Esta versão corresponde à redação final da tese de mestrado defendida pelo Eng. DANIEL ROLLA DE CAMARGO SOUZA e aprovada pela comissão julgadora em 19/06/94. \$

Prof. Dr. Milton Mori

Tese defendida e aprovada, em 19 de julho de 1994, pela banca examinadora constituída pelos Professores Doutores:

me you very

Prof. Dr. Milton Mori - Orientador

Chlocha

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sandra Cristina dos Santos Rocha

Ricardello

Prof. Dr. Reginaldo Guirardello

# UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA DEPARTAMENTO DE PROCESSOS QUÍMICOS

## DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE APLICATIVO EM LINGUAGEM C PARA CÁLCULO DE EFICIÊNCIA E PERDA DE CARGA DE CICLONES

Autor:Daniel Rolla de Camargo Souza 7/50 69Orientador:Prof. Dr. Milton Mori 1

Tese submetida à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

> Campinas - SP Julho de 1994



X UNIDADE\_ N. CHAMADA: TUnicamf So PS d Ex. ۷. \_\_\_\_\_ T. 120 87 23612 433/95. PROC. DX C PHECO - R\$ 11,00 BATA 08102 195 N.º CPD

CM-00065487-4

### FICHA CATALOGRAFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL - UNICAMP

Souza, Daniel Rolla de Camargo So89d Desenvolvimento de um software aplicativo em linguagem C para calculo de eficiencia e perda de carga de ciclones / Daniel Rolla de Camargo Souza. -- Campinas, SP : [s.n.], 1994. Orientador: Milton Mori. Dissertacao (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Quimica. 1. Ciclone. 2. Simulacao e modelagem. 3. Metodos semi-empiricos. I. Mori, Milton. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Quimica. III. Titulo. 20. CDD- 660.284 2 603.3 660.028

Indices para catalogo sistematico:

1. Ciclone 660,284 2	t 7
----------------------	--------

- 2. Simulacao e modelagem 603.3
- 3. Metodos semi-empiricos 660.028

### Agradecimentos

Ao Prof. Milton Mori, pela orientação e amizade.

Ao pessoal do Laboratório de Modelagem e Simulação de Processos Químicos (Evandro,

Luis e Henry), pelo apoio através das discussões sobre o assunto desta tese.

Ao Ernesto, pela ajuda com a digitação e confecção das figuras.

Ao Valmor (Petrobrás), pela sua contribuição como um segundo orientador.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro.

À Petrobrás/São Mateus do Sul, pela proposta do tema, criação da oportunidade e ajuda financeira.

À minha mãe, Lilian, por ter acreditado em mim e investido na minha formação como estudante e como pessoa.

E a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

### RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo a construção de um programa que calcula a eficiência de coleta e a perda de carga apresentada por um ciclone sob determinadas condições de operação. A criação deste programa foi solicitada pela PETROBRÁS-SIX (Superintendência da Industrialização do Xisto), unidade de São Mateus do Sul (PR), devido ao seu interesse em dispor desse tipo de ferramenta para simulação e/ou projeto de ciclones.

O programa dispõe de oito métodos diferentes para cálculo de eficiência e sete métodos para cálculo de queda de pressão, sendo todos eles empíricos ou semi-empíricos.

A fim de possibilitar a avaliação do grau de exatidão dos resultados obtidos por cada um desses métodos, foi construído, ainda, um banco de dados contendo 108 arquivos de dados experimentais. Destes, 80 correspondem a dados obtidos da literatura e 28, aos dados gerados por uma série de testes realizados em uma unidade de bancada na própria SIX.

A partir destes dados foi feita uma análise da performance de cada um dos métodos existentes no programa construído.

# ÍNDICE DE FIGURAS

**6* ***	Modelo Típico de Ciclone de Fluxo Reverso com Entrada Tangencial	005
Fig. 1.2	Padrão de Fluxo de Gás no Interior de um Ciclone	006
Fig. 1.3	Tipos de Entrads mais Comuns	007
Fig. 2.1	Curva de Eficiência de Lapple	019
Fig. 2.2	Curva de Eficiência de Zenz	022
Fig. 2.3	Efeito da Concentração de Sólidos	023
Fig. 2.4	Correlação para Cálculo do Número de Espirais	024
Fig. 2.5	Curva de Eficiência de Barth	027
Fig. 2.6	Perfil de Velocidade Tangencial em um Ciclone de Stairmand	030
Fig. 2.7	Fluxo de Gás no Interior de um Ciclone e Perfis de Velocidade Tangencial	035
Fig. 2.8	Modelo para Cálculo do Tempo de Residência	041
Fig. 2.9	Seção Transversal de um Ciclone	044
Fig.2.10	Regiões do Modelo de Dietz	047
Fig.2.11	Ciclone com Geometria Modificada para Análise	048
Fig.2.12	Determinação do Ângulo de Saída de Gás	056
Fig.2.13	Modelo do Ciclone Segundo Mothes e Löffler	061
-		
Fig. 3.1	Arranjo Típico de Ciclones Funcionando em um Regenerador de uma	
U	Unidade FCC	084
Fig. 4.1	Menu Básico do Programa CICLONE.EXE	097
Fig. 4.2	Dados de Entrada para a Execução dos Cálculos	098
Fig. 4.3	Definição da Faixa de Velocidades para Cálculo de Queda de Pressão	100
Fig. 4.4	Exemplo de Cálculo de Eficiência	101
Fig. 4.5		
	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão	101
Fig. 4.6	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão A Opção "Resultados"	101 102
Fig. 4.6 Fig. 4.7	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão A Opção "Resultados" A Opção "Impressão"	101 102 103
Fig. 4.6 Fig. 4.7 Fig. 4.8	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão A Opção "Resultados" A Opção "Impressão"	101 102 103 104
Fig. 4.6 Fig. 4.7 Fig. 4.8 Fig. 4.9	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão A Opção "Resultados" A Opção "Impressão" A Opção "Gráfico" Escolha de um Arquivo do Banco de Dados	101 102 103 104 105
Fig. 4.6 Fig. 4.7 Fig. 4.8 Fig. 4.9	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão A Opção "Resultados" A Opção "Impressão" A Opção "Gráfico" Escolha de um Arquivo do Banco de Dados	101 102 103 104 105
Fig. 4.6 Fig. 4.7 Fig. 4.8 Fig. 4.9 Fig. 5.1	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão A Opção "Resultados" A Opção "Impressão" A Opção "Gráfico" Escolha de um Arquivo do Banco de Dados Aparato Experimental Utilizado	101 102 103 104 105 113
Fig. 4.6 Fig. 4.7 Fig. 4.8 Fig. 4.9 Fig. 5.1 Fig. 5.2	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão A Opção "Resultados" A Opção "Impressão" A Opção "Gráfico" Escolha de um Arquivo do Banco de Dados Aparato Experimental Utilizado Influência da Velocidade de Entrada do Gás Sobre a Eficiência de Coleta	101 102 103 104 105 113 116
Fig. 4.6 Fig. 4.7 Fig. 4.8 Fig. 4.9 Fig. 5.1 Fig. 5.2 Fig. 5.4	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão A Opção "Resultados" A Opção "Impressão" A Opção "Gráfico" Escolha de um Arquivo do Banco de Dados Aparato Experimental Utilizado Influência da Velocidade de Entrada do Gás Sobre a Eficiência de Coleta Dados Experimentais Obtidos por Dirgo e Leith	101 102 103 104 105 113 116 119
Fig. 4.6 Fig. 4.7 Fig. 4.8 Fig. 4.9 Fig. 5.1 Fig. 5.2 Fig. 5.4 Fig. 5.5	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão A Opção "Resultados" A Opção "Impressão" A Opção "Gráfico" Escolha de um Arquivo do Banco de Dados Aparato Experimental Utilizado Influência da Velocidade de Entrada do Gás Sobre a Eficiência de Coleta Dados Experimentais Obtidos por Dirgo e Leith Dados Experimentais Obtidos por Dirgo e Leith	<ul> <li>101</li> <li>102</li> <li>103</li> <li>104</li> <li>105</li> <li>113</li> <li>116</li> <li>119</li> <li>119</li> </ul>
Fig. 4.6 Fig. 4.7 Fig. 4.8 Fig. 4.9 Fig. 5.1 Fig. 5.2 Fig. 5.4 Fig. 5.5 Fig. 5.6	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão A Opção "Resultados" A Opção "Impressão" A Opção "Gráfico" Escolha de um Arquivo do Banco de Dados Aparato Experimental Utilizado Influência da Velocidade de Entrada do Gás Sobre a Eficiência de Coleta Dados Experimentais Obtidos por Dirgo e Leith Dados Experimentais Obtidos por Dirgo e Leith Dados Experimentais Obtidos por Dirgo e Leith	<ul> <li>101</li> <li>102</li> <li>103</li> <li>104</li> <li>105</li> <li>113</li> <li>116</li> <li>119</li> <li>119</li> <li>124</li> </ul>
Fig. 4.6 Fig. 4.7 Fig. 4.8 Fig. 4.9 Fig. 5.1 Fig. 5.2 Fig. 5.4 Fig. 5.5 Fig. 5.6 Fig. 5.7	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão A Opção "Resultados" A Opção "Impressão" A Opção "Gráfico" Escolha de um Arquivo do Banco de Dados Aparato Experimental Utilizado Influência da Velocidade de Entrada do Gás Sobre a Eficiência de Coleta Dados Experimentais Obtidos por Dirgo e Leith Dados Experimentais Obtidos por Dirgo e Leith Dados Experimentais Obtidos por Dirgo e Leith Dados Experimentais Obtidos por Dirgo e Leith	<ul> <li>101</li> <li>102</li> <li>103</li> <li>104</li> <li>105</li> <li>113</li> <li>116</li> <li>119</li> <li>119</li> <li>124</li> <li>124</li> </ul>
Fig. 4.6 Fig. 4.7 Fig. 4.8 Fig. 4.9 Fig. 5.1 Fig. 5.2 Fig. 5.4 Fig. 5.5 Fig. 5.6 Fig. 5.7 Fig. 5.8	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão A Opção "Resultados" A Opção "Impressão"	101 102 103 104 105 113 116 119 119 124 124 126
Fig. 4.6 Fig. 4.7 Fig. 4.8 Fig. 4.9 Fig. 5.1 Fig. 5.2 Fig. 5.4 Fig. 5.5 Fig. 5.6 Fig. 5.7 Fig. 5.8 Fig. 5.9	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão A Opção "Resultados" A Opção "Impressão" A Opção "Gráfico" Escolha de um Arquivo do Banco de Dados Aparato Experimental Utilizado Influência da Velocidade de Entrada do Gás Sobre a Eficiência de Coleta Dados Experimentais Obtidos por Dirgo e Leith Dados Experimentais Obtidos por Iozia e Leith	101 102 103 104 105 113 116 119 119 124 124 126 126
Fig. 4.6 Fig. 4.7 Fig. 4.8 Fig. 4.9 Fig. 5.1 Fig. 5.2 Fig. 5.4 Fig. 5.5 Fig. 5.6 Fig. 5.7 Fig. 5.8 Fig. 5.9 Fig.5.10	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão A Opção "Resultados" A Opção "Impressão" A Opção "Gráfico" Escolha de um Arquivo do Banco de Dados Escolha de um Arquivo do Banco de Dados Aparato Experimental Utilizado Influência da Velocidade de Entrada do Gás Sobre a Eficiência de Coleta Dados Experimentais Obtidos por Dirgo e Leith Dados Experimentais Obtidos por Iozia e Leith Dados Experimentais Obtidos por Ioz	101 102 103 104 105 113 116 119 119 124 124 126 126 127
Fig. 4.6 Fig. 4.7 Fig. 4.8 Fig. 4.9 Fig. 5.1 Fig. 5.2 Fig. 5.4 Fig. 5.5 Fig. 5.6 Fig. 5.7 Fig. 5.8 Fig. 5.9 Fig. 5.10 Fig.5.11	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão A Opção "Resultados" A Opção "Impressão" A Opção "Gráfico" Escolha de um Arquivo do Banco de Dados Escolha de um Arquivo do Banco de Dados Aparato Experimental Utilizado Influência da Velocidade de Entrada do Gás Sobre a Eficiência de Coleta Dados Experimentais Obtidos por Dirgo e Leith Dados Experimentais Obtidos por Iozia e Leith Dados Experimentais Obtidos por Kim e Lee Dados Experimentais Obtidos por Kim e Lee	101 102 103 104 105 113 116 119 124 124 126 126 127 127
Fig. 4.6 Fig. 4.7 Fig. 4.8 Fig. 4.9 Fig. 5.1 Fig. 5.2 Fig. 5.4 Fig. 5.5 Fig. 5.6 Fig. 5.7 Fig. 5.8 Fig. 5.9 Fig.5.10 Fig.5.11 Fig.5.12	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão A Opção "Resultados" A Opção "Impressão" A Opção "Gráfico" Escolha de um Arquivo do Banco de Dados Escolha de um Arquivo do Banco de Dados Aparato Experimental Utilizado Influência da Velocidade de Entrada do Gás Sobre a Eficiência de Coleta Dados Experimentais Obtidos por Dirgo e Leith Dados Experimentais Obtidos por Iozia e Leith Dados Experimentais Obtidos por Iozia e Leith Dados Experimentais Obtidos por Kim e Lee Dados Experimentais Obtidos por Rimer e Münz	101 102 103 104 105 113 116 119 124 124 126 126 127 127 130
Fig. 4.6 Fig. 4.7 Fig. 4.8 Fig. 4.9 Fig. 5.1 Fig. 5.2 Fig. 5.2 Fig. 5.4 Fig. 5.5 Fig. 5.6 Fig. 5.7 Fig. 5.8 Fig. 5.9 Fig.5.10 Fig.5.11 Fig.5.12 Fig.5.13	Exemplo de Cálculo de Queda de Pressão	101 102 103 104 105 113 116 119 119 124 126 126 127 127 130 130

