,75	138170,5	2,7468 .10 ⁻⁸	2,4265 .10 ⁻⁷	
2	1326758,3	5,00176 .10 ⁻⁶	4,4185 .10 ⁻⁵	
4	1976289,5	5,9603 .10 ⁻⁵	5,2653 .10 ⁻⁴	
7,5	1705110,8	3,3898 .10 ⁻⁴	2,9945 .10 ⁻³	
10	184066,8	8,6739 .10 ⁻⁵	7,6624 .10 ⁻⁴	

Tabela C.I.5 - Massa e Concentração da Alumina Calcificada. Vazão: 0,48m³/s. Taxa de Emissão: 256,38 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	34572,3	1,0426 .10 ⁻⁹	9,2109 .10 ⁻⁹	534,14
0,75	190170,8	4,5883 .10 ⁻⁸	4,0532 .10 ⁻⁷	
2	1784134,3	6,7260 .10 ⁻⁶	5,9417 .10 ⁻⁵	
4	2115769,0	6,3810 .10 ⁻⁵	5,6369 .10 ⁻⁴	
7,5	1220356,3	2,4261 .10 ⁻⁴	2,1432 .10 ⁻³	
10	105240,3	4,959 .10 ⁻⁵	4,3810 .10 ⁻⁴	

Tabela C.I.6 - Massa e Concentração da Alumina Calcificada. Vazão: 0,45m³/s. Taxa de Emissão: 241,12 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	48532,5	1,4637 .10 ⁻⁹	1,2930 .10 ⁻⁸	535,82
0,75	186261,0	4,4939 .10 ⁻⁸	3,9699 .10 ⁻⁷	
2	1736753,5	6,5474 .10 ⁻⁶	5,7839 .10 ⁻⁵	
4	2090248,5	6,3040 .10 ⁻⁵	5,5689 .10 ⁻⁴	
7,5	1220418,3	2,4262 .10 ⁻⁴	2,1433 .10 ⁻³	
10	109661,0	5,16752 .10 ⁻⁵	4,5650 .10 ⁻⁴	

Tabela C.I.7 - Massa e Concentração da Alumina Calcificada. Vazão: 0,37m³/s. Taxa de Emissão: 83,04 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	27537,0	8,3049 .10 ⁻¹⁰	7,3365 .10 ⁻⁹	224,42
0,75	170648,8	3,3925 .10 ⁻⁸	2,9969 .10 ⁻⁷	
2	1639711,8	6,1815 .10 ⁻⁶	5,4607 .10 ⁻⁵	
4	2090919,5	6,306 .10 ⁻⁵	5,5707 .10 ⁻⁴	
7,5	132601,8	2,6361 .10 ⁻⁵	2,3287 .10 ⁻⁴	
10	120542,5	5,6804 .10 ⁻⁵	5,0180 .10 ⁻⁴	

Tabela C.I.8 - Massa e Concentração da Alumina Calcificada. Vazão: 0,30m³/s. Taxa de Emissão: 216,20 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	26184,0	7,8969 .10 ⁻¹⁰	6,9761 .10 ⁻⁹	720,69
0,75	122283,3	2,4310 .10 ⁻⁸	2,1475 .10 ⁻⁷	
2	1281838,8	4,6062 .10 ⁻⁶	4,069 .10 ⁻⁵	
4	1942340,0	5,8579 .10 ⁻⁵	5,1748 .10 ⁻⁴	
7,5	1766114,5	3,5111 .10 ⁻⁴	3,1016 .10 ⁻³	
10	183573,5	8,6507 .10 ⁻⁵	7,6419 .10 ⁻⁴	

II – Dióxido de Titânio

Tabela C.II.1 - Massa e Concentração do Dióxido de Titânio. Vazão: 0,48m³/s. Taxa de Emissão: 233,52 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	30565,0	9,2181 .10 ⁻¹⁰	8,1432 .10 ⁻⁹	486,50
0,75	128889,3	2,5623 .10 ⁻⁸	2,2635 .10 ⁻⁷	
2	1477728,8	5,5709 .10 ⁻⁶	4,921 .10 ⁻⁵	
4	2304286,5	6,9495 .10 ⁻⁵	6,1391 .10 ⁻⁴	
7,5	1250541,3	2,4861 .10 ⁻⁴	2,196 .10 ⁻³	
10	14339,0	6,7571 .10 ⁻⁶	5,969 .10 ⁻⁵	

