

LOTE EXAMINADA POR _____
TESE DEFENDIDA POR MARCOS DONIZETE LOPES
_____ E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 09 / 01 / 2003.
Leonardo Goldstein Jr
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Uma Contribuição ao Estudo do Escalonamento de Ciclones

Autor: Marcos Donizete Lopes

Orientador: Leonardo Goldstein Jr.

01/2003

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS**

Uma Contribuição ao Estudo do Escalonamento de Ciclones

Autor: Marcos Donizete Lopes

Orientador: Leonardo Goldstein Jr.

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Térmica e de Fluidos

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2003

S.P. – Brasil

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	I Unicamp
	L881c
V	EX
TOMBO BC/	56711
PROC	16/12/104
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	21,00
DATA	19/01/2004
Nº CPD	

BIBID. 309587

CM00192992-3

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

L881c Lopes, Marcos Donizete
 Uma contribuição ao estudo do escalonamento de
 ciclones / Marcos Donizete Lopes.--Campinas, SP:
 [s.n.], 2003.

Orientador: Leonardo Goldstein Jr.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Van der Waals, Forças de. 2. escoamento bifásico.
 3. Separadores (Máquinas). I. Almeida, Celso de. II.
 Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
 Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Uma Contribuição ao Estudo do
Escalonamento de Ciclones**

Autor: **Marcos Donizete Lopes**

Orientador: **Leonardo Goldstein Jr.**

Leonardo Goldstein Jr.

Prof. Dr. Leonardo Goldstein Jr.
Instituição: FEM - Unicamp

José Renato Coury

Prof. Dr. José Renato Coury
Instituição: Ufscar

Silvia Azucena Nebra de Pérez

Prof.a. Dra. Silvia Azucena Nebra de Pérez
Instituição: FEM – Unicamp

Campinas, 9 de Janeiro de 2003

**UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE**

554026200

Dedicatória:

Dedico esse trabalho aos meus pais, João e Geralda, como maneira de demonstrar a grande gratidão que tenho por tudo o que eles fizeram por mim.

Ao meu amado filho Matheus e a minha querida sobrinha Sofia .

E a todas as pessoas que sempre estiveram comigo e que sempre me apoiaram.

Agradecimentos:

Ao Prof. Dr. Leonardo Goldstein Jr., por sua paciência e sua rica orientação durante toda elaboração e finalização deste trabalho. Além disso por tudo o que me ensinou e pelo prazer de conviver com sua amizade e companheirismo.

Aos amigos Antonio de Barros Neiva, Emerson Reis, Fábio Fassani, Júlio Cesar Dainezi e Paulo Ananias, pelo auxílio durante a elaboração desta dissertação.

À Professora Dra. Meuris Gurgel, por nos auxiliar na análise granulométrica do FCC.

Aos professores e companheiros do Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos.

Ao CNPq, Fapesp e à Faculdade de Engenharia Mecânica por, propiciarem as condições necessárias à realização deste trabalho.

Ao meu bom **Deus**, por me amparar em todos os momentos da minha vida.

Resumo

Lopes, Marcos Donizete. Uma Contribuição ao Estudo de Escalonamento de Ciclones.

Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002, 122 p., Dissertação (Mestrado)

O emprego de modelos constitui uma solução prática para estudar a influência dos fatores operacionais no desempenho dos ciclones de porte industrial. A construção dos modelos deve obedecer a fatores de escala apropriados que determinam a existência de semelhança entre o modelo e o protótipo. Modelo e protótipo apresentarão comportamento fluidodinâmico semelhante se forem geometricamente semelhantes e se os valores dos números adimensionais correspondentes forem iguais. Um conjunto de números adimensionais representativo dos fenômenos envolvidos no escoamento gás-sólidos em ciclones deve levar em conta as forças interparticulares, como a de van der Waals e a eletrostática. A dificuldade para obedecer às condições de semelhança levando-as em conta seria, no entanto, muito grande. Assim sendo, desconsiderou-se a eventual participação das forças interparticulares na determinação do grupo de números adimensionais a partir dos quais se gerou as leis de escala. Estas leis simplificadas foram aplicadas para a construção de dois ciclones, modelo e protótipo, em escala, que foram testados para determinação da faixa de aplicação da simplificação introduzida. Adicionalmente abriu-se mão de operar com uma semelhança dinâmica completa entre modelo e protótipo, tendo-se a chamada Semelhança Incompleta, pois, por motivos práticos, operou-se o modelo com ar em condições ambientais, o que equivale a desprezar as forças viscosas em relação às forças de inércia, subtraindo-se o requisito da igualdade do número de Reynolds das relações de escala. O presente trabalho mostrou experimentalmente a existência de concentrações a partir das quais a simplificação proposta perde a validade, implicando que as forças desconsideradas são de magnitude tal que não podem deixar de ser consideradas na geração dos adimensionais. Verificou-se que, abaixo destas concentrações limite houve semelhança quanto ao rendimento de coleta, como se constatou pela existência de igualdade dos rendimentos de coleta dos ciclones modelo e protótipo, quando em condições operacionais de velocidades correspondentes e com a mesma concentração de sólidos na entrada dos ciclones. Verificou-se também que a perda de pressão, Δp , adimensionalizada em relação à perda de pressão no ciclone vazio mostrou-se mais adequada que a razão $\Delta p / \rho_o u_o^2$ para definição da semelhança quanto à perda de pressão, possivelmente porque a velocidade na entrada do ciclone, u_o , não seja a velocidade mais adequada a ser utilizada na adimensionalização da perda de pressão.

Palavras - Chave: Escalonamento de Ciclones, Rendimento de coleta, Separação Gás-sólido, Forças interparticulares, Concentração de Sólidos, Números adimensionais.

Abstract

Lopes, Marcos Donizete. A Contribution to the Study of Cyclones Scale-Up. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002, 122 p., Dissertação (Mestrado)

The use of models in scale is a practical way of studying how the operational parameters influence the performance of industrial cyclones. The model and the prototype cyclones should be built according to a scaling law – given by a set of dimensionless parameters --, so that they are similar. It there will be fluid-dynamical similarity between the cyclones if they are geometrically similar and the sets of corresponding dimensionless parameters are equal. A group of dimensionless parameters which represent the gas-solid flow phenomenon in cyclones should consider interparticle forces, such as the van der Waals and the electrostatic forces. However, as it would be quite difficult to comply with a scaling law determined from taking into consideration these forces, it was decided not to include them and check the range of applicability of the simplified set. Moreover, during the tests, all the dimensionless parameters were made equal, with the exception of the Reynolds number, because, for practical reasons, atmospheric air was used in the tests for both prototype and model cyclones, what is equivalent to neglect the viscous forces as compared to the inertial forces. The present work showed that when the model and prototype cyclones were operating at the corresponding velocities and with the same solids concentration at the inlet, similarity was obtained between the collection efficiencies when the solids concentration was less than 1.0 kg/kg, meaning that the proposed methodology was appropriate, that is, that the forces not included were not significant and could be neglected.. Concerning the pressure drop in the cyclones, it was observed that the ratio of the pressure drop, Δp , by the pressure drop in the cyclone with no solids, was more appropriate than the ratio $\Delta p / \rho_o u_o^2$ for expressing similarity, maybe because the entrance velocity, u_o , is not the best velocity to be used as a scaling parameter.

Keywords: Scale-up of Cyclones, Collection Efficiency, Gas-solids Separation, Interparticle Forces, Solids Concentration, Dimensionless Numbers.

Índice

Lista de Figuras	iii	
Lista de Tabelas	v	
Nomenclatura	vi	
Capítulo 1	Introdução	1
1.1	<i>Scale Up de Ciclones</i>	1
1.2	Objetivo deste Trabalho	2
Capítulo 2	Estado da Arte	4
2.1	Ciclones	4
2.2	Aglomerção de Partículas	22
Capítulo 3	Obtenção das Relações de Escala	27
3.1	Teorema dos Pi de Buckingham	28
3.2	Adimensionalização das Equações Fundamentais do Escoamento em Ciclones	32
3.3	Relação Entre as Forças Participantes	38
3.4	<i>Scale-down</i> de um Ciclone Protótipo	47
Capítulo 4	Descrição do Dispositivo e Procedimento Experimental	51
4.1	Descrição do Dispositivo Experimental	51
4.2	Aquisição de Dados	59
4.2.1	Perda de Pressão no Ciclone	59
4.2.2	Pressão	61

4.2.3	Temperatura	61
4.2.4	Vazão de Ar	61
4.2.5	Velocidade do ar na entrada do ciclone	62
4.2.6	Tempo	63
4.2.7	Massa	63
4.3	Procedimento Experimental	64
4.3.1	Preparação do inventário de sólidos na granulometria adequada	64
4.3.2	Ajuste das condições operacionais e execução dos testes	66
4.3.3	Análise granulométrica dos sólidos coletados no silo SI 02.	67
4.4	Redução de dados	67
Capítulo 5	Apresentação e Discussão dos Resultados	72
5.1	Rendimento de Coleta	73
5.1.1	Análise dos Resultados e Comparação com a Literatura	74
5.1.2	Análise da Semelhança Quanto ao Rendimento de Coleta dos Ciclones Protótipo e Modelo	78
5.2	Perda de Pressão	80
5.2.1	Análise dos Resultados e Comparação com a Literatura	80
5.2.2	Análise da Semelhança Quanto à Perda de Pressão nos Ciclones Protótipo e Modelo	85
5.3	Rendimento Fracional de Coleta	89
Capítulo 6	Conclusões e Recomendações	91
6.1	Rendimento de Coleta	92
6.2	Rendimento Fracional de Coleta	93
6.3	Perda de Pressão	94
Referências Bibliográficas		96
Apêndice A		102
Apêndice B		105
Apêndice C		114

Lista de Figuras

2.1 Desenho Esquemático de um Ciclone	5
4.1 Fluxograma Simplificado da Instalação Experimental	52
4.2 Desenho Esquemático dos Ciclones	53
4.3 Ciclone Protótipo	54
4.4 Ciclone Modelo	54
4.5 Silo alimentador de FCC - SI 01 mostrando a Válvula – V 03	55
4.6 Vista de topo do Silo SI 01	55
4.7 Vista lateral do ejetor de sólidos	56
4.8 Desenho esquemático do Ejetor EJ 01	56
4.9 Desenho esquemático do Ejetor EJ 02	56
4.10 Vibrador de Peneiras de laboratório Produtest™	57
4.11 Vibrador de Peneiras de uso industrial Produtest™	57
4.12 Vista lateral da montagem	58
4.13 Vista de topo da montagem	58
4.14 Vista frontal da montagem	59
4.15 Vista lateral da montagem	59
4.16 Esquema do Sistema de Aquisição de Dados	60
4.17 Bloco de Conexão e Condicionamento de Sinais	60
4.18 Transmissor diferencial de pressão	60
4.19 Balança Digital	63

5.1	Rendimento de coleta em função da concentração para o ciclone protótipo	74
5.2	Rendimento de coleta em função da concentração para o ciclone modelo	75
5.3	Comparação do rendimento de coleta com previsões da literatura - Ciclone protótipo	77
5.4	Comparação do rendimento de coleta com previsões da literatura - Ciclone modelo	77
5.5	Rendimentos de coleta dos ciclones protótipo e modelo Operação com velocidades altas	78
5.6	Rendimentos de coleta dos ciclones protótipo e modelo Velocidades intermediárias	79
5.7	Rendimentos de coleta dos ciclones protótipo e modelo Velocidades baixas	79
5.8	Variação da Perda de pressão com a velocidade Escoamento sem partículas	81
5.9	Variação da perda de pressão com a concentração de sólidos na entrada do ciclone – Ciclone Protótipo	82
5.10	Variação da perda de pressão com a concentração de sólidos na entrada do ciclone – Ciclone Modelo	82
5.11	Comparação entre a perda de pressão real e a perda de pressão estimada Ciclone Protótipo	83
5.12	Comparação entre a perda de pressão real e a perda de pressão estimada Ciclone Modelo	84
5.13	Perda de pressão adimensional para ciclones operando com velocidades altas	85
5.14	Perda de pressão adimensional para ciclones operando com velocidades intermediárias	86
5.15	Perda de pressão adimensional para ciclones operando com velocidades baixas	86
5.16	Razão de perda de pressão para ciclones operando com velocidades baixas	87
5.17	Razão de perda de pressão para ciclones operando com velocidades intermediárias	88
5.18	Razão de perda de pressão para ciclones operando com velocidades altas através dos ciclones protótipo e modelo	88
5.19	Distribuição granulométrica adimensional. Testes com velocidades altas	89
5.20	Distribuição granulométrica adimensional. Testes com velocidades intermediárias	90
5.21	Distribuição granulométrica adimensional. Testes com velocidades baixas	90
A.1	Função de conversão do conversor corrente-tensão	103
A.2	Função de conversão do transmissor de pressão diferencial	104
C.1	Curva normalizada de rendimento de coleta por tamanho de partícula	118
C.2	Rendimento global de coleta em função da concentração	118

Lista de Tabelas

2.1 Forças de Adesão Eletrostáticas	25
4.1 Dimensões dos Ciclones	54
4.2 Composição Mássica do Inventário de Sólidos para os Ciclones Protótipo e Modelo	65
4.3 Perda de Pressão, Temperaturas e Velocidades do Sistema para o Ciclone Protótipo	70
4.4 Perda de Pressão, Temperaturas e Velocidades do Sistema para o Ciclone Modelo	71
5.1 Ciclone Protótipo - Resultados dos Testes	72
5.2 Ciclone Modelo - Resultados dos Testes	73
C.1 Número de espirais e diâmetro de corte teórico	119
C.2 Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações $u_0 = 20,72$ m/s	120
C.3 Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações $u_0 = 17,98$ m/s	120
C.4 Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações $u_0 = 15,17$ m/s	121
C.5 Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações $u_0 = 16,26$ m/s	121
C.6 Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações $u_0 = 14,28$ m/s	122
C.7 Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações $u_0 = 11,75$ m/s	122

Nomenclatura

Letras Latinas

a	– Altura da seção de entrada do ciclone	[m]
A	– Constante de Hamaker na Eq.(2.37)	[J]
b	– Largura da seção de entrada do ciclone	[m]
B	– Diâmetro do Duto de Saída do ciclone para as partículas coletadas	[m]
C	– Concentração de sólidos na entrada do ciclone	[kg _{sólido} /kg _{ar}]
C_c	– Fator de correção de deslizamento de Cunningham	adimensional
C_A	– Coeficiente de arraste	adimensional
C_D	– Coeficiente de Descarga	adimensional
D	– Diâmetro de Barril do ciclone	[m]
d_o	– Diâmetro da entrada do ciclone nas Eqs. (2.19) e (2.20)	[m]
d_p	– Diâmetro da partícula	[μ m]
d_{pc}	– Diâmetro de corte da partícula no ciclone	[μ m]
d_{po}	– diâmetro do orifício da placa	[m]
D_r	– Coeficiente de Difusão turbulenta de Taylor	[m ² /s]
d_s	– Diâmetro do duto de saída do ciclone	[m]
D_t	– Diâmetro da tubulação onde esta acoplada a placa de orifício	[m]
$Eu = \frac{\Delta p D^4}{\rho Q^2}$	na Eq. (2.35)	adimensional
F_E	– Força de Empuxo	[N]
F_{el}	– Força de atração eletrostática	[N]
F_G	– Força da Gravidade	[N]

F_I – Força de Inércia	[N]
F_p – Força de Pressão	[N]
$Fr = \frac{u_0^2}{gD}$	adimensional
$Fr_p = \frac{u_0^2}{gd_p}$	adimensional
F_v – Força viscosa	[N]
$F_{\text{área}vw}$ – Força de Van der Waals por unidade de área	[N/m ²]
F_{vw} – Força de Van der Waals	[N]
g – Aceleração da gravidade	[m/s ²]
G – Parâmetro de assentamento gravitacional na Eq. (2.26)	adimensional
h - Altura do cilindro do ciclone	[m]
H – Altura total do ciclone	[m]
H_i – Comprimento imaginário do ciclone	[m]
i – faixa granulométrica	[μm]
k – Constante dielétrica relativa do meio entre as superfícies	adimensional
L – Comprimento efetivo do ciclone	[m]
L_e – Largura da entrada tangencial, Apêndice C	[m]
L_i – Proporção característica do ciclone na Eq. (2.32)	[m]
\dot{m} - Descarga de ar	[kg/s]
M_{coletada} – Massa das partículas retidas pelo ciclone	[g]
\dot{m}_p - Descarga de Sólidos	[kg/h]
m_p – Massa da partícula	[g]
$M_{\text{saída}}$ – Massa das partículas que atravessaram o ciclone sem serem retidas	[g]
n – Expoente da equação do vórtice no ciclone	adimensional
N – Parâmetro adimensional na Eq. (2.39)	adimensional
N_e – Número de voltas da corrente gasosa do vórtice externo no interior do ciclone, mostrado na Eq. (2.10)	adimensional
N_s - Número de espirais percorridas pelo gás na Eq.(C.2)	adimensional
p_0 – Pressão na entrada do ciclone	[mmH ₂ O]

p_{amb} – Pressão ambiente	[mmHg]
p_{po} – Pressão a montante da placa de orifício	[mmHg]
q – Carga elétrica	[As/ μm^2]
Q – Vazão de ar	[m^3/s]
$Re = \frac{\rho_p u_0 D}{\mu}$	adimensional
$Re_c = \frac{\pi R_0^2 u_0}{H_i \nu}$ na Eq. (2.29)	adimensional
$Re_D = \frac{\rho u_0 D}{\mu}$	adimensional
$Re_{do} = \frac{\rho u_0 d_o}{\mu}$	adimensional
$Re_{Dt} = \frac{\rho u D_t}{\mu}$	adimensional
$Re_p = \frac{\rho u_0 d_p}{\mu}$	adimensional
$Re_{\rho p} = \frac{\rho_p u_0 d_p}{\mu}$	adimensional
R_0 – Raio da entrada do ciclone na Eq. (2.29)	[m]
S – Comprimento do duto de saída do ciclone	[m]
$St_{do} = \frac{C_c \rho_p u_0 d_p^2}{\mu d_o}$ na Eq. (2.19)	adimensional
$St_D = \frac{C_c \rho_p u_0 d_p^2}{\mu D}$ na Eq. (2.25)	adimensional
$St = \frac{\rho_p d_p^2 u_0}{18 \mu D}$ na Eq. (2.31)	adimensional
t – Tempo de duração dos testes realizados	[s]
T_θ – Temperatura do ar na entrada do ciclone	[$^\circ\text{C}$]
T_{amb} – Temperatura ambiente	[$^\circ\text{C}$]
t_{Le} – Tempo necessário para a partícula percorrer a distancia L_e , dado pela Eq.(C.7)	[s]

T_{p0} – Temperatura do ar próximo à placa de orifício	[°C]
t_{res} – Tempo de residência do gás no ciclone	[s]
t_{95} - t de Student para 95% de confiança	adimensional
u – Velocidade tangencial do fluido	[m/s]
U – Diferença de potencial do contato	[V]
u_0 – Velocidade do ar na entrada do ciclone	[m/s]
u_p – Velocidade tangencial da partícula	[m/s]
u_{pt} – Velocidade terminal da partícula	[m/s]
u_{pt}^{50} - Velocidade terminal da partícula coletada com 50% de rendimento	[m/s]
u_{ptc} – Velocidade terminal da partícula em um campo centrífugo	[m/s]
u_{ptg} – Velocidade terminal da partícula em um campo gravitacional	[m/s]
u_{ptp} – Velocidade terminal de uma partícula no ar em repouso	[m/s]
u_v – Velocidade tangencial do fluido no vórtice do ciclone	[m/s]
v – Velocidade radial do fluido	[m/s]
v_p – Velocidade radial da partícula	[m/s]
V – Velocidade característica do escoamento gás sólido dentro do ciclones	[m/s]
V_{nl} – Volume do Ciclone acima do comprimento efetivo do ciclone	[m ³]
v_{pv} - Velocidade radial da partícula no vórtice do ciclone	[m/s]
v_{pw} - Velocidade radial da partícula próxima a parede do ciclone	[m/s]
V_s – Volume anular do ciclone acima da metade da altura da seção de entrada b	[m ³]
w – Velocidade axial do fluido	[m/s]
w_η - Incerteza na determinação do rendimento de coleta	[%]
$w_{\Delta p}$ – Incerteza na determinação da perda de pressão através do ciclone	[%]
$w_{\Delta p_o}$ – Incerteza na determinação da perda de pressão através da placa de orifício	[mmH ₂ O]
w_C – Incerteza na determinação da concentração de sólidos	[%]
$w_{conversor}$ – Incerteza associada ao conversor corrente tensão (TR 01)	[%]
w_{dpo} – Incerteza na determinação do diâmetro do orifício da placa de orifício	[mm]
w_{Dt} – Incerteza na determinação do diâmetro da tubulação de alimentação	[mm]
$w_{Mcoletada}$ – Incerteza na determinação da massa das partículas retidas pelo ciclone	[%]
w_m - Incerteza na determinação da descarga de ar	[%]

w_{m_p}	- Incerteza na determinação da descarga de sólidos	[%]
w_{Msaida}	- Incerteza na determinação da massa das partículas que atravessaram o ciclone sem serem retidas	[%]
w_p	- Velocidade axial da partícula	[m/s]
w_{placa}	- Incerteza associada ao placa de aquisição de dados	[%]
w_{ppo}	- Incerteza na determinação da pressão a montante à placa de orifício	[mmHg]
w_{SAD}	- Incerteza associada ao sistema de aquisição de dados	[%]
w_{smar}	- Incerteza associada ao transmissor de pressão Smar TM (TR 01)	[%]
w_t	- Incerteza na determinação do tempo de duração dos teste	[%]

Letras Gregas

α	- Aceleração em um campo centrífugo na Eq. (C.5)	[m/s ²]
α	- Coeficiente de re-arraste das partículas na Eq. (2.18)	adimensional
$\Psi = \frac{\rho_p d_p^2 u_0}{18\mu D} (n+1)$	na Eq. (2.14)	adimensional
ρ	- Densidade do fluido	[kg/m ³]
ϕ	- Esfericidade das partículas	adimensional
η	- Rendimento de Coleta do ciclone	adimensional
ν	- Viscosidade cinemática do fluido	[m ² /s]
μ	- Viscosidade dinâmica do fluido	[kg/m.s]
	($<1,868 \times 10^{-3}$ kg _{sólido} / kg _{gás})	adimensional
ρ_0	- Densidade do fluido na entrada do ciclone	[kg/m ³]
ϵ_0	- Permissividade do vácuo	[As/Vm]
η_0	- Rendimento de coleta do ciclone para baixas concentrações	
ρ_{abs}	- Densidade absoluta das partículas	[kg/m ³]
ρ_b	- Densidade de bulk dos sólidos	[kg/m ³]
ΔH	- Número de cargas de pressão cinética na entrada do ciclone	adimensional

ρ_p – Densidade aparente das partículas	[kg/m ³]
Δp – Perda de Pressão para escoamento com partículas	[N/m ²]
τ_p – Tempo de relaxação da partícula	[s]
ρ_{po} – Densidade do fluido próximo a placa de orifício	[kg/m ³]
Δp_{po} – Perda de Pressão através da placa de orifício	[mmH ₂ O]
Δp_v – Perda de Pressão para o escoamento sem partículas	[N/m ²]
Δp_{vP} – Perda de Pressão para escoamento sem partículas no ciclone protótipo	[N/m ²]
Δp_{vM} – Perda de Pressão para escoamento sem partículas no ciclone modelo	[N/m ²]
σ_x – Desvio Padrão	adimensional

Abreviações

BA 01 – Balança
CI 01 – Ciclone protótipo
CI 02 – Ciclone modelo
EJ 01 – Ejetor de partículas sólidas para o ciclone protótipo
EJ 02 – Ejetor de partículas sólidas para o ciclone modelo
FI 01 – Filtro de pano para coleta de sólidos na saída de ar do ciclone
PC 01 – Microcomputador para aquisição de dados
PO 01 – Placa de orifício
SI 01 – Silo alimentador de Partículas FCC
SI 02 – Silo para coleta de sólidos separados pelo ciclone
SO 01 – Soprador tipo roots
T 01 – Termopar tipo J
T 02 – Termopar tipo K
TR 01 – Transmissor de pressão diferencial
V 01 – Válvula de desvio
V 02 – Válvula para controle de vazão de ar
V 03 – Válvula para controle de sólidos

Siglas

DTP – Distribuição do tamanho das partículas

Pen. – Classificador de peneiras de laboratório

MS – Classificador Mastersizer

FCC - *fluid cracker catalyser*

Capítulo 1

Introdução

1.1 *Scale Up* de Ciclones

Ciclone ou separador ciclônico é um equipamento utilizado extensivamente como um meio de remover particulados de gases, em escoamentos bi-fásicos, em uma larga faixa de processos na indústria. Sua popularidade é devido ao fato que ele é barato e simples de ser construído, compacto, não contém partes móveis e requer pouca manutenção. Uma família de ciclones é estabelecida quando um conjunto de dimensões é fixado em relação ao diâmetro principal (Diâmetro de Barril). Existem várias famílias de ciclones, sendo as mais citadas as de Stairmand (1951) e de Lapple (1951).

Quando projetados e operados adequadamente, apresentam um bom desempenho, ou seja, têm alto rendimento de coleta e causam baixa perda de pressão. Para uma geometria específica adotada, o desempenho dos ciclones depende de vários fatores, sendo os principais a velocidade do escoamento do gás e suas propriedades físicas, as propriedades físicas das partículas e sua distribuição granulométrica, e a concentração de partículas em sua entrada. Os ciclones são projetados para apresentarem um desempenho especificado em uma dada aplicação, caracterizada por suas condições operacionais. Entretanto, poucas vezes as condições operacionais se mantêm constantes, o que ocasiona alterações no desempenho esperado.

A instrumentação e teste de um ciclone de porte industrial é muitas vezes difícil, pois ele

pode estar localizado em região de difícil acesso, como, por exemplo, dentro de um reator, e estar submetido a condições severas de pressão e temperatura. Além disso, o que se deseja muitas vezes é avaliar o desempenho de um ciclone antes de sua construção.

O emprego de modelos de ciclone, construídos em escala laboratorial, pode se constituir numa solução prática para estudar a influência da variação dos fatores operacionais no desempenho dos ciclones de porte industrial. A construção desses modelos, no entanto, deve ser efetivada obedecendo normas de semelhança ou escalonamento (*scale-up*), ou seja, devem obedecer a fatores de escala apropriados, que determinam a semelhança entre o modelo e a unidade industrial – protótipo. A não utilização de todos os fatores de escala implica na obtenção de resultados menos confiáveis, isto é, menos representativos do processo real.

1.2 Objetivo deste Trabalho

Os grupos adimensionais que governam a semelhança fluidodinâmica entre o modelo e o protótipo podem ser obtidos a partir de:

- Teorema dos Pi de Buckingham,
- Relação entre as forças que regem o escoamento ou, alternativamente,
- Adimensionalização das equações fundamentais governantes do escoamento e condições de contorno.

Modelo e protótipo apresentarão comportamento fluidodinâmico semelhante se forem geometricamente semelhantes e se os valores dos números adimensionais correspondentes forem iguais.

Um conjunto de números adimensionais representativo dos fenômenos envolvidos deveria levar em conta as forças interparticulares, como as de van der Waals e as eletrostáticas. A dificuldade prevista para obedecer às condições requeridas para que houvesse semelhança nesse caso seria muito grande. Sabe-se que as forças interparticulares se tornam mais significativas quando se trabalha com partículas de tamanho pequeno e em altas concentrações de sólidos no escoamento.

O objetivo desta dissertação foi avaliar o nível de concentração a partir do qual essas forças são de magnitude tal que não podem deixar de ser consideradas na geração dos adimensionais que comandam as condições de escalonamento modelo/protótipo. Assim sendo, foram introduzidas simplificações no conjunto completo inicial de números adimensionais, não levando em conta a participação das forças interparticulares, resultando um segundo grupo de números adimensionais mais simples, que produziu as leis de escala segundo as quais foram construídos dois ciclones em escala.

Verificou-se experimentalmente, devido a existência de poucos dados na literatura adequados para tal fim, o efeito da concentração de sólidos na entrada dos ciclones sobre o rendimento de coleta e a perda de pressão adimensional nos mesmos, determinando-se a faixa de concentrações a partir das quais o *scale-up* executado a partir do conjunto de números adimensionais simplificado perdia a validade. Para baixas concentrações as forças interparticulares são menos expressivas e, portanto, os adimensionais simplificados devem gerar leis de escala relativamente adequadas, de modo que deverá haver condições de semelhança entre os ciclones modelo e protótipo. Havendo semelhança, a perda de pressão adimensional e o rendimento de coleta, que também é um adimensional, dos ciclones modelo e protótipo devem ser iguais, nas condições operacionais correspondentes, que incluem o requisito de igualdade de concentração de sólidos na entrada dos ciclones.

Os ciclones foram testados com partículas de FCC – *fluid cracker catalyser*, para três velocidades do gás na entrada de cada ciclone.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo é feito um levantamento das informações relevantes disponíveis sobre ciclones, relativas ao tema deste trabalho, incluindo artigos sobre escalonamento, rendimento de coleta, perda de pressão, fenomenologia e modelagem de ciclones, tendo em vista situar o presente trabalho e levantar subsídios para a sua execução e para a discussão dos resultados obtidos.

2.1 Ciclones

Shepherd e Lapple (1939,1940) investigaram o padrão de escoamento e a perda de pressão em ciclones e observaram que a presença de partículas sólidas no escoamento ocasionou uma redução da perda de pressão, definida como a diferença da pressão estática entre a entrada e a saída do gás no ciclone, em relação à existente no escoamento apenas de gás. Eles verificaram também que ela variou proporcionalmente ao quadrado da velocidade do gás na entrada e que dependia das proporções geométricas do ciclone, conforme Figura 2.1. Essa dependência também foi observada por ter Linden (1949). A perda de pressão também mostrou ser dependente da concentração de partículas na suspensão gasosa, embora a maioria das correlações existentes na literatura não considere esta variável. Fatores que contribuem para a perda de pressão no ciclone incluem a expansão do gás ao entrar no ciclone, a formação do vórtice, o atrito nas paredes e a recuperação de energia cinética rotacional na forma de pressão na saída do ciclone.

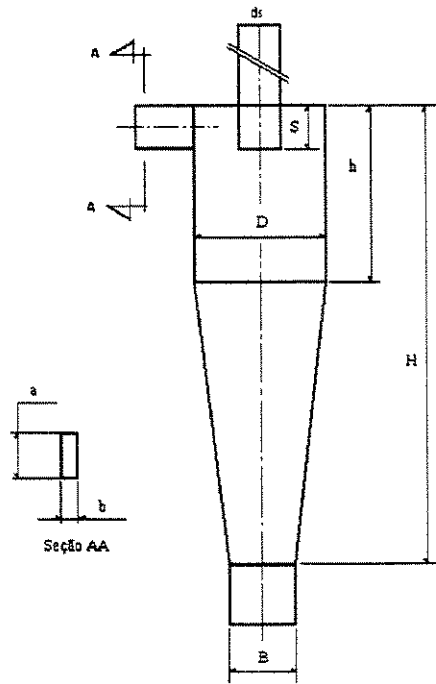


Figura 2.1. Desenho esquemático de um Ciclone

A perda de pressão em ciclones, para escoamento sem partículas, Δp_v pode ser expressa em termos do número de cargas de pressão cinética na entrada, *velocity heads*, ΔH . ΔH é um termo adimensional, um coeficiente de resistência, análogo ao coeficiente de arraste, obtido experimentalmente, e é considerado constante para um dado modelo de ciclone.

A perda de pressão em termos de ΔH é dada por:

$$\Delta p_v = \frac{1}{2} \rho_0 u_0^2 \Delta H \quad (2.1)$$

onde ρ_0 e u_0 são, respectivamente, a densidade do gás e sua velocidade na entrada do ciclone.

Há várias expressões propostas para o cálculo de ΔH . A expressão mais simples é a de Shepherd e Lapple (1940):

$$\Delta H = 16 \frac{ab}{d_s^2} \quad (2.2)$$

onde a é a altura e b a largura da seção de entrada do ciclone, e d_s é o diâmetro do tubo de saída do ciclone.

Stairmand (1949) propôs a expressão:

$$\Delta H = 1 + 2\alpha^2 \left(\frac{2(D-b)}{d_s} - 1 \right) + 2 \left(\frac{4ab}{\pi d_s^2} \right)^2 \quad (2.3)$$

onde D é o diâmetro de barril do ciclone e α é um fator dado por:

$$\alpha = \frac{-\left(\frac{d_s}{2(D-b)} \right)^{0.5} + \left(\frac{d_s}{2(D-b)} + \frac{4G^* A}{ab} \right)^{0.5}}{\frac{2G^* A}{ab}}$$

em que A é a área da superfície interna do ciclone e $G^* = 0,005$ é um fator de atrito.

A expressão proposta por Alexander (1949) é mais complexa e é dada por:

$$\Delta H = 4,62 \frac{ab}{Dd_s} \left(\left(\left(\frac{D}{d_s} \right)^{2n} - 1 \right) \left(\frac{1-n}{n} \right) + f \left(\frac{D}{d_s} \right)^{2n} \right) \quad (2.4)$$

em que n é o expoente do vórtice dado por:

$$n = 0,67D^{0,14} \quad a \quad T_0 = 283K$$

O diâmetro de barril do ciclone (D) é dado em metros.