Fig.5.14	Curvas de Eficiência	Referentes aos Testes Realizados na Petrobrás-SIX	132
Fig.5.15	Curvas de Eficiência	Relativas ao Teste 5A	135
Fig.5.16	Curvas de Eficiência	Relativas ao Teste 5A	135
Fig.5.17	Curvas de Eficiência	Relativas ao Teste 15C	137
Fig.5.18	Curvas de Eficiência	Relativas ao Teste 15C	138

•

# ÍNDICE DE TABELAS

Ciclones Lapple e Stairmand	010
O Fator de Alexander, f <sub>A</sub>	079
Constante K	083
Dimensões dos Ciclones Utilizados nos Testes	114
Valores de $\Delta P$ e $\Delta H$ Relativos ao Ciclone A	140
Valores de $\Delta P$ e $\Delta H$ Relativos ao Ciclone B	140
Valores de $\Delta P$ e $\Delta H$ Relativos ao Ciclone C	141
Valores de $\Delta P$ e $\Delta H$ Relativos ao Ciclone D	141
Valores de $\Delta P$ e $\Delta H$ Relativos ao Ciclone E	141
Valores Médios de $\Delta H$	142
Valores de $\Delta$ H Relativos a Cada Método	143
Valores de $\Delta P$ e $\Delta H$ (Dirgo e Leith)	145
Valores Médios de $\Delta H$ (Dirgo e Leith)	145
Valores de $\Delta P \in \Delta H$ (Kim e Lee)	145
Valores Médios de $\Delta$ H (Kim e Lee)	145
Valores de $\Delta P$ e $\Delta H$ (Boysan et al)	145
Valores Médios de $\Delta H$ (Boysan et al)	145
Valores de $\Delta P e \Delta H$ (Iozia e Leith)	145
Valores Médios de $\Delta H$ (Iozia e Leith)	145
Valores Totais de Variância	150
Dados de Operação do Ciclone A (teste SIX)	151
	Ciclones Lapple e Stairmand O Fator de Alexander, $f_{A}$ Constante K Dimensões dos Ciclones Utilizados nos Testes Valores de $\Delta P e \Delta H$ Relativos ao Ciclone A Valores de $\Delta P e \Delta H$ Relativos ao Ciclone B Valores de $\Delta P e \Delta H$ Relativos ao Ciclone C Valores de $\Delta P e \Delta H$ Relativos ao Ciclone D Valores de $\Delta P e \Delta H$ Relativos ao Ciclone E Valores Médios de $\Delta H$ Valores Médios de $\Delta H$ Valores de $\Delta P e \Delta H$ Relativos ao Ciclone E Valores Médios de $\Delta H$ Valores de $\Delta P e \Delta H$ Relativos a Cada Método. Valores de $\Delta P e \Delta H$ (Dirgo e Leith) Valores Médios de $\Delta H$ (Dirgo e Leith) Valores Médios de $\Delta H$ (Kim e Lee) Valores Médios de $\Delta H$ (Kim e Lee) Valores Médios de $\Delta H$ (Kim e Lee) Valores Médios de $\Delta H$ (Roysan et al) Valores Médios de $\Delta H$ (Iozia e Leith) Valores Médios de $\Delta H$ (Iozia e Leith) Valores Médios de $\Delta H$ (Iozia e Leith) Valores Totais de Variância Dados de Operação do Ciclone A (teste SIX)

.

/

## NOMENCLATURA

Α	área, área de entrada do ciclone
Α'	parâmetro de área do modelo de Stairmand
a	altura da entrada do ciclone
b	largura da entrada do ciclone
C,C'	parâmetros do modelo de Leith e Licht
c	concentração de partículas
Ci	concentração de partículas na região i
D	diâmetro do ciclone
$\mathbf{D}_{\mathbf{b}}$	diâmetro do duto de saída de sólidos do ciclone
De	diâmetro do duto de saída de gás do ciclone
$\mathbf{D}_{\mathfrak{h}}$	diâmetro hidráulico
$\mathbf{D}_{\mathbf{m}}$	parâmetro de momento angular
Dr	coeficiente de difusão de partículas
$\mathbf{D}_{vurtex}$	diâmetro do vórtex interno de gás dado pela equação (2.24)
d	Diâmetro do cone do ciclone na altura do comprimento natural, equação (2.39)
d <sub>c</sub>	diâmetro crítico
d <sub>p</sub>	diâmetro da partícula
F	fluxo de partículas
F <sub>k</sub>	força de arraste do gás sobre as partículas sólidas
f,	fator de Alexander para cálculo de queda de pressão
G	parâmetro do modelo de Stairmand
g	aceleração da gravidade
H	altura do ciclone
H'	parâmetro do modelo de Stairmand
ΔH	número de "cargas" de velocidade, adimensional
h*	altura do vórtex interno de gás segundo Barth
h <sub>c</sub>	altura da parte cilíndrica do ciclone
h <sub>c</sub>	parâmetro dado pela equação (2.104)
h3	altura da região 3 do modelo de Mothes e Löffler

J	parâmetro do modelo de Stairmand
<b>j</b> i	fluxo de partículas na região i
j <sub>i.e</sub>	fluxo de partículas entre as regiões i e k
K	constante
$K_1, K_2, K$	a parâmetros do modelo de Dietz
K <sub>a</sub> , K <sub>b</sub> , K	e parâmetros do modelo de Leith e Licht
L	concentração de sólidos na entrada do ciclone (massa de sólidos/volume de gás)
$M_p$	fluxo de partículas re-arrastadas
m	massa
m <sub>i</sub>	fração mássica da partícula i
N <sub>s</sub>	número de espiras feita pelo gás no interior do ciclone
Р	pressão
P <sub>i</sub>	pressão no ponto i
ΔP	queda de pressão
Q	vazão
R <sub>c</sub>	D/2
R <sub>c</sub> *	raio do barril do ciclone com geometria modificacada (equação 2.110)
R <sub>p</sub>	d <sub>p</sub> /2
R,	$D_c/2$
R,	raio do vórtex interno
г	coordenada radial, posição radial da partícula
ſ <sub>a</sub>	razão de áreas, dada pela equação (4.18)
S	penetração do duto de saída de gás
t <sub>res</sub>	tempo de residência
u	velocidade tangencial da partícula sólida
$V_{ni}, V_{H}, V_{s}$	parâmetros de volume do modelo de Leith e Licht
v	velocidade tangencial do gás
V <sub>b</sub>	velocidade do gás no barril do ciclone
V <sub>d</sub>	velocidade axial média do gás na parte cilíndrica do ciclone
Vi	velocidade média de entrada do gás
Ve	velocidade do gás na saída do ciclone

- vr velocidade radial do gás
- v, velocidade terminal da partícula
- v<sub>z</sub> velocidade axial do gás
- x número de partículas removidas de uma seção transversal do ciclone (equação 2.45)
- w velocidade radial da partícula sólida
- w, velocidade terminal da partícula sólida
- T temperatura
- z coordenada axial
- z, altura do vórtex interno de gás segundo Iozia e Leith

## Letras Gregas

α coeficiente	e de re-arraste	
---------------	-----------------	--

- ß expoente de Iozia e Leith (equação 2.28)
- γ parâmetro dado pela equação (2.12)
- η eficiência global de coleta
- $\eta(i)$  eficiência de coleta da partícula i
- θ coordenada angular
- $\lambda$  coeficiente de atrito,  $\lambda = 0.02$
- $\mu$  viscosidade do gás
- $\xi$  coeficiente de atrito
- ρ<sub>s</sub> densidade do gás
- ρ<sub>p</sub> densidade da partícula sólida
- $\sigma^2$  variância
- Ψ parâmetro do modelo de Leith e Licht

# Índices

g	gás
р	partícula
r	radial
S	superficial, anterior à entrada do ciclone
v	vórtex
w	parede
0	na entrada do ciclone, no tempo $t_0$

.

# ÍNDICE

IN	ITRC	DUÇÃO	001
1	REV	/ISÃO BIBLIOGRÁFICA	004
	1.1	O Ciclone	004
	1.2	Métodos de Cálculo	011
2	MÉ	TODOS PARA CÁLCULO DE EFICIÊNCIA	015
	2.1	Cálculo do Diâmetro Crítico a Partir do Tempo de Trajetória	016
		2.1.1 Método de Lapple	016
		2.1.2 Método de Zenz.	020
	2.2	Cálculo do Diâmetro Crítico a Partir da Determinação da "Partícula Estática"	024
		2.2.1 Método de Barth	025
		2.2.2 Método de lozia e Leith	029
	2.3	Determinação Direta das Eficiências Individuais	033
		2.3.1 O Expoente de Vórtex	034
		2.3.2 Comprimento Natural	036
		2.3.3 Método de Leith e Licht	037
		2.3.4 Método de Dietz	046
		2.3.5 Método de Li e Wang	054
		2.3.6 Método de Mothes e Löffler	059
	,		
3	MÉ	TODOS DE CÁLCULO DE QUEDA DE PRESSÃO	074
	3.1	Método de Alexander	075
	3.2	Método de Shepherd e Lapple	080
	3.3	Método de Casal e Martinez-Benet	081
	3.4	Método de Zenz	082
	3.5	Método de Stairmand	087
	3.6	Método de Barth	093
	3.7	Método de First	094
	~ ~		
4	O SC	OFTWARE DESENVOLVIDO	095
	4.1	A Estrutura do Programa	095
	4.2		096
		4.2.1 A Opçao "Arquivo"	097
		4.2.2 A Opção "Cálculo"	100
		4.2.3 A Opção "Resultados"	102
		4.2.4 A Opçao "Impressao"	102
		4.2.5 A Upçao "Urafico"	103
	12	4.2.0 A Opção Banco de Dados	104
	4.3	Observações Sobre as Kolinas de Calculo	103
		4.5.1 Miciolo de Zenz para Calculo de Efficiencia	100
		4.3.2 Niciouo de Alexander para Calculo de Queda de Pressão	111
		4.5.5 Metodo de Zenz para Calculo de Queda de Pressao	111

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	113
5.1 O Aparato Experimental	113
5.2 Eficiência de Coleta	115
5.2.1 Dados da Literatura	115
5.2.2 Dados Obtidos na SIX	131
5.3 Queda de Pressão	139
5.3.1 Dados Obtidos na SIX	139
5.3.2 Dados da Literatura	144
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	153
APÊNDICE A - Folhas de Dados	158
BIBLIOGRAFIA	197

•

### INTRODUÇÃO

Apesar de desenvolvido quase integralmente na Faculdade de Engenharia Química da Unicamp como tese de mestrado, o presente trabalho veio atender, na verdade, a uma solicitação feita pela PETROBRÁS-SIX (Superintendência da Industrialização do Xisto), unidade situada em São Mateus do Sul (PR). Para isso ele teve, basicamente, dois objetivos principais a cumprir:

1. Construção de um software aplicativo de interface amigável ao usuário que permite o cálculo da eficiência e/ou queda de pressão de um ciclone de dimensões conhecidas sob condições específicas de operação.

2. Construção de um banco de dados experimentais que apresenta um conjunto de dados de performance de diferentes ciclones, ou seja, dado um determinado ciclone, de geometria conhecida, trabalhando sob condições de operação também conhecidas, dispõe-se de dados acerca do desempenho apresentado pelo equipamento, o que se traduz em valores de eficiência de separação de partículas e/ou de queda de pressão apresentados por ele.

A interface amigável ao usuário apresentada por esse software é desejável devido ao fato de que se pretende distribuí-lo pelas várias unidades da SIX de modo que ele possa ser usado pelos seus operadores sempre que necessário. Não é interessante, assim, que cada pessoa que venha a utilizar esse software tenha que gastar muito tempo para aprender a manuseá-lo. As mesmas razões de economia de tempo exigem, ainda, que ele seja simultaneamente prático, objetivo e simples de usar.

Foi determinado, a priori, que esse programa deveria restringir-se apenas a métodos de cálculo de eficiência e queda de pressão de caráter total ou parcialmente empírico. Isso porque ele será usado eminentemente nas abordagens iniciais de problemas de projeto de novos ciclones ou simulação de ciclones já existentes na usina. A simplicidade desse tipo de método deverá conferir ao programa desenvolvido um caráter altamente desejável de rapidez e praticidade. O que normalmente se deseja, nas fases iniciais de abordagem de um problema de projeto ou simulação, são resultados rápidos, não necessariamente precisos, para uma primeira apreciação

#### Introdução

pelo menos da ordem de grandeza das variáveis envolvidas, sendo que tais valores poderão ou não ser posteriormente refinados, dependendo do grau de interesse gerado pela situação. Resultados grosseiros (até 20% de erro), portanto, podem ser perfeitamente tolerados nessa fase inicial. Daí a preferência por métodos empíricos ou semi-empíricos que, apesar de menos precisos e normalmente de uso restrito a estreitas faixas de operação (dentro das quais foram validados), são simples, práticos e, acima de tudo, rápidos.

Para o cálculo mais rigoroso e refinado da performance de ciclones estão sendo desenvolvidos, paralelamente a esse trabalho, outros softwares que deverão dispor de métodos de modelagem certamente mais poderosos do que os que estão sendo usados aqui.