Tabela C.II.2 - Massa e Concentração do Dióxido de Titânio. Vazão: 0,45m³/s. Taxa de Emissão: 314,86 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	15243,8	4,5974 .10 ⁻¹⁰	4,0613 .10 ⁻⁹	699,69
0,75	100647,3	2,0009 .10 ⁻⁸	1,7675 .10 ⁻⁷	
2	1128481,5	4,2541 .10 ⁻⁵	3,7581 .10 ⁻⁴	
4	2057998,3	6,2067 .10 ⁻⁵	5,48301 .10 ⁻⁴	
7,5	1816215,0	3,6107 .10 ⁻⁴	3,18966 .10 ⁻³	
10	20235,0	9,5355 .10 ⁻⁶	8,42360 .10 ⁻⁵	

Tabela C.II.3 - Massa e Concentração do Dióxido de Titânio. Vazão: 0,37m³/s. Taxa de Emissão: 233,59 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	14644,3	4,4166 .10 ⁻¹⁰	3,9016 .10 ⁻⁹	631,34
0,75	103609,5	2,059 .10 ⁻⁸	1,8196 .10 ⁻⁷	
2	1165331,5	4,3931 .10 ⁻⁶	3,8809 .10 ⁻⁵	
4	2128382,5	6,4190 .10 ⁻⁵	5,6705 .10 ⁻⁴	
7,5	1752990,5	3,48501 .10 ⁻⁴	3,0786 .10 ⁻³	
10	24860,0	1,1714 .10 ⁻⁵	1,0348 .10 ⁻⁴	

Tabela C.II.4 - Massa e Concentração do Dióxido de Titânio. Vazão: 0,30m³/s. Taxa de Emissão: 216,06 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	17060,8	5,1454 .10 ⁻¹⁰	4,5454 .10 ⁻⁹	720,22
0,75	89913,0	1,7875 .10 ⁻⁸	1,5791 .10 ⁻⁷	
2	1024318,0	3,8615 .10 ⁻⁶	3,4113 .10 ⁻⁵	
4	1966179,3	5,9307 .10 ⁻⁵	5,2391 .10 ⁻⁴	
7,5	2064395,8	4,10409 .10 ⁻⁴	3,6255 .10 ⁻³	
10	33075,8	1,558 .10 ⁻⁵	1,3769 .10 ⁻⁴	

APÊNDICE D

RESULTADOS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

I – Medidas de Velocidade

Tabela D.I.1 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Ensaio 1 - Linha Vertical.

Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	212	72,51	36,16	0,66
2	245	83,79	38,88	0,71
Centro	286	97,82	42,00	0,76
3	274	93,71	41,11	0,75
4	230	78,66	37,67	0,66
Média		85,30	39,16	0,71

Tabela D.I.2 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Ensaio 1 - Linha Horizontal.

Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	212	72,51	36,16	0,66
2	246	84,14	38,96	0,71
Centro	275	94,06	41,19	0,75
3	272	93,03	40,96	0,75
4	229	78,32	37,59	0,68
Média		84,41	38,97	0,71

Tabela D.I.3 - Resultados das medidas de velocidade no duto de Amostragem, referentes ao Ensaio 2 - Linha Vertical.

Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	145	49,59	29,95	0,55
2	169	57,80	32,34	0,59
Centro	190	64,98	34,29	0,62
3	185	63,27	33,83	0,62
4	156	53,36	31,07	0,57
Média		57,80	32,30	0,59

Tabela D.I.4 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Ensaio 2 - Linha Horizontal.

Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	152	51,99	30,67	0,56
2	173	59,17	32,72	0,60
Centro	191	65,33	34,38	0,63
3	188	64,30	34,11	0,62
4	166	56,78	32,05	0,58
Média		59,51	32,78	0,60

Tabela D.I.5 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Ensaio 3 - Linha Vertical.

Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	123	42,07	27,63	0,50
2	148	50,62	30,31	0,55
Centro	162	55,41	31,71	0,58
3	160	54,72	31,51	0,57
4	135	46,17	28,95	0,53
Média		49,80	30,02	0,55

Tabela D.I.6 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Ensaio 3 - Linha Horizontal.

Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	125	42,75	27,85	0,51
2	150	51,30	30,51	0,56
Centro	165	56,43	32,00	0,58
3	163	55,75	31,81	0,58
4	138	47,20	29,27	0,53
Média		50,69	30,29	0,55

Tabela D.I.7 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Ensaio 4 - Linha Vertical.

Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	205	70,11	35,56	0,65
2	240	82,08	38,48	0,70
Centro	261	89,27	40,13	0,73
3	260	88,93	40,05	0,73
4	224	76,61	37,17	0,68
Média		81,40	38,28	0,70

Tabela D.I.8 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Ensaio 4 - Linha Horizontal.

Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	209	71,48	35,91	0,65
2	240	82,08	38,48	0,70
Centro	266	90,98	40,51	0,74
3	265	90,64	40,43	0,74
4	233	79,69	37,91	0,69
Média		82,97	38,65	0,70

Tabela D.I.9 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Ensaio 5 - Linha Vertical.

Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	130	44,46	28,36	0,52
2	148	50,62	30,26	0,55
Centro	168	57,46	32,24	0,59
3	166	56,78	32,05	0,58
4	140	47,88	29,43	0,54
Média		51,44	30,47	0,55

Tabela D.I.10 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Ensaio 5 - Linha Horizontal.

Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	125	42,75	27,81	0,51
2	150	51,30	30,47	0,55
Centro	168	57,46	32,24	0,59
3	165	56,43	31,95	0,58
4	146	49,93	30,06	0,55
Média		51,58	30,51	0,56

Tabela D.I.11 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Ensaio 6 - Linha Vertical.

Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	198	67,72	35,00	0,64
2	235	80,37	38,13	0,69
Centro	265	90,63	40,49	0,74
3	260	88,93	40,11	0,73
4	223	76,27	37,15	0,68
Média		80,78	38,18	0,70

Tabela D.I.12 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Ensaio 6 - Linha Horizontal.

Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	207	70,80	35,79	0,65
2	237	81,06	38,29	0,70
Centro	265	90,64	40,49	0,74
3	260	88,93	40,11	0,73
4	235	80,37	38,13	0,69
Média		82,36	38,56	0,70

Tabela D.I.13 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Ensaio 7 - Linha Vertical.

Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	214	73,19	36,28	0,66
2	250	85,51	39,21	0,71
Centro	275	94,06	41,13	0,75
3	274	93,71	41,05	0,75
4	230	78,66	37,61	0,68
Média		85,03	39,06	0,71

Tabela D.I.14 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Ensaio 7 - Linha Horizontal.

Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	215	73,53	36,36	0,66
2	251	85,85	39,29	0,72
Centro	283	96,79	41,72	0,76
3	281	96,11	41,57	0,76
4	238	81,40	38,26	0,70
Média		86,74	39,44	0,72

Tabela D.I.15 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Ensaio 8 - Linha Horizontal.

Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	V(m/s)	Q(m ³ /s)
1	157	53,70	31,17	0,57
2	185	63,27	33,83	0,62
Centro	204	69,77	35,53	0,65
3	201	68,75	35,27	0,64
4	168	57,46	32,24	0,59
Média		62,59	33,61	0,61

Tabela D.I.16 - Resultados das medidas de velocidade no duto de amostragem, referentes ao Ensaio 8 - Linha Vertical.

Posição	$\Delta H(\text{mm})$	$\Delta P(\text{mmH}_2\text{O})$	$V(\text{m/s})$	$Q(\text{m}^3/\text{s})$
1	153	52,33	30,77	0,56
2	182	62,25	33,56	0,61
Centro	203	69,43	35,44	0,65
3	201	68,75	35,27	0,64
4	174	59,51	32,81	0,60
Média		62,45	33,57	0,61

II – Contagem do Número de Partículas

Tabela D.II.1 - Número de partículas num mesmo ponto de amostragem. Ensaio 1 - Linha Horizontal.