A correção de n em função da temperatura é dada por:

$$\frac{1-n_1}{1-n_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{0,3}$$

e f por:

$$f = 0,8 \left(\frac{1}{n(1-n)} \left(\frac{4-2^{2n}}{3} \right) - \left(\frac{1-n}{n} \right) \right) + 0,2 \left(2^{2n} - 1 \left(\frac{1-n}{n} \right) + 1,5(2)^{2n} \right)$$

First (1950) propôs:

$$\Delta H = \frac{ab}{d_s^2} \left(\frac{24}{\left(\frac{h(H-h)}{D^2} \right)^{1/3}} \right) \quad (2.5)$$

em que h é a altura da parte cilíndrica do ciclone e H sua altura total do ciclone.

Stairmand apresentou em 1951 um dos primeiros trabalhos a tecer considerações significativas sobre como estender os resultados experimentais de desempenho obtidos em um ciclone para operação deste mesmo ciclone em condições diferentes das estudadas originalmente, o que, de certa forma, se insere no tema do escalonamento de ciclones.

O pesquisador descreveu o mecanismo geral de operação dos ciclones e apresentou dados de desempenho para alguns tipos de ciclones. A partir dos testes realizados, construiu curvas de rendimento de coleta em função do diâmetro das partículas, para um dado tipo de ciclone, particulado sólido e vazão. Estas curvas poderiam ser transpostas, dentro de certos limites, para contemplar variações na granulometria e densidade das partículas, na viscosidade e vazão do gás, e no tamanho do ciclone. A transposição consiste basicamente em deslocar a abscissa do gráfico de rendimento de coleta segundo relações entre parâmetros nas condições dos testes de referência, realizados por Stairmand, e nas novas condições desejadas. Assim, para ajustar a curva de rendimento para a variação de densidade das partículas, o diâmetro da “nova partícula” a ser usado como abscissa seria dado pela multiplicação do diâmetro das partículas de referência pela raiz quadrada da razão entre a densidade das partículas dos testes de referência (ρ_{pR}) e a das novas partículas (ρ_{pN}).

$$d_{pN} = d_{pR} \sqrt{\frac{\rho_{pR}}{\rho_{pN}}} \quad (2.6)$$

Para mudança de vazão, o tamanho da nova partícula seria dado pela multiplicação do valor

original pela raiz quadrada da razão entre a vazão do teste de referência (Q_R) e a nova vazão (Q_N):

$$d_{pN} = d_{pR} \sqrt{\frac{Q_R}{Q_N}} \quad (2.7)$$

Alterações da viscosidade do gás seriam corrigidas de tal modo que o diâmetro das partículas na nova condição seria calculado pela multiplicação do diâmetro de referência pela raiz quadrada da razão entre a nova viscosidade (μ_N) e a viscosidade de referência (μ_R).

$$d_{pN} = d_{pR} \sqrt{\frac{\mu_N}{\mu_R}} \quad (2.8)$$

O novo rendimento ajustado a mudanças na distribuição granulométrica, seria calculado pela multiplicação do rendimento de coleta correspondente a cada faixa granulométrica i na curva original, pela nova fração em massa das partículas na faixa granulométrica i .

Finalmente, para ajustar a curva padrão obtida nos testes a uma mudança do tamanho do ciclone, para ciclones geometricamente semelhantes, o diâmetro das partículas na nova condição seria obtido a partir da multiplicação do diâmetro original pela raiz quadrada da razão entre o diâmetro de barril do novo ciclone (D_N) e o do ciclone testado (D_R).

$$d_{pN} = d_{pR} \sqrt{\frac{D_N}{D_R}} \quad (2.9)$$

Stairmand recomendou que essas correções não fossem aplicadas em caso de mudanças de escala significativas sem a devida confirmação experimental. Ele também observou que o rendimento de coleta das partículas maiores diminui com o aumento da velocidade do gás, e em ciclones menores.

A separação de partículas em um ciclone ocorre pela ação da força centrífuga gerada pelo

movimento em espiral da corrente gasosa que impele as partículas para a parede do ciclone, por onde escorregam até o fundo do mesmo, onde são separadas. Em oposição a esta força, há a força de arraste exercida pelo gás sobre as partículas, em seu movimento para o centro e para o topo do ciclone, por onde deixam o equipamento. Os trabalhos desenvolvidos para o cálculo do rendimento de coleta em geral partiram da consideração do balanço entre essas duas forças, utilizando relações diferentes, empíricas ou não, para o cálculo dos parâmetros que surgiram do balanço, como, por exemplo, o tempo de residência do gás, número de espirais do escoamento de gás no ciclone, coeficiente de arraste, entre outros.

Lapple (1950) admitiu que a carga de sólidos que entra no ciclone se encontra uniformemente distribuída através de sua seção de entrada, e que o tempo de residência é obtido a partir do número de revoluções do escoamento de gás no interior do ciclone. O trabalho traz um gráfico de rendimento de coleta pela razão entre o diâmetro de cada partícula e o diâmetro de corte do ciclone, d_{pc} , que é o diâmetro da partícula com rendimento de coleta de 50%:

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu b}{2\pi N_e u_0 (\rho_p - \rho)}} \quad (2.10)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica do gás, N_e é o número de voltas da corrente gasosa do vórtice externo no interior do ciclone – determinado experimentalmente, constante para qualquer tamanho de ciclone geometricamente semelhante –, e ρ e ρ_p são as densidades do gás e das partículas. Para ciclones geometricamente similares, o pesquisador sugere que essa curva de rendimento de coleta, normalizada pelo diâmetro de corte, poderia ser utilizada para estimar o rendimento de coleta em condições diferentes das estudadas experimentalmente, utilizando-se na abscissa do gráfico a razão entre o diâmetro de cada partícula e o diâmetro de corte, calculado para as novas condições experimentais.

Barth (1956) partiu da determinação do diâmetro da partícula na qual a força centrífuga fosse exatamente equilibrada pela força de arraste, ficando “estática” em movimento de rotação ao redor da região central do ciclone. Ele propôs relações para o cálculo do comprimento do

vórtice ascendente e para a velocidade tangencial na fronteira deste vórtice, a partir do que calculou a velocidade terminal da partícula “estática” coletada com 50% de rendimento, u_{pt}^{50} . O autor sugeriu que o rendimento de coleta de cada partícula de um dado diâmetro seria determinado a partir da razão entre a velocidade terminal dessa partícula u_{pt} e a velocidade terminal u_{pt}^{50} neste ciclone, Barth apresentou um gráfico do rendimento de coleta fracional em função da razão entre as velocidades terminais, que pode ser aproximado pela expressão:

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{u_{pt}}{u_{pt}^{50}} \right)^{-3,2}} \quad (2.11)$$

onde

$$\frac{u_{pt}}{u_{pt}^{50}} = \frac{\pi(H-S)u_v^2 \rho_p d_p^2}{9\mu Q}$$

Q é a vazão, S é o comprimento do tubo de saída do ciclone, e u_v é a velocidade tangencial do fluido no vórtice do ciclone.

O trabalho de Barth também propôs uma expressão para ΔH :

$$\Delta H = \left(\frac{4ab\theta}{\pi d_s^2} \right)^2 \gamma \quad (2.12)$$

em que:

$$\gamma = \frac{d_s}{D} \left(\frac{1}{(1-2\theta(H-S)(\lambda/d_s))^2} - 1 \right) + 4,4\theta^{-2/3} + 1$$

$$\theta = \frac{\pi d_s (D-b)}{4ab\alpha^* + 2(H-S)(D-b)\pi\lambda},$$

$$\alpha^* = 1 - \frac{1,2b}{D} \quad \text{e} \quad \lambda = 0,02$$

Mori, Suganuma e Tanaka (1968) estudaram o rendimento de coleta de ciclones operando com partículas grosseiras. Observaram que, ao contrário do que ocorre na região dos pós finos, quanto maior o tamanho das partículas, menor o rendimento de coleta, e que um ciclone grande é mais efetivo que um pequeno para coletar partículas grandes. Choques elásticos irregulares das partículas grandes com as paredes ocasionariam o seu re-arraste pelo escoamento de gás, o que explicaria o fenômeno observado.

Boothroyd (1971) descreveu a existência de aglomeração de partículas tanto dentro do ciclone propriamente dito, junto à parede, como no duto de alimentação dos sólidos, com os grandes aglomerados arrastando os aglomerados menores e as pequenas partículas.

Leith e Licht (1972) partiram da equação diferencial do movimento de uma partícula na direção radial no interior do ciclone e estabeleceram um tempo de residência médio de uma partícula no ciclone, a partir do qual puderam derivar uma equação para o rendimento de coleta. Para isso foi admitido que a turbulência causaria a mistura uniforme das partículas ainda não coletadas na corrente gasosa. O rendimento dependeria de três parâmetros adimensionais: C , função das proporções geométricas do ciclone; Ψ , função das condições operacionais e das propriedades das partículas, e n , expoente modificado da lei de vórtices para distribuição tangencial de velocidade:

$$\eta = 1 - \exp(C\Psi)^{\frac{1}{2n+2}} \quad (2.13)$$

onde:

$$C = \frac{8(V_s + V_{nl}/2)}{abD}$$

$$\Psi = \frac{\rho_p d_p^2 u_0}{18\mu D} (n+1) \quad (2.14)$$

e

$ur^n = \text{constante}$ sendo,

V_{ni} o volume do ciclone acima do comprimento efetivo, no qual o vórtice se inverte, descontado o volume do vórtice ascendente e V_s é o volume anular do ciclone acima da metade da altura da seção de entrada b.

Para um dado tipo de ciclone, seria possível estimar o tamanho das partículas que seriam coletadas com mesmo rendimento em condições operacionais diferentes, igualando-se o parâmetro ψ calculado para cada uma das condições.

Zenz (1975) propôs que a perda de pressão fosse calculada, considerando-a composta pela soma de cinco termos, obtidos empiricamente: perda pela concentração na entrada, perda na aceleração dos sólidos, perda no cilindro do ciclone, perda na reversão do sentido do escoamento e perda pela concentração na saída.

Koch e Licht (1977) combinaram o modelo de rendimento de coleta de Leith e Licht com uma correlação para velocidade de saltação proposta por Kalen e Zenz (1974) para escoamento em dutos horizontais, e estenderam o modelo original para velocidades ou vazões elevadas do gás na entrada do ciclone, onde poderia haver re-arraste de partículas coletadas.

Tawari e Zenz (1984) apresentaram um procedimento para calcular o rendimento de coleta global a partir do conhecimento da curva de rendimento de coleta de cada tamanho de partícula em ciclones operando com baixa concentração de sólidos na entrada – abaixo de $0,002 \text{ kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$ –, e das distribuições granulométricas do material perdido e do material capturado pelo ciclone, em função da concentração de sólidos na sua entrada.

Abrahamson et al. (1978) estudaram o mecanismo de coleta em ciclones, considerando o movimento dos sólidos através do ciclone e de seu silo de coleta, e ressaltaram a aglomeração de partículas como um dos mecanismos básicos da operação de um ciclone. Os autores observaram a ocorrência de re-arraste de partículas que já haviam sido separadas do escoamento gás-sólido junto à parede, tanto para finos como partículas grosseiras (saltào), numa ampla faixa de concentração de sólidos, especialmente em ciclones pequenos.

Uma relação de similaridade para que ciclones geometricamente semelhantes tenham o mesmo rendimento de coleta foi apresentada, incluindo, porém, apenas parte dos parâmetros envolvidos no escoamento gás-sólido:

$$N_2 = \frac{\rho_p d_p^2 u_0^{17/16} \rho^{1/16}}{\mu^{17/16} D^{15/16}}$$

$$= \frac{\rho_p d_p^2 u_0}{\mu D} Re_D^{1/16}$$

A redução da perda de pressão devido à presença de partículas foi atribuída por Yuu, Jotaki, Tomita e Yoshida (1978) ao movimento das partículas sólidas junto à parede cilíndrica do ciclone, que causaria uma diminuição da velocidade tangencial, devido ao atrito sólidos-parede.

Como mencionado anteriormente, a adimensionalização das equações que regem o escoamento em ciclones é uma das maneiras de gerar os adimensionais necessários para gerar as condições de escalonamento. Há, basicamente, duas abordagens que foram utilizadas na modelagem matemática de ciclones, reportadas nesta revisão:

- Considerando que o escoamento do gás não é influenciado pela presença de partículas sólidas;
- Considerando as interações entre as fases sólida e gasosa e suas trocas de quantidade de movimento.

Parida e Chand (1980) investigaram o escoamento bifásico gás-sólido em um ciclone para determinar o efeito das partículas sobre a distribuição de velocidade de rotação do gás. Os autores consideraram escoamentos diluídos, com concentração de sólidos abaixo de $0,089 \text{ kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$, e desprezaram a interação partícula-partícula. Com auxílio das equações de Navier-Stokes bifásicas, as velocidades de rotação das fases fluido e particulado foram avaliadas por esquemas numéricos. Os resultados obtidos salientaram o efeito de acoplamento da quantidade de movimento entre as duas fases, havendo uma mudança significativa no perfil de velocidade com a variação do tamanho das partículas e da concentração. As previsões numéricas concordaram razoavelmente com os resultados experimentais.

Baseado no método de Leith e Licht (1972) e em observações experimentais de ter Linden (1949), Dietz (1981) propôs um modelo para o escoamento de fluidos em ciclones, considerando que cada seção seria dividida em três regiões: de entrada, do fluxo descendente de gás e do fluxo ascendente de gás. Foi admitido que dentro de cada região a turbulência do escoamento promoveria a mistura das partículas em suspensão. O modelo propiciou a obtenção de uma expressão analítica para o rendimento de coleta dos ciclones.

$$\eta = 1 - \left[\exp\left(\frac{-2\pi(D/2)v_{pw}(z+D)}{Q}\right) \right] \left[\frac{A-\Omega}{C} \right] \left[1 - \frac{z}{L} \right]^{\Omega} \quad (2.15)$$

onde:

$$\Omega \equiv \frac{1}{2} [A - 1 - C] + \frac{1}{2} [(C - A - 1)^2 + 4AC]^{1/2}$$

e

$$A \equiv \left[\frac{2\pi(D/2)v_{pw}L}{Q} \right], \quad C \equiv \left[\frac{2\pi(d_s/2)v_{pv}L}{Q} \right]$$

sendo v_{pw} a velocidade radial da partícula próxima a parede, v_{pv} a velocidade radial da partícula no vortice, Q a vazão do escoamento, L o comprimento efetivo do ciclone, definido por Alexander (1949) como: $L = 2,3d_s(D^2/ab)^{1/3}$ e z é uma coordenada na direção axial, mostrada na Figura 2 no trabalho do autor, que varia de $z = 0$, no início do duto de saída do ciclone (d_s), a $z = L$.

Boysan, Ayers e Swithenbank (1982) apresentaram um modelo matemático que fornece detalhes do escoamento do gás e do movimento das partículas em ciclones. Em vista da evidência experimental de que o escoamento perde seu caráter tridimensional a uma pequena distância da entrada tangencial e se torna praticamente axissimétrico, as derivadas em relação à direção tangencial foram negligenciadas. As condições de contorno foram citadas, mas não foram explicitadas matematicamente. Não foram consideradas as trocas de quantidade de movimento entre as fases. A modelagem do escoamento espiralado do gás foi feita por meio de um modelo algébrico de turbulência. As equações apresentadas expressam a média no tempo dos balanços de massa e de quantidade de movimento. Foram obtidas curvas de rendimento de coleta por

tamanho de partícula através de uma técnica estocástica de seguir as partículas.

Casal e Martinez-Benet (1983) desenvolveram uma expressão para o cálculo de ΔH baseada em dados experimentais publicados por outros autores. Através de análise estatística dos dados, obtiveram a expressão:

$$\Delta H = 11,3 \left(\frac{ab}{d_s^2} \right)^2 + 3,33 \quad (2.16)$$

Mothes e Loffler (1984) propuseram um modelo em muitos pontos análogo ao modelo de Dietz, partindo do mesmo balanço de forças usual – força centrífuga x força de re-arraste. Eles dividiram o ciclone em quatro regiões: de entrada, de remoção de partículas com fluxo descendente de gás; de remoção de partículas acima da saída de sólidos e de remoção de partículas com fluxo ascendente de gás e, através dos balanços de massa em cada uma das quatro regiões do ciclone, determinaram as respectivas concentrações de partículas como função da coordenada axial. A inclusão da terceira região nas equações de balanço permitiu uma avaliação da influência do re-arraste de partículas sobre o rendimento de coleta.

Ayers, Boysan, Swithebank e Ewan (1985) retomaram seu modelo de 1984 e compararam os resultados obtidos com dados experimentais. O modelo previu o campo de escoamento de gás e forneceu as tendências do rendimento de coleta por tamanho de partícula. Boysan, Swithenbank e Ayers (1986) incluíram no modelo os termos que representam as trocas de quantidade de movimento entre as fases. A interação entre partículas não foi considerada.

Testes realizados por Beeckmans e Morin (1987) mostraram que existe um valor máximo de inventário de sólidos que pode ser sustentado por um ciclone. Qualquer material alimentado acima desse máximo desce imediatamente para o coletor. A redução da perda de pressão devido à presença de sólidos no escoamento também foi observada pelos autores.

Os efeitos da concentração de sólidos e da temperatura de operação sobre o rendimento de coleta foram abordados por Patterson e Munz (1989), que observaram, ao manter temperatura e concentrações fixas, uma melhora do rendimento com o aumento da velocidade de entrada do gás.

Fixadas a velocidade e a concentração, o rendimento de coleta variou inversamente com a temperatura. O aumento da concentração de sólidos na entrada do ciclone ocasionou o aumento do rendimento de coleta e essa influência foi mais forte em altas temperaturas.

IoZIA e Leith (1989) propuseram um método semelhante ao método de Barth para o cálculo do diâmetro de corte d_{pc} , segundo o qual a partícula com este diâmetro ficaria suspensa dentro do ciclone, devido ao equilíbrio das forças de arraste e centrífuga que haveria na interseção dos vórtices ascendente e descendente do gás, onde a velocidade tangencial seria máxima, e a velocidade e a aceleração radiais seriam nulas. A diferença entre os métodos está na proposição de novas equações, empíricas, para o cálculo da altura do vórtice ascendente e da velocidade tangencial máxima do gás. Ao invés de trabalharem com razões de velocidades terminais, como Barth, eles passaram a trabalhar com a razão do diâmetro da partícula cujo rendimento de coleta se deseja determinar, pelo diâmetro de corte:

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{pc}}{d_p}\right)^\beta} \quad (2.17)$$

Em trabalho no ano seguinte determinaram experimentalmente uma equação para o cálculo de β .

Li e Wang (1989) fizeram um refinamento dos métodos de Leith e Licht (1972), e de Dietz (1981), levantando as hipóteses de que a velocidade radial das partículas sólidas seria constante, e que o perfil de concentração das partículas não coletadas dentro do ciclone fosse uniforme; introduziram também um parâmetro para levar em consideração o re-arraste das partículas coletadas no fundo do ciclone. Para esses autores, o rendimento de coleta é dado por:

$$\eta = 1 - \exp(-\lambda\theta_1) \quad (2.18)$$

onde:

$$\theta_1 = 2\pi(S + L) / a$$

$$\lambda = \frac{(1 - \alpha)Kv_{pw}}{D_r r_w^n}$$

sendo v_{pw} a velocidade radial da partícula próxima à parede, n e L , respectivamente, o expoente do vórtice e o comprimento efetivo do ciclone, dados por Alexander (1949), α o coeficiente de re-arraste das partículas e:

$$K = \frac{(\rho_p - \rho)d_p^2}{18\mu} \frac{(1-n)Q}{b(r_w^{1-n} - r_n^{1-n})}$$

onde $D_r = 0,052Ru_v\sqrt{f/8}$ é o coeficiente de difusão turbulenta de Taylor, u_v a velocidade tangencial do gás no vórtice do ciclone, f é o coeficiente de atrito, assumido igual a 0,02 e $R=(D-d_s)/2$, $r_w=D/2$ e $r_n=d_s/2$.

Büttner e Ebert (1989) estudaram dois tipos de ciclones, variando a vazão, o raio do tubo de saída e a altura do ciclone. O objetivo foi obter uma relação adequada entre esses parâmetros, por meio de análise dimensional. As partículas utilizadas foram uma mistura de glicerina e água. Ocorreu uma diminuição do diâmetro de corte com o aumento da vazão, para as várias alturas do corpo do ciclone utilizadas, e com a diminuição do diâmetro do tubo de saída. Baseados nos dados experimentais, os autores tentaram encontrar uma relação de similaridade para o rendimento de coleta por tamanho de partícula. Os rendimentos medidos foram plotados contra o número de Stokes, definido como:

$$St_{d_0} = \frac{C_c \rho_p u_0 d_p^2}{\mu d_0} \quad (2.19)$$

em que d_0 é o diâmetro da entrada do ciclone, C_c é o fator de correção de deslizamento de Cunningham, e d_p é o diâmetro médio das partículas. A curva não correlacionou adequadamente

os dados, o que se tornou possível usando $St_{d_0}^{\frac{1}{2}} Re_{d_0}^{\frac{1}{3}}$. Os autores sugeriram que o escalonamento de ciclones geometricamente semelhantes poderia ser efetuado pela utilização dessa relação de similaridade. O diâmetro do duto de saída do ciclone, d_s , também foi variado e sua influência considerada pela inclusão do fator $(d_0/d_s)^{2/3}$, ou seja, o adimensional finalmente adotado para correlação foi:

$$St_{d_0}^{\frac{1}{2}} Re_{d_0}^{\frac{1}{3}} \left(\frac{d_0}{d_s} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.20)$$

Não foram estabelecidos os limites desta relação de *scale-up*. Os testes foram realizados apenas em ciclones pequenos, para números de Reynolds relativamente baixos.

No trabalho de Zhou e Soo (1990) foram feitas medidas com LDV para validar o cálculo do escoamento do gás e da perda de pressão em um ciclone, em que a viscosidade foi admitida constante e utilizado o modelo k-ε de turbulência. O escoamento foi considerado axissimétrico, sendo desprezados o efeito das partículas sobre o escoamento do gás, o efeito da não isothermicidade e o efeito tridimensional da entrada. O modelo não abordou o movimento das partículas. Os resultados mostraram que as aproximações utilizadas na solução analítica foram válidas para delinear os principais aspectos do escoamento e os problemas do modelo k-ε quando aplicado ao movimento em vórtices.

Clift, Ghadiri e Hoffman (1991) revisaram o trabalho de Leith e Licht (1972) e propuseram uma nova equação para cálculo do rendimento de coleta por tamanho de partícula, que prescinde do expoente n , proveniente da lei de vórtices.

$$\eta = 1 - \exp \left[- \frac{\rho_p}{9\mu} \left(\frac{d_p u_o}{D/2} \right)^2 t_{res} \right] \quad (2.21)$$

em que t_{res} é o tempo de residência do gás no ciclone, dado pelo volume do ciclone dividido pela vazão do gás. Assim, $t_{res} = \frac{D\gamma}{4u_o}$ onde γ é um fator que depende apenas da geometria do ciclone e é constante para ciclones geometricamente semelhantes.

Definindo Ψ_c por:

$$\Psi_c = \frac{\rho_p d_p^2 u_o}{9\mu D}$$

obtem-se:

$$\eta = 1 - \exp[-\Psi_c \gamma] \quad (2.22)$$

Assim, o rendimento de coleta será o mesmo, em condições diferentes, se $\Psi_{c1} = \Psi_{c2}$.

Comas, Comas, Chetrit e Casal (1991) consideraram o efeito da concentração de sólidos na entrada do ciclone sobre sua perda de pressão. A expressão usada por eles para correlacionar os dados foi:

$$\Delta p = \frac{\Delta p_v}{1 + mC^n} \quad (2.23)$$

onde Δp é a perda de pressão do escoamento com partículas, Δp_v é a perda de pressão do escoamento sem partículas, $m=0,023$ e $n=0,69$ são constantes obtidas experimentalmente, e C é a concentração de sólidos na entrada do ciclone dada em g/m^3 .

Minier, Simonin e Gabillard (1991) modelaram o escoamento em ciclones para baixas concentrações de sólidos, negligenciando a interação entre partículas e mantendo a influência do gás nas mesmas, mas não a das partículas no gás, de modo que as equações do movimento para o gás se reduzem às equações clássicas de Navier-Stokes. A aceleração da gravidade foi incluída na equação do gás, o que não havia sido considerado por outros autores. Foi utilizada a hipótese de escoamento axissimétrico.

Estudos experimentais e teóricos sobre o rendimento de coleta em um ciclone foram feitos por Yoshida, Saeki, Hashimoto e Fujioka (1991). Eles concluíram que as partículas grandes são coletadas na parede superior do ciclone e as pequenas na parede cônica. As equações foram apresentadas em sua forma adimensional e nelas foram identificados os seguintes grupos adimensionais:

$$Re_D = \frac{\rho u_0 D}{\mu} \quad \text{Número de Reynolds} \quad (2.24)$$

$$St_D = \frac{C_c \rho_p u_0 d_p^2}{\mu D} \quad \text{Parâmetro de inércia das partículas} \quad (2.25)$$

$$G = \frac{C_c \rho_p g d_p^2}{\mu u_0} \quad \text{Parâmetro de assentamento gravitacional} \quad (2.26)$$

Para modelar o escoamento turbulento foi utilizado o modelo k-ε. Os rendimentos de coleta por tamanho de partículas concordaram com os cálculos numéricos quando os dados foram arranjados de acordo com o parâmetro de inércia das partículas.

Hoffmann, Arends e Sie (1991) observaram que o efeito da concentração sobre o rendimento de coleta depende da velocidade do gás na entrada do ciclone, sendo mais pronunciada para velocidades menores. O aumento da concentração ocasionou também a redução da perda de pressão.

O efeito da concentração também foi abordado por Hoffmann, van Santen, Allen e Clift (1992), com os dados experimentais correlacionados por:

$$\Delta p = \Delta p_v (1 - 1,26 C^{0,6}) \quad (2.27)$$

onde C é a concentração de sólidos na entrada do ciclone dada em kg/m³.

Scheid e Massarani (1992) testaram partículas de alumina, quartzo e carvão num ciclone de 20 cm de diâmetro de barril e obtiveram:

$$\Delta p = \Delta p_v \left(\frac{1}{1 + 0,0248 C^{0,831}} \right) \quad (2.28)$$

onde a concentração é dada em g/m³.

Ogawa e Sugiyama (1993) aplicaram leis de similaridade mecânica ao rendimento de coleta de ciclones de escoamento direto axiais, geometricamente semelhantes. Eles afirmaram que a condição necessária para a simulação do padrão de escoamento de um fluido incompressível nestes ciclones seria igualar:

$$Re_c = \frac{\pi R_0^2 u_0}{H_c \nu} \quad (2.29)$$

$$Fr = \frac{u_0^2}{g D} \quad (2.30)$$

e

$$\begin{aligned} St &= \frac{u_0 u_{pp}}{g D} \\ &= \frac{\rho_p d_p^2 u_0}{18 \mu D} \end{aligned} \quad (2.31)$$

onde H_i é o comprimento imaginário do ciclone, ν a viscosidade cinemática do fluido, g a aceleração da gravidade e u_{pp} é a velocidade terminal de uma partícula no ar em repouso. Os parâmetros foram utilizados para plotar os gráficos de rendimento de coleta pelos autores, e não foram considerados adequados para correlacionar os dados. Uma forte dependência do rendimento em relação à concentração de sólidos na entrada do ciclone foi observada.

Ontko (1996) verificou a influência da concentração de sólidos no rendimento, geralmente no sentido de aumentá-lo, e que a troca de quantidade de movimento gás-partículas não pode ser desprezada já na faixa de concentração de sólidos de 0,015 a 0,030 kg_{sólido}/kg_{ar}, na qual trabalhou. O autor aplicou o teorema dos π de Buckingham às variáveis que considerou relevantes para descrever a dependência do rendimento fracional e da perda de pressão num ciclone: $\rho, \rho_p, \mu, Q, d_p, C, D$ mais a distribuição granulométrica das partículas e uma proporção geométrica característica do ciclone, L_i , e obteve:

$$\eta = \eta \left(Re_D, C, \frac{\rho_p}{\rho}, L_i, \text{distribuição granulométrica} \right) \quad (2.32)$$

e

$$Eu = Eu \left(Re_D, C, \frac{\rho_p}{\rho}, L_i, \text{distribuição granulométrica} \right) \quad (2.33)$$

onde

$$Re_D = \frac{\rho Q}{\mu D} \quad (2.34)$$

e

$$Eu = \frac{\Delta p D^4}{\rho Q^2} \quad (2.35)$$

isto é, que o rendimento total de coleta e a queda de pressão adimensionalizada seriam basicamente funções do número de Reynolds, Re_D , e da concentração de partículas, C . Ele realizou experimentos para testar a hipótese de que o rendimento fracional de coleta seria independente das frações mássicas das partículas na região de entrada, mas não chegou a resultado conclusivo. Ontko afirmou que o número de Stokes, que aparece quando do balanço das forças atuando numa partícula isolada imersa num escoamento com $Re_p \ll 1$, não pode ser um parâmetro para o escalonamento do rendimento fracional de ciclones.

Büttner retomou em 1999 seu trabalho de 1989 afirmando a validade da correlação do rendimento fracional com o parâmetro $St^{\frac{1}{2}} Re_{d_0}^{\frac{1}{3}} \left(\frac{d_0}{d_s} \right)^{\frac{2}{3}}$, para $Re_{d_0} < 100\ 000$, também para aplicações em alta temperatura. Segundo o autor o rendimento de coleta não seria influenciado pelo diâmetro de barril do ciclone, isto é, o rendimento de coleta pode ser previsto mesmo quando não há semelhança geométrica em termos da relação D/d_0 .

2.2 Aglomeração de Partículas

Abrahamson et al. (1978) estudaram o mecanismo de coleta em ciclones e indicaram a aglomeração dos sólidos como uma etapa fundamental na coleta de partículas pequenas, menores do que $50\ \mu\text{m}$, sendo que seu efeito começaria a ser observado em concentrações acima de $0,008\ \text{kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$.

A fim de que as partículas em suspensão tenham a possibilidade de se aglomerar, têm que haver contacto entre si, o que ocorreria, nas condições usuais de operação industrial dos ciclones, devido ao movimento randômico induzido pela turbulência do escoamento. Em baixas concentrações, menores do que $8 \cdot 10^{-4}\ \text{kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$, as colisões seriam esparsas até que as partículas tenham se concentrado pela ação centrífuga junto à parede. Em contraste, para concentrações elevadas na entrada do ciclone, a aglomeração irá ocorrer em todo volume do ciclone, embora a

maior formação de aglomerados continue ocorrendo junto à parede.

As forças que agem para manter a integridade do aglomerado, isto é, que mantêm unidas as partículas, podem ser:

- Forças de van der Waals,
- Forças Eletrostáticas e
- Forças Capilares.

Estas últimas dependem do teor de umidade e não são significativas no presente trabalho.

Os autores fizeram estimativas da ordem de grandeza dessas forças e das forças de arraste exercidas pelo gás, e descobriram que as forças de aglomeração podem dominar as forças de desintegração dos aglomerados, dando a estes uma duração significativa.

Eles consideram que as aglomerações poderiam ocorrer não só no ciclone propriamente dito, mas durante o trajeto da suspensão através do duto de alimentação, ou mesmo no silo de coleta de sólidos. Eles propõem que as condições do escoamento a montante do ciclone sejam escolhidas cuidadosamente para que a aglomeração seja promovida – por meio de turbulência, umidade – antes que os particulados entrem no ciclone, e que a destruição desses aglomerados seja evitada, através de cuidados como o de evitar irregularidades nas superfícies do ciclone, regiões de altas velocidades do gás e, portanto, de alto cisalhamento, descolamento da camada limite, geometrias inadequadas para a entrada do ciclone.

A força de van der Waals resulta da interação entre os momentos de dipolo de átomos e moléculas (Schubert, 1981; Seville, 2000). Alguma confusão costuma surgir entre as expressões da força de van der Waals entre moléculas e entre partículas macroscópicas. No caso de partículas macroscópicas, o cálculo da força de van der Waals é possível para alguns modelos idealizados: esfera/sólido semi-infinito, esfera/esfera e sólido semi-infinito/sólido semi-infinito.

Hamaker (1937) derivou uma expressão para o cálculo da força de atração entre duas partículas esféricas iguais em função do raio R e da distância a que as separa:

$$F_{vw} = \frac{AR}{12a^2} \quad (2.36)$$

onde A é a constante de Hamaker, que é função do material. Para dois sólidos semi-infinitos distanciados de a , a força por unidade de área valeria:

$$F_{\text{área}vw} = \frac{A}{6\pi a^3} \quad (2.37)$$

e, entre uma esfera e um corpo semi-infinito distanciados de a :

$$F_{vw} = \frac{AR}{6a^2} \quad (2.38)$$

Para a maioria dos sólidos $A \cong 10^{-19}$ J. Visser (1989) traz valores de A para a combinação de vários materiais no vácuo.