A construção do Banco de Dados citado anteriormente tem, por sua vez, a finalidade de possibilitar uma avaliação do desempenho usual de cada um dos métodos de cálculo disponíveis no software aplicativo. Devido às eventuais imprecisões apresentadas por eles seria interessante dispor de algumas linhas de orientação no sentido de indicar quais deles costumam apresentar os melhores resultados e quais são normalmente os mais imprecisos, ou, pelo menos, as faixas de operação dentro das quais cada um costuma apresentar melhores resultados, ou seja, maior capacidade de prever os dados experimentais.

A única forma de se fazer isso é através da comparação de dados reais, obtidos experimentalmente, com resultados obtidos pelo uso dé cada método. Para isso foi levantado um número razoável de dados experimentais da literatura disponível. Além disso foram realizados uma série de testes no modelo piloto da SIX, com o objetivo de obtenção de dados experimentais próprios para comparação de resultados.

O conteúdo do trabalho encontra-se dividido em seis capítulos.

O capítulo 1 faz uma rápida abordagem a respeito do funcionamento e aplicações mais comuns dos ciclones, além de trazer algumas informações gerais sobre esse equipamento e um resumo dos métodos de cálculo empíricos ou semi empíricos mais conhecidos. Esses métodos são objeto de discussão detalhada nos capítulos 2 e 3, que apresentam, respectivamente, os métodos para cálculo de eficiência e os métodos para cálculo de queda de pressão disponíveis no software desenvolvido.

A estrutura e o modo de operação desse software são o assunto do capítulo 4. O capítulo

5, por sua vez, apresenta não apenas uma série de resultados obtidos através do uso do programa, como também a análise desses resultados e a sua comparação com os dados experimentais obtidos dos testes realizados na PETROBRÁS-SIX ou da literatura.

As conclusões a que se chegou a partir das análises presentes no capítulo 5 encontram-se no capítulo 6, assim como algumas sugestões para trabalhos posteriores.

## CAPÍTULO 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.1- O Ciclone

Os ciclones, também conhecidos como coletores centrífugos de poeira ou separadores ciclônicos, consistem, atualmente, em um dos mais difundidos aparelhos inerciais usados para remoção de sólidos particulados de correntes gasosas e/ou para determinação da distribuição de tamanhos de partículas que podem ser transportadas por uma corrente de gás. Eles são usados para remoção de poeiras de correntes gasosas industriais desde o final do século XIX e, desde então, sua popularidade para esse tipo de aplicação vem crescendo continuamente.

A figura 1.1 traz a representação esquemática de um modelo convencional de ciclone, de fluxo reverso e entrada tangencial. Este consiste simplesmente em um cilindro, também chamado de barril, dotado de uma entrada tangencial por onde deve entrar uma corrente gasosa carregada de partículas a uma dada velocidade, geralmente alta. Essa geometria impõe um movimento espiral à corrente gasosa que passa, então, a girar ao redor do duto de saída de gás, que se encontra na parte superior do ciclone. À medida em que a espiral de gás se move para baixo ela impõe uma aceleração centrífuga muitas vezes da ordem de várias centenas de gravidades sobre as partículas sólidas que são, então, empurradas em direção à parede do cilindro, de onde elas escorregam para serem finalmente coletadas no fundo do ciclone. Isso explica o fato de que usualmente a parte inferior do ciclone é cônica, ao invés de cilíndrica, de modo a facilitar a captação de sólidos na base do equipamento. Após atingir um determinado ponto na parte inferior do ciclone, a espiral de gás reverte o seu fluxo e passa a se deslocar para cima, criando, assim, uma espiral interna de gás, livre de sólidos, que sobe em direção ao duto de saída (figura 1.2). Deve-se notar, porém, que não há qualquer fronteira rígida entre esses dois vórtex de gás (ascendente e descendente) e que a tranferência de gás e de partículas finas de poeira ocorre ao longo de todo o comprimento do ciclone [3]. Tal coletor pode ser caracterizado pelas suas oito dimensões características (figura 1.1), que são freqüentemente expressas em termos de sua razão com o valor do diâmetro do cilindro, D.



Figura 1.1- Modelo típico de ciclone de fluxo reverso com entrada tangencial.

Notação:

- a = Altura do duto de entrada de gás;
- b = Largura do duto de entrada de gás;

D = Diâmetro do barril;

 $D_b = Diâmetro do duto de saída de sólidos;$ 

D<sub>e</sub>= Diâmetro do duto de saída de gás;

H = Altura do ciclone;

- $h_c =$  Altura do cilindro;
- S = Penetração do duto de saída de gás.

A grande popularidade dos ciclones baseia-se no fato de que eles apresentam

normalmente altas eficiências (acima de 90%), são compactos, de confecção simples e barata, são fáceis de se operar, não contêm partes móveis e, além de tudo, requerem pouca manutenção. Sua faixa de tamanhos pode variar desde um ciclone miniatura como, por exemplo, aqueles que têm um cilindro de menos de 2 cm de diâmetro e são usados em aplicações de higiene industrial, para coleta de partículas inaláveis extremamente pequenas, até aqueles com vários metros de diâmetro usados para remoção de particulados de gases em plantas industriais [20].

Quanto ao seu tipo de projeto os ciclones dividem-se basicamente em 2 categorias: o ciclone de fluxo reverso, mais comum e já ilustrado na figura 1.1, e o ciclone de fluxo direto, onde não ocorre a reversão do fluxo de gás, e tanto este quanto as partículas a serem coletadas saem pela mesma extremidade do equipamento.

Com relação às condições de operação o ciclone pode ser usado para separar os seguintes sistemas:

- fluidos de diferentes densidades;
- sólidos de líquidos;
- sólidos de gases.



Figura 1.2 - Padrão de fluxo do gás no interior de um ciclone [27].

Quando a fase mais leve é um líquido (ex: separação de sólidos de uma corrente aquosa) costuma-se denominar o equipamento de <u>hidrociclone</u>. Apesar disso, o tipo de aplicação mais comum para a qual os ciclones são empregados é a remoção de poeiras relativamente finas de gases cujas propriedades não são muito diferentes das propriedades do ar [3].

Mesmo os modelos mais comuns de ciclones utilizados para esse tipo de aplicação podem dispor de entrada tangencial ou entrada em voluta (figura 1.3). Apesar de a entrada em voluta garantir menor queda de pressão, a entrada tangencial tem uso mais difundido uma vez que ela permite que maiores valores de eficiência sejam atingidos. Esse é, em última análise, o ponto crucial quando se trata do emprego de ciclones: deseja-se sempre que ele disponha da maior eficiência de coleta possível, mas geralmente isso ocorre às custas de uma maior queda de pressão. Quando se procura operar o ciclone sob condições que garantam menor perda de carga, provavelmente a sua eficiência também cairá. Existe, portanto, uma condição ótima de operação, assim como um design ótimo para cada aplicação em particular.



Figura 1.3- Tipos de entrada mais comuns.

A principal desvantagem dos ciclones é que, devido ao fato de eles se basearem em forças inerciais para coletas de sólidos, sua habilidade de coletar partículas com menos de 40 mícrons diminui exponencialmente com a diminuição de tamanho das mesmas, de forma que essencialmente todas as partículas menores que 5 mícrons são quase sempre perdidas [34]. Apesar

disso, alguns ciclones podem, a princípio, ser especialmente projetados para apresentarem maiores eficiências na coleta de finos (partículas com diâmetro menor que 44  $\mu$ m), mas tal procedimento é normalmente restrito pelos seguintes fatores:

- excessiva queda de pressão;
- atrito excessivo das partículas sobre o equipamento;
- erosão;
- altos custos de manutenção.

De qualquer forma, a estrutura simples de que os ciclones dispõem, aliada à possibilidade de se trabalhar com eles de modo seguro e confiável em faixas de pressão que variam desde 0,01 bar até 100 bar, e a temperaturas até superiores a 1000 °C [25], lhes confere uma posição no mínimo privilegiada entre os aparelhos de separação de sólidos existentes hoje em dia. Para remoção de partículas a altas temperaturas, os ciclones representam, no presente momento, o único equipamento que pode ser usado em escala industrial. Deve-se notar que as condições extremas de operação de um ciclone são limitadas, a princípio, apenas pelo material de que ele é construído.

As refinarias de petróleo consistem em um dos maiores campos de aplicação desse equipamento [34], se não o mais importante, e são, assim, os órgãos que maior preocupação têm tido atualmente em garantir o desenvolvimento desse tipo de tecnologia. Em tais aplicações os ciclones são usados principalmente associados aos reatores e regeneradores de unidades de craqueamento catalítico fluidizado (FCC) e aos incineradores que são responsáveis pela queima das correntes de resíduos provenientes do refino [34]. Os objetivos finais de seu uso nesses casos são:

•recuperação do catalisador que promove o craqueamento e é carregado pela corrente gasosa e/ou

• controle da emissão de partículas sólidas ao ambiente.

Devido às baixas eficiências de coleta obtidas para recuperação de finos, nas aplicações em que o gás efluente do ciclone é jogado diretamente na atmosfera são utilizados, em geral, dois ou três ciclones em série, sendo que o segundo e o terceiro (caso exista) estágios de separação são executados, via de regra, por ciclones menores, trabalhando a maiores velocidades de entrada, maiores eficiências, mas, por outro lado, causando igualmente uma maior perda de carga.

A tendência atual de se obter energia elétrica a partir de combustíveis fósseis, particularmente o carvão, exige um rigoroso tratamento dos gases formados para remoção dos sólidos particulados a fim de se protegerem as hélices das turbinas existentes mais adiante no processo. Tal separação é normalmente feita sob condições rigorosas de temperatura e pressão, o que faz do ciclone o equipamento ideal para executar esse tipo de tarefa. Esse fato, aliado à crescente preocupação em relação ao impacto ambiental das emissões sólidas de diferentes indústrias, faz com que tal equipamento receba atenção cada vez maior [6].

Embora os ciclones venham sendo largamente usados em várias aplicações industriais por um longo tempo, os mecanismos exatos através dos quais ocorre a remoção de partículas ainda não são completamente conhecidos [20]. Isso porque, apesar da aparente simplicidade do equipamento, o fluxo de fluidos no seu interior é extremamente complexo, devido ao caráter tridimensional do movimento espiral descrito pelo gás, o que envolve zonas de alta vorticidade e muitas regiões de reversão de fluxo. O conhecimento atual dos padrões de fluxo de gás em um ciclone estão grandemente baseados em dados obtidos ainda nas décadas de 30 e 40 usando tubos de impacto (tubos de Pitot, por exemplo) que provavelmente causavam distorções nas linhas de fluxo, uma vez que fluxos altamente turbulentos são, em geral, sensíveis a esse tipo de interferência [6]. A confiabilidade desses dados não pode, portanto, ser garantida.

De qualquer forma, foram esses dados que formaram a base para a construção de uma série de teorias e correlações empíricas ou semi-empíricas que são usadas até hoje para o projeto de ciclones. Embora muitas dessas teorias tenham sido desenvolvidas a mais de 40 anos atrás, elas ainda não foram bem validadas. Assim, muito do projeto desses equipamentos baseia-se ainda no uso da experiência, tentativa e erro, como linhas de orientação. Existem alguns modelos básicos, de grande aceitação no meio industrial, que servem como base para o design de ciclones. Entre tais modelos um dos mais populares, por exemplo, é o ciclone de alta eficiência proposto

por Stairmand em 1951 [30]. Apesar de continuar sendo amplamente usado até hoje, não há nenhuma fundamentação teórica que garanta que ele, ou qualquer outro modelo de uso difundido (como o ciclone de Lapple), trabalhe sob condições ótimas [10,20]. As dimensões desses dois modelos de ciclone encontram-se expressas como função de D na Tabela 1.1:

	Lapple	Stairmand
a/D	0,50	0,50
b/D	0,25	0,20
D <sub>c</sub> /D	0,50	0,50
S/D	0,62	0,50
h_/D	2,00	1,50
H/D	4,00	4,00
D <sub>b</sub> /D	0,25	0,37

Tabela 1.1 - Ciclones Lapple e Stairmand.

De acordo com Swift [31] "... os ciclones têm sido desenvolvidos praticamente apenas através de procedimentos experimentais, e seria difícil provar matematicamente que eles dispõem do melhor design."

Entende-se, na verdade, muito pouco dos efeitos de cada uma das oito dimensões do ciclone sobre a sua performance [20].

Devido a essa carência de um método rigoroso de projeto, é largamente aceita a possibilidade de que existam melhores projetos e/ou condições de operação em que os ciclones

atuais possam operar [6]. Esse fato, aliado às exigências de se removerem partículas cada vez menores das emissões industriais, justificam o atual interesse renovado no projeto desse tipo de coletor, de forma que ele trabalhe a altas eficiências, especificamente em condições de alta pressão e temperatura, mesmo que isso seja às custas de maiores perdas de carga em determinadas aplicações.

### 1.2 - Métodos de Cálculo

Em vista do que foi exposto no item anterior, torna-se clara a premente necessidade de métodos que permitam o cálculo dos dois indicadores da performance de um ciclone: sua eficiência de coleta e perda de carga associada. Do ponto de vista do meio industrial, é basicamente isso o que interessa, no fim das contas, em se tratando desse tipo de equipamento.