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	108063	105915	132019	149187	131752
0,75	708174	758926	861101	942905	870810
2,0	2706007	2589367	2586496	2478657	2532086
4,0	338104	299811	208018	187266	211423
7,5	12195	15571	7355	9969	7614
10	725	365	482	266	422

Tabela D.II.2 - Número de partículas num mesmo ponto de amostragem Ensaio 1 - Linha Vertical.

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	121142	152413	174089	119247	143788
0,75	842893	932466	1056132	744633	899670
2,0	2538108	2483574	2422889	2580343	2459590
4,0	244587	173438	127887	313929	197271
7,5	9769	5912	4826	13926	9239
10	612	293	300	734	706

**Tabela D.II.3 - Número de partículas num mesmo ponto de amostragem
Ensaio 2 - Linha Horizontal.**

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	120702	127163	139242	159126	134669
0,75	707792	808690	838109	904973	795765
2,0	2241836	2315847	2258722	2240465	2304099
4,0	428669	311986	305630	250303	306040
7,5	107632	58732	73428	45535	58871
10	10672	6274	8264	5294	7432

**Tabela D.II.4 - Número de partículas num mesmo ponto de amostragem
Ensaio 2 - Linha Vertical.**

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	120646	138352	158112	153197	134967
0,75	774975	829952	905579	896098	785129
2,0	2317576	2305513	2287724	2257697	2322907
4,0	325289	294071	232748	256647	305395
7,5	64102	58096	38508	45985	54676
10	8196	7057	4492	5232	7677

**Tabela D.II.5 - Número de partículas num mesmo ponto de amostragem.
Ensaio 3 - Linha Horizontal.**

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	74935	84428	69205	96209	92786
0,75	543286	519911	484487	656675	654612
2,0	2605494	2591857	2576451	2632573	2656607
4,0	513295	602417	653372	390605	39074
7,5	44862	36337	40255	18977	17352
10	3764	1094	725	659	593

**Tabela D.II.6 - Número de partículas num mesmo ponto de amostragem.
Ensaio 3 - Linha Vertical.**

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	100963	88127	102499	69366	72952
0,75	723387	635674	674245	281141	550248
2,0	2626609	2557494	2622873	2613872	2613539
4,0	324425	441291	372991	555399	524114
7,5	14427	38453	16485	26854	26623
10	545	1785	452	605	602

**Tabela D.II.7 - Número de partículas num mesmo ponto de amostragem.
Ensaio 4 - Linha Horizontal.**

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	52377	86581	140938	137726	146065
0,75	375851	563012	846070	819755	882870
2,0	2258517	2426861	2365748	2338403	2279985
4,0	858860	526866	271353	291494	247574
7,5	137657	76493	34791	42927	38377
10	12747	8110	4133	4893	4836

**Tabela D.II.8 - Número de partículas num mesmo ponto de amostragem.
Ensaio 4 - Linha Vertical.**

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	135447	150224	155749	154191	145424
0,75	837005	895354	926577	917456	857736
2,0	1281530	2315751	2325916	2313782	2313899
4,0	275443	238930	219686	231853	266395
7,5	42244	35789	32767	37693	50344
10	5452	4786	3794	4184	6314

**Tabela D.II.9 - Número de partículas num mesmo ponto de amostragem.
Ensaio 5 - Linha Horizontal.**

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	70103	74266	54087	67770	62569
0,75	450260	411770	384268	374788	356710
2,0	2559663	2524284	2507007	2456730	2430520
4,0	708705	781257	853646	882658	927289
7,5	49229	53933	50972	62241	64501
10	1130	1253	1205	1139	1929

**Tabela D.II.10 - Número de partículas num mesmo ponto de amostragem.
Ensaio 5 - Linha Vertical.**

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	55596	49720	41247	37385	34601
0,75	473057	428678	403610	339649	367557
2,0	2616840	2586136	2536475	2396165	2441303
4,0	679222	768517	846777	1021755	936630
7,5	39040	40842	47318	7468	84884
10	884	683	710	1682	1647

Tabela D.II.11 - Número de partículas num mesmo ponto de amostragem.
Ensaio 6 - Linha Horizontal.