Em realidade os sistemas reais diferem bastante dessas idealizações. A aspereza da superfície das partículas limita a aproximação das mesmas, aumentando o distanciamento efetivo entre elas e reduzindo a força de atração de van der Waals praticamente a zero para uma aspereza de 1 μm , por exemplo. Por outro lado, quando a geometria das partículas favorece o contacto ou há deformação plástica das partículas na região de encontro, as forças de atração podem dominar a força da gravidade. Visser (1989) menciona que as forças de atração são mais significantes para partículas porosas e para partículas com superfícies planas extensas, como no caso de cristais.

Rietema et al.(1993) desenvolveram uma expressão para a força de van der Waals entre duas partículas em um leito fluidizado, levando em consideração o efeito da deformação das partículas e de sua rugosidade. Não se conhece trabalho semelhante para ciclones.

Partículas com cargas elétricas diferentes tendem a se atrair, propiciando, assim, a formação de aglomerados. Estudos sobre a atuação de forças eletrostáticas em sistemas gás-sólido foram realizados por Montgomery, em 1959, segundo quem a geração de cargas elétricas de sinais opostos nas partículas sólidas ocorreria:

- Como resultado do contacto e separação entre as partículas, com transferência de elétrons, e
- Por carregamento triboelétrico, através do atrito de partículas entre si e do atrito de partículas com as superfícies do sistema.

De acordo com Schubert (1981), os elétrons migram das partículas com menor valor da função de trabalho (*electron work function*) para as partículas com maior valor, até atingir equilíbrio. As partículas que recebem os elétrons ficam carregadas negativamente. A diferença de potencial do contacto depende da combinação dos materiais e das condições da superfície das partículas.

A força de atração eletrostática correspondente é maior em materiais condutores, pois as cargas ficam concentradas na zona de contacto. Quando as partículas se separam há um retorno das cargas, o que acarreta uma redução da carga das partículas. Caso não haja uma rápida separação das partículas, elas podem se descarregar totalmente.

Os materiais isolantes geralmente conservam a carga desenvolvida no contacto, que, em geral, é igualmente distribuída ao longo de sua superfície. Neste caso a força de atração é calculável pela lei de Coulomb. A Tabela 2.1 traz as expressões para as forças de adesão para os sistemas sólido semi-infinito/sólido semi-infinito, sólido semi-infinito/esfera e esfera/esfera, conforme Schubert (1981).

Tabela 2.1 – Forças de Adesão Eletrostáticas

Geometria	Condutor Elétrico	Isolante Elétrico
Sólido Semi-infinito/Sólido Semi-Infinito*	$\frac{k \epsilon_0 U^2}{2 a^2}$	$\frac{q_1 q_2}{2k \epsilon_0}$
Esfera/Sólido Semi-Infinito	$\frac{k \epsilon_0 \pi R U^2}{a}$	$\frac{2 q_1 q_2 \pi R^2}{k \epsilon_0}$
Esfera/Esfera	$\frac{k \epsilon_0 \pi R_1 R_2 U^2}{(R_1 + R_2) a}$	$\frac{4 q_1 q_2 \pi (R_1 R_2)^2}{k \epsilon_0 (R_1 + R_2 + a)^2}$

* No caso de Sólido Semi-infinito/Sólido Semi-infinito, é apresentado na tabela 2.1, as forças por unidade de área.

onde:

k = Constante dielétrica relativa do meio entre as superfícies ($k= 1$ para o vácuo)

ϵ_0 = Permissividade do vácuo = $8,855 \times 10^{-12}$ As/Vm

a = Distância entre os corpos, (mm)

q_1, q_2 = Cargas nas superfícies 1 e 2, (As/ μm^2).

U = Diferença de potencial do contacto, (V)

Para o caso do movimento de partículas carregadas num campo eletrostático, Soo (1964) estudou o movimento radial de uma partícula numa nuvem esféricamente simétrica de partículas igualmente carregadas, não levando em conta qualquer interação fluidodinâmica entre as partículas e o gás. Ele obteve um parâmetro adimensional para existência de semelhança nesta situação específica:

$$N = \frac{d_p^2}{u_0^2} \left(\frac{q}{m_p} \right) \frac{\rho_p}{\epsilon_0} \quad (2.39)$$

O efeito do carregamento eletrostático pode ser relevante no caso de escalonamento, conforme discutido por Hyre (1997). Para evitá-lo, pode haver necessidade de tratamento específico das partículas ou do equipamento, como a adição de aditivos, o uso de revestimentos, a umidificação do ar, o aterramento do leito e a ionização do ar.

Não há na literatura trabalhos que tratem do escalonamento de ciclones levando em consideração a aglomeração das partículas menores devido à ação das forças interparticulares, um fenômeno que altera a distribuição granulométrica efetiva das partículas, e resulta no aumento do rendimento de coleta de um ciclone.

Capítulo 3

Obtenção das Relações de Escala

Nesta seção são propostos grupos adimensionais aplicáveis ao estudo da semelhança entre ciclones, e feitas considerações sobre sua utilização, tendo em vista o desenvolvimento de protótipos através de testes com o modelo correspondente.

A elaboração de modelos para representar sistemas de porte industrial deve seguir leis de escala que proporcionem a obtenção de comportamento dinâmico semelhante dos dois sistemas. A semelhança geométrica é pré-requisito para a existência de semelhança dinâmica. Existe semelhança geométrica quando todas as dimensões lineares do modelo são relacionadas às do protótipo através de um fator de escala constante, r , e os ângulos são mantidos. Como já foi mencionado anteriormente, modelo e protótipo apresentarão comportamento fluido-dinâmico semelhante se possuírem semelhança geométrica e se os parâmetros adimensionais, que constituem as relações de escala para o problema, forem iguais quando calculados para o modelo e para o protótipo, respectivamente, ou, alternativamente, se as equações governantes e as condições de contorno adimensionais forem as mesmas para os dois sistemas, já que as soluções adimensionais das equações serão idênticas.

A homogeneidade dimensional dos termos das equações que representam os fenômenos físicos é básica na elaboração dos métodos de análise dimensional, ou seja, os termos aditivos de uma equação devem possuir as mesmas unidades. A análise dimensional possibilita a obtenção

do grupo de parâmetros adimensionais que governam as variáveis envolvidas no problema, e constituem as relações de escala.

Inicialmente os adimensionais serão determinados pela aplicação do teorema dos Pi de Buckingham. Em seguida serão determinados pela adimensionalização das equações fundamentais do escoamento gás-sólidos no ciclone e, finalmente, pela relação entre as forças que participam do processo.

As forças usuais consideradas como atuantes no escoamento gás-sólido no interior dos ciclones são as forças da gravidade, viscosas e de empuxo, não se levando em conta as forças eletrostáticas e de van der Waals, que são forças de atração interparticulares que adquirem importância à medida que aumenta a concentração de sólidos na entrada do ciclone.

3.1 Teorema dos Pi de Buckingham

As grandezas dependentes de interesse são o rendimento de coleta e a perda de pressão no ciclone, variáveis consideradas independentes entre si. O estudo será feito para a perda de pressão e estendido para o rendimento de coleta.

- Listagem das grandezas envolvidas:

As grandezas que foram consideradas como influenciando o rendimento de coleta η e a perda de pressão Δp entre a entrada e a saída do ciclone são a densidade e viscosidade do fluido, ρ e μ , a densidade e o diâmetro médio das partículas, ρ_p e d_p , uma velocidade característica do escoamento, V , a aceleração da gravidade, g , a concentração de sólidos na entrada do ciclone, C , a esfericidade das partículas, ϕ , e sua distribuição granulométrica, DTP . Apenas uma dimensão do ciclone é necessária, pois as demais deverão estar em escala devido ao pré-requisito de semelhança geométrica. A dimensão característica do ciclone é o diâmetro de barril D . Desta forma, as grandezas envolvidas na determinação de Δp são:

$$\Delta p, \rho, \mu, \rho_p, d_p, V, g, D, C, \phi, DTP$$

n = 11 grandezas

- Escolha das grandezas fundamentais:

Para expressar as dimensões de todas as grandezas listadas acima são necessárias três grandezas básicas: massa M, comprimento L e tempo t. Assim, $r = 3$ grandezas básicas.

- Expressão das grandezas envolvidas em termos das r grandezas básicas:

Grandezas	Unidades
Δp	M/Lt ²
ρ, ρ_p	M/L ³
μ	M/Lt
d_p, D	L
V	L/t
g	L/t ²
ϕ, C, DTP	adimensionais

- Seleção das r grandezas repetitivas:

$$\rho, D, V \quad m = r = 3 \text{ grandezas repetitivas}$$

- Estabelecimento e resolução das equações dimensionais:

Como $n - m = 11 - 3 = 8$, resultarão 8 grupos adimensionais, π . Estabelecendo as equações dimensionais tem-se:

$$\pi_1 = \rho^a V^b D^c \Delta p = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{M}{Lt^2}\right) = M^0 L^0 t^0$$

Equacionando os expoentes de M, L e t, obtém-se:

$$M: a + 1 = 0$$

$$L: -3a + b + c - 1 = 0 \quad \Rightarrow a = -1; b = -2; c = 0$$

$$t: -b - 2 = 0$$

Assim,

$$\pi_1 = \frac{\Delta p}{\rho V^2}$$

$$\pi_2 = \rho^a V^b D^c \phi = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \cdot 1 = M^0 L^0 t^0$$

Equacionando os expoentes de M, L e t, obtém-se:

$$M: a = 0$$

$$L: -3a + b + c = 0 \quad \Rightarrow a = b = c = 0$$

$$t: -b = 0$$

Assim

$$\pi_2 = \phi.$$

Como C é adimensional, da mesma forma que ϕ , a resolução de sua equação dimensional resultará no grupo:

$$\pi_3 = C$$

O grupo adimensional envolvendo μ é obtido de:

$$\pi_4 = \rho^d V^e D^f \mu = \left(\frac{M}{L^3}\right)^d \left(\frac{L}{t}\right)^e (L)^f \left(\frac{M}{Lt}\right) = M^0 L^0 t^0$$

Equacionando os expoentes de M, L e t, obtém-se:

$$M: d + 1 = 0$$

$$L: -3d + e + f - 1 = 0 \quad \Rightarrow a = b = c = -1$$

$$t: -b - 1 = 0$$

Assim,

$$\pi_4 = \frac{\mu}{\rho V D} = \frac{1}{Re_D}$$

Analogamente:

$$\pi_5 = \rho^g V^h D^i \rho_p = \left(\frac{M}{L^3}\right)^g \left(\frac{L}{t}\right)^h (L)^i \left(\frac{M}{L^3}\right) = M^0 L^0 t^0$$

$$\text{M: } g + 1 = 0$$

$$\text{L: } -3g + h + i - 3 = 0 \quad \Rightarrow g = -1; h = i = 0$$

$$\text{t: } -h = 0$$

Assim,

$$\pi_5 = \frac{\rho}{\rho_p}$$

Agora,

$$\pi_6 = \rho^j V^k D^l d_p = \left(\frac{M}{L^3}\right)^j \left(\frac{L}{t}\right)^k (L)^l L = M^0 L^0 t^0$$

$$\text{M: } j = 0$$

$$\text{L: } -3j + k + L + 1 = 0 \quad \Rightarrow j = k = 0; l = -1$$

$$\text{t: } -k = 0$$

Desta forma,

$$\pi_6 = \frac{d_p}{D}$$

O grupo envolvendo g é obtido de:

$$\pi_7 = \rho^m V^n D^o g = \left(\frac{M}{L^3}\right)^m \left(\frac{L}{t}\right)^n (L)^o \left(\frac{L}{t^2}\right) = M^0 L^0 t^0$$

$$\text{M: } m = 0$$

$$\text{L: } -3m + n + o + 1 = 0 \quad \Rightarrow m = 0; n = -2; o = 1$$

$$\text{t: } -n - 2 = 0$$

Assim,

$$\pi_7 = \frac{gD}{V^2} = \frac{1}{Fr}$$

A última relação de escala π_8 corresponde à distribuição do tamanho das partículas DTP , que é definida de maneira adimensional, pela relação do diâmetro de cada faixa granulométrica pelo diâmetro médio das partículas.

O conjunto de adimensionais que trata do fenômeno fica, portanto, dado por:

$$\frac{\rho V D}{\mu} ; \frac{g D}{V^2} ; \frac{\rho}{\rho_p} ; \frac{d_p}{D} ; \frac{\Delta p}{\rho V^2} ; \phi ; C \text{ e } DTP \quad (3.1)$$

em que é conveniente adotar $V = u_0$.

Analogamente, admite-se que terão o mesmo rendimento de coleta ciclones com semelhanças geométrica e dinâmica, para a qual se exige a igualdade de π_2 a π_8 .

3.2 Adimensionalização das Equações Fundamentais do escoamento em Ciclones

As equações governantes dos modelos do escoamento em ciclones e suas condições de contorno precisam ser estabelecidas inicialmente para que a partir de sua adimensionalização se possa identificar os grupos adimensionais envolvidos no fenômeno.

Há, basicamente duas abordagens que foram utilizadas na modelagem matemática de ciclones:

- O padrão de escoamento do gás foi admitido como não influenciado pela presença de partículas sólidas;
- As interações entre as fases sólida e gasosa e suas trocas de quantidade de movimento são levadas em conta.

Exemplo da primeira abordagem é a modelagem realizada por Minier, Simonin e Gabillard (1991), que admitiram concentrações pequenas de sólidos, tal que, segundo os autores, os termos da interação entre os sólidos e o gás poderiam ser descartados das equações de movimento, bem como os das interações das partículas entre si. Apenas a influência do gás na proximidade das partículas foi mantida. As equações do gás foram obtidas das equações de Navier-Stokes. Devido à natureza turbulenta do escoamento, cada variável foi dividida em uma

parte média e outra flutuante. As equações foram escritas usando notação indicial: as barras representam a variável média e o sobrescrito ' representa a parte flutuante.

- Equação da continuidade:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{fase gasosa}) \quad (3.2)$$

- Equação da quantidade de movimento para o gás:

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t_i} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} - \rho \frac{\partial (\bar{u}_i' \bar{u}_j')}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (\text{fase gasosa}) \quad (3.3)$$

- Equação da quantidade de movimento para uma partícula:

$$\frac{d\bar{u}_p}{dt} = \bar{g} + \frac{\bar{u} - \bar{u}_p}{\tau_p} \quad (3.4)$$

Nesta equação foi considerado que $\rho \ll \rho_p$, sendo assim desprezada a força de empuxo sobre as partículas. As forças de arraste e da gravidade foram consideradas as dominantes do fenômeno. τ_p é o “tempo de relaxação da partícula”, dado por:

$$\tau_p = \frac{\rho_p}{\rho} \frac{4d_p}{3C_A |u - u_p|}$$

onde

$$C_A = \frac{24}{Re_p} (1 + 0,15 Re_p^{0,687}) \quad \text{para } Re_p < 1000,$$

e

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u - u_p|}{\mu},$$

i e j , são índices de notação tensorial

Assim, a Eq. (3.4) fica:

$$\rho_p \frac{d\bar{u}_p}{dt} = \rho_p \bar{g} + \frac{3C_A \rho |\bar{u} - \bar{u}_p| (\bar{u} - \bar{u}_p)}{4d_p} \quad (3.5)$$

Os autores não apresentaram as condições de contorno adotadas. As velocidades foram adimensionalizadas pela velocidade de entrada do gás no ciclone, u_0 , os comprimentos pelo diâmetro do barril do ciclone D , e o tempo e a pressão por D/u_0 e $\rho_0 u_0^2$, assim $u^* = u/u_0$, $u_p^* = u_p/u_0$, $t^* = t.u_0/D$, $P^* = P/\rho_0 u_0^2$.

A equação da continuidade adimensionalizada se torna:

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} = 0 \quad (3.6)$$

a da quantidade de movimento para o gás fica:

$$\frac{\partial \bar{u}_i^*}{\partial t^*} + \bar{u}_j^* \frac{\partial \bar{u}_i^*}{\partial \bar{x}_j^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial \bar{x}_i^*} + \frac{\partial \bar{u}_i^* \bar{u}_j^*}{\partial \bar{x}_i^*} + \frac{\mu}{\rho u_0 D} \frac{\partial^2 \bar{u}_i^*}{\partial \bar{x}_i^* \partial \bar{x}_j^*} + \frac{g_i D}{u_0^2} \quad (3.7)$$

e a da quantidade de movimento para as partículas:

$$\frac{du_p^*}{dt^*} = \frac{D}{u_0^2} \bar{g} + \frac{\rho}{\rho_p} \frac{3C_A |\bar{u}^* - \bar{u}_p^*| (\bar{u}^* - \bar{u}_p^*)}{4d_p^*} \quad (3.8)$$

onde C_A é função do número de Reynolds.

Os parâmetros adimensionais identificados nestas equações são:

$$Re_D = \frac{\rho u_0 D}{\mu}; \quad Fr = \frac{u_0^2}{gD} \quad e \quad \frac{\rho}{\rho_p} \quad (3.9)$$

A modelagem conduzida por Boysan, Swithenbank e Ayers (1986) é um exemplo da segunda abordagem. Ela apresenta as equações em um sistema de coordenadas cilíndricas polares. Foi argumentado que os efeitos tridimensionais estão confinados à vizinhança da entrada tangencial e que o escoamento é praticamente axi-simétrico na região principal do ciclone. Desta forma, as derivadas em relação à direção tangencial foram desprezadas. As equações utilizadas foram obtidas das equações de Navier-Stokes pela decomposição da velocidade instantânea em suas componentes média e flutuante e tirando a média no tempo. Foram consideradas as interações de quantidade de movimento entre gás e partículas. Para efeito de adimensionalização será considerada apenas a equação na direção axial, pois os mesmos grupos são obtidos na direção radial.

- Equação da continuidade para o gás:

$$\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} = 0 \quad (3.10)$$

- Equação da quantidade de movimento para o gás na direção axial:

$$\rho w \frac{\partial w}{\partial z} + \rho v \frac{\partial w}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho \frac{\partial \bar{w}'^2}{\partial z} - \frac{\rho}{r} \frac{\partial(r\bar{w}'v')}{\partial r} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + F_z \quad (3.11)$$

onde w, v e w', v' são as partes média e flutuante das componentes da velocidade nas direções z e r , respectivamente, e as interações de quantidade de movimento entre gás e partículas estão contidas no termo F_z .

Para obter a equação de movimento das partículas, não foi considerada a interação entre as mesmas, e foram desprezadas as forças da gravidade e empuxo, mantida apenas a força de arraste. As equações foram escritas para cada tamanho i de partícula. Assim, na direção axial:

$$\rho_p \frac{dw_{pi}}{dt} = - \left(\frac{3\mu}{d_{pi}^2} \right) \left(\frac{C_A Re_D}{4} \right)_i (w_{pi} - w - w') \quad (3.12)$$

As condições de contorno adotadas foram: velocidade e pressão conhecidas na entrada do ciclone, p_0 e u_0 , e gradiente nulo no eixo de simetria do ciclone para a velocidade axial w . As demais velocidades seriam nulas no eixo por virtude de simetria. No plano de saída do tubo de saída dos gases as condições não são conhecidas a priori, tendo sido admitido que os gradientes axiais de todas as variáveis se anulariam neste plano. A condição de não deslizamento prevaleceria nas paredes do ciclone.

F_z seria dada por:

$$F_z = \frac{1}{\Delta V} \sum_j \sum_i \left(\frac{18\mu}{\rho_p d_{pi}^2} \right) \left(\frac{C_A Re_D}{24} \right)_i (w_{pi} - w) \Delta n_i \Delta t \frac{\pi}{6} d_{pi}^3 \rho_p$$

em que j é o número de intervalos de tempo necessários para as partículas passarem pelo volume ΔV e i a faixa granulométrica.

Procedendo a adimensionalização das equações como no modelo anterior, obteve-se:

. Equação adimensionalizada da continuidade para o gás:

$$\frac{\partial w^*}{\partial z^*} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial(r^* v^*)}{\partial r^*} = 0 \quad (3.13)$$

. Equação adimensionalizada da quantidade de movimento da fase gasosa na direção axial:

$$\begin{aligned}
w^* \frac{\partial w^*}{\partial z^*} + v^* \frac{\partial w^*}{\partial r^*} = & -\frac{\partial P}{\partial z^*} - \frac{\partial \bar{w}^{*2}}{\partial z^*} \\
& - \frac{1}{r^*} \frac{\partial(r^* w^* v^*)}{\partial r^*} + \frac{\mu}{\rho u_o D} \frac{\partial^2 w^*}{\partial z^{*2}} + \frac{\mu}{\rho u_o d_p} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* \frac{\partial w^*}{\partial r^*} \right) \\
& + \frac{\mu}{\rho u_o D} \sum_j \sum_i \frac{\pi}{8} C_A Re_D \Delta n_i \Delta t (w_{pi}^* - w^*) \frac{d_{pi}^*}{\Delta V^*}
\end{aligned} \tag{3.14}$$

e para as partículas de diâmetro d_{pi} :

$$\frac{dw_{pi}^*}{dt^*} = -\frac{\mu}{\rho_p u_o D} \frac{3C_A Re_D}{4d_{pi}^{*2}} (w_{pi}^* - w^* - w'^*) \tag{3.15}$$

- Condições de contorno:

Na entrada do ciclone: $u_o^* = \frac{u_o}{u_o} = 1; \quad p_o^* = \frac{p_o}{\rho_o u_o^2}$

Em $r^* = 0$: $\frac{\partial w^*}{\partial z^*} = 0; \quad v^* = 0; \quad v'^* = 0$

Nas paredes: $u^* = u'^* = v^* = v'^* = u_{pi}^* = 0$

Destas equações podem ser identificados os seguintes grupos adimensionais:

$$Re = \frac{\rho_p u_o D}{\mu}; \quad Re_D = \frac{\rho u_o D}{\mu}; \quad Re_p = \frac{\rho u_o d_p}{\mu}; \quad \frac{p_o}{\rho_o u_o^2} \tag{3.16}$$

onde se observa que a não inclusão da força da gravidade nas equações do modelo acarretou o não surgimento do número de Froude. Dividindo-se Re_D por Re obtém-se a relação ρ/ρ_p ,

que pode substituir o primeiro grupo adimensional. Da mesma forma, dividindo-se Re_D por Re_p obtém-se a relação D/d_p que pode substituir.

3.3 Relação Entre as Forças Participantes

Uma terceira maneira de obter os adimensionais é a partir da expressão das forças que participam do fenômeno.

Dimensionalmente, as forças podem ser expressas por:

$$\text{Forças de inércia: } F_I \propto \rho_p V^2 d_p^2$$

$$\text{Força da gravidade: } F_G \propto \rho_p d_p^3 g$$

$$\text{Forças viscosas: } F_V \propto \mu V d_p$$

$$\text{Forças de pressão: } F_p \propto \Delta p d_p^2$$

$$\text{Força de Empuxo: } F_E \propto \rho d_p^3 g$$

Os grupos adimensionais podem ser obtidos das relações entre essas forças:

$$Re_{\rho p} = \frac{F_I}{F_V} = \frac{\rho_p V^2 d_p^2}{\mu V d_p} = \frac{\rho_p V d_p}{\mu}$$

$$\pi_5 = \frac{F_E}{F_G} = \frac{\rho d_p^3 g}{\rho_p d_p^3 g} = \frac{\rho}{\rho_p}$$

$$Fr_p = \frac{F_I}{F_G} = \frac{\rho_p V^2 d_p^2}{\rho_p d_p^3 g} = \frac{V^2}{g d_p} \quad \text{Número de Froude;}$$

$$\pi_1 = \frac{F_p}{F_I} = \frac{\Delta p d_p^2}{\rho_p V^2 d_p^2} = \frac{\Delta p}{\rho_p V^2}$$

Outros grupos que podem ser obtidos da divisão entre as forças acima não são independentes. Para garantir a semelhança, a esfericidade e distribuição granulométrica adimensional das partículas, concentração de sólidos na entrada do ciclone e a razão entre o diâmetro do ciclone e o diâmetro médio das partículas também teriam de ser considerados. A característica deste procedimento é que os adimensionais obtidos provêm das razões entre as forças, o que facilita sua interpretação física.

As forças interparticulares dependem das características de cada uma das partículas que estão interagindo. Há pouca informação disponível sobre o tema em geral, e em particular para o caso de ciclones.

Como foi visto no Cap. 2, Hamaker (1937) derivou uma expressão para o cálculo da força de atração de Van der Waals entre duas partículas esféricas iguais em função do raio R e da distância a que as separa:

$$F_{vw} = \frac{AR}{12a^2} \quad (3.17)$$

onde A é a constante de Hamaker, que é função do material, e as partículas são supostas rígidas e perfeitamente lisas. Em realidade as partículas têm asperezas, sendo que as protuberâncias acabam definindo a área de contacto, o que reduz drasticamente o valor da força. A razão entre a força de Van der Waals, conforme (3.17), e a força gravitacional daria:

$$\pi_9 = \frac{A}{4a^2 \rho_p g d_p^2} \quad (3.18)$$

A força de atração eletrostática entre duas partículas esféricas iguais, de material isolante, pode ser estimada, de acordo com Schubert (1981), por:

$$F_{el} = \frac{\pi q^2 d_p^4}{4k \varepsilon_0 (d_p + a)^2} \quad (3.19)$$

onde:

k = Constante dielétrica relativa do meio entre as superfícies ($k= 1$ para o vácuo)

ε_0 = Permissividade do vácuo;

a = Distância entre os corpos,

q = Carga na superfície.

A razão da força de atração eletrostática com a força da gravidade daria:

$$\pi_{10} = \frac{3q^2 d_p}{2k \varepsilon_0 \rho_p g (d_p + a)^2} \quad (3.20)$$

O conjunto dos adimensionais que constituem as relações de escala deveriam incluir relações como π_9 e π_{10} . O escalonamento usual de ciclones não inclui a ação das forças interparticulares, devido ao conhecimento insatisfatório do assunto. Sabe-se, no entanto, que elas passam a exercer maior influência à medida que cresce a concentração de sólidos na entrada do ciclone. Neste estudo o escalonamento de ciclones será feito da maneira usual, sem incluir as forças interparticulares, e se irá verificar o efeito da concentração na determinação da faixa de validade de aplicação do escalonamento convencional.

Assim, do exame dos adimensionais em (3.1), (3.9) e (3.16) pode-se identificar os parâmetros que devem ser considerados para que haja semelhança dinâmica entre os escoamentos:

$$Re_D = \frac{\rho u_0 D}{\mu}; \quad Fr = \frac{u_0^2}{gD}; \quad \frac{\rho}{\rho_p}; \quad \frac{D}{d_p}; \quad \phi; \quad C \text{ e } DTP \quad (3.21)$$

onde deve-se requerer, ainda, a mesma aspereza da superfície interna dos ciclones modelo e protótipo e que os ciclones sejam fabricados com o mesmo material.

O adimensional $\frac{P_0}{\rho u_0^2}$, P_0 é usualmente considerada a pressão manométrica na entrada do ciclone, pode ser desprezado quando a velocidade do fluido é pequena comparada à velocidade do som - escoamento incompressível -, como ocorre normalmente em ciclones.

Assim, o rendimento de coleta por tamanho de partículas e a perda de pressão adimensional são dados em função dos parâmetros:

$$\eta = f\left(Re_D; Fr; \frac{\rho}{\rho_p}; \frac{D}{d_p}; \phi; C e DTP\right) \quad (3.22)$$

e

$$\frac{\Delta p}{\rho u_0^2} = g\left(Re_D; Fr; \frac{\rho}{\rho_p}; \frac{D}{d_p}; \phi; C e DTP\right) \quad (3.23)$$

havendo semelhança geométrica.

Se a curva de rendimento de coleta por tamanho de partícula for determinada para um modelo em escala espera-se que seja igual ao rendimento de coleta do protótipo para a partícula em escala correspondente, o mesmo valendo para a perda de pressão adimensional.

As propostas de *scale-up* apresentadas pelos autores citados no estado-da-arte podem agora ser discutidas em face do grupo de adimensionais determinado neste trabalho.

Stairmand (1951) sugeriu que para ajustar a curva de rendimento de coleta por tamanho de partículas para mudanças na densidade das mesmas, mantendo as demais condições inalteradas, deveria ser preparada uma nova curva. A partir de considerações da lei de Stokes, não explicitadas pelo autor, partículas coletadas com igual rendimento terão os diâmetros relacionados pela raiz quadrada da razão entre a densidade das partículas do teste e a densidade das novas partículas:

$$d_{p2} = d_{p1} \sqrt{\frac{\rho_{p1}}{\rho_{p2}}}$$

como foi visto no Capítulo 2. A partir dos adimensionais obtidos neste trabalho, esta relação pode ser obtida de:

$$\frac{\rho_p}{\rho} \frac{\rho u_o d_p}{\mu} \frac{d_p}{D} = \frac{\rho_p u_o d_p^2}{\mu D} \rightarrow \frac{\rho_{p1} u_{o1} d_{p1}^2}{\mu_1 D_1} = \frac{\rho_{p2} u_{o2} d_{p2}^2}{\mu_2 D_2} \rightarrow d_{p2} = d_{p1} \sqrt{\frac{\rho_{p1}}{\rho_{p2}}}$$

pois $u_{o1} = u_{o2}$, $\mu_1 = \mu_2$ e $D_1 = D_2$. Entretanto, para que o rendimento seja o mesmo, os demais adimensionais das Equações 3.22 e 3.23 também deveriam ser igualados, o que não foi requerido por Stairmand.

O ajuste proposto para mudança de vazão foi à multiplicação do tamanho da partícula pela raiz quadrada da razão entre a vazão do teste de referência pela nova vazão:

$$d_{p2} = d_{p1} \sqrt{\frac{Q_{o1}}{Q_{o2}}}$$

Pelos adimensionais obtidos neste trabalho:

$$\frac{\rho_{p1} u_{o1} d_{p1}^2}{\mu_1 D_1} = \frac{\rho_{p2} u_{o2} d_{p2}^2}{\mu_2 D_2} \rightarrow d_{p2} = d_{p1} \sqrt{\frac{u_{o1}}{u_{o2}}}$$

como se observa, novamente, apenas a igualdade de um dos grupos adimensionais propostos foi satisfeita. Os demais adimensionais também deveriam ser igualados, o que não foi levado em consideração por Stairmand.

Segundo Stairmand, para mudança de viscosidade do gás, o diâmetro das partículas seria relacionado por:

$$d_{p2} = d_{p1} \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1}}$$

A partir dos adimensionais obtidos neste trabalho:

$$\frac{\rho_{p1} u_{o1} d_{p1}^2}{\mu_1} = \frac{\rho_{p2} u_{o2} d_{p2}^2}{\mu_2} \rightarrow d_{p2} = d_{p1} \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1}}$$

A igualdade dos demais adimensionais não foi requerida por Stairmand.

A última correção sugerida por Stairmand foi para mudança do tamanho do ciclone. Para ciclones geometricamente semelhantes, partículas coletadas com o mesmo rendimento seriam relacionadas por:

$$d_{p2} = d_{p1} \sqrt{\frac{D_2}{D_1}}$$

Essa relação também pode ser obtida pela multiplicação entre adimensionais propostos neste trabalho, sem a exigência da igualdade de todo o grupo de parâmetros adimensionais (3.22).

Havendo variação em todos os parâmetros simultaneamente, Stairmand propõe que a correção envolverá todas as relações sugeridas, aplicadas uma após a outra, e partículas coletadas com igual rendimento no modelo e no protótipo, seriam relacionadas por:

$$d_{p2} = \sqrt{\frac{D_2 u_{o1} \rho_{p1} \mu_2}{D_1 u_{o2} \rho_{p2} \mu_1}} d_{p1} \quad (3.24)$$

A expressão acima pode ser obtida do produto dos adimensionais $Re_p \cdot \frac{d_p}{D}$ e $\frac{\rho_p}{\rho}$. Observe-se que o produto de adimensionais é também um adimensional, e pode substituir qualquer um

dos parâmetros adimensionais que o originou. Isso significa que (3.24) requereu apenas a igualdade de um dos adimensionais do grupo (3.22).

Stairmand recomendou que ao se realizar os ajustes acima referidos, outros parâmetros, como a forma das partículas, por exemplo, devem permanecer inalteradas. Pode-se admitir daí que ϕ , C e DTP devem ser iguais para que as proposições de Stairmand possam ser empregadas.