Dentre os métodos semi-empíricos para cálculo de eficiência de um ciclone, os mais antigos baseiam-se no cálculo prévio do diâmetro de corte ou diâmetro crítico de partícula, d<sub>c</sub>, que é definido como o diâmetro da partícula cuja eficiência individual de coleta é igual a 50%. Os valores de eficiência para todos os outros tamanhos de partículas são determinados tomando-se como referência o valor do diâmetro crítico. Um dos métodos mais difundidos que partem dessa abordagem é sem dúvida, o método de Lapple [21], proposto por ele em 1950. Como este há também o método proposto mais recentemente por Zenz [34], praticamente idêntico. Como fatores a favor deste segundo método pode-se dizer que:

1. Zenz (1975) baseou-se em um número muito maior de experimentos para propor sua teoria, usando um maior número de modelos diferentes de ciclones, ao passo que Lapple baseou-se apenas em um único modelo.

2. Zenz fez estudos do efeito da concentração de sólidos sobre a eficiência.

3. Zenz levou em consideração a influência do tipo de entrada (tangencial ou voluta) sobre a eficiência, coisa que Lapple não fez (ele trabalhou apenas com um ciclone de entrada tangencial).

Alguns anos após Lapple ter proposto sua teoria, Barth [4] apresentou seu próprio método de cálculo, que é, diga-se de passagem, amplamente citado pela literatura européia [10]. Barth utiliza-se do valor da velocidade terminal da partícula de diâmetro crítico ( $\eta = 50\%$ ) como referência para o cálculo das eficiências das partículas de diferentes velocidades terminais (correspondentes, por sua vez, aos diferentes diâmetros). Mais recentemente Iozia e Leith [17,18] desenvolveram o seu próprio método de cálculo baseando-se em algumas modificações do método de Barth.

A grande vantagem da teoria proposta por Leith e Licht [22] em 1972 é que ela permite o cálculo direto da eficiência individual de qualquer diâmetro de partícula para qualquer geometria de ciclone, sem a necessidade da determinação prévia do diâmetro crítico ou algo equivalente. Seu método, além de reconhecer a natureza inerentemente turbulenta do fluxo no interior dos ciclones, leva em conta a distribuição de tempos de residência do gás no interior do equipamento. Apesar disso, o modelo proposto traz consigo algumas hipóteses que se desviam do comportamento real apresentado pelo ciclone, o que se traduz em capacidade pobre de predição da performance desses equipamentos. Para contornar essas limitações Dietz [9] propôs, em 1981, um outro método que não passa, na verdade, de um aperfeiçoamento do método de Leith e Licht, uma vez que ele apresenta como característica original apenas o fato de basear-se em hipóteses iniciais mais realistas para descrição do processo de separação de partículas. O desenvolvimento matemático posterior para determinação das equações do método é semelhante. Já no final da década de 80 (1989) Li e Wang [12] apresentaram um novo modelo para cálculo de eficiência que parte de uma abordagem um pouco diferente, baseando-se praticamente apenas na equação da continuidade.

Finalmente, guardando também muitas semelhanças com o método de Dietz, há o método de Mothes e Löffler (1984) [25], que se diferencia do anterior basicamente pela forma como alguns dos parâmetros intermediários do método são calculados. Apesar das várias diferenças superficiais, logo se verifica que, no fundo, trata-se do mesmo desenvolvimento matemático básico que parte das mesmas hipóteses iniciais.

Além destes existem, sem dúvida, outros métodos para o cálculo da eficiência. Foi decidido, porém, que esse trabalho deveria se restringir apenas àqueles que foram citados até

agora para a construção do software desejado.

No caso dos métodos para cálculo de queda de pressão a situação torna-se um pouco diferente. O grau de empirismo é sensivelmente maior e, embora alguns métodos apresentem alguma fundamentação teórica, como é o caso dos métodos de Alexander (1949) [3] e de Stairmand (1949) [29], por exemplo, a maioria baseia-se quase que exclusivamente em dados empíricos como, por exemplo, o método de Shepherd e Lapple (1940) [28] e o método de First (1949) [13].

Além dos quatro anteriores, outros métodos que fazem parte deste trabalho são os propostos por: Zenz (1975) [34], Casal e Martinez-Benet (1983) [8] e Barth (1950) [4]. Maiores detalhes sobre cada um deles serão apresentados mais adiante.

# CAPÍTULO 2 MÉTODOS PARA CÁLCULO DE EFICIÊNCIA

A separação de partículas promovida pelo ciclone ocorre, conforme já foi comentado, devido à força centrífuga gerada pelo movimento espiral da corrente gasosa que impele o sólido em direção à parede do ciclone, de onde ele desliza para o fundo e é captado. Em contrapartida a essa força opõe-se a força de arraste exercida sobre as partículas sólidas pelo gás em seu movimento em direção ao centro do ciclone e daí para o topo, de onde ele escoa para fora do equipamento.

Todas as teorias para cálculo de eficiência de coleta partem de um balanço entre essas duas forças. Fazendo-se diferentes hipóteses com relação à importância relativa de cada um dos termos gerados por esse balanço, e utilizando-se diferentes equações (empíricas ou não) para o cálculo dos parâmetros que venham a surgir nesses balanços (tempo de residência do gás, coeficientes de atrito, número de espirais que a corrente gasosa executa no ciclone, coeficiente de rearraste, fatores de correção, etc...) são obtidos os diferentes métodos para cálculo de eficiência, que podem ser extremamente simples, como por exemplo o método de Lapple [21], ou um pouco mais elaborados, envolvendo a resolução consecutiva de uma série de equações encadeadas, como é o caso do método de Mothes e Löffler [25].

Existem diferentes termos do balanço de forças que podem ou não ser tomados como insignificantes e, assim, ser desprezados. Uma vez que a importância relativa desses termos deve variar com o projeto do ciclone e condições operacionais, é bastante improvável que um único conjunto de hipóteses seja adequado para prever precisamente a eficiência de um ciclone para todas as aplicações possíveis [10].

Há, pelo menos, um acordo geral em se usarem 2 tipos de parâmetros para o cálculo da performance do ciclone:

• parâmetros de operação ( $d_p$ ,  $\rho_p$ ,  $\rho_g$ ,  $v_i$ ,  $\mu$ , T);

• parâmetros geométricos (D, De, a, b, S, H, h<sub>c</sub>, D<sub>b</sub>).

A situação não é tão clara, porém, com relação aos efeitos que as dimensões e geometria do ciclone exercem sobre a eficiência de coleta de partículas. Algumas teorias levam em consideração todas as oito dimensões do ciclone, enquanto outras incluem às vezes não mais do que 3 dimensões.

A eficiência individual de coleta do ciclone,  $\eta(i)$ , é definida como a fração de partículas de um dado tamanho que é retida por ele. A eficiência total de separação corresponde à média ponderada das eficiências individuais:

$$\eta = \sum_{i} m(i) \cdot \eta(i)$$
 (2.1)

onde m(i) é a fração mássica correspondente às partículas de tamanho (diâmetro) i. Note que essa eficiência global corresponde, em última análise, à razão entre a massa de partículas coletadas pelo ciclone pela massa total alimentada no mesmo.

Leith [10] identificou três tipos distintos de abordagens do problema inicial de balanço de forças que, por sua vez, conduzem a diferentes modelos para predição da eficiência de coleta de um ciclone. São elas:

- Cálculo do diâmetro crítico a partir do tempo de trajetória;
- Cálculo do diâmetro crítico a partir da determinação da partícula estática;
- Determinação direta das eficiências individuais.

### 2.1 Cálculo do diâmetro crítico a partir do tempo de trajetória

Esse tipo de abordagem assume que as partículas entram no ciclone a um certa distância radial de seu eixo e devem se deslocar, então, de sua posição original até a parede para serem coletadas. A partícula de diâmetro crítico é definida como sendo aquela que percorre exatamente essa distância durante seu tempo de residência no ciclone. Diferentes considerações a respeito da posição radial inicial e do tempo de residência levam a diferentes soluções aproximadas.

#### 2.1.1 Método de Lapple

A teoria de Lapple [21] para cálculo do diâmetro crítico é, sem dúvida, a mais conhecida dentre as que adotam a abordagem do tempo de trajetória para cálculo de eficiência, sendo, da mesma forma, uma das teorias mais simples que existem para isso.

Lapple assumiu que a carga de sólidos que entra no ciclone encontra-se uniformemente distribuída ao longo da abertura de entrada. Uma vez estabelecida essa hipótese, é de se esperar que o diâmetro de partícula capaz de percorrer, durante o seu tempo de residência dentro do ciclone, exatamente a distância correspondente à metade da largura do bocal de entrada (b), seja coletado com 50% de eficiência. Esse passa a ser, então, o diâmetro crítico de partícula e, assim, partículas com diâmetro maior que esse apresentam eficiência de coleta maior que 50%, enquanto que as partículas menores apresentarão, evidentemente, eficiências menores que 50%.

Assumindo-se que o gás se move no interior do ciclone como uma espiral rígida com

velocidade constante e igual à velocidade média de entrada no ciclone (v<sub>i</sub>), a distância percorrida pelo gás será dada pelo perímetro do cilindro,  $\pi D$ , multiplicado pelo número de espirais descritas pelo gás, N<sub>s</sub>. Assim, o tempo de residência do gás no ciclone será:

$$t_{res} = \frac{(\pi D) N_s}{V_i}$$
(2.2)

A partir do que foi comentado anteriormente, conclui-se que durante o tempo de residência,  $t_{res}$ , as partículas de diâmetro crítico percorrem exatamente a distância radial b/2, tendo que, para isso, vencer a força de arraste exercida pelo gás movimentando-se em fluxo contrário. A velocidade das partículas nesse percurso corresponderá, portanto, à sua velocidade terminal (v<sub>t</sub>) quando expostas a um campo centrífugo:

$$V_{t} = \frac{d_{p}^{2} (\rho_{p} - \rho_{g}) v^{2} / r}{18 \mu}$$
(2.3)

E o tempo necessário para a partícula percorrer esse percurso será:

$$t_{res} = \frac{b/2}{v_t} \tag{2.4}$$

Igualando (2.2) a (2.4), substituindo o valor de  $v_t$  pela equação (2.3), e resolvendo para  $d_p$ :

$$d_p = \sqrt{\frac{9\mu b}{2\pi \left(\rho_p - \rho_g\right) v_i N_s}}$$
(2.5)

Uma vez que d<sub>p</sub>, nesse caso, corresponde ao diâmetro crítico (d<sub>c</sub>) e lembrando que  $\rho_p$ >>  $\rho_g$  a equação (2.5) torna-se:

$$d_c = \sqrt{\frac{9\mu b}{2\pi\rho_p v_i N_s}}$$
(2.6)

que é a equação de Lapple para cálculo do diâmetro crítico de coleta.

No caso específico de seu aparato experimental, Lapple calculou  $N_s = 5$  determinando experimentalmente o diâmetro de corte e resolvendo a equação (2.6) para  $N_s$ . Embora ele tenha recomendado que se determine experimentalmente o valor de  $N_s$  para o caso de cada ciclone em particular, o valor  $N_s = 5$  é normalmente usado como uma constante sempre que se trabalha com o método de Lapple.

O cálculo do diâmetro crítico, porém, consiste em apenas meio caminho para quem está preocupado com o cálculo da performance de coleta de um ciclone. É necessário, agora, que a partir do valor de d<sub>e</sub> possamos relacionar à qualquer diâmetro de partícula sua respectiva

eficiência. Isso pode ser feito através do uso da <u>curva de eficiência</u>  $(d/d_c \ge \eta)$  obtida experimentalmente por Lapple e que se encontra na figura 2.1. Essa curva foi resultado do uso de um único modelo de ciclone e pode não ser válida para outras geometrias. As propoções geométricas do ciclone usado por Lapple encontram-se na Tabela 1.1. A curva experimental da figura 2.1 pode ser representada pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{d_p}{d_c}\right)^{-2}\right]}$$
(2.7)



Figura 2.1 - Curva de eficiência de Lapple [10].

#### 2.1.2- Método de Zenz

Assumindo-se que o gás se move dentro do ciclone como uma espiral rígida à velocidade constante igual à velocidade média de entrada (v<sub>i</sub>), e determinando o tempo de residência do gás a partir do número de voltas descritas pela espiral, Zenz [34] determina o diâmetro da menor partícula capaz de percorrer a distância b durante o seu tempo de residência no ciclone. O procedimento é exatamente igual ao executado por Lapple e a equação resultante é:

$$d_{c} = \sqrt{\frac{9 \,\mu b}{\pi \left(\rho_{p} - \rho_{g}\right) \, v_{i} N_{s}}} \tag{2.8}$$

Assim, pelo menos em teoria, todas as partículas maiores que  $d_c$  devem ser coletadas, assim como algumas com diâmetro menor que  $d_c$ , desde que elas entrem no ciclone em posições mais próximas à parede e, assim, tenham que percorrer uma distância menor que b para serem coletadas.

Na prática, porém, partículas com diâmetro maior que o calculado pela equação (2.8) são perdidas ao mesmo tempo em que partículas com diâmetro menor que d<sub>c</sub> podem apresentar eficiências significativamente altas, dependendo das condições de operação.

A maior perda das partículas maiores ocorre quando há re-arraste de partículas na base do ciclone, ou seja, partículas já coletadas, próximas à parede do cone, na base do equipamento, são novamente capturadas pelo vórtex ascendente de gás e carregadas com ele para fora do ciclone. Por outro lado, sabe-se que a eficiência de coleta de um ciclone aumenta com o aumento da carga de sólidos, sendo mantidas constantes todas as outras variáveis. Isso ocorre devido ao efeito de varredura das partículas maiores que carregam os finos presos em seus interstícios.