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	108063	105915	132019	149187	131752
0,75	708174	758926	861101	942905	870810
2,0	2706007	2589367	2586496	2478657	2532086
4,0	338104	299811	208018	187266	211429
7,5	12195	15571	7355	9969	7614
10	725	365	482	266	422

Tabela D.II.12 - Número de partículas num mesmo ponto de amostragem.
Ensaio 6 - Linha Vertical.

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	121142	152413	174089	119247	143788
0,75	842893	932466	1056132	744633	899670
2,0	2538108	2483574	2422889	2580343	2459590
4,0	244587	173438	127887	313929	197271
7,5	9769	5912	4826	13926	9239
10	612	293	300	734	706

Tabela D.II.13 - Número de partículas num mesmo ponto de amostragem.
Ensaio 7 - Linha Horizontal.

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	37108	42956	35208	49786	25374
0,75	260314	336412	311909	387115	217107
2,0	2100296	2378113	2204757	2435434	1846970
4,0	1276726	1021678	1107632	843558	1394879
7,5	164653	76589	131577	57704	288495
10	3876	2397	1985	2327	3685

Tabela D.II.14 - Número de partículas num mesmo ponto de amostragem.
Ensaio 7 - Linha Vertical.

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	40742	36822	46779	49976	54319
0,75	356968	358390	305158	285631	280936
2,0	2412627	2345946	2220166	2189678	2210076
4,0	971117	962704	1141931	1203829	1190425
7,5	73279	76044	133152	122264	104935
10	1143	1571	1214	1201	1193

Tabela D.II.15 - Número de partículas num mesmo ponto de amostragem.
Ensaio 8 - Linha Horizontal.

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	57912	47644	55365	54597	54492
0,75	402319	303386	344167	383755	372841
2,0	2286791	2128916	2219645	2286870	2236703
4,0	802485	1061904	959887	1167791	870812
7,5	142204	188785	169476	142071	161519
10	13311	12812	13544	12407	14535

Tabela D.II.16 - Número de partículas num mesmo ponto de amostragem.
Ensaio 8 - Linha Vertical.

Diâmetro	Número de partículas				
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
0,4	49586	64363	59980	61854	62799
0,75	376445	445569	370857	413346	390974
2,0	2268809	2407261	2267246	2354731	2282511
4,0	893590	760167	916789	812444	843027
7,5	183684	123968	181797	147684	169883
10	15412	8632	13166	11193	9884

III – Massa e Concentração

Tabela D.III.1 - Massa e Concentração do Dióxido de Titânio. Ensaio 1 - Linha Vertical. Taxa de Emissão: 81,06287 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	125387,2	1,72272 .10 ⁻⁸	2,02912 .10 ⁻⁷	176,22363
0,75	828383,2	7,50235 .10 ⁻⁷	8,83669 .10 ⁻⁶	
2	2578522,6	4,42836 .10 ⁻⁵	5,21598 .10 ⁻⁴	
4	248925,6	3,42005 .10 ⁻⁵	4,02832 .10 ⁻⁴	
7,5	10540,8	9,54640 .10 ⁻⁶	1,12443 .10 ⁻⁴	
10	452,0	9,70333 .10 ⁻⁷	1,14291 .10 ⁻⁵	

Tabela D.III.2 - Massa e Concentração do Dióxido de Titânio. Ensaio 1 - Linha Horizontal. Taxa de Emissão: 73,87269 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	142135,8	1,95284 .10 ⁻⁸	2,30016 .10 ⁻⁷	160,59281
0,75	895158,5	8,10711 .10 ⁻⁷	9,54901 .10 ⁻⁶	
2	2496900,8	4,28819 .10 ⁻⁵	5,05087 .10 ⁻⁴	
4	211422,4	2,90478 .10 ⁻⁵	3,42142 .10 ⁻⁴	
7,5	8734,4	7,91042 .10 ⁻⁶	9,31733 .10 ⁻⁵	
10	529,0	1,13563 .10 ⁻⁶	1,33761 .10 ⁻⁵	