Lapple (1951) e Tawari e Zenz (1984) apresentaram gráficos de rendimento de coleta em função da razão entre o diâmetro das partículas e o diâmetro de corte, dado, segundo Lapple por:

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu b}{2\pi N_e u_o (\rho_p - \rho)}} \quad (2.10)$$

Para ciclones geometricamente similares, Lapple sugeriu que essa curva de rendimento de coleta, normalizada pelo diâmetro de corte, poderia ser utilizada para estimar o rendimento de coleta em condições diferentes das estudadas experimentalmente, utilizando-se na abscissa do gráfico a razão entre o diâmetro de cada partícula e o diâmetro de corte, calculado para as novas condições experimentais. Assim, partículas coletadas com mesmo rendimento obedeceriam à relação:

$$\frac{d_{p1}}{d_{pc1}} = \frac{d_{p2}}{d_{pc2}} \rightarrow d_{p1} = \frac{d_{pc2}}{d_{pc1}} d_{p2}$$

Assim, substituindo a expressão para d_{pc} :

$$d_{p2} = \sqrt{\frac{D_2 u_{o1} (\rho_{p1} - \rho_1) \mu_2}{D_1 u_{o2} (\rho_{p2} - \rho_2) \mu_1}} d_{p1}$$

Como a densidade das partículas usualmente é muito maior que a densidade dos gases,

$$\frac{(\rho_{p1} - \rho_1)}{(\rho_{p2} - \rho_2)} \approx \frac{\rho_{p1}}{\rho_{p2}}$$

Substituindo na expressão para d_{p2} resulta:

$$d_{p2} = \sqrt{\frac{D_2 u_{o1} \rho_{p1} \mu_2}{D_1 u_{o2} \rho_{p2} \mu_1}} d_{p1}$$

que é análoga a (3.24). As mesmas considerações feitas sobre o trabalho de Stairmand são aplicáveis a esse caso.

Nos trabalhos de Leith e Licht (1972) e de Koch e Licht (1977), o rendimento de coleta por tamanho de partícula foi expresso por:

$$\eta = 1 - \exp\{-2[C\Psi]\}^{1/(2n+2)} \quad (2.13)$$

onde

$$\Psi = \frac{\rho_p d_p^2 u_o}{18\mu D} (n+1) \quad (2.14)$$

em que n é o expoente da velocidade na lei dos vórtices.

Ψ pode ser obtido da multiplicação dos mesmos adimensionais propostos acima, a menos do fator $(n+1)$. C é um fator dependente da configuração geométrica do ciclone e é constante para uma dada configuração geométrica. Nessa expressão, vários adimensionais que, segundo (3.22), são necessários não estão presentes, como por exemplo, o número de Froude e a razão entre as densidades dos sólidos e do gás.

Segundo Leith e Licht, para ciclones geometricamente semelhantes, o rendimento de coleta será o mesmo, em condições diferentes de operação, se $\Psi_1 = \Psi_2$. Igualando esses parâmetros, obtém-se:

$$d_{p2} = \sqrt{\frac{D_2 u_{o1} \rho_{p1} (n_1 + 1) \mu_2}{D_1 u_{o2} \rho_{p2} (n_2 + 1) \mu_1}} d_{p1}$$

A imposição de semelhança dinâmica entre os escoamentos exige que n_1 seja igual a n_2 . Desta forma, obtém-se novamente que:

$$d_{p2} = \sqrt{\frac{D_2 u_{o1} \rho_{p1} \mu_2}{D_1 u_{o2} \rho_{p2} \mu_1}} d_{p1}$$

Clift, Ghadiri e Hoffman (1991) revisaram o trabalho de Leith e Licht e propuseram uma nova equação para cálculo do rendimento de coleta por tamanho de partícula:

$$\eta = 1 - \exp[-\Psi_c \gamma] \quad (2.20)$$

onde γ é um fator que depende apenas da geometria do ciclone, e é constante para ciclones geometricamente semelhantes, e

$$\Psi_c = \frac{\rho_p d_p^2 u_o}{9 \mu D}$$

Assim, o rendimento de coleta será o mesmo para ciclones em escala geométrica se $\Psi_{c1} = \Psi_{c2}$. Neste caso, os diâmetros de partículas coletadas com igual rendimento são relacionados por:

$$d_{p2} = \sqrt{\frac{D_2 u_{o1} \rho_{p1} \mu_2}{D_1 u_{o2} \rho_{p2} \mu_1}} d_{p1},$$

idêntica à expressão obtida pelos autores precedentes, e sujeita às mesmas ressalvas.

Não há na literatura disponível dados obtidos em ciclones geometricamente semelhantes, operando em condições de semelhança dinâmica, que possam ser utilizados para confirmar a adequação do grupo de adimensionais propostos nesse trabalho. Testes experimentais específicos foram realizados para levantar essa informação.

3.4 *Scale-down* de um Ciclone Protótipo

As condições em que um ciclone modelo deve operar são obtidas a partir das condições desejadas de operação do ciclone protótipo, pela imposição da igualdade dos adimensionais de (3.22), que não leva em conta as forças interparticulares. O índice 1 refere-se ao protótipo e o índice 2, ao modelo. Admite-se que a configuração geométrica dos ciclones é escolhida a priori e que suas dimensões sejam proporcionais ao diâmetro do barril do ciclone.

Ciclone protótipo: Stairmand de alto desempenho

Diâmetro do barril, $D_1 = 0,2 \text{ m}$

Velocidade do gás na entrada, $u_{o1} = 18 \text{ m/s}$

Partículas sólidas: FCC

Diâmetro médio, $d_{p1} = 97 \text{ }\mu\text{m}$

Densidade, $\rho_{p1} = 1350 \text{ kg/m}^3$

Esféricidade, $\phi_1 = 0,90$

Concentração na entrada, $C_1 = 0,561 \text{ kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$

Temperatura, $T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

Pressão, $P_1 = 1,0 \text{ bar}$

Gás: Ar

Viscosidade, $\mu_1 = 1,952 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$

Densidade, $\rho_1 = 1,113 \text{ kg/m}^3$

O modelo deverá operar em temperatura ambiente e pressão atmosférica, e o fator de escala geométrico é 0,6. Nessas condições:

$$D_2 = 0,12 \text{ m}$$

$$\rho_2 = \rho_1$$

$$\mu_2 = \mu_1$$

A condição de igualdade da esfericidade das partículas usadas no modelo e no protótipo é atendida usando catalisador de FCC para o modelo. A concentração de sólidos na entrada do modelo $C_2 = C_1$ e a distribuição granulométrica adimensional das partículas deve ser a mesma, com

$$\begin{aligned}d_{p2} &= d_{p1} \frac{D_2}{D_1} \\ &= 97 \times 0,6 \\ &= 58,2 \mu\text{m}\end{aligned}$$

como será detalhado no próximo capítulo.

A igualdade do adimensional ρ/ρ_p é atendida porque:

$$\rho_2 = \rho_1 \quad e \quad \rho_{p2} = \rho_{p1}$$

A velocidade do ar na entrada do modelo pode ser calculada de:

$$\left(\frac{gd_{p1}}{u_{o1}^2} \right) = \left(\frac{gd_{p2}}{u_{o2}^2} \right)$$

Daí:

$$\begin{aligned}u_{o2} &= u_{o1} \sqrt{\frac{d_{p2}}{d_{p1}}} \\ &= 18 \sqrt{0,6} \\ &= 13,9 \text{ m/s}\end{aligned}$$

O próximo passo é verificar a igualdade do número de Reynolds:

$$Re_1 = \frac{\rho_1 u_{o1} d_{p1}}{\mu_1} = 99,5$$

$$Re_2 = \frac{\rho_2 u_{o2} d_{p2}}{\mu_2} = 46,1$$

Para que $Re_2 = Re_1$ o ar deveria estar a cerca de -65°C , que não é uma condição viável.

A utilização de um outro gás no modelo, como o dióxido de carbono, por exemplo, levaria

a:

$$\begin{aligned} \rho_{p2} &= 1350 \frac{0,862}{1,113} \\ &= 1045 \text{ kg} / \text{m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nu_2 &= \frac{\mu_2}{\rho_2} \\ &= \frac{13,9 \times 58,210^{-6}}{99,5} \\ &= 8,1310^{-6} \text{ m}^2 / \text{s} \end{aligned}$$

que corresponde a uma temperatura de 22°C . Apesar da temperatura ser adequada, a situação ainda é complicada, pela necessidade de trabalhar com um gás de manuseio mais difícil do que o ar e pela dificuldade de achar um particulado sólido com a esfericidade do catalisador de FCC e a densidade de $1045 \text{ kg}/\text{m}^3$. Outros fatores de escala podem ser utilizados, mas seus valores são limitados pela possibilidade de se encontrar partículas com a densidade e diâmetros necessários.

Há situações em que não se consegue uma semelhança dinâmica completa entre modelo e protótipo, e tem-se a chamada Semelhança Incompleta [Fox e McDonald, 1992], como no caso acima, de operação do modelo com ar, em que $Re_2 \neq Re_1$. A saída seria realizar os testes com o próprio protótipo, o que não é prático, por exemplo, em casos como o de ciclones operando numa temperatura de 650°C e pressão de 2 bar, em regeneradores de catalisador de FCC.

Trabalhar com a semelhança incompleta no caso atual, em que se opera o modelo com ar,

equivale a desprezar as forças viscosas em relação às forças de inércia, subtraindo-se o requisito da igualdade do número de Reynolds para a operação do protótipo e do modelo, do grupo de relações de escala provenientes de (3.22). Os valores obtidos para Re_1 e Re_2 dão uma idéia da aproximação incorrida. Mesmo na ausência de uma semelhança completa, é considerado que testes com modelos fornecem uma informação essencial.

Capítulo 4

Descrição do Dispositivo e Procedimento Experimental

4.1 Descrição do Dispositivo Experimental

O dispositivo experimental utilizado nos testes localiza-se no Laboratório de Processos Térmicos e Engenharia Ambiental da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. A Figura 4.1 mostra o fluxograma simplificado da instalação.

O dispositivo experimental compreende uma série de itens comuns tanto aos testes com o ciclone protótipo como aos com o ciclone modelo, e outros cujas dimensões dependem de qual dos ciclones está sendo testado:

- Soprador tipo Roots - SO 01;
- Válvula de desvio (tipo gaveta) – V 01;
- Linha de alimentação de ar;
- Válvula para controle da vazão de ar (tipo gaveta) – V 02;
- Silo alimentador de partículas de FCC - SI 01;
- Duto vertical para alimentação de sólidos na linha de transporte pneumático (diâmetro 50 mm);
- Duto para transporte pneumático horizontal (diâmetro de 50 mm, em acrílico, para o ciclone modelo e 75 mm, em PVC, para o ciclone protótipo);
- Válvula para controle da dosagem de sólidos (tipo gaveta) – V 03;
- Ejetor de partículas sólidas (para o ciclone protótipo EJ 01 ou para o ciclone modelo EJ 02);
- Ciclone (Protótipo – CI 01 ou modelo – CI 02);
- Filtro de pano para coleta de sólidos na saída de ar do ciclone – FI 01;
- Silo para coleta de sólidos separados pelos ciclones (construído em aço carbono) – SI 02;

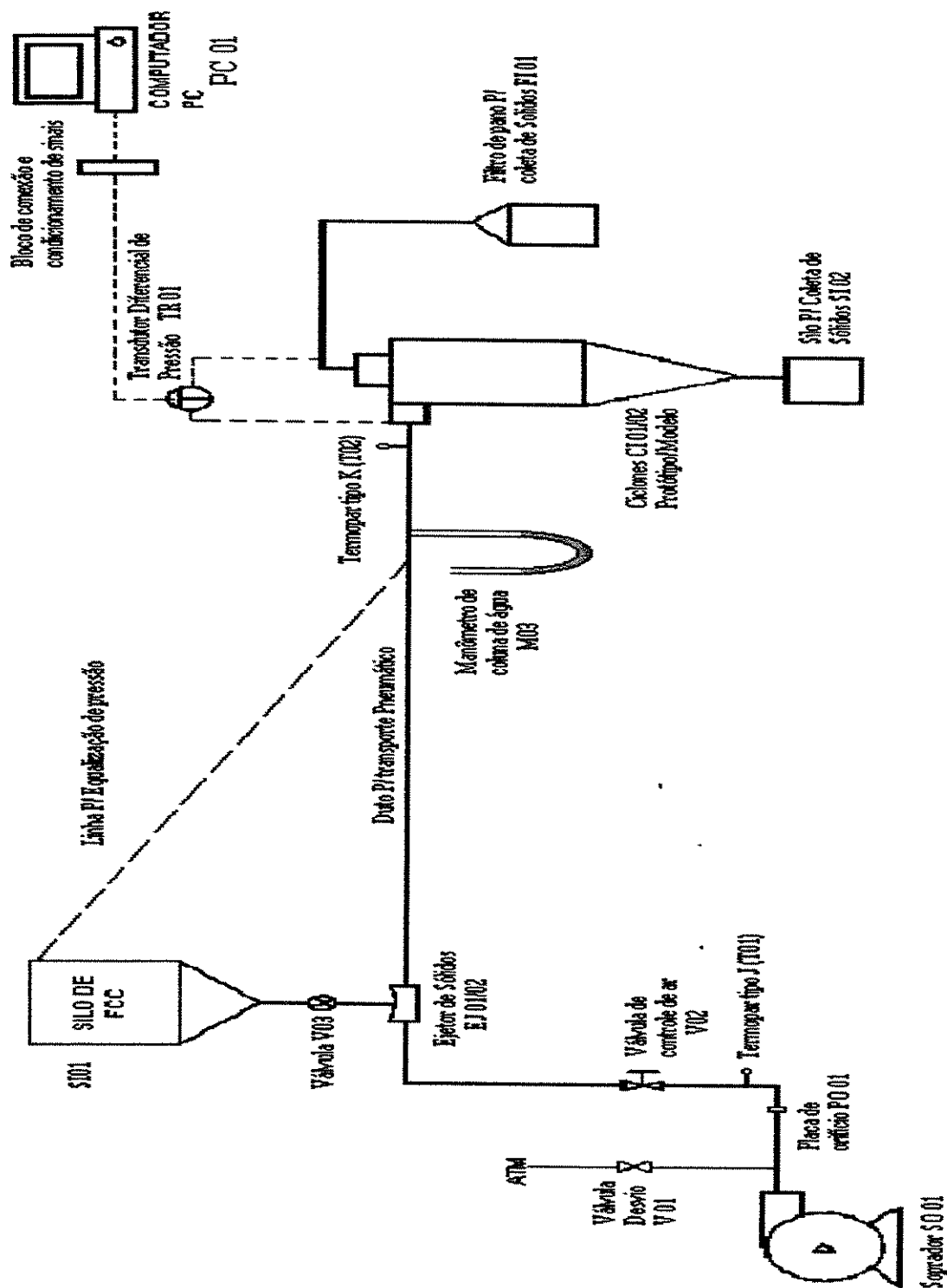


Figura 4.1 Fluxograma Simplificado da Instalação Experimental

A instrumentação consta basicamente de:

- Placa de Orifício - PO 01, com diâmetro do orifício de 43mm para testes realizados no ciclone protótipo e diâmetro de 32 mm para testes realizados no ciclone modelo
- Termopares - T 01 e T 02;
- Transmissor de pressão diferencial - TR 01;
- Balança - BA 01, e
- Sistemas de aquisição de dados

Os ciclones protótipo – CI 01 e modelo – CI 02 estão esquematizados na Figura 4.2 e são mostrados nas Figuras 4.3 e 4.4, respectivamente. Ambos são da família Stairmand para alta eficiência de coleta e foram construídos em aço inox AISI 304 .Suas dimensões são dadas na Tabela 4.1.

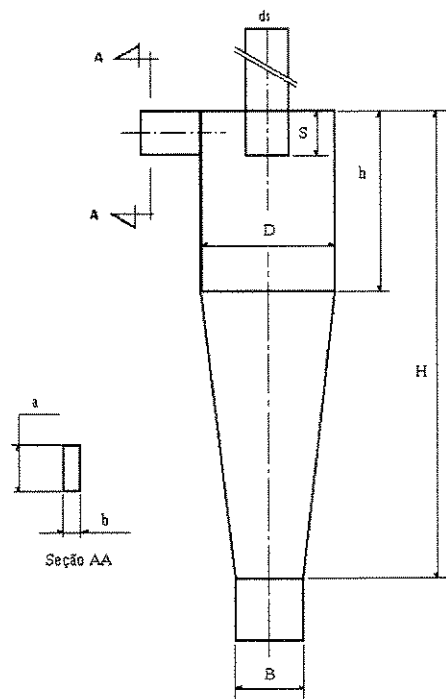


Figura 4.2. Desenho Esquemático dos Ciclones

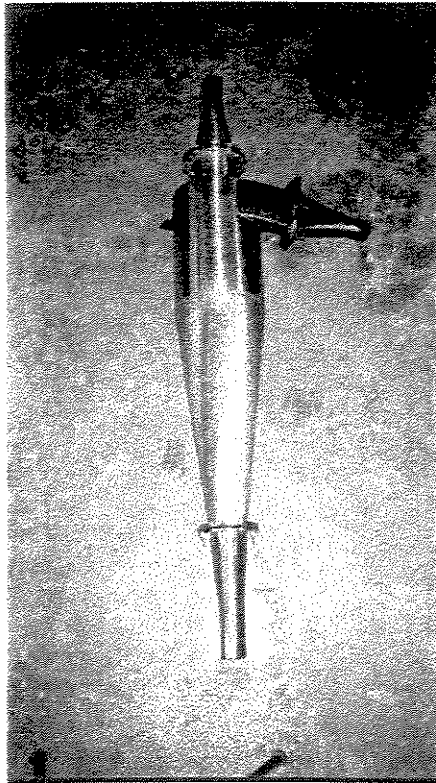


Figura 4.3. Ciclone Protótipo.

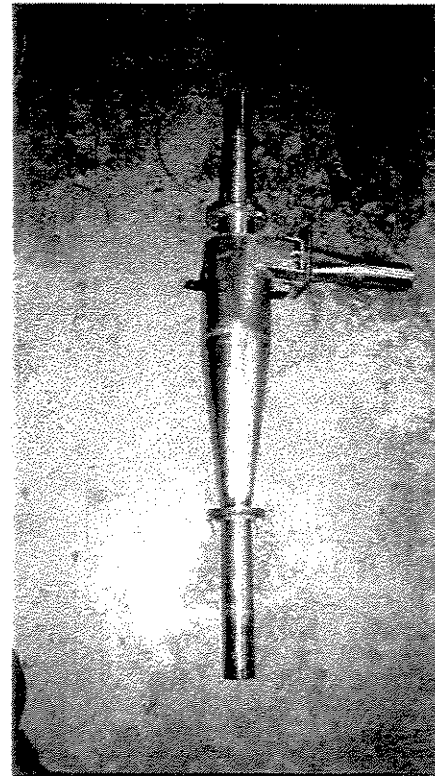


Figura 4.4. Ciclone Modelo

Tabela 4.1 Dimensões dos Ciclones

Stairmand de alta eficiência - dimensões em (m)	Ciclone Protótipo	Ciclone Modelo
Diâmetro de barril, D	0,2	0,12
Diâmetro do duto de saída do gás, ds	0,1	0,06
Altura da seção de entrada, a	0,1	0,06
Largura da seção de entrada, b	0,04	0,024
Altura do duto de saída do gás, S	0,1	0,06
Altura total, H	0,8	0,48
Altura do barril, h	0,3	0,18
Diâmetro do duto de saída das partículas, B	0,075	0,045

O silo alimentador de partículas SI 01 é mostrado nas Figuras 4.5 e 4.6. Ele também foi construído em aço inóx e tem capacidade para 2000 kg de FCC. O silo foi hermeticamente

fechado para evitar vazamento do ar. Possui em sua base um duto vertical com uma válvula tipo gaveta, galvanizada – V 03, para ajuste da descarga de sólidos. A pressão no seu interior foi equalizada para permitir uma descarga constante de partículas, ligando o topo do silo ao duto horizontal na entrada do ciclone.

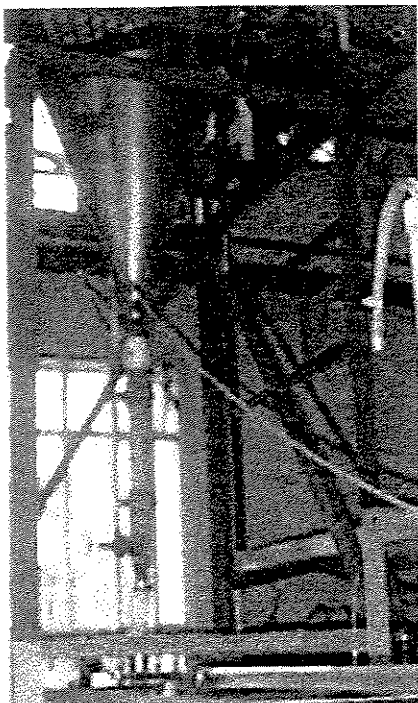


Figura 4.5 - Silo alimentador de FCC SI 01 mostrando a Válvula – V 03



Figura 4.6 - Vista de topo do Silo SI 01

Na base do duto vertical sob o silo alimentador, foi montado o ejetor de sólidos - EJ 01 para os testes realizados no ciclone protótipo, ou EJ 02 para os testes realizados no ciclone modelo. A Figura 4.7 mostra uma fotografia do ejetor EJ 02. Ambos foram construídos em aço inóx e ligados ao duto de transporte pneumático horizontal. Os ejetores de sólidos foram projetados segundo Bohnet (1969), e suas dimensões são dadas nas Figuras 4.8 e 4.9.

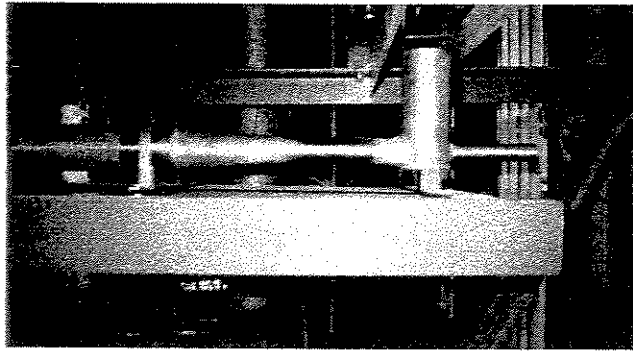
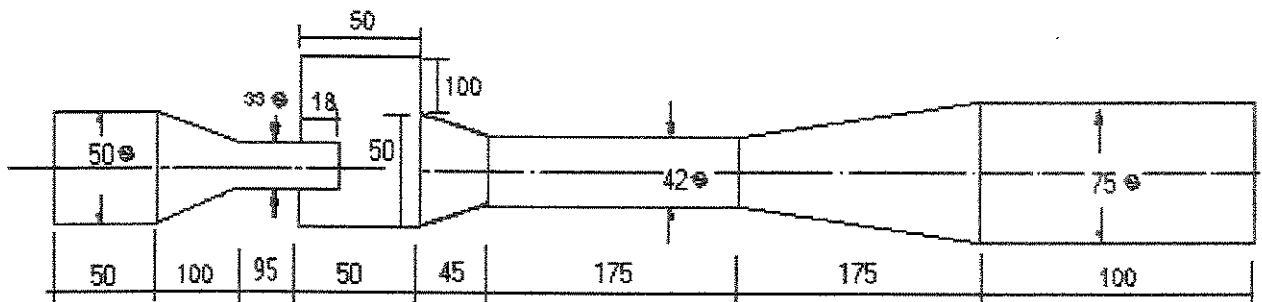


Figura 4.7. Vista lateral do ejetor de sólidos



Unid: mm

Figura 4.8. Desenho esquemático do Ejetor EJ 01

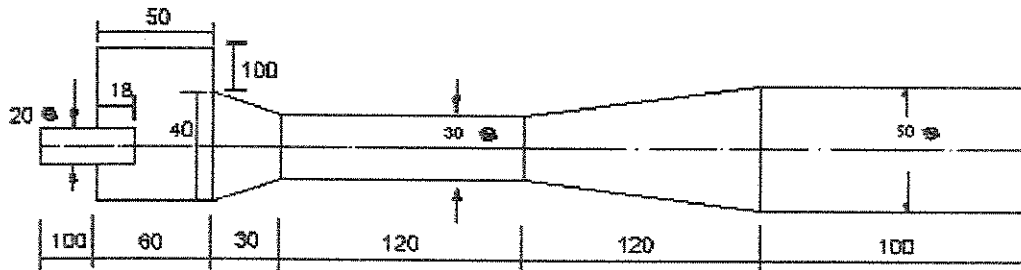


Figura 4.9. Desenho esquemático do Ejetor EJ 02

Unid: mm

O transporte dos sólidos até o topo do silo SI 01 foi feito com um sistema de talha mecânica.

A linha de alimentação de ar foi construída de tubos de aço de diâmetro igual a 105,9 mm, e era dotada de uma válvula tipo gaveta – V 02 para controle da vazão, que foi medida através do

diferencial de pressão em uma placa de orifício construída segundo a norma ISO 5167 - 1980, com orifício de 43 mm de diâmetro, para os testes realizados no ciclone protótipo, e 32mm de diâmetro, para os testes realizados no ciclone modelo, instalada em um flange da tubulação após a válvula de desvio V 01.

O material sólido foi peneirado inicialmente em peneiras de produção industrial, com formato de um paralelepípedo, com 0,52 m de lado e 0,11 m de altura, com um volume de 0,0287 m³, utilizando um classificador de peneiras da marca Produtest, 220 V, 60 Hz, 1 mm de amplitude, mostrado na Figura 4.11. A verificação do grau de separação atingido foi feita pelo peneiramento de amostras do material já peneirado em peneiras de laboratório de formato cilíndrico, com 0,15 m de raio da base e 0,08 m de altura, para um volume de 0,005652 m³, usando um classificador de peneiras da marca Produtest, 127 V, 60 Hz, 1 mm de amplitude, mostrado na Figura 4.10.



Figura 4.10 - Vibrador de Peneiras de laboratório Produtest™

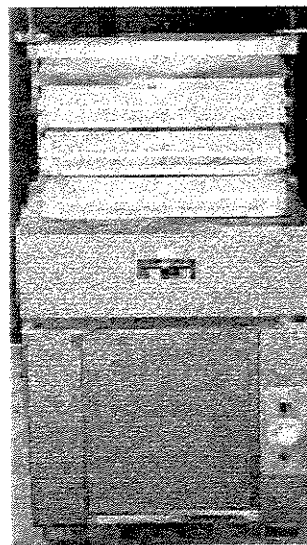


Figura 4.11 Vibrador de Peneiras de uso industrial Produtest™

A verificação do grau de separação atingido também foi feita utilizando-se um classificador Mastersizer (MS), a laser, cujas características são descritas abaixo

Lentes	Faixa de tamanho
300RF	0,05 - 900 μm
300 mm	0,5 - 900 μm
1000 mm	4,2 - 3500 μm

Precisão: 2% do diâmetro médio (volume)
Transmissor laser: Laser He-Ne 2mW (mínimo)
Comprimento de onda: 633 nm
Voltagem: 110 V.

As Figuras 4.12 a 4.15 mostram uma série de vistas da instalação.



Figura 4.12. Vista lateral da montagem.

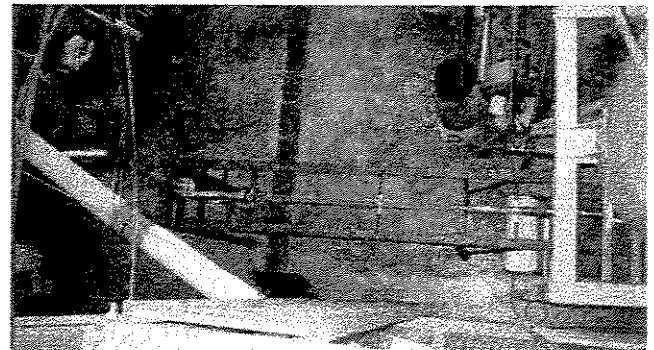


Figura 4.13. Vista de topo da montagem.

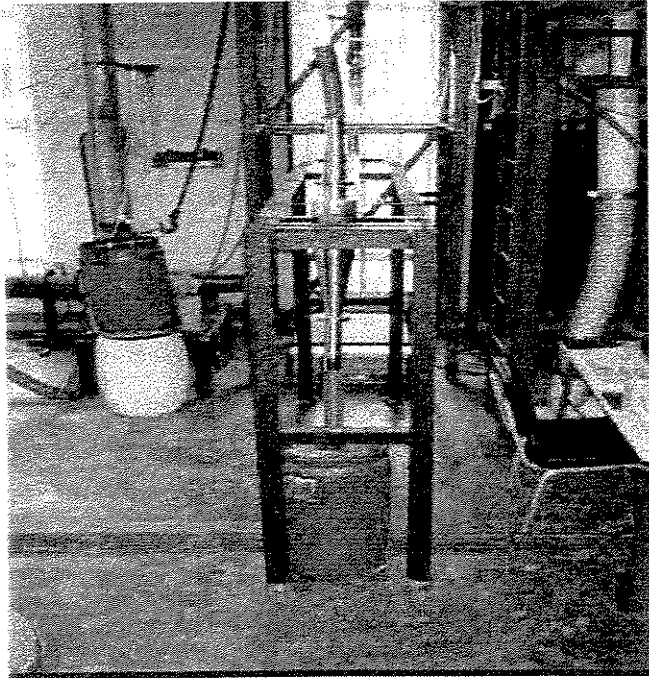


Figura 4.14. Vista frontal da montagem.

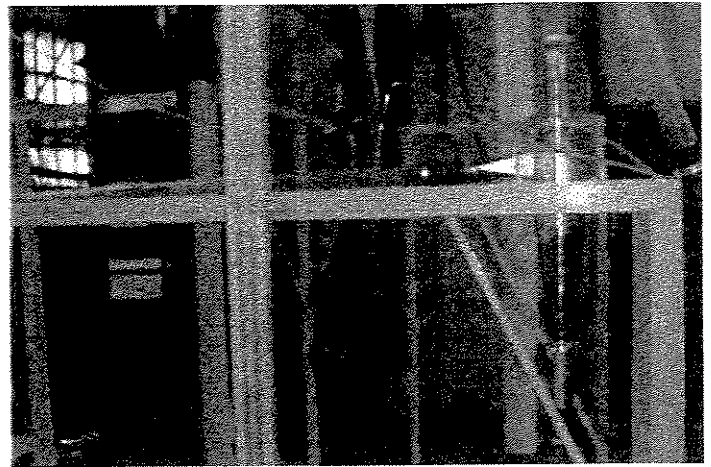


Figura 4.15. Vista lateral da montagem

O ar do transporte pneumático foi fornecido por um soprador tipo Roots, com capacidade até 1320 m³/h, pressão até 60 kPa, vácuo até - 4 kPa, e temperatura de saída do gás até 120°C.

4.2 Aquisição de Dados

4.2.1 Perda de Pressão no Ciclone

Um sistema de aquisição e análise de sinais foi utilizado para medir a perda de pressão do escoamento através do ciclone, conforme a Fig. 4.16. Ele era constituído por:

- Um transmissor de pressão diferencial Smar™, modelo LD 301-D1 com saída analógica de 4 à 20 mA e faixa de medição de 0 à 5000 Pa, com precisão de $\pm 0,075\%$ da faixa de medição ($\pm 3,75$ Pa), mostrado na Figura 4.18;
- Conversor Corrente/Tensão RCV 420, de 4 – 20 mA para 0 – 5 V, com incerteza de $\pm 0,05\%$ da faixa de medição.
- Bloco de conexão e condicionamento de sinais SC-2345, marca National Instruments™, mostrado na Figura 4.17;

- Placa de aquisição tipo AT-M10-16E10, de 12 bits, marca National Instruments™, 1,5 LSB (menor dígito significativo);
- Micro PC 486DX com software Labview™ 5.0 for Windows™ instalado, com rotina de aquisição, permitindo inclusive a geração do espectro de frequência dos sinais.

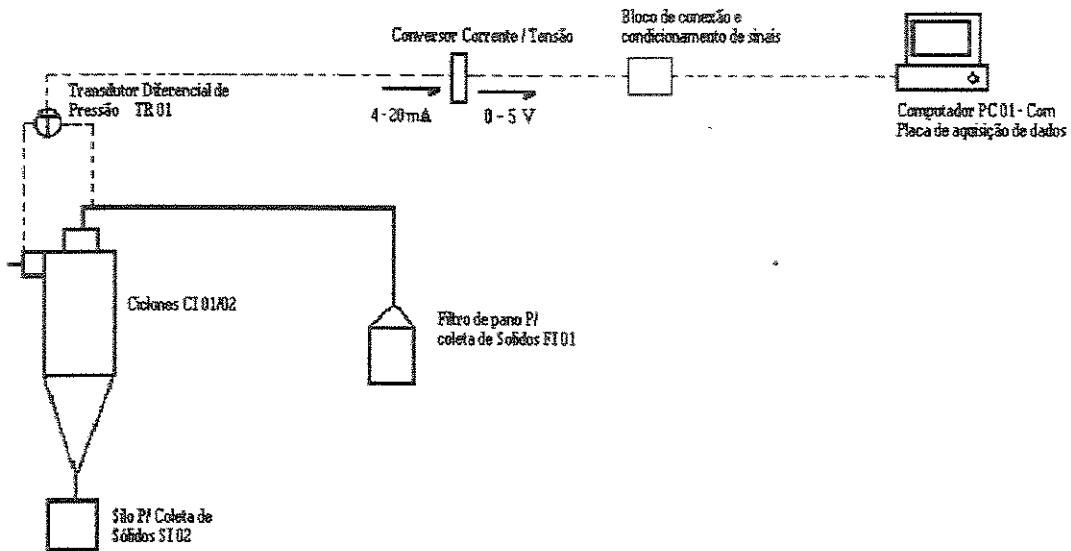


Figura 4.16 Esquema do Sistema de Aquisição de Dados

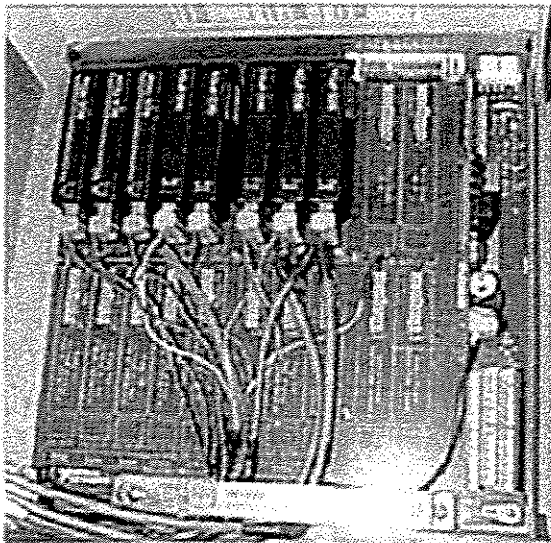


Figura 4.17. Bloco de Conexão e Condicionamento de Sinais

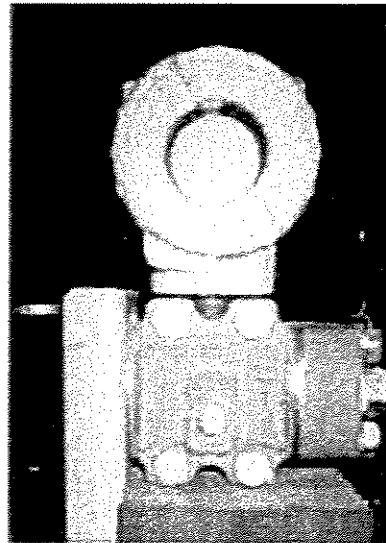


Figura 4.18. Transmissor diferencial de pressão.