A fim de fundamentar a sua teoria, Zenz partiu das seguintes hipóteses:

1. O diâmetro de partícula calculado pela eq.(2.8) é arbitrariamente tomado como possuindo eficiência de coleta de apenas 50%.

2. A equação (2.8) aplica-se somente a cargas de sólido muito baixas, da ordem de 1 grão de sólido/ft<sup>3</sup> de gás ou menos (1 g = 15,432 grãos), ou seja, nas situações em que não ocorre o carregamento das partículas pequenas pelas maiores.

 O número de espirais, N<sub>s</sub>, a baixa carga de sólidos deve ser uma função apenas da velocidade do gás e proporções do ciclone.

4. A velocidade do movimento espiral de gás não é suficiente para provocar o re-arraste de partículas.

5. A influência da quantidade de sólidos na corrente gasosa sobre o valor final de eficiência de coleta deve ser função da magnitude da eficiência de coleta a baixas concentrações de sólidos.

Baseado em dados colhidos em diferentes ciclones operando com uma ampla variedade de sólidos numa faixa de concentração de menos de 1 até mais de 1000 grãos/ft<sup>3</sup> (2,29.10<sup>-3</sup> a 2,29 Kg/m<sup>3</sup>), Zenz determinou uma série de correlações para cálculo da eficiência de um ciclone.

A figura 2.2 representa a curva de eficiência fracional normalizada correspondente a essas correlações.  $D_{pth}$  corresponde ao diâmetro crítico (d<sub>c</sub>) e E<sub>o</sub> é a eficiência de coleta com que uma partícula de diâmetro  $D_p$  é coletada ( $\eta$ [i]) desde que a concentração de sólidos seja menor
que 1 grão/ft<sup>3</sup>. Note que uma das duas curvas dessa figura serve especificamente para o cálculo de ciclones com entrada em voluta. Para concentrações maiores, o valor corrigido da <u>eficiência</u> <u>global</u> de coleta pode ser obtido da figura 2.3 ( $E_L$ ) conhecendo-se a concentração de sólidos e o valor da eficiência global de coleta para concentrações baixas de sólidos, obtido da figura 2.2.



Figura 2.2 - Curva de eficiência de Zenz [34].

Esse gráfico não se aplica, porém, ao cálculo de eficiências individuais, uma vez que seria muito difícil prever empiricamente a influência que o aumento da concentração de sólidos exerce sobre cada diâmetro individual de partícula.



Figura 2.3 - Efeito da concentração de sólidos [34].

A figura (2.4), finalmente, corresponde à correlação que fornece o número de espiras  $(N_s)$  descritas pelo gás no interior de um ciclone de geometria similar às geometrias de Lapple ou Stairmand (ou, pelo menos, não muito diferente delas). Conforme já estabelecido, N, é dado como função da velocidade de entrada do gás  $(v_i)$ . Para geometrias muito diferentes, porém, é

de se esperar que a figura (2.4) não forneça valores adequados de  $N_s$ . Entretanto, uma vez que esse valor é elevado à raiz quadrada na equação (2.8), o valor de d<sub>e</sub> não é tão sensitivo a erros (desde que não muito grosseiros) na determinação de  $N_s$ .



Figura 2.4 - Correlação para o cálulo do número de espirais [34].

# 2.2 - Cálculo do diâmetro crítico a partir da determinação da "partícula estática"

A abordagem da partícula estática determina o diâmetro de partícula para o qual a força centrífuga é exatamente balanceada pela força de arraste. Essas partículas deveriam permanecer indefinidamente em movimento de rotação ao redor da região central do ciclone, abaixo do duto de saída de gás. A força de arraste excede a força centrífuga para as partículas menores e assim elas são carregadas para o centro e para fora pelo topo do ciclone. As partículas maiores giram

em direção à parede do ciclone e são coletadas no fundo. Na prática, porém, uma separação precisa nunca é observada devido às flutuações das velocidades radiais e tangenciais ao longo da altura do ciclone. A eficiência para o diâmetro calculado como crítico é normalmente assumida como de 50%.

#### 2.2.1 - Método de Barth

Barth [4] desenvolveu sua teoria de eficiência com base nessa abordagem. Ele assumiu, inicialmente, que o vórtex ascendente de gás presente no centro do ciclone seria como que uma extensão cilíndrica imaginária do duto de saída de gás, possuindo, inclusive, o mesmo diâmetro que este (D<sub>e</sub>). Esse vórtex se prolongaria, então, desde a parte inferior do duto de saída de gás até a base do ciclone (quando D<sub>e</sub>  $\leq$  D<sub>b</sub>) ou até encontrar a parede do cone, na parte inferior (se D<sub>e</sub> > D<sub>b</sub>). Definindo h<sup>•</sup> como altura (= comprimento) do vórtex interno, temos que:

$$h^* = H - S$$
, se  $D_e \leq D_b$  (2.9)

$$h^* = \frac{(H - hc) (D - De)}{(D - Db)} + (hc - S), \quad \text{se } D_e > D_b \quad (2.10)$$

Barth calculou a velocidade tangencial do gás na fronteira do vórtex ascendente (v,)

como:

$$v_{v} = v_{o} \left[ \frac{(De/2) (D - b) \pi}{2ab\gamma + h^{*} (D - b) \lambda \pi} \right]$$
(2.11)

onde  $\lambda$  é o fator de fricção que Barth assumiu como constante e igual a 0,02, v<sub>o</sub> é a velocidade do gás na saída do ciclone e:

$$\gamma = 1 - 1, 2(b/D)$$
 (2.12)

Barth calculou, então, que a velocidade terminal da partícula estática  $(v_t^*)$  é:

$$v_t^* = \frac{Qg}{2\pi h^* v_v^2}$$
(2.13)

Uma vez que a velocidade terminal de uma partícula qualquer ( $v_t$ ), esférica e em regime de Stokes, é dada pela equação (2.3), a seguinte razão pode ser escrita:

$$\frac{v_t}{v_t^*} = \frac{\pi h^* v_v^2 \rho_p d_p^2}{9 \,\mu Q}$$
(2.14)

A eficiência de coleta para qualquer diâmetro de partícula é determinada pela razão entre sua velocidade terminal e a velocidade terminal da partícula estática. Isso pode ser feito através da curva de Barth ( $v_t/v_t$  x  $\eta$ ) dada pela figura (2.5) ou pela equação abaixo, que representa a curva:

$$\eta = \frac{1}{\left[1 + (v_t/v_t^*)^{-3.2}\right]}$$
(2.15)



Figura 2.5 - Curva de eficiência de Barth [10].

Para se determinar o valor exato do diâmetro crítico, basta que se aplique a equação (2.14) para o caso em que  $v_t = v_t^*$ , sendo que nessa situação,  $d_p = d_c$ :

$$d_c = \sqrt{\frac{9\mu Q}{\pi h^* \rho_p v_t^2}}$$
(2.16)

Dirgo e Leith [10] introduziram uma modificação ao método de Barth que consiste em multiplicar o lado direito da equação (2.14) por um fator constante K, determinado por eles como igual a 4. Tal modificação é totalmente empírica e baseia-se unicamente nos dados experimentais obtidos por esses autores que observaram que, apesar de a curva de Barth reproduzir muito bem a forma da curva de seus pontos experimentais, a primeira encontrava-se deslocada para a direita em relação à segunda. A introdução do fator de correção K = 4 na equação (2.14) levava à obtenção de valores maiores de eficiência pela equação (2.15) e, com isso, a um melhor ajuste entre os pontos experimentais e os valores de eficiência calculados por essa teoria. No entanto, ao mesmo tempo em que propõem essa modificação, Dirgo e Leith chamam a atenção para o fato de que a forma da curva de eficiência depende muito da geometria do ciclone, sendo de se esperar que sua proposta não seja necessariamente válida para qualquer situação. De fato, em um artigo publicado 5 anos mais tarde, ao comparar seus próprios resultados experimentais com pontos calculados pelo método de Barth, Kim e Lee [20] verificaram que a modificação proposta por Dirgo e Leith piorava o ajuste dos pontos experimentais com os pontos calculados sendo que, assim, eles preferiram utilizar a teoria de Barth em sua forma original.

#### 2.2.2- Método de Iozia e Leith

O método de Iozia e Leith [17,18] é basicamente idêntico ao método de Barth, uma vez que parte do mesmo princípio e do mesmo balanço de forças usado por esse último. Assim, temos:

A força de arraste que um fluido exerce sobre uma partícula  $(F_k)$  pode ser calculada pela Lei de Stokes:

$$F_k = 3\pi \mu d_p w \tag{2.18}$$

Deve-se notar que o valor da velocidade radial a ser usado (w) deve ser o correspondente ao deslocamento relativo entre a fase fluida (gás) e a partícula. Daí, a equação (2.17) pode ser escrita da seguinte forma (assumindo-se geometria esférica):

$$\frac{\pi d_p^3 \rho_p}{6} \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{\pi d_p^3 \rho_p}{6} \frac{v^2}{r} + 3\pi \mu d_p \left[ \frac{dr}{dt} - v_r \right]$$
(2.19)

Ao invés de assumir que o vórtex interno de gás tem diâmetro igual ao do duto de saída

no topo do ciclone ( $D_{vortex} = D_e$ ) Iozia e Leith estabeleceram sua própria correlação para determinar esse diâmetro. No raio do vórtex interno ( $R_v$ ) devem ficar teoricamente suspensas as partículas de diâmetro crítico devido ao balanço entre as forças centrífuga e de arraste. Nesse ponto, onde a velocidade tangencial do gás é máxima ( $v_{max}$ , figura 2.6), a velocidade e aceleração radial dessas partículas são nulas. Assim, da equação (2.19):

$$\frac{d_p^2 \rho_p}{18 \mu} \frac{V_{max}}{R_v} = V_r$$
(2.20)

O grupo  $d_p^2 \rho_p / 18 \mu$  é também conhecido como o tempo de relaxamento da partícula de diâmetro  $d_p$ .





A velocidade radial do fluxo de gás no sentido do centro do ciclone é:

$$v_r = \frac{Q}{2\pi R_v z_v} \tag{2.21}$$

onde Q corresponde ao fluxo de gás e z, é a altura do vórtex interno de gás (não necessariamente igual ao valor de h<sup>\*</sup> definido por Barth).

Substituindo a equação (2.21) em (2.20) obtemos a equação para cálculo do diâmetro crítico, d.:

$$d_{c} = \sqrt{\frac{9\mu Q}{\pi z_{v} \rho_{p} v_{máx}^{2}}}$$
(2.22)

Note que a equação (2.22) acima corresponde exatamente à equação (2.16) definida por Barth. Resta, agora, definirmos como determinar os valores de R, (ou o diâmetro do vórtex,  $D_{vórtex}$ ), z, e de  $v_{máx}$  de forma que a equação (2.22) possa ser usada.

Após a realização de uma série de testes em onze ciclones diferentes, de forma a avaliar o efeito da velocidade de entrada e da geometria do ciclone sobre as variáveis citadas acima, e após a realização da análise da sensibilidade de cada variável a esses parâmetros (= velocidade de entrada e geometria), a fim de avaliar a importância relativa de cada um, Iozia e Leith chegaram às seguintes equações totalmente empíricas:

$$V_{max} = 6.1 V_i (ab/D^2)^{0.61} (De/D)^{-0.74} (H/D)^{-0.33}$$
 (2.23)

$$D_{vortex} = 0.47 D (ab/D^2)^{-0.26} (De/D)^{1.4}$$
 (2.24)

Daí, de modo análogo ao procedimento executado por Barth:

$$Z_c = H - S, \qquad \text{se } D_{\text{vortex}} \leq D_{\text{b}} \qquad (2.25)$$

$$z_{c} = (H-S) - \left(\frac{H-h_{c}}{D_{b}}\right) \left(\frac{D_{vortex}}{D_{b}} - 1\right), \quad \text{se } D_{vortex} > D_{b} \quad (2.26)$$

A relação entre eficiência de coleta e diâmetro de partícula costuma dar origem a curvas de eficiência de forma sigmóide. Tais curvas, como já vimos no caso dos métodos anteriores, podem ser aproximadas por uma equação do tipo:

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_c}{d_p}\right)^{\beta}}$$
(2.27)

Através de um novo conjunto de experimentos e da análise estatística de seus resultados,

foi determinada a seguinte equação para o cálculo de B:

 $\ln(\beta) = 0.62 - 0.87 \ln(d_c) + 5.21 \ln(ab/D^2) + 1.05 \ln(ab/D^2)^2 \quad (2.28)$ 

onde d<sub>c</sub> deve ser usado em centímetros.

Esse método, porém, não leva em consideração:

• O efeito da concentração de partículas.

• O efeito do re-arraste de partículas.

## 2.3 - Determinação direta das eficiências individuais

Teorias mais recentes permitem o cálculo direto da eficiência de partículas de qualquer tamanho para ciclones de qualquer design. A curva de eficiência fracional completa pode ser determinada sem a necessidade de se referir a uma curva de eficiência generalizada baseada em um diâmetro crítico.

Antes da apresentação de algumas teorias que partem dessa abordagem, segue abaixo a descrição de dois parâmetros importantes definidos por Alexander [3] muitas vezes usados por elas.

## 2.3.1- O expoente do vórtex

Um grande número de experimentos já demonstrou que a velocidade tangencial do gás dentro do ciclone aumenta gradualmente da parede em direção ao centro até que, quando um certo ponto é atingido, ela cai bruscamente (figura 2.7 b).

O expoente do vórtex, n, definido por Alexander [3], descreve a variação do valor da velocidade tangencial do gás em função da posição radial, no ciclone:

$$V. r^n = K$$
 (2.29)

onde K é uma constante.