Tabela D.III.3 - Massa e Concentração da Alumina Calcificada. Ensaio 2 - Linha Vertical. Taxa de Emissão: 32,22653 µg/s

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	136180,4	4,10710 .10 ⁻⁹	4,83758 .10 ⁻⁸	70,05768
0,75	811065,8	1,61243 .10 ⁻⁷	1,89921 .10 ⁻⁶	
2	2272193,8	8,56597 .10 ⁻⁶	1,00895 .10 ⁻⁴	
4	320525,6	9,66682 .10 ⁻⁶	1,13861 .10 ⁻⁴	
7,5	68839,6	1,36856 .10 ⁻⁵	1,61196 .10 ⁻⁴	
10	7647,2	3,60366 .10 ⁻⁶	4,24459 .10 ⁻⁵	

Tabela D.III.4 - Massa e Concentração da Alumina Calcificada. Ensaio 2 - Linha Horizontal. Taxa de Emissão: 27,84465 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	141054,8	4,25411 .10 ⁻⁹	5,01073 .10 ⁻⁸	60,53184
0,75	838346,6	1,66667 .10 ⁻⁷	1,96309 .10 ⁻⁶	
2	2298283,4	8,66432 .10 ⁻⁶	1,02053 .10 ⁻⁴	
4	282830,0	8,52995 .10 ⁻⁶	1,00471 .10 ⁻⁴	
7,5	52273,4	1,03922 .10 ⁻⁵	1,22405 .10 ⁻⁴	
10	6530,8	3,07757 .10 ⁻⁶	3,62493 .10 ⁻⁵	

Tabela D.III.5 - Massa e Concentração do Dióxido de Titânio. Ensaio 3 - Linha Vertical. Taxa de Emissão: 150,05203 µg/s

Diâmetro(µm)	N	M(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	83512,6	1,14740 .10 ⁻⁸	1,35147 .10 ⁻⁷	288,56160
0,75	571794,2	5,17852 .10 ⁻⁷	6,09956 .10 ⁻⁶	
2	2612596,4	4,48688 .10 ⁻⁵	5,28490 .10 ⁻⁴	
4	510078,6	7,00809 .10 ⁻⁵	8,25452 .10 ⁻⁴	
7,5	31556,6	2,85796 .10 ⁻⁵	3,36627 .10 ⁻⁴	
10	1367,0	2,93461 .10 ⁻⁶	3,45655 .10 ⁻⁵	

Tabela D.III.6 - Massa e Concentração do Dióxido de Titânio. Ensaio 3 - Linha Horizontal. Taxa de Emissão: 132,92818 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	86781,4	1,19231 .10 ⁻⁸	1,40437 .10 ⁻⁷	255,63111
0,75	572939,0	5,18889 .10 ⁻⁷	6,11177 .10 ⁻⁶	
2	2606877,4	4,47706 .10 ⁻⁵	5,27334 .10 ⁻⁴	
4	443644,0	6,09533 .10 ⁻⁵	7,17942 .10 ⁻⁴	
7,5	24568,4	2,22507 .10 ⁻⁵	2,62081 .10 ⁻⁴	
10	798,0	1,71311 .10 ⁻⁶	2,01780 .10 ⁻⁵	

Tabela D.III.7 - Massa e Concentração da Alumina Calcificada. Ensaio 4 - Linha Vertical. Taxa de Emissão: 39,39353 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	112737,4	3,40008 .10 ⁻⁹	4,00481 .10 ⁻⁸	75.75679
0,75	697511,6	1,38668 .10 ⁻⁷	1,63331 .10 ⁻⁶	
2	1333902,8	8,79861 .10 ⁻⁶	1,03635 .10 ⁻⁴	
4	439229,4	1,32468 .10 ⁻⁵	1,56029 .10 ⁻⁴	
7,5	66049,0	1,31308 .10 ⁻⁵	1,54662 .10 ⁻⁴	
10	6943,8	3,27219 .10 ⁻⁶	3,85417 .10 ⁻⁵	