A perda de pressão no ciclone, Δp , foi medida a partir de um total de 1500 amostras para cada teste, com frequência de 60 amostras/segundo.

4.2.2 Pressão

A pressão na entrada do ciclone, p_o , foi medida utilizando um manômetro em U de coluna de água, de fabricação própria, com menor graduação de 1 mmH₂O.

A pressão ambiente, p_{amb} , foi medida por um barômetro de Torricelli fabricado pela Incotherm™, com menor graduação igual a 1 mmHg .

4.2.3 Temperatura

A temperatura do ar na placa de orifício, T_{PO} , foi medida pelo termopar T 01, tipo J, com precisão de $\pm 2,2$ °C ou $\pm 0,75\%$.

A temperatura ambiente, T_{amb} , foi medida por um termômetro fabricado pela Incotherm™, com menor divisão de 2 mm e menor graduação de 1 °C.

A temperatura do ar na entrada do ciclone, T_0 , foi medida por um termopar tipo K, com precisão de $\pm 2,2$ °C ou $\pm 0,75\%$.

4.2.4 Vazão de Ar

A queda de pressão na placa de orifício, Δp_{PO} , foi medida utilizando-se um manômetro em U de coluna de água, de fabricação própria, com menor graduação de 1 mmH₂O, enquanto a pressão a montante à placa, p_{PO} , foi medida utilizando um manômetro em U de coluna de mercúrio, de fabricação própria, com menor graduação de 1 mmHg.

A partir dos dados de Δp_{Po} , p_{Po} e T_{PO} calculou-se a vazão de ar, Q , segundo a norma ISO 5167, de 1980:

$$Q = \frac{C_D E \varepsilon \pi / 4 \sqrt{2 \Delta p_{Po} \rho_{Po}}}{\rho_{Po}} \quad (4.1)$$

em que d_{Po} é o diâmetro do orifício da placa e C_D é o coeficiente de descarga calculado por:

$$C_D = 0,5959 + 0,0312 \beta^{2,1} - 0,1840 \beta^8 + 0,0029 \beta^{2,5} \left[\frac{10^6}{Re_{Dt}} \right]^{0,75} \quad (4.2)$$

onde $\beta = (d_{po}/D_t)$, é a razão entre o diâmetro do orifício pelo diâmetro da tubulação e Re_{Dt} é o número de Reynolds baseado no diâmetro da tubulação, $Re_{Dt} = \frac{\rho u D_t}{\mu}$.

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35 \beta^4) \frac{\Delta p_{Po}}{k p_{Po}} \quad (4.4)$$

onde k é a rugosidade da parede do tubo. O cálculo é iterativo, pois a determinação de Re_{Dt} depende da vazão de ar.

A descarga de ar, \dot{m} , é dada por:

$$\dot{m} = Q \cdot \rho_{Po} \quad (4.5)$$

onde ρ_{Po} é densidade do ar na placa.

4.2.5 Velocidade do ar na entrada do ciclone

A velocidade do ar na entrada do ciclone foi obtida a partir da descarga de ar, tal que:

$$u_o = \frac{\dot{m}}{\rho_o a.b} \quad (4.6)$$

onde ρ_o é a densidade do ar na entrada do ciclone e $a.b$ é a área da seção transversal da entrada do ciclone.

4.2.6 Tempo

A duração dos experimentos, t , foi medida com um cronômetro digital da marca Cassio modelo HS-20, com precisão de $\pm 0,01$ s.

4.2.7 Massa

As medidas de massa foram realizadas com uma balança digital da marca OHAUS™, com capacidade para 12.000 g e precisão de $\pm 0,1$ g, mostrada na Figura 4.19.



Figura 4.19 – Balança Digital

4.3 Procedimento Experimental

O procedimento experimental consistiu basicamente em:

- Preparação dos inventários de sólidos na granulometria requerida,
- Ajuste das condições operacionais e execução dos testes propriamente ditos e
- Análise granulométrica dos sólidos retidos pelos ciclones, coletados no silo SI 02.

4.3.1 Preparação do inventário de sólidos na granulometria adequada

Para preparar o inventário de partículas, elas foram inicialmente peneiradas no classificador de peneiras de porte industrial, utilizando-se peneiras com aberturas de 180, 150, 125, 106, 90, 75, 63, 53, 45 μm , para um tempo de peneiramento de 20 minutos e um inventário de 6 kg em cada peneiramento. Como o vibrador de peneiras não suporta de uma só vez todas as peneiras acima citadas, foi necessário dividir o peneiramento em etapas. Assim, primeiramente, o inventário foi peneirado nas peneiras maiores, com aberturas de 180, 150, 125, 106 μm . Em seguida foi retirada a massa que passou através da peneira de abertura de 106 μm para peneiramento nas peneiras de abertura de 90, 75, 63, 53 e 45 μm . O material peneirado era colocado em recipientes separados, por faixa granulométrica. Foram peneirados ao todo cerca de 427,88 kg. Para conhecer com maior precisão a granulometria de cada recipiente, foram peneiradas duas amostras de 500 g cada, do material de cada um dos recipientes em um classificador de peneiras de laboratório, com aberturas de 180, 150, 125, 106, 90, 75, 63, 53, 45 μm e tempo de peneiramento de 20 minutos. Novamente, como o vibrador de peneiras não suportava de uma só vez todas as peneiras acima citadas, foi necessário dividir o peneiramento em etapas. Sendo assim, primeiramente, foram utilizadas as peneiras maiores, com aberturas de 180, 150, 125, 106 μm . A massa que passou através da peneira de abertura de 106 μm foi peneirada nas peneiras com aberturas de 90, 75, 63, 53 e 45 μm .

A partir dessas informações foi possível a preparação dos inventários de sólidos para o ciclone protótipo e para o ciclone modelo, com as distribuições granulométricas estabelecidas pelo processo de escalonamento, tal que os inventários tivessem a mesma distribuição

granulométrica adimensional e os diâmetros das faixas correspondentes estivessem na relação dada pelo fator de escala adotado. Em outras palavras, as faixas granulométricas correspondentes em cada inventário deveriam ter a mesma fração mássica e seus diâmetros obedecer ao fator de escala, tal que:

$$d_{p2i} = f d_{p1i}$$

Após a preparação de cada inventário eles foram colocados cada um em um tambor, onde foram homogeneizados pela rolagem do mesmo, num procedimento padronizado. Após a homogeneização das misturas, foram colhidas duas amostras de cada tambor e novamente foram determinadas as distribuições granulométricas respectivas, através do classificador de peneiras de laboratório (Pen.). Estas distribuições foram verificadas por comparação com as medidas feitas no classificador Mastersizer (MS), conforme a Tabela 4.2. A massa total do inventário de cada ciclone foi 100,50 kg. O diâmetro médio de Sauter calculado para o inventário do ciclone protótipo foi 86,6 μm e 46,6 μm para o do ciclone modelo, calculados com a distribuição mais detalhada fornecida pelo classificador Mastersizer, valores que estão numa relação de escala igual a 0,54, contra o valor 0,6 da proposição original do capítulo anterior.

Tabela 4.2 – Composição Mássica do Inventário de Sólidos para os

Ciclones Protótipo e Modelo.

Protótipo				Modelo				
Faixa Gran. [μm]	d_{p1i} [μm]	Fração Mássica [%]		d_{p2i} Desejado [μm]	Faixa Gran. [μm]	d_{p2i} Obtido [μm]	Fração Mássica Obtida [%]	
		Pen.	MS				Pen.	MS
<38	19,0	31	2,7	11,4	<38	<38	29	12,8
38-45	41,5		1,9	24,9	<38	<38		
45-53	49,0		3,6	29,4	<38	<38		
53-63	58,0		6,8	34,8	<38	<38		
63-75	69,0		10,7	41,4	38-45	41,5		
75-90	82,5	13	15,1	49,5	45-53	49,0	19	17,2
90-106	98,0	19	15,4	58,8	53-63	58,0	26	20,6
106-125	115,5	17	15,4	69,3	63-75	69,0	15	17,4
125-150	137,5	12	13,2	82,5	75-90	82,5	5	11,7
150-180	165,0	8	8,6	99,0	90-106	98,0	6	5,7
180-212	196,0	-	4,3	117,6	106-125	115,5	-	1,6
212-250	231,0	-	2,3	138,6	125-150	137,5	-	-

O trabalho desenvolvido para construir os inventários foi cuidadoso e consumiu bastante tempo, sendo que o peneiramento e as análises com o Mastersizer foram repetidos mais de uma vez. A comparação da fração mássica e do diâmetro médio obtidos para o inventário do ciclone modelo com os valores desejados mostra que o esforço despendido levou a resultados razoáveis, dentro da precisão usual obtida nos dados provenientes de experimentos realizados com sistemas gás-sólidos.

O material particulado sólido utilizado foi, como já mencionado, o catalisador de FCC, cujas características (Petrobrás 2000) são:

Densidade aparente: $\rho_p = 1370 \text{ kg/m}^3$

Densidade absoluta: $\rho_{abs} = 2550 \text{ kg/m}^3$

Densidade bulk: $\rho_b = 700 \text{ a } 750 \text{ kg/m}^3$

Esfericidade: $\phi = 0,8$

4.3.2 Ajuste das condições operacionais e execução dos testes

Para a execução dos testes foi usado o procedimento experimental a seguir:

- Medir a pressão, a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar;
- Abrir completamente a válvula de desvio V 01;
- Fechar completamente a válvula para controle de vazão V 02, juntamente com as demais válvulas da linha;
- Ligar o sistema de aquisição de dados PC 01, a balança BA 01, e o transmissor TR 01;
- Acionar o soprador SO 01;
- Medir a perda de pressão na placa de orifício Δp_{po} , a pressão a montante da placa de orifício p_{po} e a temperatura a jusante da placa T_{po} . A partir dos valores de Δp_{po} , p_{po} , T_{po} , ajustar a vazão de gás na entrada do ciclone, fechando a válvula desvio V 01 e ajustando, simultaneamente, a válvula V 02 até atingir a vazão de gás desejada. Calcular a velocidade de entrada a partir da vazão;

- Medir a pressão na entrada do ciclone p_0 e a temperatura na entrada do ciclone T_0 .
- Adquirir os valores da perda de pressão para o ciclone vazio, Δp_v ;
- Ajustar a válvula V 03, para alcançar a concentração de sólidos desejada, e simultaneamente, acionar o cronômetro;
- Aguardar aproximadamente 10 s para que o escoamento entre em regime, e iniciar a aquisição de dados da perda de pressão para o ciclone Δp . Encerrada a aquisição de dados, fechar a válvula V 03 e, simultaneamente, parar o cronômetro;
- Abrir totalmente a válvula de desvio V 01 e fechar a válvula V 02;
- Pesar a massa coletada em SI 02 e FI 01

4.3.3 Análise granulométrica dos sólidos coletados no silo SI 02.

- Amostrar o material coletado no SI 02 e medir sua distribuição granulométrica através das peneiras de laboratório e do classificador MasterSizer.

Foram realizadas um total de 49 corridas, em que se variou a concentração de sólidos na entrada dos ciclones para uma dada velocidade do escoamento na entrada mantida constante.

Foram testadas três velocidades médias na entrada do ciclone protótipo: 20,72 m/s, 17,98 m/s e 15,17 m/s e as três correspondentes para o ciclone modelo: 16,26 m/s, 13,93 m/s e 11,75 m/s, determinadas pela relação de escala:

$$\begin{aligned}
 u_{02} &= u_{01} \sqrt{\frac{d_{p2}}{d_{p1}}} \\
 &= 17,98 \sqrt{0,6} \\
 &= 13,93 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

por exemplo, como foi visto no capítulo anterior.

A variação na concentração de sólidos foi realizada variando a abertura da válvula V 03.

4.4 Redução de dados

- Perda de pressão no ciclone

Na Figura 4.16 é mostrado o trajeto do sinal proporcional á perda de pressão entre a entrada e a saída do ciclone, Δp . Na saída do transmissor diferencial de pressão TR01 o sinal apresenta-se como uma corrente continua de 4 a 20 mA.

Uma placa de aquisição de dados comporta-se como um voltímetro, isto é, ao invés de uma corrente, o sinal na entrada da placa deve se apresentar como um sinal de tensão. Neste sentido torna-se necessário um bloco conversor de corrente em tensão ligado entre o transmissor de pressão e a placa de aquisição de dados.

Após a placa de aquisição de dados, sem nenhum tratamento do sinal, esse se apresentaria como valores de tensão na tela do computador PC01. Portanto, é necessário um procedimento de recuperação da medida do sinal de pressão que foi convertido inicialmente pelo transmissor de pressão. Com o auxílio de um computador e da rotina de aquisição de dados, elaborada para o software Labview™, o sinal é tratado e convertido novamente em pressão (Pa). Esse tratamento esta exemplificado no Apêndice A. O valor indicado constitui a média de 1500 leituras da perda de pressão a cada 25 segundos.

- Concentração de sólidos na entrada do ciclone

A concentração de sólidos, C , foi obtida da relação:

$$C = \frac{m_p}{m} \quad (4.7)$$

em que m_p e m são as descargas de partículas e de ar, respectivamente:

$$m_p = \frac{M_{coletada} + M_{Saída}}{t} \quad (4.8)$$

onde $M_{coletada}$ é a massa de particulados retidos pelo ciclone, coletados no silo SI 02, $M_{saída}$ é a massa dos sólidos que atravessaram o ciclone sem serem retidos, coletados no filtro FI 01,

e t é o tempo de duração de cada teste.

- Rendimento de coleta dos ciclones

O rendimento de coleta, η , foi obtido a partir de:

$$\eta = \frac{M_{coletada}}{M_{coletada} + M_{saida}} \quad (4.9)$$

O rendimento de coleta por tamanho de partícula (ou fracional) foi determinado a partir da análise granulométrica do material recolhido no silo SI 02.

A partir desses resultados foram construídos os gráficos:

- Rendimento de coleta η versus concentração de sólidos C ;
- Perda de pressão adimensionalizada ($\Delta p / \rho_0 u_0^2$) versus concentração de sólidos C e
- $\Delta p / \Delta p_v$ versus concentração de sólidos C ,

para cada velocidade do gás na entrada do ciclone, para os ciclones modelo e protótipo.

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam as variáveis de interesse obtidas através do procedimento experimental descrito acima.

A semelhança fluidodinâmica dos ciclones se verifica quando os rendimentos de coleta e as diferenças de pressão adimensionalizadas são iguais em cada concentração, nas velocidades do ar correspondentes na entrada dos ciclones.

Tabela 4.3 – Perda de Pressão, Temperaturas e Velocidades do Sistema para o Ciclone Protótipo

Teste N ^o	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ΔP_{Po}	649	650	653	655	653	655	655	455	455	455	455	455	455	455	301	301	301	301	301	303	301	303
p_{Po} (mmHG)	188	188	188	188	188	188	188	131	131	131	130	130	130	129	88	88	85	85	85	85	85	85
T_{Po} (°C)	24	25	25	25	25	25	25	24	25	25	25	25	26	26	28	28	27	27	26	26	25	25
Q (m ³ /h)	297,12	297,85	298,50	299,00	298,50	299,00	299,00	258,30	258,73	258,73	258,90	258,90	259,20	259,50	218,37	218,40	218,40	218,40	218,00	218,00	218,00	218,00
U_0 (m/s)	20,63	20,68	20,73	20,76	20,73	20,76	20,76	17,94	17,97	17,97	17,98	17,98	18,00	18,02	15,16	15,16	15,17	15,17	15,14	15,10	15,10	15,10
p_0 (mmCA)	99,00	98,20	96,50	96,50	97,00	97,00	98,20	74,40	72,40	72,90	71,70	71,20	72,00	71,00	47,50	47,30	48,10	47,60	47,80	48,30	47,80	47,80
T_0 (°C)	24,40	24,40	24,30	24,30	24,10	23,90	23,80	23,90	23,90	23,90	23,90	24,00	24,00	24,00	26,60	26,10	25,90	25,60	25,00	24,80	24,50	25,30
ρ_{Po} (kg/m ³)	1,219	1,218	1,217	1,217	1,218	1,219	1,221	1,116	1,115	1,116	1,115	1,115	1,115	1,115	1,100	1,102	1,103	1,104	1,106	1,107	1,108	1,105
m (kg/h)	362,21	362,82	363,16	363,70	363,58	364,36	364,90	288,19	288,61	288,63	288,76	288,65	288,99	289,30	240,20	240,60	240,83	241,06	241,14	241,32	241,55	240,89
$M_{coletada}$ (g)	507,9	2433,3	4194,1	4399,5	6020,7	6605,8	6491,2	590,8	1857,8	4864,7	8273,3	7080,7	3371,1	582,4	3965,6	2713,6	1419,1	2105,5	1680,5	5101,9	804,4	509,3
M_{saida} (g)	0,5	0,7	0,9	0,9	1,9	2,3	2,5	0,3	0,3	1,4	2,5	1,8	0,6	0,3	0,8	0,5	0,4	0,3	0,3	1,4	0,3	0,2
M_{total} (g)	508,4	2434	4195	4400,4	6022,6	6608,1	6493,7	0,3	1858,1	4866,1	8275,8	7082,5	3371,7	582,7	3966,4	2714,1	1419,5	2105,8	1680,8	5103,3	804,7	509,5
t (s)	83,38	60,75	56,26	46,27	46,89	51,56	46,7	43,26	38,76	36,81	38,41	36,65	37,02	42,24	33,82	31,73	33,04	34,15	35,06	36,41	37,56	37,19
m_p (kg/h)	21,95	144,24	268,43	342,37	462,39	461,39	500,59	49,19	172,58	475,90	775,65	695,69	327,88	49,66	422,21	307,93	154,67	221,99	172,59	504,58	77,13	49,32

Tabela 4.4 – Perda de Pressão, Temperaturas e Velocidades do Sistema para o Ciclone Modelo

Teste Nº	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
ΔP_{Fp}	150	152	152	152	152	152	152	150	150	150	109	109	109	109	109	110	110	111	111	77	77	77	77	77	77	77	77
p_{Po} (mmHG)	101	100	100	100	100	100	100	135	135	135	70	70	70	70	70	69	90	89	88	73	73	73	73	73	73	73	73
T_{Po} (°C)	29	29	28	28	28	28	27	36	34	34	37	37	37	37	37	37	28	36	37	27	27	27	27	27	27	27	27
Q (m³/h)	83,90	84,35	84,35	84,35	84,35	84,35	84,35	83,39	83,39	83,39	74,30	74,30	74,30	74,30	74,30	74,34	72,50	73,54	73,54	60,93	60,93	60,93	60,93	60,93	60,93	60,93	60,93
u_0 (m/s)	16,18	16,27	16,27	16,27	16,27	16,27	16,27	16,09	16,09	16,09	14,33	14,33	14,33	14,33	14,33	14,34	13,99	14,19	14,19	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75
p_0 (mmCA)	120	116	127	120	121	120	117	123	124	124	85	70	83	81	84	85	90	85	86	63	63	63	63	63	63	63	60
T_0 (°C)	29,0	28,5	28,0	27,9	27,3	27,2	27,0	31,0	30,7	30,7	27,5	27,5	27,6	27,7	27,5	28,2	26,3	30,5	30,8	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4	26,4
ρ_{Po} (kg/m³)	1,107	1,108	1,111	1,111	1,113	1,113	1,114	1,100	1,101	1,101	1,107	1,105	1,106	1,105	1,107	1,104	1,112	1,096	1,095	1,102	1,102	1,102	1,102	1,102	1,102	1,102	1,103
m (kg/h)	92,84	93,47	93,73	93,69	93,89	93,91	93,94	91,70	91,80	91,80	82,22	82,09	82,18	82,13	82,21	82,08	80,61	80,58	80,51	67,18	67,18	67,18	67,18	67,18	67,18	67,18	67,18
$M_{coletada}$ (g)	425,3	918,8	1014,7	1329,8	1473,9	1254,6	470,4	281,5	475,9	447,6	502,9	350,5	818,1	1196,5	1565,3	2829,7	1219,1	1532	1027,2	280,6	715,1	897,4	1099,5	1578,2	1554,9	1160,1	2159,2
M_{saida} (g)	0,1	0,7	1,2	18	16,1	9,2	0,1	0,7	11,6	8,7	0,2	0,1	0,7	0,8	2,8	3,2	7,1	3,7	8,5	0,1	0,5	0,9	0,6	0,9	1,1	0,9	1,3
M_{total} (g)	425,4	919,5	1015,9	1347,8	1490,0	1263,8	470,5	282,2	487,5	456,3	503,1	350,6	818,8	1197,3	1568,1	2832,9	1226,2	1535,7	1035,7	280,7	715,6	898,3	1100,1	1579,1	1556	1161	2160,5
t (s)	38,51	40,38	38,38	42,38	44,02	42,22	82,02	10,02	10,16	11,20	122,77	41,71	55,26	58,52	63,7	106,88	35,29	38,21	19,59	43,31	45,06	39,08	37,39	46,21	41,03	39,95	61,32
m_p (kg/h)	39,77	81,98	95,29	114,49	121,85	107,76	20,65	101,39	172,74	146,67	14,75	30,26	53,34	73,65	88,62	95,44	125,09	144,69	190,33	23,33	57,17	82,75	105,92	123,02	136,52	104,62	126,84

Capítulo 5

Apresentação e Discussão dos Resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos testes realizados nas condições operacionais descritas no capítulo anterior. As Tabelas 5.1 e 5.2 sumarizam os resultados obtidos nos testes realizados com os ciclones protótipo e modelo, onde σ_x é o desvio padrão das leituras de Δp .

Tabela 5.1 – Ciclone Protótipo - Resultados dos Testes

Teste Nº	U_0 (m/s)	C (kgsol/kgar)	η	ΔP (Pa)	σ_x (Pa)	$\Delta P / \rho_0 U_0^2$	$\Delta P / \Delta P_V$
1	20,63	0,061	99,9	915,38	5,71	1,77	0,39
2	20,68	0,398	99,97	807,99	6,53	1,56	0,34
3	20,73	0,739	99,98	782,49	4,38	1,5	0,33
4	20,76	0,941	99,98	782,2	4,93	1,5	0,33
5	20,73	1,272	99,97	722,73	9,19	1,39	0,31
6	20,76	1,266	99,97	737,98	7,13	1,41	0,31
7	20,76	1,372	99,96	722,85	6,17	1,38	0,31
8	17,94	0,171	99,95	560,72	8,38	1,57	0,35
9	17,97	0,598	99,98	568,71	3,5	1,59	0,35
10	17,97	1,649	99,97	464,04	7,75	1,29	0,29
11	17,98	2,686	99,97	429,36	8,13	1,2	0,26
12	17,98	2,41	99,97	446,11	7,83	1,24	0,27
13	18,00	1,135	99,98	537,61	17,15	1,49	0,33
14	18,02	0,172	99,95	552,23	7,07	1,53	0,34
15	15,16	1,758	99,98	319,15	9,51	1,27	0,31
16	15,16	1,28	99,98	344,43	10,57	1,37	0,33
17	15,17	0,642	99,97	369,47	23,41	1,46	0,36
18	15,17	0,921	99,99	386,34	14,37	1,53	0,37
19	15,14	0,716	99,98	383,09	24,47	1,52	0,37
20	15,10	2,091	99,97	305,21	9,95	1,21	0,30
21	15,10	0,319	99,96	347,64	4,86	1,37	0,34
22	15,10	0,205	99,96	358,8	2,73	1,42	0,35

Tabela 5.2 – Ciclone Modelo - Resultados dos Testes

Teste Nº	U_0 (m/s)	C (kgso1/kgar)	η	ΔP (Pa)	σ_x (Pa)	$\Delta P / \rho_0 U_0^2$	$\Delta P / \Delta P_V$
23	16,18	0,428	99,98	304,25	1,92	1,05	0,43
24	16,27	0,877	99,92	267,31	2,48	0,91	0,38
25	16,27	1,017	99,88	261,66	2,17	0,89	0,37
26	16,27	1,222	98,66	230,9	2,33	0,79	0,33
27	16,27	1,298	98,92	227,93	3,02	0,78	0,32
28	16,27	1,147	99,27	239,03	1,33	0,81	0,34
29	16,27	0,22	99,98	319,47	3,02	1,09	0,45
30	16,09	1,106	99,75	-----	-----	-----	-----
31	16,09	1,882	97,62	-----	-----	-----	-----
32	16,09	1,598	98,09	-----	-----	-----	-----
33	14,33	0,179	99,96	234,55	4,75	1,04	0,47
34	14,33	0,369	99,97	219,81	1,56	0,97	0,44
35	14,33	0,649	99,91	190,15	1,32	0,84	0,38
36	14,33	0,897	99,93	187,92	2,35	0,83	0,38
37	14,33	1,078	99,82	174,22	1,78	0,77	0,35
38	14,34	1,163	99,89	180,72	2,82	0,8	0,36
39	13,99	1,552	99,42	165,31	8,9	0,76	0,33
40	14,19	1,796	99,76	160,91	5,88	0,73	0,32
41	14,19	2,364	99,18	-----	-----	-----	-----
42	11,75	0,347	99,96	169,3	2,15	1,12	0,55
43	11,75	0,851	99,93	151,4	3,16	1	0,49
44	11,75	1,232	99,9	126,98	5,43	0,84	0,41
45	11,75	1,577	99,95	139,39	6,34	0,92	0,45
46	11,75	1,831	99,94	128,96	4,41	0,85	0,42
47	11,75	2,032	99,93	116,23	5,57	0,77	0,38
48	11,75	1,558	99,92	118,95	5,86	0,78	0,39
49	11,8	1,888	99,94	126,58	2,48	0,83	0,41

5.1 Rendimento de Coleta

O rendimento de coleta, como já foi visto, é definido como a fração das partículas que entram no ciclone e são por ele coletadas.

5.1.1 Análise dos Resultados e Comparação com a Literatura

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam os gráficos do rendimento de coleta em função da concentração de sólidos para os ciclones protótipo e modelo, respectivamente. As três curvas referem-se às três velocidades utilizadas para cada ciclone.

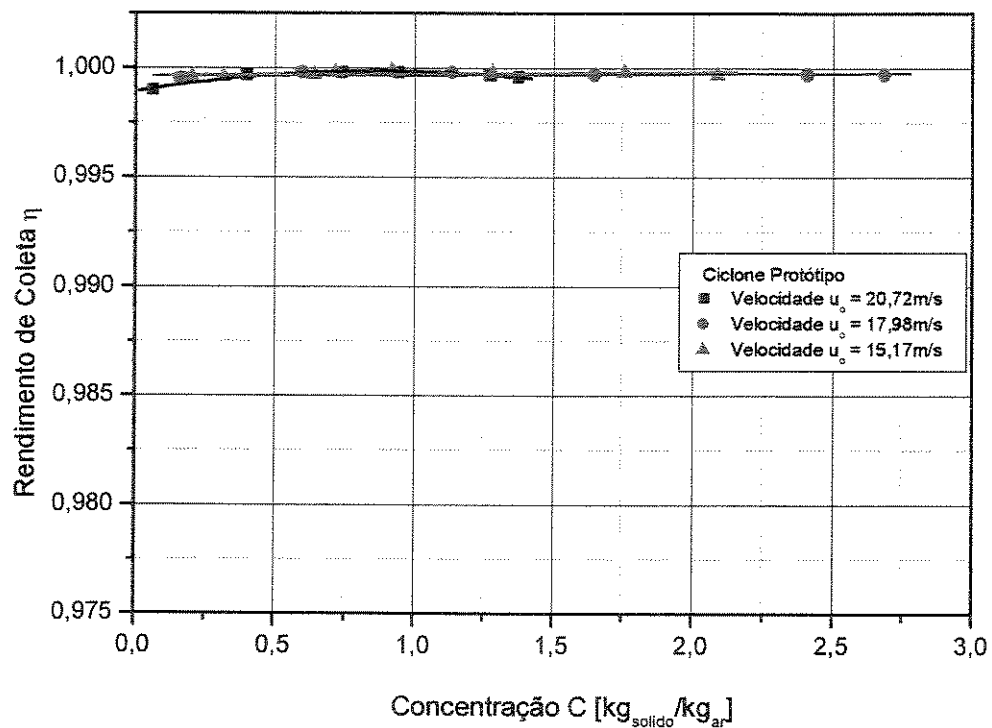


Figura 5.1 Rendimento de coleta em função da concentração para o ciclone protótipo.

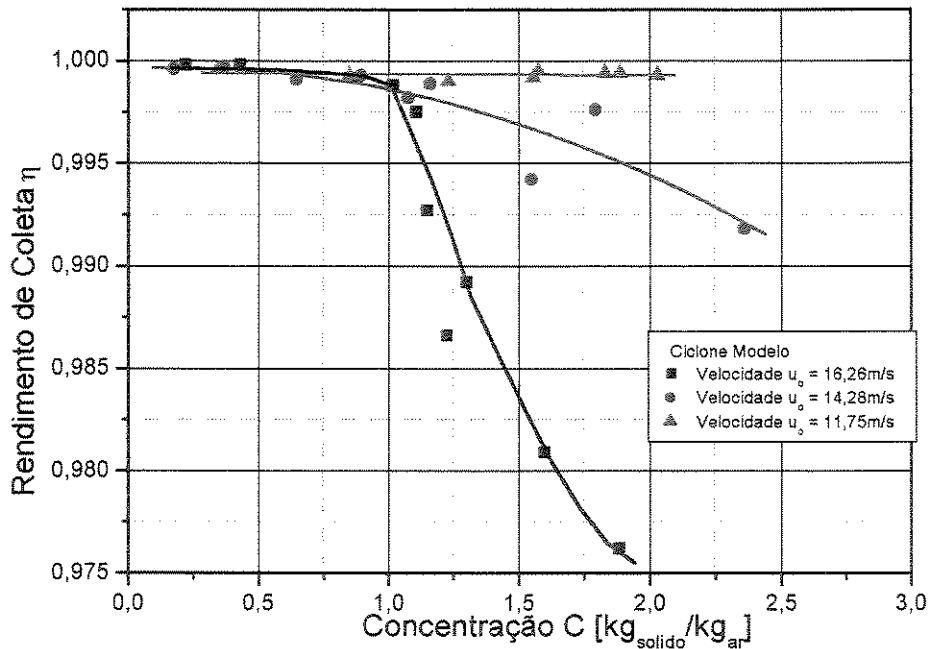


Figura 5.2 Rendimento de coleta em função da concentração para o ciclone modelo.

Para o ciclone protótipo os rendimentos de coleta são bastante próximos nas três velocidades estudadas, na faixa de concentração estudada; no ciclone modelo, porém, pode-se observar um afastamento das curvas a partir da faixa de concentração $0,75 \text{ kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$. A partir desta faixa de concentração, quanto maior a velocidade, maior foi a queda do rendimento de coleta. Pode-se atribuir este fato ao re-arraste das partículas maiores, que saltam da parede do ciclone, o que, segundo Stairmand (1951), torna-se mais evidente em pequenos ciclones operando com altas velocidades. Stairmand apresentou essa teoria do re-arraste das partículas para tentar explicar o baixo rendimento de coleta observado em seus experimentos com partículas maiores do que as da faixa usual de operação dos ciclones (2 à 100 μm). Abrahamson et al. (1978) também observaram em seus experimentos com ciclones longos, operando com partículas na faixa de 180 a 250 μm , a “saltação” de partículas da parede do ciclone e concluiu, como o fizera Stairmand, que as partículas maiores são dificilmente coletadas em ciclones pequenos operados em altas velocidades.