Para um gás hipotético com viscosidade zero e sem efeitos de fricção há uma completa conservação do momento angular, ou seja, n = 1:

$$v_1 r_1 = v_2 r_2 = \dots v_i r_i = \dots = K$$

onde o índice i refere-se a uma posição radial qualquer, no interior do ciclone.

No caso da rotação de um corpo sólido, por outro lado, sabe-se que n = -1:

$$\frac{v_1}{r_1} = \frac{v_2}{r_2} = \ldots = \frac{v_i}{r_i} = \ldots = K$$



Figura 2.7- (a) Fluxo de gás no interior de um ciclone; (b) perfis de velocidade tangencial [6].

Em uma situação real de operação de um ciclone, a viscosidade do gás e os efeitos de fricção se combinam para gerar valores de n entre -1 e 1. O valor de n deverá aumentar com o diâmetro do ciclone, uma vez que o efeito do atrito com as paredes internas do ciclone é mais

significativo para diâmetros menores e, nesse caso, a transferência do momento angular será menos perfeita. Observações experimentais mostram que nas condições de rotação normais em um ciclone o valor de n costuma variar entre 0,5 e 0,9 [10], dependendo do tamanho do ciclone e da temperatura de operação. Para o cálculo de seu valor Alexander apresentou a seguinte equação empírica:

$$n = 1 - [(1 - 0, 67 D^{0, 14}) (T/283)^{0, 3}]$$
(2.30)

onde o diâmetro do barril deve ser dado em metros, e a temperatura, em graus Kelvin.

Nenhuma outra forma de predizer o valor de n foi encontrada, até o momento.

#### 2.3.2- Comprimento natural

Pode-se imaginar, a princípio, que quanto maior for a altura de um ciclone, maior será o grau de separação efetuado por ele, devido ao maior tempo de residência do gás em seu interior. Isso é verdadeiro apenas até um certo ponto, uma vez que o ponto mais baixo até onde o gás desce, no interior do ciclone, não é necessariamente o fundo deste. Alexander [3] observou, em longos ciclones de vidro, que o vórtex de gás possuia sempre um ponto de reversão de fluxo de posição estável e bem definida, a uma determinada distância abaixo do duto de saída de gás, que era sempre menor que (H-S). Ele denominou essa distância, então, de "comprimento natural" do ciclone (l) e encontrou a seguinte equação empírica para calcular seu valor:

$$1 = 2,3 D_e \left(\frac{D^2}{ab}\right)^{1/3}$$
 (2.31)

Deve-se notar que o valor de l é independente do valor da vazão de gás que entra no separador.

Se o barril do ciclone tiver um comprimento muito maior que l, deverá se formar uma zona de estagnação entre o ponto de reversão do fluxo de gás e a saída de sólidos na base do equipamento. A força que promove a separação de sólidos deixa de existir nessa região e eles poderão bloquear a saída na base do ciclone à medida em que forem se depositando no cone. Torna-se, assim, indesejável que o barril venha a exceder muito o comprimento natural do ciclone.

Se, por outro lado, o comprimento do corpo do ciclone for menor que l (H-S < l), seu potencial de separação será sub-aproveitado [22], o que também não é desejável.

#### 2.3.3 - Método de Leith e Licht

O método de Leith e Licht [22] parte de uma equação que dá a componente radial da trajetória de uma partícula individual que se move num gás girando sob as condições dentro do ciclone. Uma equação diferencial que descreve esse movimento é estabelecida através de um balanço de forças sobre a partícula com as seguinte hipóteses:

1. A partícula é esférica;

2. O movimento da partícula não é influenciado pela presença de outras partículas nas proximidades (= baixa concentração de sólidos);

3. A força de arraste radial sobre a partícula é dada pela Lei de Stokes;

4. A velocidade radial do gás é zero (!);

5. A velocidade tangencial da partícula é a mesma que a do gás, ou seja, não há escorregamento na direção tangencial entre a partícula e o gás;

6. A componente tangencial da velocidade está relacionada à posição radial por uma forma modificada da equação para um vórtex de um fluido ideal:

onde o valor de n é calculado pela equação proposta por Alexander (2.30).

Sob essas condições o balanço de forças nos leva à seguinte equação:

$$\frac{d^2r}{dt^2} + \frac{18\mu}{d_p^2} \frac{dr}{dt} - u_w^2 R_c^{2n} \frac{1}{r^{2n+1}} = 0$$
 (2.32)

onde u<sub>w</sub> é a velocidade tangencial do gás na parede do ciclone e R<sub>e</sub> é o raio do ciclone.

Estritamente falando, a velocidade tangencial do gás na parede do ciclone deve ser nula. Entretanto, a região na qual as partículas capturadas deslizam pela parede em direção à saída de sólidos deve ser muito fina. Assim, um erro muito pequeno é introduzido quando consideramos que:

$$r = R_c \rightarrow u_w = \frac{Q}{ab}$$
 (2.33)

ou seja, a velocidade tangencial das partículas próximas à parede é igual à velocidade média de entrada do gás.

Uma solução aproximada da equação (2.32) pode ser obtida desprezando-se a derivada de segunda ordem, o que é equivalente a dizer que a partícula se move radialmente para o centro do ciclone com velocidade constante.

Integrando a equação resultante chega-se a:

$$t = \frac{9\mu}{\rho_p(n+1)} \left(\frac{R_c}{u_w d_p}\right) \left[ \left(\frac{r}{R_c}\right)^{2n+2} - \left(\frac{R_1}{R_c}\right)^{2n+2} \right]$$
(2.34)

onde t é o tempo gasto para uma partícula de diâmetro d<sub>p</sub> mover-se de R<sub>1</sub> até r.

O erro causado pela aproximação de se desprezar a segunda derivada foi estimado por Mehta [23] através da comparação entre resultados obtidos da equação (2.34) com a solução numérica da equação (2.32). Ele verificou que as duas soluções se aproximam uma da outra e dão virtualmente o mesmo resultado depois que t atinge 1/20 do tempo necessário para a partícula atingir a parede do ciclone. Para tempos mais curtos a solução aproximada tende a superestimar o tempo de trajetória.

Uma vez definido o movimento da partícula sólida (equação 2.34), o próximo passo a ser tomado é a determinação do tempo médio de residência do gás no ciclone, que será o responsável pelo grau de eficiência de separação.

Leith e Licht assumem que o tempo médio de residência total  $(t_{res}^{T})$  é igual ao tempo médio necessário para o gás descer do nível médio de entrada até o nível correspondente à base do duto de saída de gás  $(t_{res}^{1})$  mais o tempo médio de residência do gás abaixo desse ponto  $(t_{res}^{2})$ :

$$\mathbf{t}_{\mathrm{res}}^{\mathrm{T}} = \mathbf{t}_{\mathrm{res}}^{1} + \mathbf{t}_{\mathrm{res}}^{2}$$

O mínimo tempo de residência possível pode ser calculado assumindo que todo o gás entra pelo nível médio de entrada (a/2) e sai imediatamente do ciclone quando chega à base do duto de saída de gás, ou seja,  $t_{res}^2 = 0$  e  $t_{res}^T = t_{res}^{-1}$ . Nessa situação temos:

$$t_{res}^{1} = \frac{\pi (S - a/2) (D^{2} - D_{e}^{2})}{4Q} = \frac{V_{s}}{Q}$$
(2.35)

onde V, corresponde ao volume da região anular entre o nível médio da entrada de gás e a base do duto de saída de gás (figura 2.8):

$$V_s = \frac{\pi (S - a/2) (D^2 - D_e^2)}{4}$$
 (2.36)

O tempo de residência adicional  $(t_{res}^2)$  pode variar de zero até um valor máximo correspondente ao ponto mais baixo que o gás pode descer no interior do ciclone, sendo que o tempo adicional médio  $(t_{res}^2)$  é tomado, então, como sendo igual à metade do valor do tempo máximo adicional. O ponto mais baixo até onde o gás desce, corresponde ao comprimento natural dado por Alexander (equação 2.31), conforme já foi discutido no item 2.3.2.

O tempo adicional máximo de residência  $(t_{max})$ , então, será:

$$t_{máx} = \frac{V_{n1}}{Q} \tag{2.37}$$

onde  $V_{nt}$  corresponde ao volume total do ciclone desde a base do duto de saída de gás até a base do comprimento natural do ciclone, menos o volume do vórtex ascendente de gás (figura 2.8). Assumindo que o diâmetro do vórtex central de gás é igual ao diâmetro do duto de saída ( $D_{vórtex} = D_e$ ), temos:

$$V_{nl} = \frac{\pi D^2}{4} (h_c - S) + \frac{\pi}{4} \frac{(1 + S - h_c) D^2}{3} \left[ 1 + \frac{d}{D} + \frac{d^2}{D^2} \right] - \frac{\pi D_e^2 1}{4}$$
 (2.38)

onde d corresponde ao diâmetro do cone do ciclone na altura correspondente à base do vórtex central de gás (comprimento natural):

$$d = D - (D - D_b) \left[ \frac{S + 1 - h_c}{H - h_c} \right]$$
(2.39)



Figura 2.8- Modelo para cálculo do tempo de residência.

Note que, se l > H-S,  $V_{nl}$  reduz-se a  $V_{H}$ , que corresponde ao volume total do ciclone abaixo do duto de saída de gás menos o volume do vórtex central. Assim, substituindo l = H-S na equação (2.38):

$$V_{nl} = V_{H} = \frac{\pi D^{2}}{4} (h_{c} - S) + \frac{\pi D^{2}}{4} \frac{(H - h_{c})}{3} \left[ 1 + \frac{D_{b}}{D} + \frac{D_{b}^{2}}{D^{2}} \right] - \frac{\pi D_{e}^{2}}{4} (H - S)$$
(2.40)

Nesse caso,  $d = D_b$ .

Assim, o tempo de residência médio final será:

$$t_{res}^{T} = \frac{1}{Q} \left[ V_{s} + \frac{V_{nI}}{2} \right] = \frac{K_{c} D^{3}}{Q}$$
 (2.41)

onde:

$$K_c = \frac{V_s + V_{nl}/2}{D^3}$$
 (2.42)

 $K_c$  é uma constante adimensional para um dado modelo de ciclone que depende apenas das proporções de suas várias dimensões. A magnitude de  $K_c$  dá uma indicação do volume efetivo relativo que uma geometria de ciclone oferece, no qual a separação de partículas é realizada. Quanto maior  $K_c$ , maior será o tempo de residência.

É evidente que a hipótese número quatro que levou à dedução da equação (2.32) não corresponde ao que ocorre, de fato, na porção do ciclone abaixo da base do duto de saída de gás. Fazendo-se a devida correção com relação ao efeito da velocidade radial constante de gás em direção ao centro do ciclone sobre a força de arraste que atua na partícula, a equação (2.32) torna-se:

$$\frac{d^2r}{dt^2} + \frac{18\mu}{d_p^2\rho_p}\frac{dr}{dt} - u_w^2 R_c^{2n} \frac{1}{r^{2n+1}} + \frac{18\mu w}{d_p^2\rho_p} = 0$$
 (2.43)

Sendo que a velocidade radial do gás (w) pode ser estimada como:

$$w = \frac{Q}{\pi D_e l} = \frac{u_w ab}{\pi D_e l}$$
(2.44)

O efeito líquido desse termo adicional na equação (2.43) tende a reduzir o valor final de eficiência calculado. Uma vez que os valores de w são muito baixos e tendem, de fato, a zero nas proximidades da parede (onde ocorre a coleta), tal correção foi desprezada.

Assume-se que a força de arraste do gás que tende a carregar as partículas sólidas para o centro do ciclone (1), o efeito de mistura causado pela turbulência no interior do ciclone (2) e o re-arraste de partículas coletadas na parede de volta para o fluxo de gás (3) são suficientemente predominantes de forma a assegurar que uma concentração uniforme de partículas não coletadas seja mantida em cada seção tranversal do ciclone, ou seja, que o "back mixing" é completo.

Seja uma seção transversal de um ciclone conforme indicado na figura 2.9. Num tempo dt todas as partículas a uma distância dr (ou menos) da parede do ciclone vão se mover até ela e ser coletadas. Essas partículas vão percorrer simultaneamente uma distância rd $\theta$  tangencialmente e dz verticalmente. O número de partículas removidas, dx, será:

$$-dx = \frac{d\theta}{2} \left[ R_c^2 - (R_c - dr)^2 \right] c \, dz$$
 (2.45)

onde c é a concentração de partículas. O número total de partículas (x) no setor de onde elas estão sendo removidas é:

$$x = \frac{d\theta}{2} R_c^2 c \, dz \tag{2.46}$$

A fração de partículas removidas no tempo dt, portanto, será:

$$-\frac{dx}{x} = \frac{2R_c dr - (dr)^2}{R_c^2} \approx \frac{2 dr}{R_c}$$
(2.47)

desprezando a derivada de segunda ordem.



Figura 2.9- Seção transversal de um ciclone.

A fim de relacionar a fração de partículas coletadas com o tempo de residência devemos utilizar a equação (2.47) associada à equação (2.34), desenvolvida para mostrar a relação entre o tempo e a posição radial de uma partícula no vórtex. A taxa com que o sistema de partículas não coletadas se move em direção à parede do vórtex em função do tempo que o sistema passou dentro do vórtex é obtida assumindo-se que a posição radial das partículas não coletadas é  $R_1 = 0$  no centro do vórtex quando t= 0.