Tabela D.III.8 - Massa e Concentração da Alumina Calcificada. Ensaio 4 - Linha Horizontal. Taxa de Emissão: 27,13084 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	148207,0	4,46982 .10 ⁻⁹	5,26480 .10 ⁻⁸	52,17469
0,75	886825,6	1,76304 .10 ⁻⁷	2,07661 .10 ⁻⁶	
2	2319975,6	8,74610 .10 ⁻⁶	1,03017 .10 ⁻⁴	
4	246461,4	7,43310 .10 ⁻⁶	8,75512 .10 ⁻⁵	
7,5	39767,4	7,90591 .10 ⁻⁶	9,31203 .10 ⁻⁵	
10	4906,0	2,31190 .10 ⁻⁶	2,72308 .10 ⁻⁵	

Tabela D.III.9 - Massa e Concentração do Dióxido de Titânio. Ensaio 5 - Linha Vertical. Taxa de Emissão: 190,62308 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	65759,0	9,03478 .10 ⁻⁹	1,06417 .10 ⁻⁷	414,39800
0,75	395559,2	3,58243 .10 ⁻⁷	4,21959 .10 ⁻⁶	
2	2495640,8	4,28602 .10 ⁻⁵	5,04832 .10 ⁻⁴	
4	830711,0	1,14133 .10 ⁻⁴	1,34433 .10 ⁻³	
7,5	56175,2	5,08758 .10 ⁻⁵	5,99243 .10 ⁻⁴	
10	1331,2	2,85776 .10 ⁻⁶	3,36603 .10 ⁻⁵	

Tabela D.III.10 - Massa e Concentração do Dióxido de Titânio. Ensaio 5 - Linha Horizontal. Taxa de Emissão: 193,86959 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	43709,8	6,00539 .10 ⁻⁹	7,07349 .10 ⁻⁸	421,45563
0,75	402510,2	3,64538 .10 ⁻⁷	4,29374 .10 ⁻⁶	
2	2515383,8	4,31993 .10 ⁻⁵	5,08826 .10 ⁻⁴	
4	850580,2	1,16863 .10 ⁻⁴	1,37648 .10 ⁻³	
7,5	57250,4	5,18495 .10 ⁻⁵	6,10713 .10 ⁻⁴	
10	1121,2	2,40694 .10 ⁻⁶	2,83503 .10 ⁻⁵	

Tabela D.III.11 - Massa e Concentração da Alumina Calcinada. Ensaio 6 - Linha Vertical. Taxa de Emissão: 31,69522 µg/s.

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	109440,0	3,30063 .10 ⁻⁹	3,88767 .10 ⁻⁸	68,90265
0,75	694091,8	1,37988 .10 ⁻⁷	1,62530 .10 ⁻⁶	
2	2428972,6	9,15701 .10 ⁻⁶	1,07856 .10 ⁻⁴	
4	376841,8	1,13653 .10 ⁻⁵	1,33867 .10 ⁻⁴	
7,5	57225,8	1,13767 .10 ⁻⁵	1,34001 .10 ⁻⁴	
10	6490,8	3,05872 .10 ⁻⁶	3,60273 .10 ⁻⁵	

Tabela D.III.12 - Massa e Concentração da Alumina Calcinada. Ensaio 6 - Linha Horizontal. Taxa de Emissão: 25,08230 µg/s

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	137795,0	4,15580 .10 ⁻⁹	4,89493 .10 ⁻⁸	54,52674
0,75	858163,0	1,70606 .10 ⁻⁷	2,00950 .10 ⁻⁶	
2	2350594,2	8,86153 .10 ⁻⁶	1,04376 .10 ⁻⁴	
4	260709,8	7,86281 .10 ⁻⁶	9,26126 .10 ⁻⁵	
7,5	42836,2	8,51600 .10 ⁻⁶	1,00306 .10 ⁻⁴	
10	5009,8	2,36081 .10 ⁻⁶	2,78070 .10 ⁻⁵	