Mori et al. (1968) trabalharam com ciclones pequenos (0,06 a 0,24 m de diâmetro), e observaram que o rendimento de coleta das partículas de areia utilizadas tornava-se

consideravelmente mais baixo quando o tamanho das partículas estava na faixa de 70 a 250 μm .

Na faixa de concentração entre 1,4 e 5,6 $\text{kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$, Tuzla e Chen (1992) observaram uma pequena diminuição do rendimento de coleta com o aumento da concentração de sólidos, sendo 3,6 m/s a velocidade na entrada do ciclone e 0,4 m o diâmetro de barril.

No trabalho de Fassani e Goldstein (1999) a tendência de diminuição do rendimento de coleta com o aumento da concentração de sólidos na entrada do ciclone, só foi observada em concentrações acima de 12 $\text{kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$, num ciclone com diâmetro de barril de 0,154 m, operando nas velocidades de 7 m/s, 18 m/s, e 27 m/s, e concentrações até 25 $\text{kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$.

O ciclone modelo do presente trabalho atuou dentro da faixa granulométrica usual de operação dos ciclones, com diâmetro médio de Sauter em torno de 46,8 μm . Admitindo-se, no entanto, que a aglomeração de partículas torna-se mais significativa em concentrações mais elevadas de sólidos, haveria com isso a formação de aglomerados que operariam como partículas de maior tamanho. Este fato, associado ao menor tamanho do ciclone modelo ($D = 0,12 \text{ m}$) e à operação com velocidades relativamente altas, pode explicar a queda no rendimento de coleta observada nas velocidades e concentrações maiores.

As Figuras 5.3 e 5.4 comparam os resultados experimentais obtidos com as curvas para o rendimento de coleta determinadas segundo os procedimentos sugeridos por Stairmand (1951),

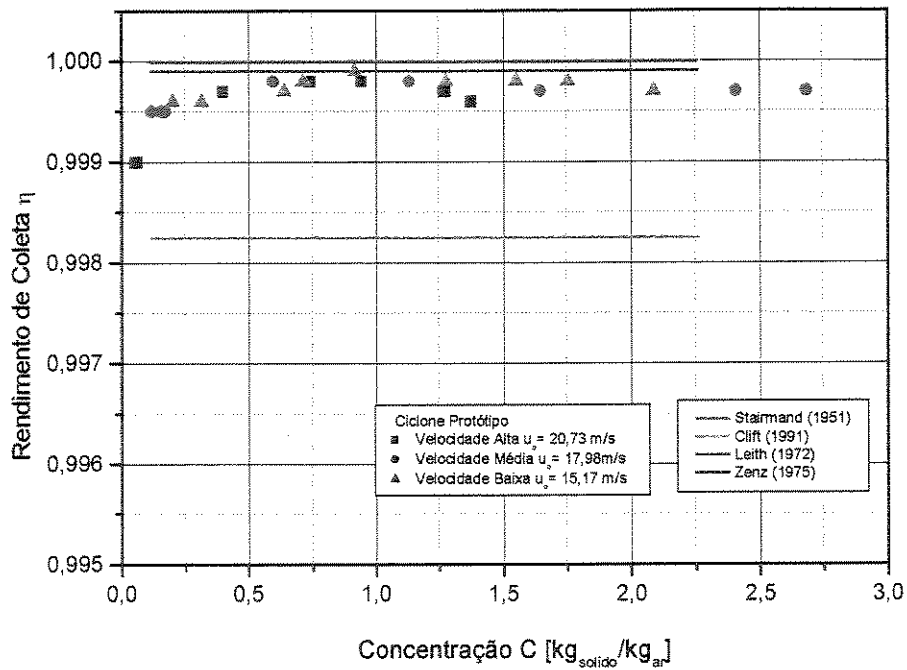


Figura 5.3 Comparação do rendimento de coleta com previsões da literatura - Ciclone protótipo

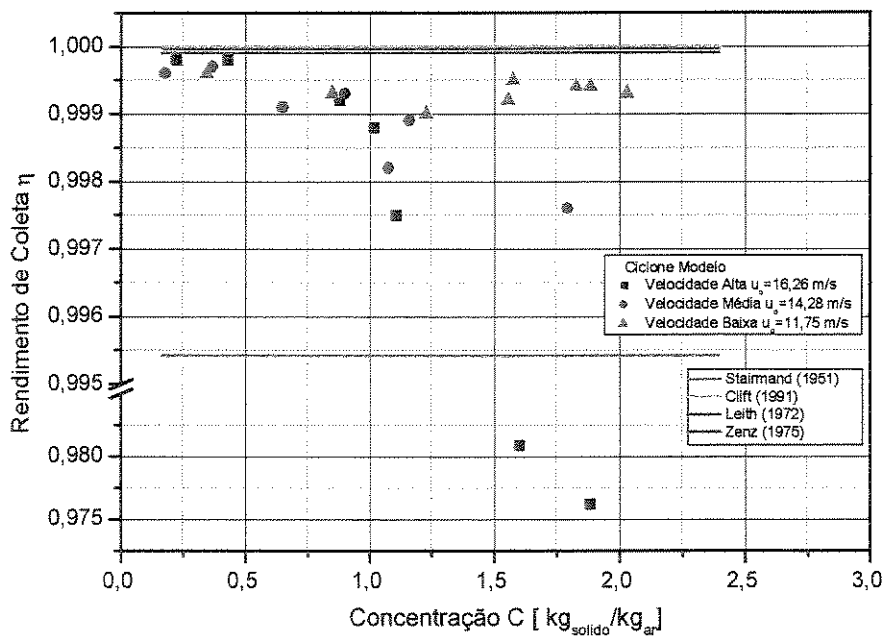


Figura 5.4 Comparação do rendimento de coleta com previsões da literatura - Ciclone modelo

Leith e Licht (1972), Zenz (1975), descrito no Apêndice C, e Clift et al. (1991). Observa-se que as curvas calculadas de acordo com cada procedimento para as diferentes velocidades na entrada do ciclone se superpõem. Observa-se ainda que os valores determinados segundo Leith e Licht, e Clift praticamente se superpõem, tanto no ciclone protótipo como no modelo.

Como se pode notar, estes métodos de previsão do rendimento disponíveis na literatura não se mostraram adequados, principalmente nas maiores concentrações estudadas, e em ciclones menores operando em altas velocidades, nos quais as partículas aglomeradas saltam e são re-arrastadas. Isto era de esperar, pois os métodos foram desenvolvidos para baixas concentrações e não consideraram variações na concentração de sólidos na entrada do ciclone, com a exceção de Zenz (1975), que trabalhou com concentrações até $1,87 \text{ kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$.

5.1.2 Análise da Semelhança Quanto ao Rendimento de Coleta dos Ciclones Protótipo e Modelo

As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 comparam o rendimento de coleta dos ciclones protótipo e modelo em função da concentração de partículas na entrada, para cada velocidade estudada.

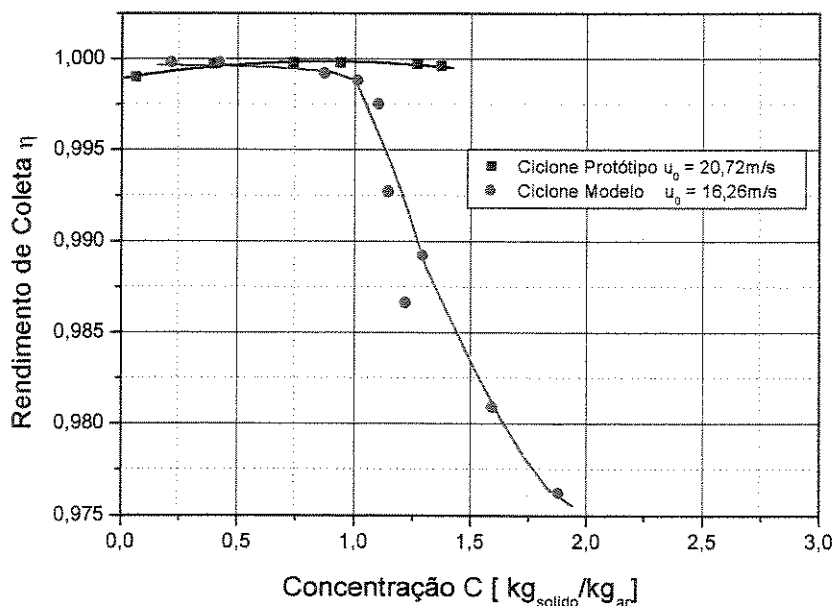


Figura 5.5 Rendimentos de coleta dos ciclones protótipo e modelo
Operação com velocidades altas

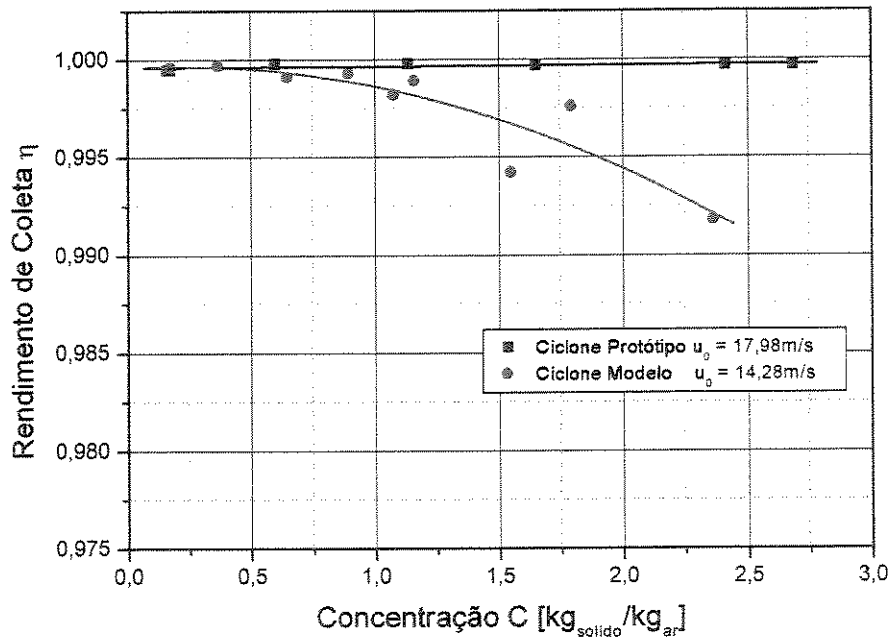


Figura 5.6 Rendimentos de coleta dos ciclones protótipo e modelo
Operação com Velocidades intermediárias

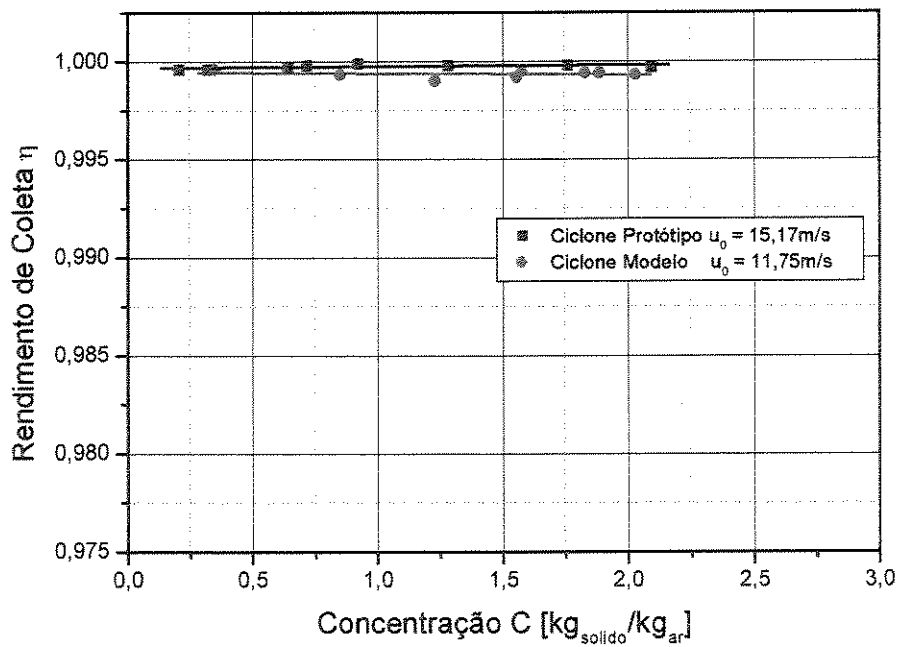


Figura 5.7 Rendimentos de coleta dos ciclones protótipo e modelo
Operação com Velocidades baixas

Observa-se que os rendimentos de coleta dos ciclones protótipo e modelo são praticamente iguais em todas as velocidades estudadas, para concentrações até $1,0 \text{ kg}_{\text{solido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$. Para valores maiores de concentração há um afastamento das curvas de rendimento de coleta, que se torna mais significativo conforme aumenta a velocidade.

No entanto, quando os ciclones protótipo e modelo operaram nas velocidades mais baixas de $15,17 \text{ m/s}$ e $11,75 \text{ m/s}$, respectivamente, a semelhança quanto ao rendimento de coleta ocorreu em toda a faixa de concentração estudada no presente trabalho. Isto pode ser atribuído ao fato do re-arraste ser menos significativo nesta velocidade utilizada no ciclone modelo, mesmo que o aumento da concentração tenha propiciado a formação de aglomerado de partículas.

Para o ciclone modelo operando com velocidades médias de $14,28 \text{ m/s}$ e $16,26 \text{ m/s}$ o re-arraste tornou-se bastante significativo para concentrações acima de $0,75 \text{ kg}_{\text{solido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$, caindo o rendimento de coleta. Isto teria ocorrido porque o re-arraste se manifesta com mais vigor em ciclones de tamanho pequeno, operando com velocidades relativamente altas.

Em concentrações acima de $0,75 \text{ kg}_{\text{solido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$ a velocidade do gás na entrada do ciclone é, portanto, um fator decisivo para que se obtenha semelhança entre os ciclones, visto que, quanto maior a velocidade, mais significativo é o afastamento entre as curvas de rendimento de coleta, para os ciclones aqui estudados.

5.2 Perda de Pressão

5.2.1 Análise dos Resultados e Comparação com a Literatura

A Figura 5.8 mostra, inicialmente, a variação da perda de pressão do escoamento através dos ciclones, sem a presença de partículas, em função da velocidade, onde se pode observar o aumento da perda de pressão com o aumento da velocidade.

Os dados experimentais foram ajustados por uma equação parabólica para os ciclones protótipo e modelo, com coeficientes de correlação de $0,99943$ e $0,99963$, respectivamente:

$$\Delta p_{vP} = 612,979 - 126,461u_o + 10,158u_o^2 \quad (5.1)$$

e

$$\Delta p_{vM} = 479,826 - 89,085u_o + 6,326u_o^2 \quad (5.2)$$

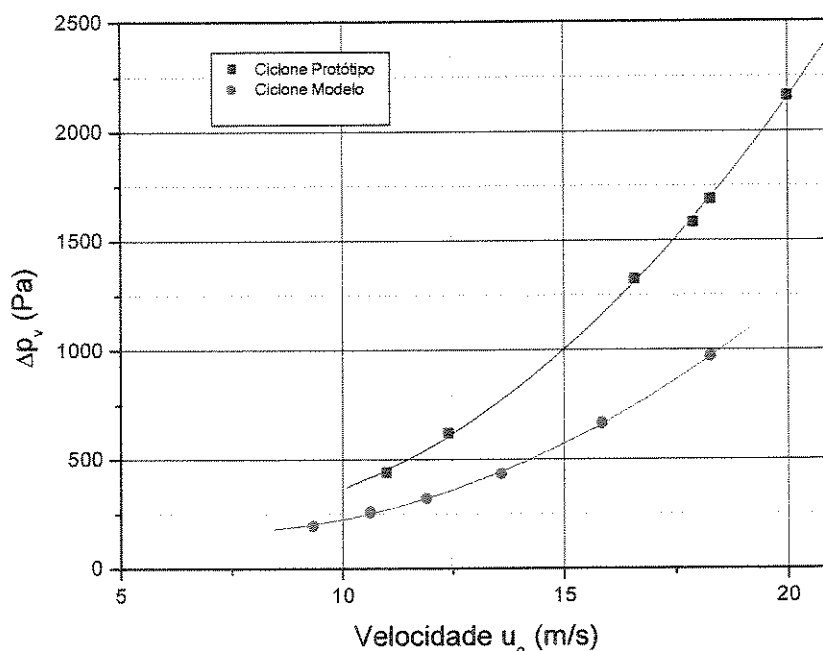


Figura 5.8 Variação da Perda de pressão com a velocidade
Escoamento sem partículas

As Figuras 5.9 e 5.10 mostram a variação da perda de pressão em função da concentração de sólidos na entrada dos ciclones protótipo e modelo, respectivamente, variando-se a velocidade do escoamento na entrada dos mesmos. Da mesma forma que no caso de escoamento sem partículas, observa-se que, quanto maior a velocidade, maior é a perda de pressão, independentemente da concentração de sólidos.

A comparação dos valores obtidos para ΔP_v e ΔP mostra que a introdução de partículas no escoamento causa uma redução da perda de pressão dos ciclones em relação ao escoamento sem partículas. Esse fato foi observado por vários pesquisadores, como, por exemplo, Shepherd e Lapple (1939), Kiegel (1968), Yuu et al. (1978), Beeckmans e Morin (1987), e Hoffmann et

al. (1992). A redução da perda de pressão foi menor para as menores velocidades, como já fora observado por Fassani e Goldstein (2000).

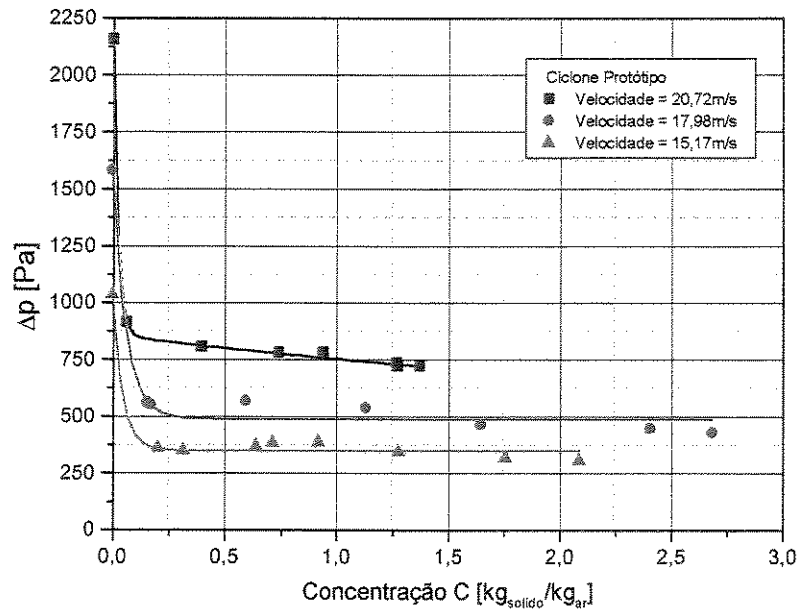


Figura 5.9 Variação da perda de pressão com a concentração de sólidos na entrada do ciclone – Ciclone Protótipo

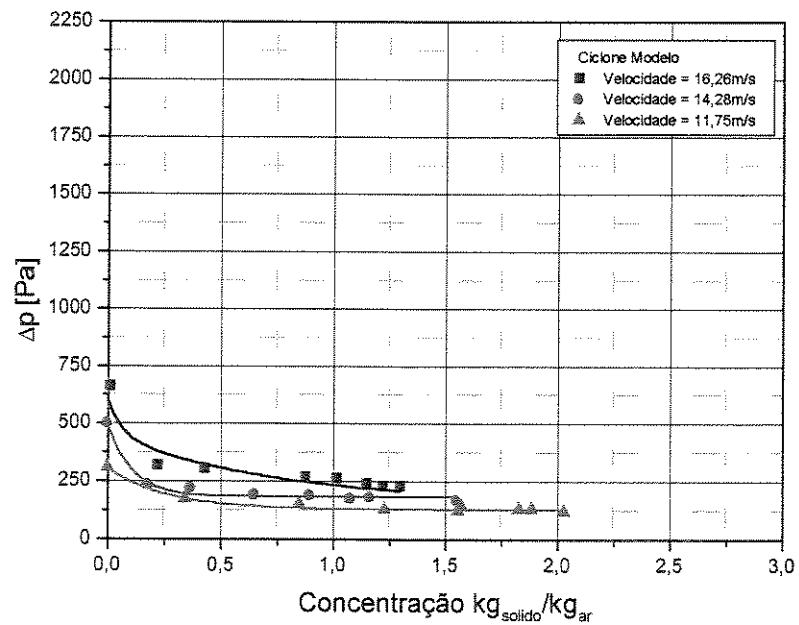


Figura 5.10 Variação da perda de pressão com a concentração de sólidos na entrada do ciclone – Ciclone Modelo

A presença de partículas no escoamento causa uma diminuição da velocidade tangencial do gás devido ao aumento do atrito nas paredes e a atenuação dos perfis de velocidade do gás. Esses dois fatores seriam responsáveis pela diminuição da perda de pressão observada.

Nas Figuras 5.11 e 5.12 as perdas de pressão nos ciclones utilizados no presente trabalho são comparadas com os valores previstos para as mesmas, pelas expressões de Comas et al. (1991) e Scheid e Massarani (1992), únicos autores na literatura aberta, juntamente com Hoffmann et al. (1992), que levaram em consideração a concentração de sólidos no cálculo da perda de pressão.

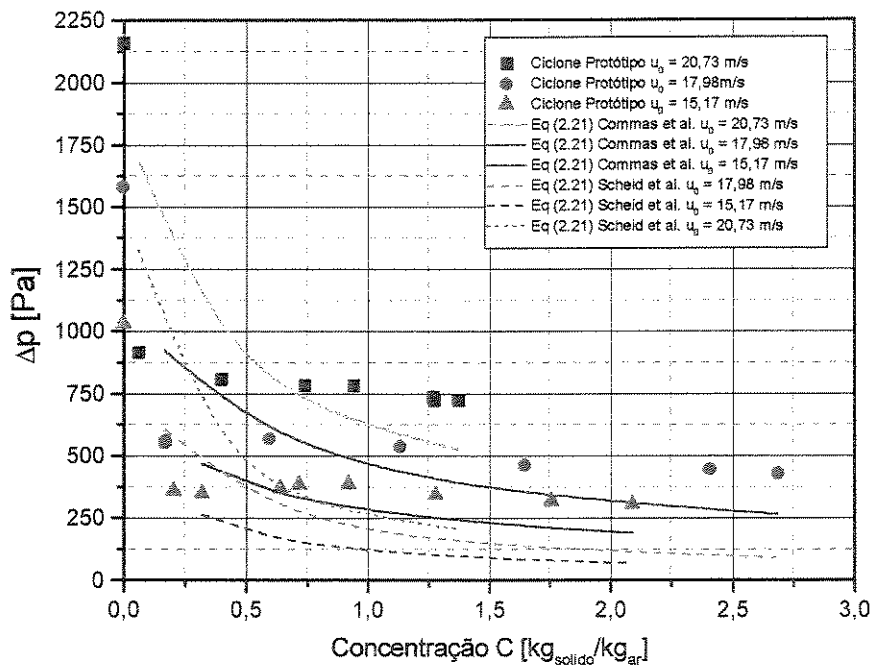


Figura 5.11 Comparação entre a perda de pressão real e a perda de pressão estimada
Ciclone Protótipo

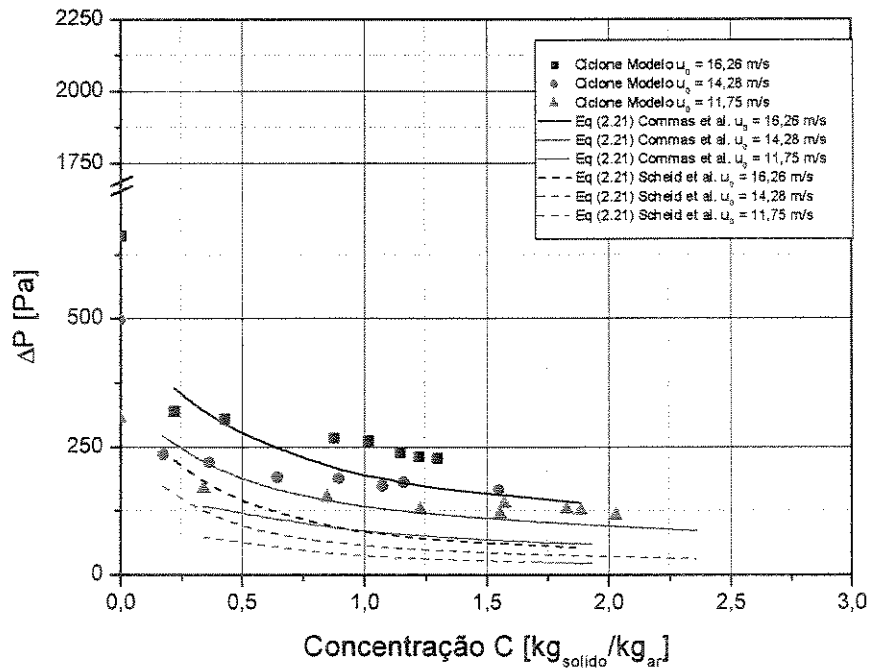


Figura 5.12 Comparação entre a perda de pressão real e a perda de pressão estimada
Ciclone Modelo

A comparação dos resultados mostra diferenças relativas da ordem de 38% para o ciclone protótipo e de 53% para o ciclone modelo pela expressão de Comas et al., com desvios ainda maiores pela expressão de Scheid e Massarani. A correlação de Hoffmann et al., por sua vez, fornece valores negativos de perda de pressão na maior parte da faixa de concentração dos testes realizados. Uma explicação provável para este fato é que as expressões em questão foram obtidas para baixas concentrações: 0,004 a 0,106 $\text{kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$ em Hoffmann, 0,041 a 0,490 $\text{kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$ em Comas et al., e 0,008 a 0,041 $\text{kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$ em Scheid e Massarani. A correlação de Comas et al. mostra uma maior concordância com os resultados do presente trabalho na faixa de concentrações em que foi originalmente obtida.

5.2.2 Análise da Semelhança Quanto à Perda de Pressão nos Ciclones Protótipo e Modelo

As Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 comparam a perda de pressão adimensional nos ciclones protótipo e modelo, $\Delta p / \rho_o u_o^2$, para cada velocidade estudada, em função da concentração de sólidos particulados na entrada dos ciclones.

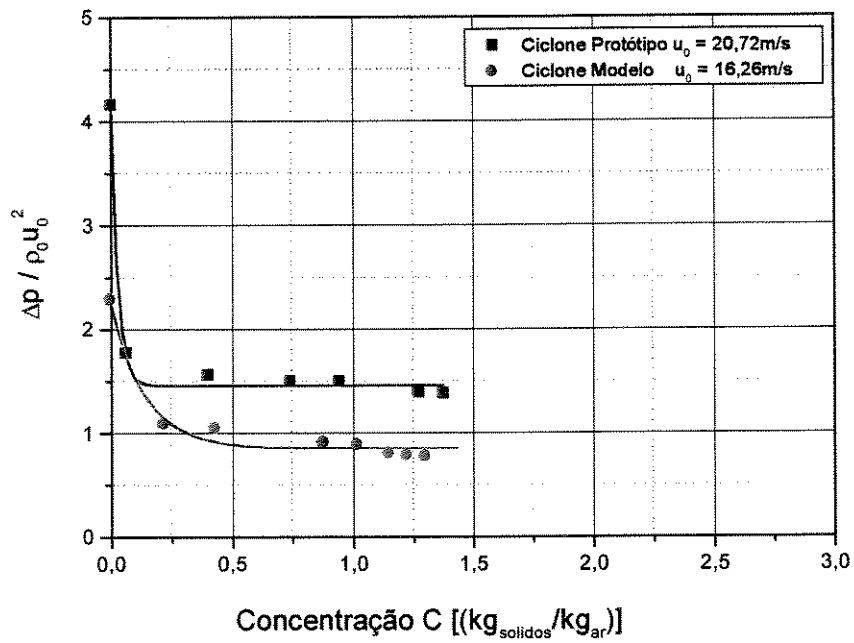


Figura 5.13 Perda de pressão adimensional para ciclones operando com velocidades altas

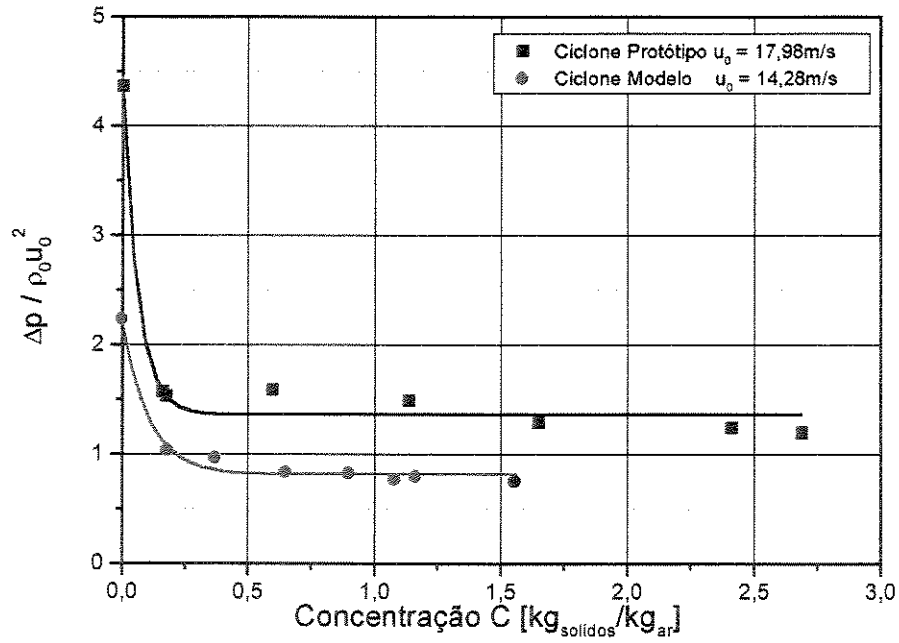


Figura 5.14 Perda de pressão adimensional para ciclones operando com velocidades intermediárias

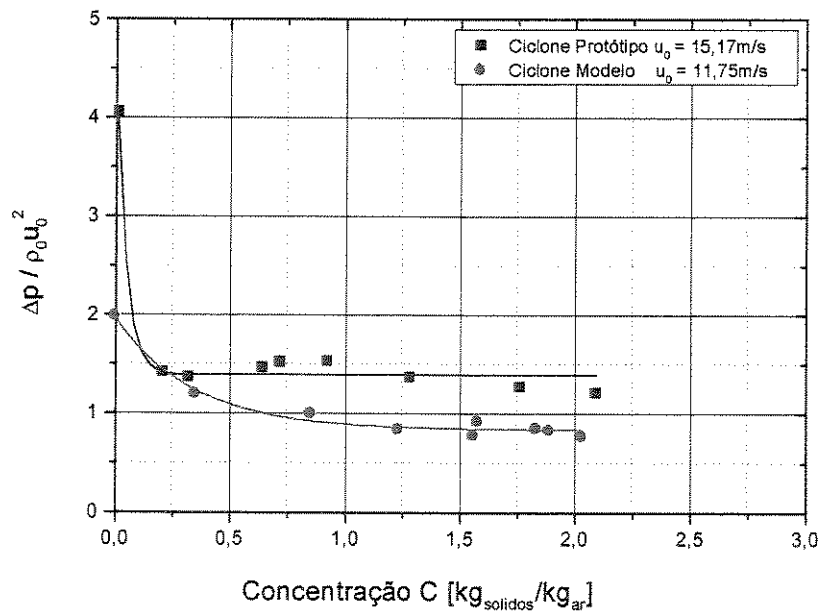


Figura 5.15 Perda de pressão adimensional para ciclones operando com velocidades baixas

A análise das figuras mostra que não houve superposição das curvas de perda de pressão adimensional obtidas para os ciclones protótipo e modelo, nas velocidades correspondentes, como seria de esperar se houvesse semelhança entre os ciclones. Aparentemente a concentração de sólidos não exerceu influência no sentido de delimitar uma faixa de escoamentos diluídos na qual a menor ocorrência de aglomeração de partículas favorecesse a aplicação das condições de semelhança propostas. O fato que os testes com o ciclone modelo tenham sido realizados com partículas um pouco menores do que determinado pelo fator de escala adotado neste trabalho talvez explique os resultados. Todavia ainda não há na literatura informações disponíveis relativas ao efeito do tamanho das partículas na perda de pressão em um ciclone. Uma segunda possível explicação para os resultados obtidos é que a velocidade do gás na entrada do ciclone, u_0 , talvez não seja a velocidade mais adequada para participar da adimensionalização da perda de pressão.