Diferenciando (2.34) e combinando com (2.47):

$$\int_{x_0}^{x} \frac{dx}{x} = -\int_{0}^{t} \frac{\rho_p}{9\mu} \left(\frac{d_p u_w}{R_c}\right)^2 \left[\frac{\rho_p(n+1)}{9\mu} \left(\frac{d_p u_w}{R_c}\right)^2 t\right]^{-\frac{(2n+1)}{2n+2}} dt \qquad (2.48)$$

Integrando (2.48) para  $t = t_{res}^{T} = (K_c D^3)/Q$  temos:

$$\eta = \frac{x_0 - x}{x_0} = 1 - \exp\left[-2\left[\frac{\rho_p}{9\mu} \left(\frac{d_p u_w}{R_c}\right)^2 (n+1) \frac{K_c D^3}{Q}\right]^{\frac{1}{(2n+2)}}\right] \quad (2.49)$$

Lembrando que  $Q = u_{w}$  ab e rearranjando a equação (2.49) chegamos a:

$$\eta = 1 - \exp \left[-2 \left[C\psi\right]^{1/(2n+2)}\right]$$
 (2.50)

onde:

$$\psi = \frac{\rho_p \, d_p^2 \, u_w(n+1)}{18 \, \mu D} \tag{2.51}$$

$$C = \frac{8K_c}{K_a K_b}$$
(2.52)

$$K_a = \frac{a}{D} \tag{2.53}$$

$$K_b = \frac{b}{D} \tag{2.54}$$

 $\Psi$  e C são parâmetros adimensionais, sendo que  $\Psi$  é um parâmetro de impactação centrífuga inercial que reflete as condições de operação no interior do ciclone, e C é conhecido como o número de design do ciclone, o qual reflete a forma geométrica do ciclone, uma vez que ele depende apenas de suas oito dimensões características. Ciclones geometricamente similares, ou seja, com mesmo valor de C, operando em condições de operação similares (mesmo valor de  $\Psi$ ) devem, portanto, apresentar a mesma eficiência.

É evidente que a eficiência de coleta tende a ser maximizada pelo uso de um conjunto de condições de operação e/ou de um ciclone com geometria tal que garanta a maximização do valor de  $\Psi$  e/ou de C, respectivamente. Assim, por exemplo, pode-se notar que um determinado ciclone é mais eficiente a altas vazões de gás, ou trabalhando a baixas temperaturas. Todos os outros fatores mantidos constantes, um ciclone baixo com grande diâmetro de barril é menos eficiente que um ciclone longo mas de diâmetro menor operando nas mesmas condições. O valor de C também pode ser escrito como:

$$C = \frac{\pi D^{2}}{ab} \left[ 2 \left( 1 - \left( \frac{D_{e}}{D} \right)^{2} \right) \left( \frac{S}{D} - \frac{a}{2D} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{S+1-h_{c}}{D} \right) \left( 1 + \frac{d}{D} + \frac{d^{2}}{D^{2}} \right) + \frac{h_{c}}{D} - \left( \frac{D_{e}}{D} \right)^{2} \frac{1}{D} - \frac{S}{D} \right]$$
(2.55)

Devem ser feitas, agora, duas observações:

1. Se a soma do comprimento natural (l) com o comprimento do duto de saída de gás (S) for menor que a parte cilíndrica do ciclone (h<sub>c</sub>), a equação (2.31) fornece resultados errôneos. Nessa situação d = D.

2. O parâmetro de geometria do ciclone, C, é em parte uma medida do tempo de residência do gás dentro do ciclone. Se d for menor que o diâmetro do duto de saída de gás ( $D_e$ ), a teoria de Leith e Licht irá subestimar o tempo de residência [11] e o valor correto do novo parâmetro de geometria, C', passa a ser:

$$C' = C + \frac{\pi D^2}{ab} \left[ \frac{S+1-h_c}{D-d} \left[ \left( \frac{D_e}{D} \right)^2 \left( \frac{D_e-d}{D} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{d^3}{D^3} - \frac{D_e^3}{D^3} \right) \right] \right]$$
(2.56)

## 2.3.4 - Método de Dietz

Apesar de o método proposto por Leith e Licht já representar um grande avanço em termos de modelagem de ciclones, duas de suas hipóteses representam desvios muito grandes em relação à situação física real. São elas:

1. Apesar de ser reconhecida a existência de uma distribuição de tempos de residência, apenas o tempo médio é efetivamente usado para efeito de cálculo, o que, como é de se esperar, gera desvios em relação à situação real.

2. O modelo em si não é consistente com o padrão de fluxo de gás existente no ciclone. A hipótese de que o gás encontra-se uniformemente misturado em cada seção transversal do ciclone e torna-se progressivamente mais limpo à medida em que aumenta o tempo de residência do gás ignora a natureza de fluxo reverso do ciclone, incluindo a existência de dois vórtex distintos com movimento em direções opostas. O intercâmbio de partículas entre as seções de fluxo descendente e ascendente, inclusive, deve ser levado em consideração.

O método de Dietz propõe um modelo que divide o ciclone em 3 regiões distintas (figura 2.10):

1. Região de entrada: espaço anular ao redor do duto de saída no topo do ciclone;

2. Região de fluxo descendente: corresponde ao vórtex abaixo da base do duto de saída de gás;

3. Região interna: formada pela extensão do duto de saída até o fundo do ciclone.



Figura 2.10- Regiões do modelo de Dietz.

Assume-se que a turbulência garante perfis uniformes de concentração radial de partículas não coletadas em cada região, sendo permitido o intercâmbio de partículas entre as regiões dois e três. Conseqüentemente, o modelo inclui a possibilidade de bypass de partículas causado por menores tempos de residência de gás (1) ou passagem "prematura" de partículas da região dois para a região três (2).

A fim de simplificar a análise, a geometria convencional do ciclone (figura 1.1) é modificada para a de um cilindro simples (figura 2.11). O raio do ciclone ( $R_c$ ) e o raio do duto de saída de gás ( $R_t$ ) permanecem os mesmos. Considerando que toda a alimentação entra no nível médio da entrada, o valor de S deve ser substituído por (S-a/2) na nova geometria. O comprimento do novo ciclone abaixo do duto de saída de gás é igual ao comprimento correspondente no ciclone original. Se esse comprimento for maior que o comprimento natural dado por Alexander (equação 2.31), então o comprimento de Alexander deve ser usado, apesar de o modelo não ser particularmente sensível a esse parâmetro.



Figura 2.11 - Ciclone com geometria modificada para análise.

Fazendo o balanço de massa em cada uma das regiões, temos:

# Região 1

$$\frac{d}{dz}[Q_0c_1] = -2\pi R_c F_w(z)$$
 (2,57)

Região 2

$$\begin{cases} Variação axial \\ do fluxo de \\ partículas \end{cases} = \begin{cases} Partículas \\ captadas na \\ parede \end{cases} + \begin{cases} Partículas \\ captadas pelo \\ vórtex central \end{cases}$$

$$\frac{d}{dz} [Q(z) c_2] = -2 \pi R_c F_w(z) - 2 \pi R_v(z) F_v(z)$$
 (2.58)

# Região 3

$$-\frac{d}{dz}[Q(z)c_3] = 2 \pi R_v(z) F_v(z)$$
 (2.59)

Q(z) = fluxo volumétrico axial em cada região,

(região 1: Q(z) = fluxo volumétrico de entrada =  $Q_0$ );

 $F_w(z)$  = fluxo de partículas próximo à parede do ciclone,

(partículas/(tempo.área));

 $F_v(z) =$  fluxo de partículas da região 2 para a região 3;

 $R_{v}(z) =$  raio do vórtex interno (região 3).

A velocidade radial da partícula na parede do ciclone ( $w_w$ ), onde a velocidade radial do gás é zero, pode ser diretamente calculada a partir de um balanço entre forças inerciais e de arraste. Seja F<sub>k</sub> a força de arraste:

Daí:

$$F_{k} = \frac{(massa \ da \ partícula) \cdot v_{w}^{2}}{R_{c}}$$
(2.60)

Assumindo geometria esférica e que a Lei de Stokes (equação 2.18) se aplica:

$$6 \pi \mu R_p w_w(z) = \frac{\frac{4}{3} \pi \rho_p R_p^3 v_w^2}{R_c}$$

Daí:

$$w_{w}(z) = \frac{2\rho_{p}R_{p}^{2}V_{w}^{2}}{9\mu R_{c}}$$
(2.61)

O fluxo de partículas na região 1 é dado por:

$$F_{w} = C_{1} \cdot W_{w}$$
 (2.62)

O fluxo de partículas entre as regiões 2 e 3 é assumido como composto por duas componentes: a velocidade radial de gás v, que carrega as partículas da região anular para a região central e que é contrabalanceada pela força centrífuga que impele as partículas do centro em direção ao ânulo com velocidade w,. Assim, o fluxo de partículas será:

$$F_{v} = C_{2}V_{r} - C_{3}W_{v}$$
 (2.63)

onde a velocidade radial de gás é assumida como constante:

$$V_r(z) = V_{r0} = \frac{Q_0}{2\pi R_r l}$$
 (2.64)

A velocidade das partículas carregadas do centro para a região anular ( $w_v$ ) pode ser calculada novamente através do balanço entre força centrífuga e força de arraste, de forma análoga à dedução de  $w_w$ , e desprezando a velocidade radial do gás que já está incluída no transporte da região 2 para a região 3 (equação 2.63). Daí:

$$w_{v}(z) = \frac{2\rho_{p}R_{p}^{2}v_{v}^{2}}{9\mu R_{v}}$$
(2.65)

O fluxo axial em função da coordenada axial (z) será:

$$Q(z) = Q_0(1 - z/1)$$
 (2.66)

Assume-se, ainda, que:

• A velocidade tangencial do gás não varia axialmente;

• A velocidade tangencial do gás está relacionada à posição radial de acordo com a relação de Alexander (equação 2.29);

•O raio da região 3 (que separa o fluxo ascendente do fluxo descendente de gás) é igual ao raio do duto de saída:

$$R_v = R_t \tag{2.67}$$

Com isso o sistema de equações (2.57) a (2.59) pode ser resolvido analiticamente para as condições de entrada. A solução encontrada é:

$$c_{1}(z) = c_{0} \exp\left[\frac{-2\pi R_{c} w_{w}(z+S-a/2)}{Q}\right]$$
(2.68)

$$C_2 = C_1 (z=0) \left[ 1 - \frac{z}{l} \right]^{\beta}$$
 (2.69)

$$C_{3} = C_{1}(z=0) \left[\frac{A-\beta}{C}\right] \left[1-\frac{z}{l}\right]^{\beta}$$
(2.70)

onde:

$$\beta = \frac{1}{2} [A - 1 - C] + \frac{1}{2} [(C - A - 1)^{2} + 4AC]^{1/2}$$
 (2.71)

$$A \approx \frac{2\pi R_c \, l w_w}{Q} \tag{2.72}$$

$$C \approx \frac{2\pi R_t l w_v}{Q}$$
 (2.73)

A eficiência final de coleta para um determinado diâmetro de partícula é:

$$\eta = 1 - \frac{C_3(z=0)}{C_0}$$
 (2.74)

Substituindo a equação (2.70) em (2.74) e rearranjando os termos:

$$\eta = 1 - [K_0 - (K_1^2 + K_2)^{1/2}] \exp\left[\frac{-2\pi R_c w_w (S - a/2)}{Q}\right]$$
(2.75)

onde:

$$K_{0} = \frac{R_{c}w_{w} + R_{v}v_{ro} + R_{v}w_{v}}{2R_{v}w_{v}}$$
(2.76)

$$K_{1} = \frac{R_{v}W_{v} - R_{v}V_{ro} - R_{c}W_{w}}{2R_{v}W_{v}} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left(\frac{R_{v}}{R_{c}}\right)^{2n} \left\{ 1 + \frac{9\mu Q_{0}}{4\pi l \rho_{p}R_{p}^{2} v_{w}^{2}} \right\} \right] (2.77)$$

.

$$K_2 = \frac{R_c}{R_v} \frac{w_w}{w_v} = \left(\frac{R_v}{R_c}\right)^{2n}$$
(2,78)

As equações (2.75) a (2.78) podem ser novamente rearranjadas a fim de serem escritas de forma que o seu uso seja ainda mais fácil e direto:

$$\eta = 1 - [K_0 - (K_1^2 - K_2)^{1/2}] \exp\left[\frac{-\pi (2S - a) \rho_p d_p^2 V_i}{18 \mu a b}\right]$$
(2.79)

$$K_{0} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \left( \frac{D_{e}}{D} \right)^{2n} \left( 1 + \frac{9 \mu ab}{\pi \rho_{p} l d_{p}^{2} v_{i}} \right) \right]$$
(2.80)

$$K_{1} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{D_{e}}{D} \right)^{2n} \left( 1 + \frac{9 \, \mu \, ab}{\pi \, \rho_{p} \, l \, d_{p}^{2} \, v_{j}} \right) \right]$$
(2.81)

$$K_2 = \left(\frac{D_e}{D}\right)^{2n} \tag{2.82}$$

#### 2.3.5- Método de Li e Wang

O método de Dietz apresenta, sem dúvida alguma, melhorias em relação ao seu precessor, o método de Leith e Licht, e isso poderá ser visto de forma bem clara quando forem observados os resultados obtidos por cada um desses métodos. Apesar disso, porém, Dietz ainda assumiu que a turbulência produz um perfil de concentração radial uniforme de partículas não coletadas dentro de cada uma das três regiões de seu modelo. Além disso, embora tenha levado em consideração a natureza de fluxo reverso do ciclone, Dietz assumiu que a velocidade radial da partícula possui valor constante, igual à velocidade da partícula nas proximidades da parede do ciclone.