Tabela D.III.13 - Massa e Concentração do Dióxido de Titânio. Ensaio 7 - Linha Horizontal. Taxa de Emissão: 336,26428 µg/s

Diâmetro(µm)	N	m(g)	C(g/m ³)	C*(µg/m ³)
0,4	38086,4	5,23278 .10 ⁻⁹	6,16346 .10 ⁻⁸	646,66208
0,75	302571,4	2,74027 .10 ⁻⁷	3,22765 .10 ⁻⁶	
2	219311,4	3,76646 .10 ⁻⁵	4,43635 .10 ⁻⁴	
4	1128894,6	1,55101 .10 ⁻⁴	1,82687 .10 ⁻³	
7,5	143803,6	1,30237 .10 ⁻⁴	1,53401 .10 ⁻³	
10	2854,0	6,12684 .10 ⁻⁶	7,21654 .10 ⁻⁵	

Tabela D.III.14 - Massa e Concentração do Dióxido de Titânio. Ensaio 7 - Linha Vertical. Taxa de Emissão: 290,64153 $\mu\text{g/s}$.

Diâmetro(μm)	N	m(g)	C(g/m^3)	C*($\mu\text{g/m}^3$)
0,4	45727,6	$6,28262 \cdot 10^{-9}$	$7,40002 \cdot 10^{-8}$	558,92602
0,75	317416,6	$2,87472 \cdot 10^{-7}$	$3,38601 \cdot 10^{-6}$	
2	2275698,6	$3,90829 \cdot 10^{-5}$	$4,60341 \cdot 10^{-4}$	
4	1094001,2	$1,50307 \cdot 10^{-4}$	$1,77040 \cdot 10^{-3}$	
7,5	101934,8	$9,23185 \cdot 10^{-5}$	$1,08738 \cdot 10^{-3}$	
10	1264,4	$2,71436 \cdot 10^{-6}$	$3,19712 \cdot 10^{-5}$	

Tabela D.III.15 - Massa e Concentração da Alumina Calcinada. Ensaio 8 - Linha Vertical. Taxa de Emissão: 77,64975 $\mu\text{g/s}$.

Diâmetro(μm)	N	m(g)	C(g/m^3)	C*($\mu\text{g/m}^3$)
0,4	54002,0	$1,62866 \cdot 10^{-9}$	$1,91833 \cdot 10^{-8}$	149,32644
0,75	361293,6	$7,18266 \cdot 10^{-8}$	$8,46014 \cdot 10^{-7}$	
2	2231785,0	$8,41363 \cdot 10^{-6}$	$9,91005 \cdot 10^{-5}$	
4	972575,8	$2,93322 \cdot 10^{-5}$	$3,45491 \cdot 10^{-4}$	
7,5	160811,0	$3,19699 \cdot 10^{-5}$	$3,76559 \cdot 10^{-4}$	
10	13321,8	$6,27775 \cdot 10^{-6}$	$7,39429 \cdot 10^{-5}$	

Tabela D.III.16 - Massa e Concentração da Alumina Calcinada. Ensaio 8 - Linha Horizontal. Taxa de Emissão: 73,38031 $\mu\text{g/s}$.

Diâmetro(μm)	N	m(g)	C(g/m^3)	C*($\mu\text{g/m}^3$)
0,4	59716,4	$1,80100 \cdot 10^{-9}$	$2,12132 \cdot 10^{-8}$	141,11599
0,75	399438,2	$7,94099 \cdot 10^{-8}$	$9,35334 \cdot 10^{-7}$	
2	2316111,6	$8,73154 \cdot 10^{-6}$	$1,02845 \cdot 10^{-4}$	
4	845203,4	$2,54907 \cdot 10^{-5}$	$3,00244 \cdot 10^{-4}$	
7,5	161403,2	$3,20876 \cdot 10^{-5}$	$3,77946 \cdot 10^{-4}$	
10	11657,4	$5,49342 \cdot 10^{-6}$	$6,47046 \cdot 10^{-5}$	

APÊNDICE E

Perfil de velocidade no duto para as posições de amostragem nas linhas horizontal e vertical