As Figuras 5.16, 5.17 e 5.18 apresentam uma segunda comparação da perda de pressão, adimensionalizada desta vez pela relação com a perda de pressão do escoamento sem partículas

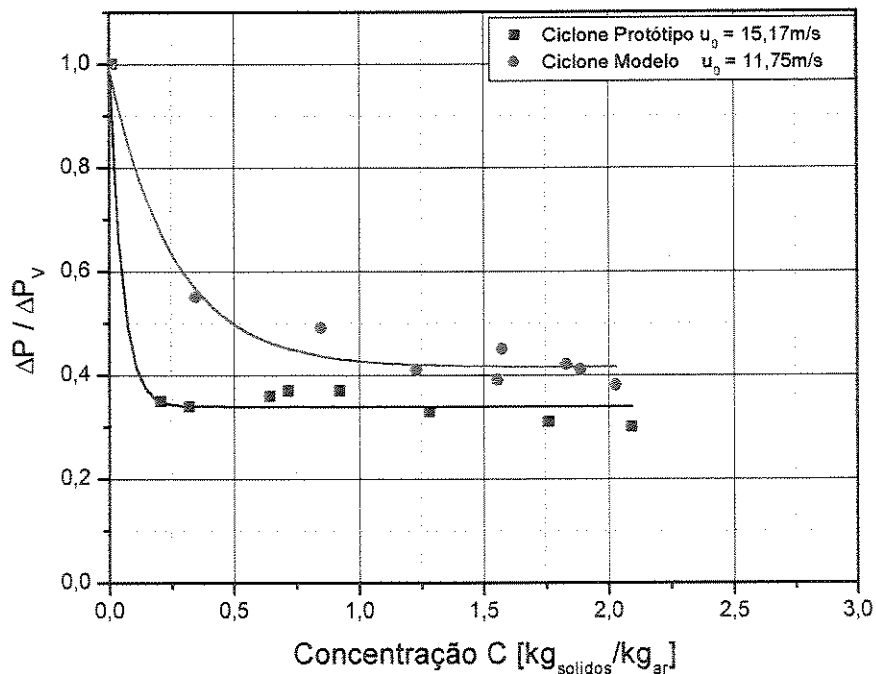


Fig. 5.16 Razão de perda de pressão para ciclones operando com velocidades baixas

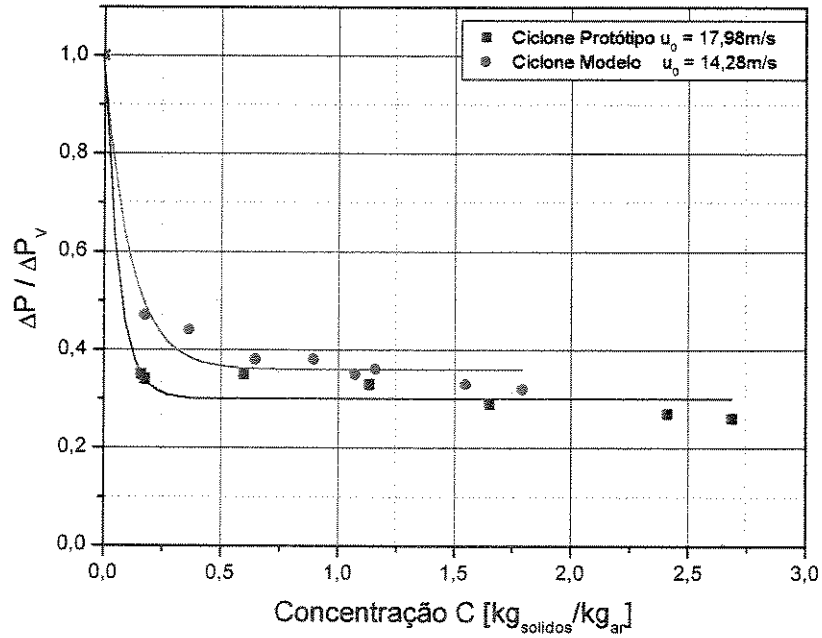


Figura 5.17 Razão de perda de pressão para ciclones operando com velocidades intermediárias

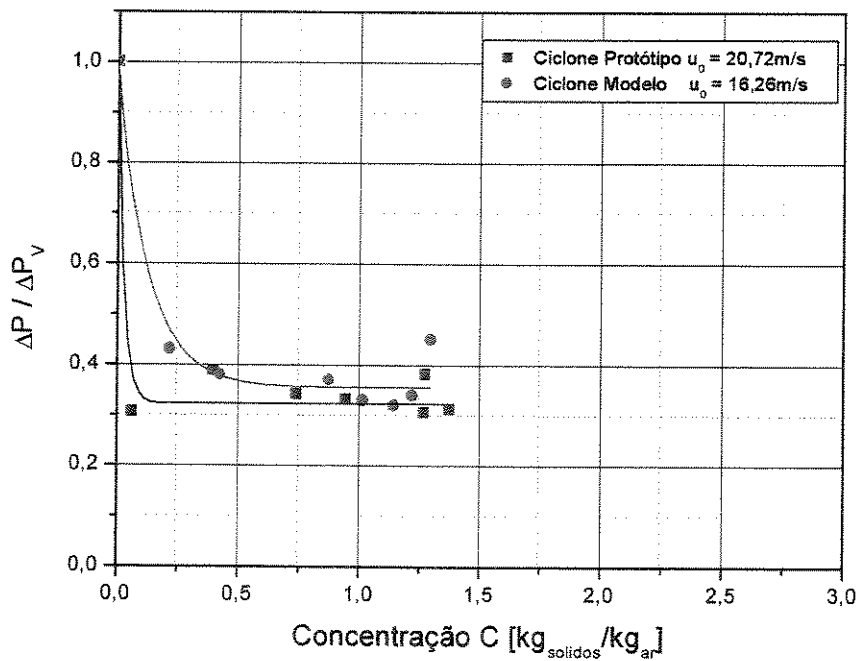


Figura 5.18 Razão de perda de pressão para ciclones operando com velocidades altas através dos ciclones protótipo e modelo.

É possível observar nas figuras que os valores da relação $\Delta p/\Delta p_v$ dos ciclones protótipo e modelo tendem a ser mais próximos entre si do que os da relação $\Delta p/\rho_o u_o^2$, uma aproximação que melhora com o aumento da velocidade do ar e não parece ser dependente da concentração de sólidos na entrada do ciclone. Ao que tudo indica, os estudos de semelhança de ciclones devem considerar o adimensional $\Delta p/\Delta p_v$ para efeito de determinação da perda de pressão no ciclone protótipo a partir de testes no ciclone modelo. Este procedimento parece eliminar a questão de encontrar uma velocidade u adequada para permitir o uso de uma relação do tipo $\Delta p/\rho_o u^2$.

5.3 Rendimento Fracional de Coleta

As Figuras 5.19 a 5.21 comparam a distribuição granulométrica adimensional do material particulado coletado experimentalmente no ciclone protótipo com a distribuição obtida experimentalmente no ciclone modelo, e na qual se aplicou o fator de escala $f=0,6$, adotado neste trabalho. Foram comparadas as distribuições resultantes de testes com os ciclones protótipo e modelo, realizados com aproximadamente a mesma concentração de sólidos na entrada do ciclone e com as velocidades correspondentes, nos quais se encontrou praticamente o mesmo rendimento de coleta. Como se pode observar, as distribuições granulométricas são bastante

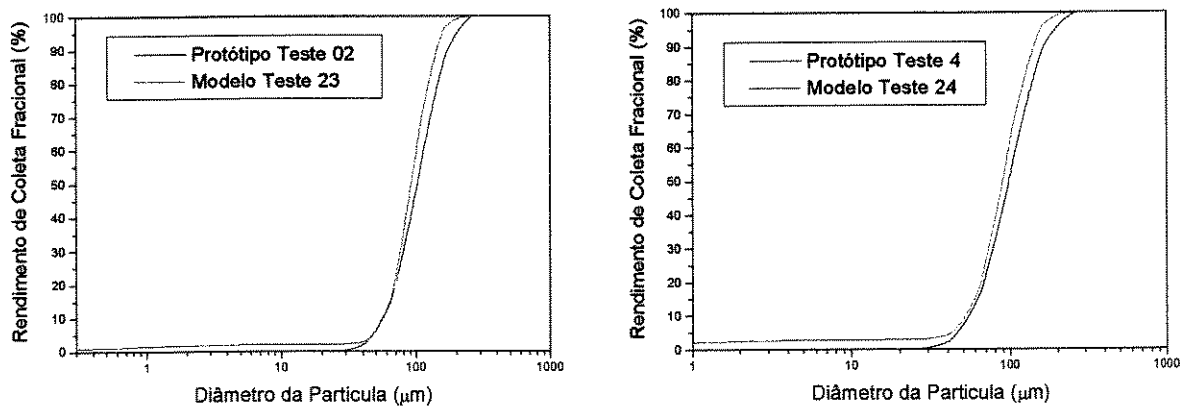


Fig. 5.19 Rendimento de Coleta Fracional. Testes com velocidades altas.

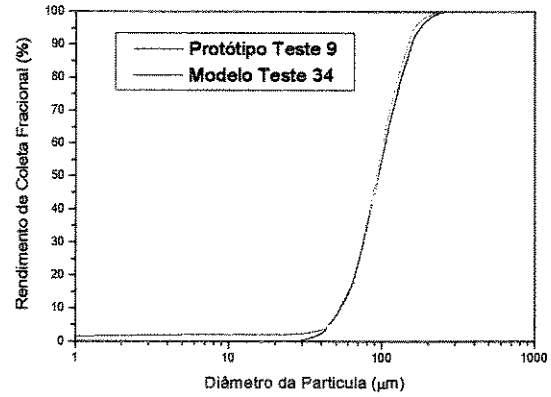
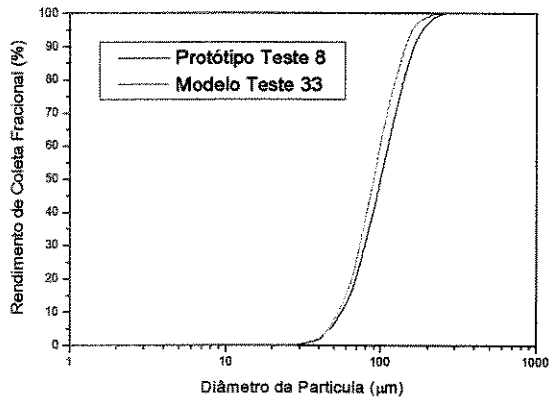


Fig. 5.20 Rendimento de Coleta Fracional. Testes com velocidades intermediárias.

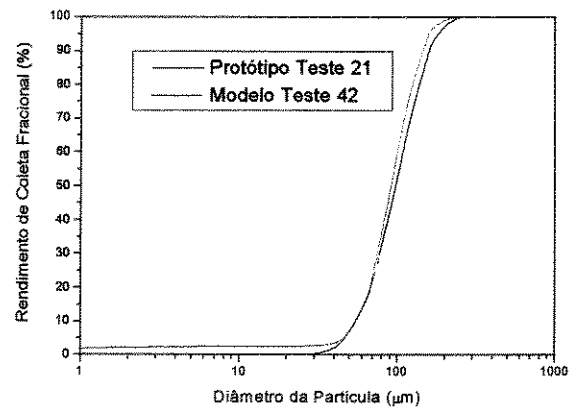
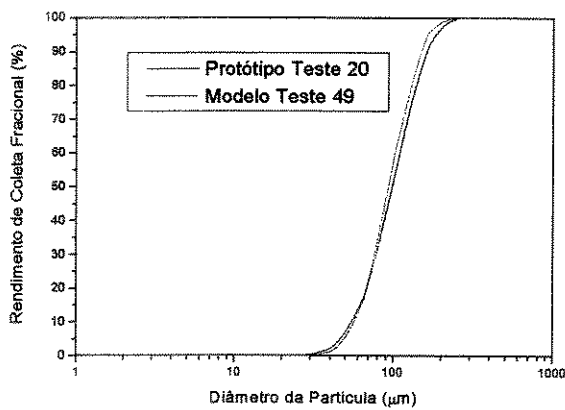


Fig. 5.21 Rendimento de Coleta Fracional. Testes com velocidades baixas.

próximas, o que mostra que as condições de semelhança propostas são aplicáveis satisfatoriamente para o cálculo do rendimento de coleta, em concentrações de sólidos na entrada abaixo de um valor limite, que cresce com a diminuição da velocidade de escoamento.

Capítulo 6

Conclusões e Recomendações

O emprego de modelos constitui uma solução prática para estudar a influência dos fatores operacionais no desempenho dos ciclones de porte industrial. A construção dos modelos deve obedecer a fatores de escala apropriados, que determinam a existência de semelhança entre o modelo e a unidade industrial – protótipo. Modelo e protótipo apresentarão comportamento fluidodinâmico semelhante se forem geometricamente semelhantes e se os valores dos números adimensionais correspondentes forem iguais.

Um conjunto de números adimensionais representativo dos fenômenos envolvidos no escoamento gás-sólidos em ciclones deve levar em conta as forças interparticulares, como a de van der Waals e a eletrostática. Sabe-se que essas forças são mais significativas quando se trabalha com partículas de tamanho pequeno e em escoamentos com altas concentrações de sólidos. A dificuldade para obedecer às condições de semelhança levando-as em conta seria, no entanto, muito grande. Assim sendo, desconsiderou-se a eventual participação das forças interparticulares na determinação do grupo de números adimensionais a partir dos quais se gerou as leis de escala. Estas leis simplificadas foram aplicadas para a construção de dois ciclones, modelo e protótipo, em escala, que foram testados para determinação da faixa de aplicação da simplificação introduzida. Adicionalmente abriu-se mão de operar com uma semelhança dinâmica completa entre modelo e protótipo, tendo-se a chamada Semelhança Incompleta, pois, por motivos práticos, operou-se o modelo com ar em condições ambientais, o que equivale a desprezar as forças viscosas em relação às forças de inércia, subtraindo-se o requisito da

igualdade do número de Reynolds para a operação do protótipo e do modelo do grupo de relações de escala.

O presente trabalho mostrou experimentalmente a existência de concentrações a partir das quais a simplificação proposta perde a validade, implicando que as forças desconsideradas são de magnitude tal que não podem deixar de ser consideradas na geração dos adimensionais que comandam as condições de escalonamento. Verificou-se que, abaixo destas concentrações limite houve semelhança quanto ao rendimento, como se constatou pela existência de igualdade dos rendimentos de coleta dos ciclones modelo e protótipo, quando em condições operacionais de velocidades correspondentes e com a mesma concentração de sólidos na entrada dos ciclones. Verificou-se também que a perda de pressão adimensional $\Delta p/\Delta p_v$ se mostrou mais adequada do que a razão $\Delta p/\rho_o u_o^2$ para definição da semelhança quanto à perda de pressão, possivelmente porque u_o não seja a velocidade mais adequada a ser utilizada na adimensionalização da perda de pressão.

Foram utilizados dois ciclones do tipo Stairmand de alta eficiência, um Protótipo com diâmetro de barril igual à 0,2 m e um ciclone Modelo com diâmetro de barril igual à 0,12 m.

Foram utilizadas partículas de FCC, um catalisador utilizado no processo de craqueamento do petróleo.

As seguintes conclusões podem ser inferidas dos resultados apresentados:

6.1 Rendimento de Coleta

Observou-se que, de modo geral, até a concentração de sólidos em torno de $1,0 \text{ kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$, a semelhança fluidodinâmica entre os ciclones Modelo e Protótipo foi verificada. A partir deste ponto começou a ocorrer distanciamento entre as curvas de rendimento de coleta entre o ciclone protótipo e o ciclone modelo, que tornou-se mais evidente para as faixas de velocidades mais altas.

Uma interpretação possível para estas divergências seria o rearraste de partículas maiores ou aglomerados no ciclone modelo, a partir de uma concentração de sólidos igual à $1,0 \text{ kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$, devido ao seu pequeno diâmetro de barril e as velocidades de operação relativamente altas. Segundo a literatura aberta, o tamanho das partículas de sólidos, a velocidade do gás na entrada do ciclone e o diâmetro de barril do ciclone tem influência direta sobre o rearraste de sólidos e com isso diminui o rendimento de coleta. No entanto, quando os ciclones protótipo e modelo operaram nas velocidades mais baixas de $15,17 \text{ m/s}$ e $11,75 \text{ m/s}$, respectivamente, a semelhança quanto ao rendimento de coleta ocorreu em toda a faixa de concentração estudada no presente trabalho. Isto pode ser atribuído ao fato do re-arraste ser menos significativo nesta velocidade utilizada no ciclone modelo, mesmo que o aumento da concentração tenha propiciado a formação de aglomerado de partículas.

Com isso podemos concluir que para concentrações acima de $0,75 \text{ kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$ a velocidade do gás na entrada do ciclone é, portanto, um fator decisivo para que se obtenha semelhança entre os ciclones, visto que, quanto maior a velocidade, mais significativo é o afastamento entre as curvas de rendimento de coleta, para os ciclones aqui estudados.

No presente trabalho, a comparação do rendimento de coleta obtido nos testes realizados com os métodos de previsão para rendimento de coleta propostos na literatura aberta, mostrou que os métodos propostos na literatura não são adequados, principalmente nas maiores concentrações estudadas, e em ciclones menores operando em altas velocidades, nos quais as partículas aglomeradas saltam e com isso são rearrastadas.

6.2 Rendimento Fracional de Coleta

Foi possível observar que, o rendimento fracional de coleta para os ciclones Protótipo e Modelo ficaram bastante próximos, o que mostra que as condições de semelhança propostas são aplicáveis satisfatoriamente para o cálculo do rendimento de coleta, em concentrações de sólidos na entrada do ciclone abaixo de um valor limite, que cresce com a diminuição da velocidade de escoamento.

6.3 Perda de Pressão

A perda de pressão para o escoamento de ar sem partículas aumentou de forma aproximadamente parabólica com o aumento da velocidade do ar na entrada do ciclone, conforme foi mostrado na Figura 5.8.

Da mesma forma que no caso de escoamento sem partículas, foi observado que, conforme as Figuras 5.9 e 5.10, quanto maior a velocidade, maior é a perda de pressão, independentemente da concentração de sólidos.

A comparação entre os valores obtidos de ΔP e ΔP_v , mostra que a introdução de partículas no escoamento causou a redução da perda de pressão do ciclone em relação ao escoamento sem partículas, em toda a faixa de concentração estudada. Isto pode ser explicado pois a presença de partículas no escoamento causa uma diminuição da velocidade tangencial do gás devido ao aumento do atrito nas paredes e a atenuação dos perfis de velocidade do gás.

Comparando os resultados obtidos para perda de pressão no presente trabalho com os métodos para cálculo de perda de pressão propostos na literatura, observou-se que a correlação de Commas et al. obteve maior concordância que as demais correlações, Scheid et al. e Hoffman et al., na faixa de concentração de 0,008 à 0,041 $kg_{sólido}/kg_{ar}$.

Quanto à comparação entre as perdas de pressão adimensionais para as curvas de $\Delta p / \rho_o u_o^2$ para o ciclone protótipo e modelo não houve superposição, nas velocidades correspondentes como se esperava, caso houvesse semelhança entre os ciclones. O fato que os testes com o ciclone modelo tenham sido realizados com partículas um pouco menores do que o determinado pelo fator de escala adotado neste trabalho talvez explique os resultados. Todavia ainda não há na literatura informações disponíveis relativas ao efeito do tamanho das partículas na perda de pressão em um ciclone. Uma segunda possível explicação para os resultados obtidos é que a velocidade do gás na entrada do ciclone, u_o , talvez não seja a velocidade mais adequada para participar da adimensionalização da perda de pressão.

Porém foi possível observar que os valores da relação $\Delta p/\Delta p_v$, dos ciclones protótipo e modelo tendem a ser mais próximos entre si do que os da relação $\Delta p/\rho_o u_o^2$, uma aproximação que melhora com o aumento da velocidade do ar e não parece ser dependente da concentração de sólidos na entrada do ciclone. Ao que tudo indica, os estudos de semelhança de ciclones devem considerar o adimensional $\Delta p/\Delta p_v$ para efeito de determinação da perda de pressão no ciclone protótipo a partir de testes no ciclone modelo. Este procedimento parece eliminar a questão de encontrar uma velocidade u adequada para permitir o uso de uma relação do tipo $\Delta p/\rho_o u^2$.

Com base nos resultados obtidos, são dadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Efeito da granulometria na perda de pressão;
- Pesquisa de uma velocidade mais adequada para a adimensionalização da perda de pressão;
- Utilização de um fator de escala maior, para que seja observada a influência do fator de escala na semelhança entre ciclones;
- Desenvolvimento de métodos para estimar o rendimento de coleta em altas concentrações.

Referências Bibliográficas

- . Abrahamson, J., Martin, C. G. e Wong, K. K., The physical mechanisms of dust collection in a cyclone, Trans. I. Chem. Eng., v.56, p.168-177, 1978.
- . Alexander, R. M., Fundamentals of cyclone design and operation, Proc. Australia Inst. Min. Metal, New Series, n.152-153, p. 203-228, 1949.
- . Ayers, W. H., Boysan, F., Swithenbank, J. e Ewan, B. C. R., Theoretical modelling of cyclone performance, Filtration and Separation, p.39-43, Jan/Feb 1985.
- . Barth, W., Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations, Brennstoff -Wärme-Kraft, v.8, p. 1-9, 1956. Apud Leith, D., Handbook of Powder Science and Technology, Reading, USA, Fayed, M. E. e Otten, L., Cap. 16: Cyclones, 1984.
- . Beeckmans, J. M. e Morin, B., The effect of particulate solids on pressure drop across a cyclone, powder Technology, v. 52, p. 227-232, 1987.
- . Bohnet, M., Design Principles of Gas/Solids Injectors, Cap. 18 de Cheremisinoff, N. P., Encyclopedia of Fluid Mechanics - Gas-Solids Flows, Gulf Publ. Co., v. 4, p. 539-562, 1986.
- . Boothroyd, R. G., Flowing Gas-Solids Suspensions, Chapman and Hall, Ingl., 1971.

- . Boysan, F., Ayers, W. H. e Swithenbank, J. A fundamental mathematical modelling approach to cyclone design. *Trans. Inst. Chem. Engrs*, v.60, p.222-230, 1982.
- . Boysan, F.; Swithenbank, J.; Ayers, W. H. Mathematical modelling of gas-particle flows in cyclone separators, Cap. 42: *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, editor: N. P. Cheremisinof, Gulf Publ. Co., v.4, 1986.
- . Buckingham, E., On Physically similar systems, *Phys. Rev.*, v.4, p. 345-376, 1914.
- . Büttner, H.e Ebert, F. Particle collection in small laboratory cyclones as a basis for the design of large-scale cyclones, *Chem. Eng. Technol.*, v.12, p.295-301, 1989.
- . Büttner, H., Dimensionless representation of particle separation characteristic of cyclones, *J. Aerosol Sci.*, v. 30, n. 10, p. 1291-1302, 1999.
- . Casal, J. e Martinez-Benet, J. M., A better way to calculate cyclone pressure drop, *Chemical Engineering*, p. 99-100, 1983.
- . Clift, R.; Ghadiri, M.; Hoffman, A. C. A critique of two models for cyclone performance. *AIChE Journal*, v.37, n.2, p.285-289, 1991.
- . Comas, M., Comas, J., Chetrit, C. e Casal, J., Cyclone pressure drop and efficiency with and without an inlet vane, *Powder Technology*, v.66, p.143-148, 1991.
- . Dieck, R. H., Measurement uncertainty models, *ISA Transactions*, v. 36, n.1, p. 29-35, 1997.
- . Dietz, P. W., Collection efficiency of cyclones separators, *AIChE Journal*, v.27, n.6, p.888-892, 1981.
- . Fassani, L. F., e Goldstein, L. Jr, A study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure drop and collection efficiency, *Powder Technology*, v. 107, p. 60-65, 2000.

- . First, M. W., Sc.D. thesis, Harvard University, Boston, USA, 1950. Apud Leith, D., Handbook of Powder Science and Technology, Reading, USA, Fayed, M. E. e Otten, L., Cap. 16: Cyclones, 1984.
- . Fox, R. W. e McDonald, A. T., Introdução à Mecânica dos Fluidos, Ed. Guanabara, R. J., 1994
- . Hyre, M. R., Comunicação pessoal, jun 1997.
- . Hamaker, H. C. The London-Van der Waals attraction between spherical particles. *Physica*, v.4, n.10, p.1058-1072, 1937.
- . Hoffmann, A. C., Arends, H. e Sie, H., An experimental investigation elucidating the nature of the effect of solids loading on cyclone performance, *Filtration and Separation*, p. 188-193, 1991.
- . Hoffmann, A.C., van Santen, A., Allen, W. K. e Clift, R., Effects of geometry and solid loading on the performance of gas cyclones, *Powder Technology*, v.70, p. 83-91, 1992.
- . Iozia, D. L. e Leith, D., Effect of cyclone dimensions on gas flow pattern and collection efficiency, *Aerosol Science and Technology*, v.10, p. 491-500, 1989.
- . Kalen, B. e Zenz, F.A., *AIChE Symposium Series.*, v.70, n.137, p.388, 1974, Apud Koch e Licht, 1997.
- . Kiegel, E., *Aufbereitungs Technik*, v. 9, p. 1. Apud Yuu et al., 1978.
- . Koch, W. H. e Licht, W., New design approach boosts cyclone efficiency, *Chem. Eng.*, v.84, p. 80-88, 1977.
- . Lapple, C. E., Processes use many collector types, *Chemical Engineering*, p.144-151, May 1951.

- . Leith, D. e Licht, W., The collection efficiency of cyclone type particle collectors – A new theoretical approach, AIChE Symp. Ser., n.126, p.196-206, 1972.
- . Li, E. e Wang, Y. A new collection theory of cyclone separators, AIChE Journal, v.35, n.4, p. 666-669, 1989.
- . ter Linden, A. J., Investigations into cyclone dust collectors, Inst. Mech. Eng. J., v. 160, p. 233-251, 1949.
- . Minier, J. P., Simonin, O. e Gabillard, M., Numerical modelling of cyclone separators, Proc. 11th International Conference on Fluidized Bed Combustion, v.3, p. 1251-1259, 1991.
- . Mori, Y., Suganuma, A. e Tanaka, S., On collection efficiency of gas cyclone in coarse particle range, J. Chem. Eng. Of Japan, p. 82-86. 1968.
- . Montgomery, D. J., Solid State Phys., v.9, p.139-97, 1959 Apud Soo,1964.
- . Mothes, H. e Löffler, F., A model for particle separation in cyclones, Chem. Eng. Process., v.18, p. 323-331, 1984.
- . Ogawa, A. e Sugiyama, K., Application of mechanical similarity laws to the collection efficiencies of geometrically similar type of uni-flow cyclone dust collectors, J. of Thermal Science, v.2, n.2, p. 87-97, 1993.
- . Ontko, J. S., Cyclone separator scaling revisited, Powder Technology, v.87, p. 93-104, 1996.
- . Parida, A. e Chand, P., Turbulent swirl with gas-solid flow in cyclone, Chemical Engineering Science, v.35, p. 949-954, 1980.
- . Patterson, P. A. e Munz, R. J., Cyclone collection efficiencies at very high temperatures, Canadian J. Chem. Eng., v. 67, p. 321-328, 1989.

- . PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A., Informação Pessoal Recebida, 2000.
- . Rietema, K., Cottar, E. J. E. e Piepers, H. W., The effect of interparticle forces on stability of gas-fluidized beds-II. Theoretical derivation of bed elasticity on the basis of Van der Waals forces between powder particles, *Chemical Engineering Science*, v.48, n.9, p.1687-1697, 1993.
- . Scheid, M. C. e Massarani, G., Influência da concentração de sólidos e de sangrias no desempenho de ciclones a gás, *Anais XX Encontro Nacional Sobre Meios Porosos, UFSCar*, 10 p., Oct. 1992.
- . Schubert, H., Principles of agglomeration, *International Chemical Engineering*, v.21, n.3, p. 363-377, 1981.
- . Seville, J. P. K., Willet, C. D. e Knight, P. C., Interparticle forces in fluidization: a review, *Powder Technology*, v. 113, p. 261-268, 2000.
- . Shepherd, C. B. e Lapple, C. E., Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors – Cyclone without inlet vane, *Industrial and Engineering Chemistry*, v.31, n.8, p. 972-983, 1939.
- . Shepherd, C. B. e Lapple, C. E., Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors, *Industrial and Engineering Chemistry*, v.32, n.9, p.1246-1248, 1940.
- . Soo, S. L., Effect of electrification on the dynamics of a particulate system, *I&EC Fundamentals*, v.3, n.1, p. 75-80, 1964.
- . Stairmand, C. J., Pressure drop in cyclone separators, *Engineering*, v.168, p. 409, 1949. Apud Stairmand, 1951.
- . Stairmand, C. J., The design and performance of cyclone separators, *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, v.29, p. 356-373, 1951.

- . Tawari, T.D. e Zenz, F. A., Evaluating cyclone efficiencies from stream compositions, *Chemical Engineering*, p. 69-73, April 1984
- . Tuzla, K. e Chen, J., Performance of a cyclone under high solid loading, *AIChE Symposium Series*, v. 3, n.289, p.130-136, 1992.
- . Visser, J., An invited review: Van der Waals and other cohesive forces affecting powder fluidization, *Powder Technology*, v. 58, p. 1-10,1989.
- . Yoshida, H., Saeki, T., Hashimoto, K. e Fujioka, T., Size classification of submicron powder by air cyclone and three-dimensional analysis, *J. Chem. Engineering of Japan*, v.24, n.5, p. 640-647, 1991.
- . Yuu, S., Jotaki, T., Tomita, Y. e Yoshida, K., The reduction of pressure drop due to dust loading in a conventional cyclone, *Chem. Eng. Science*, v. 33, p. 1573-1580, 1978.
- . Zenz, F. A. *Manual on Disposal of Refinery Waste: Volume on Atmospheric Emissions*, Cap. 11: Cyclone Separators, API Publ. 931, 1975.
- . Zhou, L. X. e Soo, S. L., Gas-solid flow and collection of solids in a cyclone separator, *Powder Technology*, v.63, p. 45-63, 1990.

Apêndice A

Rotina de Aquisição de Dados da Perda de Pressão no Ciclone

Como já foi dito anteriormente, a placa de aquisição de dados opera como um voltímetro convertendo sinais de tensão em binários. Sendo assim, são necessárias funções de conversão dos sinais elétricos convertidos pela placa em valores das grandezas detectadas no transmissor de pressão.

A seguir são apresentadas as funções de conversão dos sinais entre os equipamentos.

Conversor corrente-tensão

Como foi apresentado no item 4.4, os sinais relacionados à grandeza proveniente do transmissor de pressão é uma corrente contínua. Antes de serem aplicados à entrada da placa devem ser convertidos em tensão, esta tarefa é realizada por um conversor corrente-tensão que a converte de 4 a 20 mA para 0 a 5 V DC.

A Figura A.1 apresenta o gráfico da tensão contínua V versus a corrente contínua I . A função de conversão deste equipamento é a própria equação da reta dada por:

$$V = 0,3125 I - 1,25 \quad (\text{A.1})$$

Invertendo para I em função de V,

$$I = 3,2 V + 4,0 \quad (\text{A.2})$$

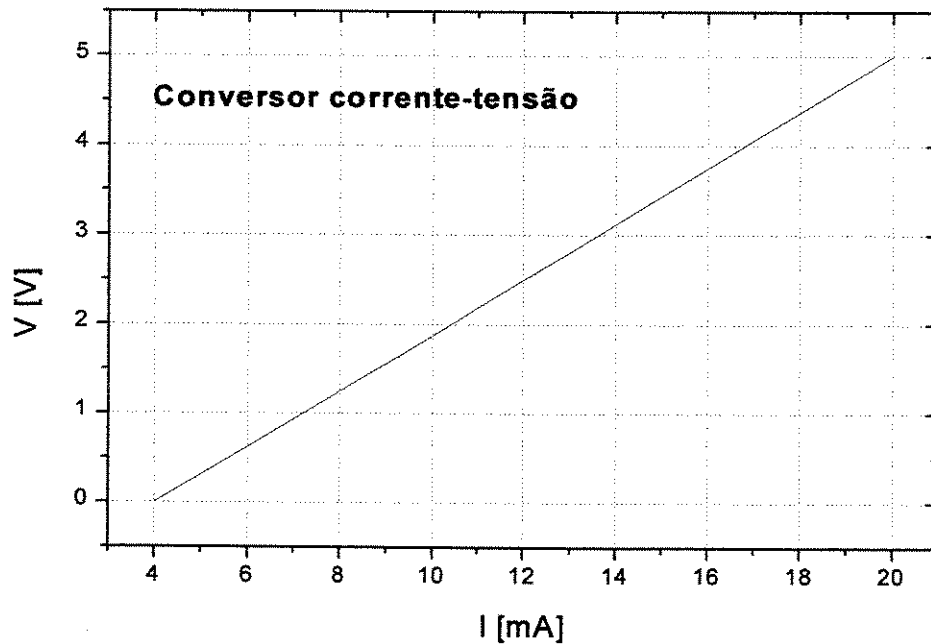


Figura A.1 - Função de conversão do conversor corrente-tensão

Transmissor de pressão SMAR LD 301/D1 - TR 01

Este medidor foi utilizado para realizar a medida da queda de pressão entre a entrada e a saída do ciclone, como discutido no item 4.2.1. Converte sinais de pressão na faixa ajustada de 0 a 5000 Pa em sinais de corrente de 4 a 20 mA. A Figura A.2 mostra o gráfico da função de conversão deste medidor, pressão diferencial Δp versus a corrente I.

A equação da reta é dada por

$$\Delta p = 312,5 I - 1250 \quad (\text{A.3})$$

Substituindo a Eq. A.2 da corrente,

$$\Delta p = 1000,0 V \quad (A.4)$$

A Eq. A.4 é a função de transferência deste medidor junto à placa de aquisição de dados.

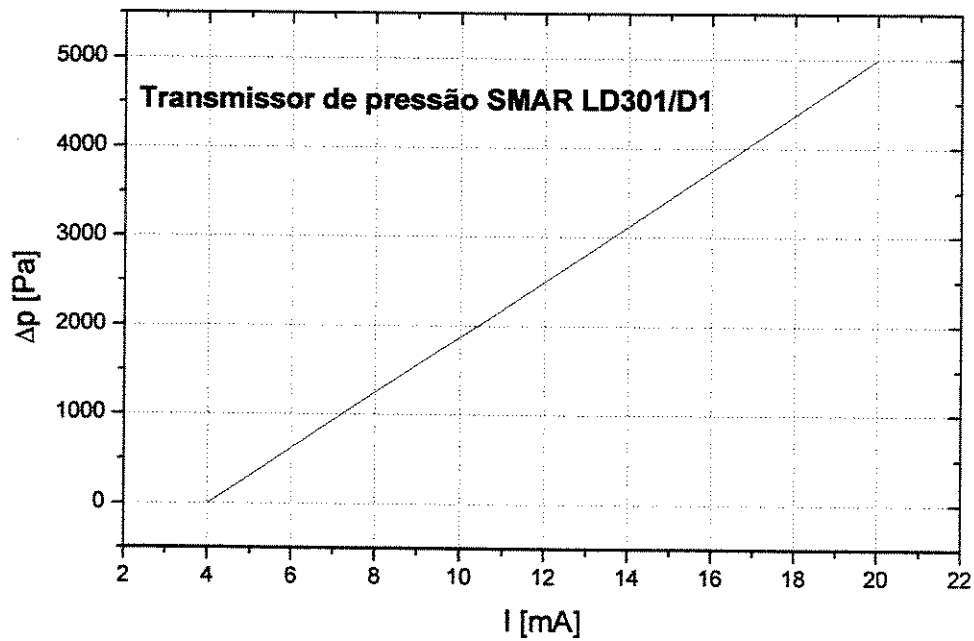


Figura A.2 - Função de conversão do transmissor de pressão diferencial

Assim através da equação (A.4) a rotina de aquisição de dados transforma os sinais de tensão da placa de aquisição de dados em sinais de pressão, Pa, que são mostrados na tela do computador PC 01.

Apêndice B

Análise da Incerteza Experimental

Os experimentos foram realizados cuidadosamente, os instrumentos calibrados e a montagem inspecionada periodicamente. Testes preliminares foram conduzidos para avaliar o desempenho do sistema e para identificar e eliminar fontes de erros sistemáticos. Por essa razão, é esperado que os erros sistemáticos, se não eliminados, tenham sido reduzidos a um mínimo.

Uma estimativa dos erros randômicos máximos esperados no rendimento de coleta, na perda de pressão, na concentração e velocidade é apresentada neste apêndice.

Para avaliar as incertezas de um resultado obtido a partir da composição de medidas primárias, foi utilizado o procedimento descrito por Holman (1994). Supondo que um resultado R seja função das variáveis independentes $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$:

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (\text{B.1})$$

e que $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$, sejam as incertezas nas variáveis independentes, a incerteza w_R no resultado é dada como:

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{B.2})$$

As incertezas dos resultados apresentados no presente trabalho foram avaliadas utilizando a Eq. (B.2).

- Rendimento de Coleta

O rendimento de coleta é definido, na Eq. 4.4, por :

$$\eta = \frac{M_{coletada}}{M_{coletada} + M_{saída}} \quad (B.3)$$

As massas foram medidas na balança digital da marca OHAUS™, com capacidade para 12.000 g e precisão de $\pm 0,1$ g.

Para cada teste realizado foi feita a pesagem da massa coletada pelo ciclone no silo SI 02 e da massa coletada no Filtro de Pano FI 01.

A incerteza na determinação de η foi avaliada, aplicando a Eq.(B.2), por:

$$w_{\eta} = \left[\left(-\frac{M_{coletada}}{(M_{coletada} + M_{Saída})^2} w_{M_{saída}} \right)^2 + \left(\frac{M_{Saída}}{(M_{coletada} + M_{Saída})^2} w_{M_{coletada}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (B.4)$$

A maior incerteza para o ciclone Protótipo ocorreu no Teste 22, e foi $w_{\eta}=0,00098$ ou 0,098 por cento; para o ciclone Modelo a maior incerteza ocorreu no Teste 42, $w_{\eta}=0,00356$ ou 0,356 por cento, como mostrado a seguir:

$$w_{\eta} = \left[\left(-\frac{509,3}{(509,3+0,2)^2} \left(\frac{0,1}{0,2} \right) \right)^2 + \left(\frac{0,2}{(509,3+0,2)^2} \left(\frac{0,1}{509,3} \right) \right)^2 \right]^{1/2} = 0,00098$$

$$w_{\eta} = \left[\left(\frac{280,6}{(280,6+0,1)^2} \left(\frac{0,1}{0,1} \right) \right)^2 + \left(\frac{0,1}{(280,6+0,1)^2} \left(\frac{0,1}{280,6} \right) \right)^2 \right]^{1/2} = 0,00356$$

- Descarga de Ar

A descarga de ar foi avaliada pela Eq. (4.3). A incerteza na determinação da descarga de ar, w_m , foi determinada utilizando-se a norma ISO 5168, “Cálculo da incerteza de uma medição de vazão”, e é calculada conforme a equação:

$$w_m = \left[\left(\frac{w_{\alpha}}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{w_{\varepsilon}}{\varepsilon} \right)^2 + 4 \left(\frac{\beta^4}{\alpha} \right)^2 \times \left(\frac{w_{D_t}}{D_t} \right)^2 + 4 \left(1 + \frac{\beta^4}{\alpha} \right)^2 \times \left(\frac{w_{d_{po}}}{d_{po}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{w_{\Delta P_{po}}}{\Delta P_{po}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{w_{\rho}}{\rho} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (B.5)$$

onde:

$$\alpha = C_D \cdot E$$

em que:

. C_D e E são dados pelas equações 4.2 e 4.3; e

. β é igual ao diâmetro do orifício da placa dividido pelo diâmetro da tubulação;

Assim a maior incerteza w_m encontrada para os testes realizados foi da ordem de 2,9 por cento, como mostrado a seguir:

$$\beta = \frac{d_{po}}{D_t} = \frac{43}{105,9} = 0,406$$

$$C_D = 0,5959 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,1840\beta^8 + 0,0029\beta^{2,5} \left[\frac{10^6}{Re_{D_t}} \right]^{0,75} \quad (B.6)$$

Dai:

$$C_D = 0,5959 + 0,0312 \times 0,406^{2,1} - 0,184 \times 0,406^8 + 0,0029 \times 0,406^{2,5} = 0,601$$

onde o termo $\left[\frac{10^6}{Re_{D_t}} \right]^{0,75}$ da equação foi desprezado.

$$E = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} = \frac{1}{\sqrt{(1-0,406^4)}} = 1,014$$

$$\frac{w_\alpha}{\alpha} = 0,027 \quad (\text{dado pela norma ISO 5168})$$

$$\frac{w_\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{4\Delta P_{po}}{P_{po}} \% = \frac{4}{100} \left(\frac{455}{131 \times 13,607} \right) = 1,02 \times 10^{-2} \quad (\text{dado pela norma ISO 5168})$$

$$4 \left(\frac{\beta^4}{\alpha} \right)^2 = 4 \left(\frac{0,406^4}{0,609} \right)^2 = 0,008$$

$$\left(\frac{w_{D_t}}{D_t} \right)^2 = \left(\frac{1,0 \times 10^{-5}}{105,9} \right)^2 = 8,917 \times 10^{-15}$$

$$4\left(1 + \frac{\beta^4}{\alpha}\right)^2 = 4\left(1 + \frac{0,406^4}{0,609}\right)^2 = 4,365$$

$$\left(\frac{w_{d_{po}}}{d_{po}}\right)^2 = \left(\frac{1,0 \times 10^{-5}}{43}\right)^2 = 5,408 \times 10^{-14}$$

$$\frac{1}{4}\left(\frac{w_{\Delta P_{po}}}{\Delta P_{po}}\right)^2 = \frac{1}{4}\left(\frac{1}{455}\right)^2 = 1,208 \times 10^{-6}$$

$$\frac{1}{4}\left(\frac{w_{\rho}}{\rho}\right)^2 = \frac{1}{4}\left[\left(\frac{w_{P_{po}}}{P_{po}}\right)^2 + \left(\frac{w_{T_{po}}}{T_{po}}\right)^2\right] = \frac{1}{4}\left[\left(\frac{0,5}{131}\right)^2 + (0,0075)^2\right] = 1,77 \times 10^{-5}$$

Substituindo em (B5):

$$w_m = \left[(0,027)^2 + (1,02 \times 10^{-2})^2 + 0,008 \times 8,917 \times 10^{-15} + 4,635 \times 5,408 \times 10^{-14} + 1,208 \times 10^{-6} + 1,77 \times 10^{-5} \right]^{1/2}$$

$$= 0,029$$

- Descarga de sólidos.

A descarga de sólidos foi avaliada pela Eq. (4.6):

$$m_p = \frac{M_{coletada} + M_{Saída}}{t} \tag{B.7}$$

A incerteza na determinação da descarga de sólidos foi avaliada pela equação:

$$w_{m_p} = \left[\left(\frac{w_{M_{coletada}}}{t} \right)^2 + \left(\frac{w_{M_{saida}}}{t} \right)^2 + \left(\frac{-M_{coletada} - M_{saida}}{t^2} w_t \right)^2 \right]^{1/2} \quad (B.8)$$

O tempo foi medido com precisão de $\pm 0,01$ s. Aplicando-se a equação acima, foram determinadas a incerteza w_{m_p} máxima igual a 1,34 por cento para o ciclone Protótipo e 2,6 por cento para o ciclone Modelo.

Para o ciclone Protótipo:

$$w_t = (0,01/37,19) = 2,69 \times 10^{-4}$$

$$w_{M_{coletada}} = (0,1/509,3) = 1,96 \times 10^{-4}$$

$$w_{M_{saida}} = (0,1/0,2) = 0,5$$

$$\left(\frac{w_{M_{coletada}}}{t} \right)^2 = \left(\frac{1,96 \times 10^{-4}}{37,19} \right)^2 = 3,0 \times 10^{-11}$$

$$\left(\frac{w_{M_{saida}}}{t} \right)^2 = \left(\frac{0,5}{37,19} \right)^2 = 1,81 \times 10^{-4}$$

$$\left(\frac{-M_{coletada} - M_{saida}}{t^2} w_t \right)^2 = \left(\frac{-509,3 - 0,5}{37,19^2} 2,69 \times 10^{-4} \right)^2 = 9,81 \times 10^{-9}$$

Daí:

$$w_{m_p} = \left[3,0 \times 10^{-11} + 1,81 \times 10^{-4} + 9,81 \times 10^{-9} \right]^{1/2} = 0,0134$$

- Concentração de Sólidos na Entrada do Ciclone.

A concentração de sólidos na entrada do ciclone foi definida, na Eq. (4.1), por:

$$C = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}} \quad (\text{B9})$$

A incerteza w_C na determinação de C é dada por:

$$w_C = \left[\left(\frac{1}{\dot{m}} w_{\dot{m}_p} \right)^2 + \left(\frac{-\dot{m}_p}{\dot{m}^2} w_{\dot{m}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{B.10})$$

A incerteza máxima para a concentração de sólidos na entrada do ciclone protótipo é igual a 0,02 por cento e ocorreu no teste de maior concentração, que é o Teste 11. Para o ciclone Modelo a incerteza máxima foi de 0,06 por cento, no Teste 41.

Como exemplo segue o cálculo para o ciclone Protótipo:

$$\left(\frac{1}{\dot{m}} w_{\dot{m}_p} \right)^2 = \left(\frac{0,0018}{288,76} \right)^2 = 3,89 \times 10^{-11}$$

$$\left(\frac{-\dot{m}_p}{\dot{m}^2} w_{\dot{m}} \right)^2 = \left(\frac{-8273,3}{288,76^2} 0,02 \right)^2 = 3,94 \times 10^{-6}$$

Daí:

$$w_C = \left[3,89 \times 10^{-11} + 3,94 \times 10^{-6} \right]^{1/2} = 0,002$$

- Perda de Pressão no Ciclone

A incerteza da perda de pressão é composta pela incerteza do Sistema de Aquisição de Dados mostrado na Fíg.(4.16) (erros sistemáticos), que inclui a incerteza de todos os equipamentos que compõem o sistema e é avaliada em 0,1%, mais a incerteza aleatória ou randômica.

A fórmula abaixo citada por Dieck (1997), foi utilizada para o cálculo da incerteza na Perda de Pressão na entrada do ciclone.

$$w_{\Delta p} = \pm \sqrt{w_{SAD}^2 + (t_{95}\sigma_x)^2} \quad (B.11)$$

onde w_{SAD} é a incerteza do sistema de aquisição de dados, t_{95} é o t de Student para 95% de confiança.

Como a perda de pressão foi medida a partir de um total de 1500 amostras para cada teste, com freqüência de 60 amostras/segundo, σ_x é o desvio padrão da média das 1500 amostras apresentado nas Tabelas 5.1 e 5.2, para os ciclones Protótipo e Modelo respectivamente, dividido pela perda de pressão média (ΔP) correspondente.

Para o ciclone protótipo a maior incerteza foi encontrada no teste de número 19, com 12,54% e para o ciclone modelo a maior incerteza foi encontrada no teste de número 39, com 10,55%.

Como exemplificado abaixo para o ciclone Protótipo:

$$w_{\Delta p} = \pm \sqrt{w_{SAD}^2 + (t_{95}\sigma_x)^2}$$

$$\sigma_x = (24,47/383,09) = 0,064$$

$$w_{SAD} = \pm \sqrt{w_{smar}^2 + w_{conversor}^2 + w_{placa}^2}$$

w_{smar} é a incerteza associada ao transmissor diferencial de pressão Smar™ e é dada por:

$$w_{smar} = \frac{3,75}{5000} = 0,00075;$$

$w_{conversor}$ é a incerteza associada ao conversor Corrente/Tensão RCV 420 e é dada por:

$$w_{conversor} = 0,0005;$$

w_{placa} é a incerteza associada ao Bloco de conexão e condicionamento de sinais SC-2345 e a Placa de Aquisição de Dados é dada por:

$$LSB = \frac{(10-0)}{2^{12}} = 0,00244$$

$$w_{placa} = \frac{1,5 \cdot LSB}{10V(\text{fundodeescala})} = \frac{1,5 \times 0,00244}{10} = 0,000366$$

Portanto:

$$w_{SAD} = \pm \sqrt{0,00075^2 + 0,0005^2 + 0,000366^2} = \pm 0,001$$

Assim,

$$w_{\Delta p} = \pm \sqrt{0,001^2 + (1,96 \times 0,064)^2} = 0,1254$$

Deve ser notado que as incertezas apresentadas nesta análise foram sempre relacionadas ao pior caso possível, o que não implica que elas realmente ocorreram. A tarefa empreendida nesta análise foi determinar apenas quão incerta uma particular observação pode ter sido.

Apêndice C

Procedimento de Zenz

O trabalho de Zenz (1975) é a referência para estimar o rendimento de coleta de ciclones operando em concentrações até $1,868 \text{ kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$. Este apêndice descreve o procedimento desenvolvido por Zenz (1975) que considera o efeito da concentração de sólidos para determinar o rendimento de coleta de ciclones. Basicamente, o procedimento envolve a determinação do diâmetro de corte, do número de espirais percorridas pelo gás, do rendimento de coleta em baixas concentrações e, finalmente, da avaliação do rendimento de coleta em altas concentrações.

Admite-se que o gás se mova através do ciclone como uma espiral rígida, mantendo uma velocidade constante e igual à velocidade média na entrada do ciclone. A distância percorrida pelo gás é igual ao perímetro do cilindro do ciclone multiplicado pelo número de espirais N_s . O tempo para percorrer essa distância ou tempo de residência do gás no ciclone é dado por:

$$t_{res} = \frac{\pi D N_s}{u_0} \quad (\text{C.1})$$

onde N_s é o número de espirais percorridas pelo gás. N_s é uma correlação calculada por método inverso e tentativa e erro. Ele foi apresentado em forma gráfica por Zenz. Uma expressão para ajustar a curva de N_s foi apresentada por Coker (1993) e é dada por:

$$N_s = u_0(0,1079 - 0,00077u_0 + 1,924 \times 10^{-6}u_0^2) \quad (\text{C.2})$$

Para atingir a parede do ciclone, a partícula deve percorrer uma distância horizontal máxima igual à largura da faixa espiralada, que, por hipótese, é igual à largura L_e da entrada tangencial. A velocidade com que a partícula percorre essa distância é avaliada através de uma analogia com a velocidade terminal em um campo gravitacional, determinada pela equação de movimento da partícula:

$$\rho_p \frac{\pi}{6} d_p^3 g - \rho \frac{\pi}{6} d_p^3 g - 3\pi\mu u_0 d_p = m_p \cdot a \quad (C.3)$$

onde o primeiro e segundo termos do lado esquerdo da Eq. (C.3) representam o peso e o empuxo atuando sobre a partícula, respectivamente, e o terceiro termo é a força de arraste sobre a partícula que, por hipótese, segue a lei de Stokes. A velocidade terminal é alcançada quando a aceleração da partícula é nula, ou seja, o termo do lado direito da Eq. (C.3) é nulo. Assim, a manipulação algébrica da Eq. (C.3) resulta na velocidade terminal em um campo gravitacional, u_{ptg} :

$$u_{ptg} = \frac{gd_p^2(\rho_p - \rho)}{18\mu} \quad (C.4)$$

A analogia referida acima consiste na substituição de g por α , a aceleração em um campo centrífugo, expressa por:

$$\alpha = \frac{u_0^2}{D/2} \quad (C.5)$$

A substituição de g da Eq. (C.4) por α , resulta na velocidade terminal em um campo centrífugo:

$$u_{ptc} = \frac{u_0^2 d_p^2 (\rho_p - \rho)}{9\mu D} \quad (C.6)$$

O tempo necessário para a partícula percorrer a distância L_e , através da faixa espiral, é obtido pela divisão de L_e por u_{ptc} , ou seja,

$$t_{L_e} = \frac{9\mu LD}{(\rho_p - \rho)u_0^2 d_p^2} \quad (C.7)$$

A Eq. C.7 estabelece que quanto menor o diâmetro da partícula, maior o tempo necessário para percorrer a distância L_e . O menor tamanho de partícula que pode ser coletado, ou diâmetro de corte d_{pc} , é obtido igualando t_{L_e} da Eq. C.7 ao tempo de residência do gás no ciclone, t_{res} , Eq. C.1. Assim,

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu L}{(\rho_p - \rho)\pi u_0 N_s}} \quad (C.8)$$

Na prática, partículas maiores que o tamanho dado pela Eq. C.8 podem não ser coletadas e partículas menores podem ser coletadas. Além disso, o rendimento de coleta é influenciado pela concentração de sólidos na entrada do ciclone e torna-se difícil ajustar resultados experimentais com a Eq. C.8. As hipóteses feitas por Zenz para superar essa dificuldade foram:

- O diâmetro da partícula calculado pela Eq. C.8 é tomado como o tamanho coletado com rendimento de 50% ;
- A Eq. C.8 é aplicável apenas em concentrações muito baixas de sólidos, da ordem de $1,868 \times 10^{-3} \text{ kg}_{\text{sólido}}/\text{kg}_{\text{ar}}$ ou menos;
- Uma curva normalizada de rendimento de coleta por tamanho de partícula deve ser obtida, ou seja, uma única curva de d_p/d_{pc} versus rendimento de coleta;
- O número de espirais N_s em baixas concentrações é função apenas da velocidade do gás na entrada do ciclone e das proporções geométricas do ciclone.

- O efeito da concentração depende da magnitude do rendimento de coleta em baixas concentrações, e
- A velocidade do vórtice ascendente não é suficiente para re-arrastar as partículas coletadas.

Baseado em ciclones de até 3,66 m de diâmetro e operando com grande variedade de sólidos em concentrações de $1,868 \times 10^{-3}$ a $1,868 \text{ kg}_{\text{sólido}} / \text{kg}_{\text{gás}}$, as hipóteses acima conduziram a um conjunto de correlações de trabalho. A Fig. C.1 representa a curva normalizada de rendimento de coleta por tamanho de partícula. O diâmetro d_{pc} é o tamanho das partículas calculado pela Eq. C.8 e η_0 é o rendimento de coleta com o qual as partículas de diâmetro d_p seriam coletadas, em concentração total na entrada do ciclone menor do que $1,868 \times 10^{-3} \text{ kg}_{\text{sólido}} / \text{kg}_{\text{gás}}$.

A análise resultou nas curvas empíricas da Fig. C.2. A abcissa representa a concentração de todas as partículas na entrada do ciclone. O valor corrigido do rendimento global de coleta para concentrações maiores que $1,868 \times 10^{-3} \text{ kg}_{\text{sólido}} / \text{kg}_{\text{gás}}$ pode ser obtido da Fig. C.2, conhecendo-se o valor do rendimento global de coleta para baixas concentrações de sólidos, obtido da Fig.C.1.

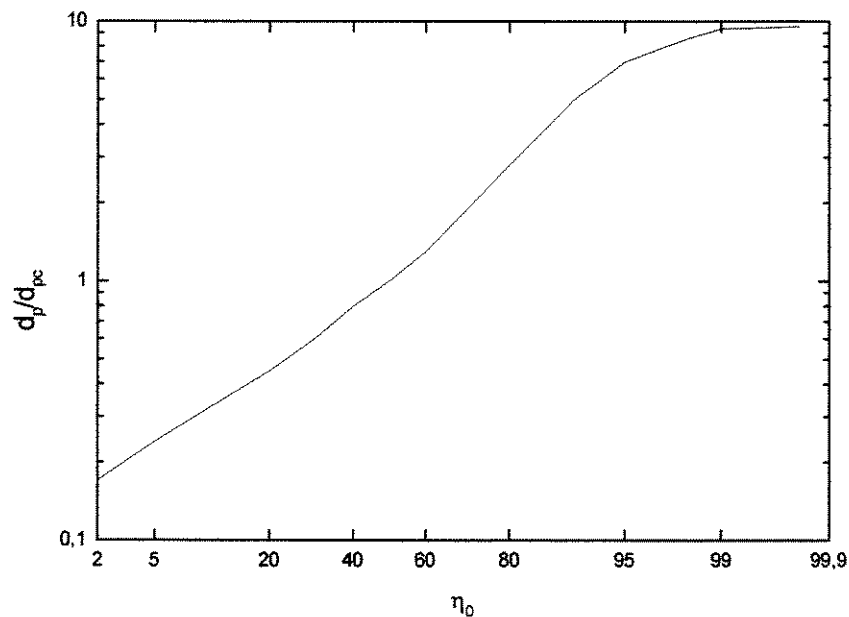


Figura C.1 – Curva normalizada de rendimento de coleta por tamanho de partícula

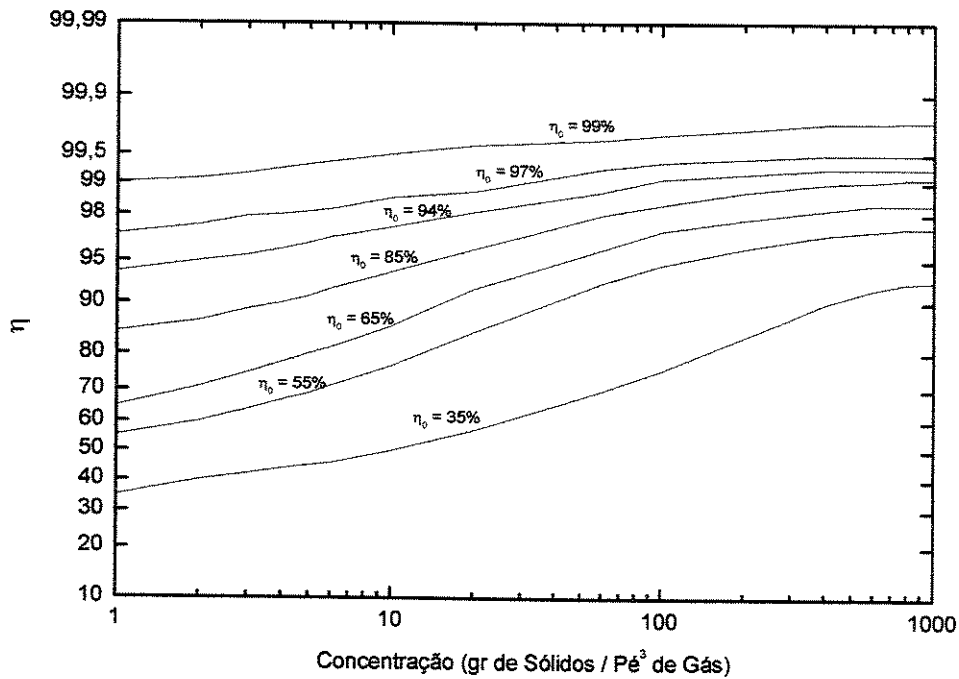


Figura C.2 – Rendimento global de coleta em função da concentração

A metodologia proposta por Zenz para a estimativa do rendimento de coleta, nas condições experimentais e o ciclone utilizado nos testes deste trabalho, foi avaliada por comparação com os resultados experimentais obtidos.

O procedimento proposto requer inicialmente o cálculo do número de voltas espirais N_s percorridas em média pelo gás no interior do ciclone, a partir da Eq. C.2, na qual u_0 é dada em pés/s.

Em seguida, é calculado o diâmetro de corte teórico d_{pc} , isto é, o diâmetro da partícula que supostamente é coletada com rendimento de 50%, utilizando a expressão C.8 para cada faixa de velocidade. O resultado dos cálculos encontra-se na Tabela C.1.

Tabela C.1 - Número de espirais e diâmetro de corte teórico

Ciclone Protótipo			Ciclone Modelo		
U_0 (m/s)	N_s	d_{pc} (μ m)	U_0 (m/s)	N_s	d_{pc} (μ m)
20,72	4,38	1,46	16,26	3,86	1,05
17,98	4,08	1,62	14,28	3,56	1,17
15,17	3,70	1,85	11,75	3,13	1,38

Após essa etapa, estima-se o rendimento de coleta em baixas concentrações, η_0 , utilizando para tanto a distribuição granulométrica média das partículas sólidas alimentadas nos testes realizados. A distribuição granulométrica foi rearranjada em faixas de fração mássica, conforme sugerido por Zenz.

A Tabela C.2 apresenta os rendimentos de coleta calculados para cada faixa granulométrica, obtidos a partir da Fig. C.1, onde o rendimento de coleta é dado em função do diâmetro médio de cada faixa, d , dividido pelo diâmetro de corte. A fração coletada de cada tamanho de partícula, dada pelo produto do rendimento de coleta da faixa pela sua fração mássica e finalmente, o rendimento de coleta global η_0 para baixas concentrações, obtido pela somatória das frações coletadas em cada faixa, são também apresentados nessa tabela. Os valores da tabela C.2 se referem ao ciclone Protótipo operando na faixa de velocidade de 20,72 m/s.

Tabela C.2 - Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações $u_0 = 20,72$ m/s

Ciclone Protótipo $U_0 = 20,72$ m/s					
Faixa granulométrica	d (μ m)	Fração Mássica	d/d_{pc}	Rendimento de coleta	Fração Coletada
10 - 20	15	0,014	10,274	0,9980	0,0140
20 - 30	25	0,0032	17,123	1,0000	0,0032
30 - 40	35	0,0176	23,973	1,0000	0,0176
40 - 65	52,5	0,1356	35,959	1,0000	0,1356
65 - 76	70,5	0,0997	48,288	1,0000	0,0997
76 - 104	90	0,2695	61,644	1,0000	0,2695
104 - 160	132	0,3573	90,411	1,0000	0,3573
160 - 220	190	0,0883	130,137	1,0000	0,0883
200 - 260	230	0,0148	157,534	1,0000	0,0148
η_0					1,0000

O mesmo procedimento foi aplicado às faixas de 17,98 e 15,17 m/s, para o ciclone Protótipo e para as faixas de 16,26, 14,28 e 11,75 m/s para o ciclone Modelo. Os resultados podem ser vistos nas Tabelas C.3, C.4, C.5, C.6, C.7, respectivamente.

Tabela C.3 - Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações $u_0 = 17,98$ m/s

Ciclone Protótipo $U_0 = 17,98$ m/s					
Faixa granulométrica	d(μ m)	Fração Mássica	d/d _{pc}	Rendimento de coleta	Fração Coletada
10 - 20	15	0,014	9,259	0,9880	0,0138
20 - 30	25	0,0032	15,432	1,0000	0,0032
30 - 40	35	0,0176	21,605	1,0000	0,0176
40 - 65	52,5	0,1356	32,407	1,0000	0,1356
65 - 76	70,5	0,0997	43,519	1,0000	0,0997
76 - 104	90	0,2695	55,556	1,0000	0,2695
104 - 160	132	0,3573	81,481	1,0000	0,3573
160 - 220	190	0,0883	117,284	1,0000	0,0883
200 - 260	230	0,0148	141,975	1,0000	0,0148
η^o					0,9998

Tabela C.4 - Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações $u_0 = 15,17$ m/s

Ciclone Protótipo $U_0 = 15,17$ m/s					
Faixa granulométrica	d(μ m)	Fração Mássica	d/d _{pc}	Rendimento de Coleta	Fração Coletada
10 - 20	15	0,014	8,108	0,9720	0,0136
20 - 30	25	0,0032	13,514	1,0000	0,0032
30 - 40	35	0,0176	18,919	1,0000	0,0176
40 - 65	52,5	0,1356	28,378	1,0000	0,1356
65 - 76	70,5	0,0997	38,108	1,0000	0,0997
76 - 104	90	0,2695	48,649	1,0000	0,2695
104 - 160	132	0,3573	71,351	1,0000	0,3573
160 - 220	190	0,0883	102,703	1,0000	0,0883
200 - 260	230	0,0148	124,324	1,0000	0,0148
η^o					0,9996

Tabela C.5 - Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações $u_0 = 16,26$ m/s

Ciclone Modelo $U_0 = 16,26$ m/s					
Faixa granulométrica	d(μ m)	Fração Mássica	d/d _{pc}	Rendimento de coleta	Fração Coletada
1 - 10	5,5	0,0017	5,238	0,9100	0,0015
10 - 20	15	0,0234	14,286	1,0000	0,0234
20 - 30	25	0,0210	23,810	1,0000	0,0210
30 - 40	35	0,1097	33,333	1,0000	0,1097
40 - 65	52,5	0,4611	50,000	1,0000	0,4611
65 - 76	70,5	0,1570	67,143	1,0000	0,1570
76 - 104	90	0,1862	85,714	1,0000	0,1862
104 - 160	132	0,0400	125,714	1,0000	0,0400
				η^o	0,9999

Tabela C.6 - Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações $u_0 = 14,28$ m/s

Ciclone Modelo $U_0 = 14,28$ m/s					
Faixa granulométrica	d(μ m)	Fração Mássica	d/d _{pc}	Rendimento de coleta	Fração Coletada
1 - 10	5,5	0,0017	4,701	0,9100	0,0015
10 - 20	15	0,0234	12,821	1,0000	0,0234
20 - 30	25	0,0210	21,368	1,0000	0,0210
30 - 40	35	0,1097	29,915	1,0000	0,1097
40 - 65	52,5	0,4611	44,872	1,0000	0,4611
65 - 76	70,5	0,1570	60,256	1,0000	0,1570
76 - 104	90	0,1862	76,923	1,0000	0,1862
104 - 160	132	0,0400	112,821	1,0000	0,0400
		1,0001		η^o	0,9999

Tabela C.7 - Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações $u_0 = 11,75$ m/s

Ciclone Modelo $U_0 = 11,75$ m/s					
Faixa granulométrica	$d(\mu\text{m})$	Fração Mássica	d/d_{pc}	Rendimento de coleta	Fração Coletada
1 - 10	5,5	0,0017	3,986	0,9100	0,0015
10 - 20	15	0,0234	10,870	1,0000	0,0234
20 - 30	25	0,0210	18,116	1,0000	0,0210
30 - 40	35	0,1097	25,362	1,0000	0,1097
40 - 65	52,5	0,4611	38,043	1,0000	0,4611
65 - 76	70,5	0,1570	51,087	1,0000	0,1570
76 - 104	90	0,1862	65,217	1,0000	0,1862
104 - 160	132	0,0400	95,652	1,0000	0,0400
η_0					0,9999

Os valores de η_0 foram utilizados para obter os valores de η , o rendimento global nas concentrações desejadas, a partir da Fig. C.2, que traz as curvas de rendimento de coleta em função da concentração, tendo η_0 como parâmetro, válidas para concentrações variando de $1,868 \times 10^{-3}$ a $1,868$ kg de FCC/ kg de ar.