O método de Li e Wang [12] apresenta melhorias em relação aos dois métodos

anteriores, uma vez que ele não assume nem que a partícula possui velocidade radial constante, e nem que há um perfil radial uniforme de concentração de partículas ainda não coletadas no interior do ciclone. O modelo inclui, ainda, a possibilidade de se levar em conta o re-arraste de partículas e o efeito da difusão turbulenta nas proximidades da parede do ciclone.

Assim como a teoria de Dietz, o método de Li e Wang para cálculo de eficiência substitui a geometria convencional do ciclone pela de um cilindro simples, tendo o duto de entrada seu comprimento original (S) substituído por (S-a/Z) (figura 2.11). As demais proporções do ciclone permanecem inalteradas.

Desprezando-se a difusão turbulenta no seio do fluido no interior do ciclone, assim como a velocidade terminal da partícula na direção z, e baseando-se nas equações da continuidade e conservação de partículas (balanço de massa), a equação que descreve o modelo proposto para distribuição de partículas no ciclone será:

$$w \frac{\partial c}{\partial r} + v \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial \theta} = 0, \qquad (0 \le \theta \le \theta_1) \qquad (2.83)$$

Sendo  $\theta_1$  = ângulo de saída de gás. O ângulo de entrada é tomado como igual a 0 ( $\theta_0$  = 0). Assumindo que o deslocamento axial de cada espiral descrita pelo vórtex central de gás corresponde à altura da entrada do ciclone (figura 2.12), o número total de voltas dadas pelo fluxo ascendente de gás será:

$$N_{voltas} = \frac{S+1}{a}$$
 (2.84)

O valor de l é dado pela equação (2.31). Se (l> H-S) seu valor deverá ser substituído por (H - S). Sendo o ângulo correspondente a uma volta completa igual a  $2\pi$ , o ângulo de saída,  $\theta_1$ , será:

$$\theta_{1} = 2\pi \frac{(S+1)}{a} \qquad (2.85)$$

Figura 2.12- Determinação do ângulo de saída do gás.

Definindo  $\alpha$  como sendo o coeficiente de re-arraste de partículas, de modo que  $\alpha = 0$ para a situação em que o re-arraste é nulo e  $\alpha = 1$  para re-arraste total (nenhuma partícula é coletada) e levando-se em consideração a difusão turbulenta na parede do ciclone, as condições de fronteira da equação (2.83) serão:

$$c = c_0, \qquad em \ \theta = 0 \qquad (2.86)$$

ł

$$D_r \frac{\partial C}{\partial r} = (1 - \alpha) wC, \qquad em \quad r = D/2 \qquad (2.87)$$

D<sub>r</sub> corresponde ao coeficiente virtual de difusão observada quando um material solúvel (nesse caso, as partículas sólidas) se dispersa através de um fluxo turbulento de solvente (o gás). Seu valor pode ser calculado pela equação proposta por Taylor [32] em 1954:

$$D_r = 0,052 AU \sqrt{\lambda/8}$$
 (2.88)

onde: A = raio do tubo onde ocorre o escoamento;

U= velocidade média no tubo;

 $\lambda =$  fator de atrito.

A equação (2.88) aplica-se ao escoamento em um tubo simples. Fazendo a correspondência para o caso de um ciclone temos:

$$A = \begin{cases} Raio \ hidráulico \\ do \ ciclone \end{cases} \implies A = \frac{D - D_e}{2}$$
 (2.89)

$$U = \begin{cases} Velocidade \\ tangencial do gás \end{cases} \xrightarrow{} U = v$$
 (2.90)

Substituindo (2.89) e (2.90) em (2.88):

$$D_r = 0,052 \frac{(D - D_e)}{2} v \sqrt{\lambda/8}$$
 (2.91)

O valor do coeficiente de atrito ( $\lambda$ ) pode ser assumido como sendo constante e igual a 0,02 [10].

A velocidade radial da partícula, w, pode ser diretamente calculada do balanço entre a
força centrífuga devido à corrente gasosa e a força de arraste (assumindo regime de Stokes) devido à velocidade radial do gás:

$$w(r) = \frac{(\rho_p - \rho_g) v^2 d_p^2}{18 \,\mu \,r}$$
(2.92)

A dependência radial entre a velocidade tangencial e a posição radial é dada pelas equações (2.29) e (2.30) propostas por Alexander, conforme já visto no item 2.3.1. Daí:

$$V(r) = \frac{(1 - n) Q}{b (r_w^{1-n} - r_v^{1-n}) r^n}$$
(2.93)

Substituindo (2.92) e (2.93) em (2.83) e resolvendo a equação chega-se à distribuição de concentração no ciclone:

$$C(r,\theta) = \frac{C_0(r_w - r_v) \exp\left\{-\lambda \left[\theta - \frac{1}{K(1+n)}r^{1+n}\right]\right\}}{\int_{r_v}^{r_w} \exp\left\{\frac{1}{K(1+n)}r^{1+n}\right\} dr}$$
(2.94)

onde:

$$K = \frac{(1-n) (\rho_p - \rho_s) d_p^2 Q}{18 \,\mu \, b \, (r_w^{1-n} - r_v^{1-n})}$$
(2.95)

$$\lambda = \frac{(1-\alpha)Kw_w}{D_r r_w^n}$$
(2.96)

A eficiência de coleta é:

$$\eta = 1 - \frac{C_1}{C_0}$$
 (2.97)

onde  $c_1 = c(r_v, \theta_1)$ , que corresponde à concentração de partículas na saída. Da equação (2.94):

$$c_1 = c_0 \exp\left[-\lambda \theta_1\right] \tag{2.98}$$

Finalmente, combinando (2.97) e (2.98):

$$\eta = 1 - \exp[-\lambda \theta_1]$$
 (2.99)

que é a equação final para o cálculo da eficiência.

#### 2.3.6- Método de Mothes e Löffler

Através da realização de uma série de experimentos próprios e análise dos resultados obtidos, Mothes e Löffler [25] desenvolveram seu próprio método para cálculo de eficiência que, por sua vez, baseia-se nos modelos apresentados por Dietz [9] e Muschelknautz [26]. As medidas do padrão do fluxo gasoso e do movimento das partículas levaram às seguintes conclusões:

1. A velocidade tangencial do gás depende, a princípio, apenas do raio e não é função da coordenada axial do ciclone. A variação radial da velocidade tangencial do gás é determinada pela geometria do ciclone, rugosidade da parede e concentração de partículas.

2. O transporte de partículas no ciclone é devido a um processo no qual um movimento difusivo (turbulento) é superposto a um movimento médio. Enquanto o movimento médio das partículas determina, a princípio, o diâmetro de corte no ciclone, a contribuição difusiva do movimento influencia a forma da curva de eficiência. Ambos os mecanismos devem ser levados em consideração.

3. A superfície fictícia de separação entre os vórtex ascendente e descendente de gás tem um papel decisivo no grau de remoção de partículas.

4. O re-arraste de partículas já depositadas na parte cônica no fundo do ciclone causa um grande aumento na concentração de sólidos nessa região, onde há, portanto, um "back-mixing" de partículas mais acentuado.

Para melhor representação do ciclone, o modelo divide-o em 4 regiões distintas (figura 2.13):

- 1. Região de entrada;
- 2. Região de remoção de partículas com fluxos descendente de gás;
- 3. Região de remoção de partículas na base do equipamento;
- 4. Região de remoção de partículas com fluxo ascendente de gás.

Assume-se "back-mixing" radial perfeito das partículas em cada uma das regiões do modelo.

A velocidade tangencial do gás nas proximidades da parede do ciclone, supondo-se ausência total de atrito  $(v_w)$ , pode ser calculada segundo a relação empírica proposta por Meissner [24]:

$$\frac{v_w^*}{v_d} = \frac{\pi R_c^2}{ab\beta^*}$$
(2.100)

onde:

$$V_d = \frac{Q}{\pi R_c^2} \tag{2.101}$$

$$\beta^* = -0,204 b/R_c + 0,889$$
 (2.102)



Figura 2.13 - Modelo do ciclone segundo Mothes e Löffler.

Levando em conta os efeitos de fricção através do coeficiente de atrito  $\xi$ , a velocidade tangencial real nas proximidades da parede do ciclone, v<sub>w</sub>, é:

$$\frac{v_w}{v_d} = \frac{1}{\xi h_c^*} \left[ \sqrt{\frac{1}{4} + \xi h_c^* \frac{v_w^*}{v_d}} - \frac{1}{2} \right]$$
(2.103)

onde:

$$h_{c}^{*} = \frac{a}{R_{c}} \left[ \frac{2\pi - \arccos[(b/R_{c}) - 1]}{2\pi} - 1 \right] + \frac{h_{c}}{R_{c}}$$
(2.104)

Meissner calculou a dependência radial da velocidade tangencial do gás dentro do ciclone através da realização de um balanço diferencial de momento angular, que resultou em:

$$V = \frac{V_{w}}{\frac{r}{R_{c}} \left[ 1 + D_{m} \left( 1 - \frac{r}{R_{c}} \right) \right]}$$
(2.105)

O parâmetro de momento angular,  $D_m$ , caracteriza a troca de momento angular entre a parede e o gás e é dado por:

$$D_m = \frac{V_w}{V_d} \left( \xi + \frac{\xi}{sen \epsilon} \right)$$
(2.106)

 $\epsilon$  é o ângulo entre a parede do cone do ciclone e a vertical (figura 2.12), e seu valor é obtido da seguinte relação:

$$tg \in = \frac{D/2 - D_b/2}{H - h_c}$$
 (2.107)

Uma série de experimentos realizados por Meissner indicam que normalmente, para separadores ciclônicos:

$$0,0065 \le \xi \le 0,0075$$

Uma vez que a velocidade tangencial do gás também é função da concentração de partículas, as relações acima são válidas apenas para baixas concentrações de sólidos.

A velocidade radial do gás,  $v_r$ , é assumida como sendo desprezível nas vizinhanças da parede, mas possuindo um valor constante em  $r = R_v$  ao longo de toda a altura do ciclone:

$$v_r(R_c) = 0;$$
  $v_r(R_v) = \frac{Q_0}{2\pi R_v(H-S)}$  (2.108)

Note que mais uma vez é assumido que o raio do vórtex interno do gás é igual ao raio do duto de saída de gás, ou seja:

$$R_v = R_t = \frac{D_e}{2}$$
 (2.109)

A velocidade axial do gás, v<sub>z</sub>, é tomada como sendo independente do raio.

Como nos métodos anteriores, a geometria cônico-cilíndrica do ciclone é substituída pela de um ciclone simples sendo que, levando-se em consideração o tempo de residência, o volume total do novo ciclone deve permanecer constante. Isso é feito mudando-se o raio do ciclone,  $R_c$ , para  $R_c^*$ , uma vez que a alteração da altura H afetaria o valor da velocidade radial, v<sub>r</sub> (equação 2.108), que é um fator importante para a determinação da eficiência de coleta. Daí:

$$R_c^* = \sqrt{\frac{Volume \ do \ ciclone}{\pi \ h}}$$
(2.110)

A expressão para o cálculo da velocidade axial, então, será:

$$V_{z}(z) = \frac{Q_{0}(H-z)}{\pi \left(R_{c}^{*2} - R_{v}^{2}\right)(H-S)}$$
(2.111)

E o fluxo volumétrico na direção axial é:

$$Q(z) = Q_0 \frac{H-z}{H-S}$$
,  $(S \le z \le H)$  (2.112)

Os balanços de massa de partículas correspondentes a cada uma das regiões do ciclone são:

64

# Região 1

$$\begin{cases}
Variação axial \\
do fluxo de \\
partículas
\end{cases} = \begin{cases}
Quantidade de partículas \\
que "sai" para a parede \\
(são captadas na parede)
\end{cases}$$

$$\frac{d}{dz} [Q_0 c_1(z)] = -2\pi R_c^* j_1(R_c^*) \qquad (2.113)$$

Onde  $c_1$  corresponde à concentração de partículas sólidas na região 1 e  $j_1$  ( $R_e^*$ ) corresponde ao fluxo de partículas em direção à parede:

$$j_1(R_c^*) = w_t(R_c^*) C_1(Z)$$
 (2.114)

Onde  $w_t$  (R<sub>c</sub><sup>\*</sup>) corresponde à velocidade terminal da partícula de diâmetro d<sub>p</sub> nas vizinhanças da parede e é calculada pela seguinte equação:

$$w_t(R_c^*) = \frac{(\rho_p - \rho_g) d_p^2 v^2(R_c^*)}{18 \mu R_c^*}$$
(2.115)

Região 2

$$\begin{cases}
Variação axial \\
do fluxo de \\
partículas
\end{cases} = \begin{cases}
Partícula \\
captadas \\
na parede
\end{cases} + \begin{cases}
Troca de \\
partículas com \\
a região 4
\end{cases}$$

$$\frac{d}{dz} [Q(z)c_2(z)] = -2\pi R_c^* j_2(R_c^*) + 2\pi R_v j_{2,4}(R_v) \quad (2.116)$$

.

O fluxo de partículas em direção à parede, como no caso anterior, é:

$$j_2(R_c^*) = w_t(R_c^*) C_2(Z)$$
 (2.117)

O fluxo  $j_{2,4}$  inclui a troca convectiva e difusiva de partículas entre as regiões 2 e 4. A direção do fluxo convectivo de partículas vai depender de se a velocidade terminal das partículas sólidas no gás ( $w_t(R_v)$ ) é maior ou menor que a velocidade radial do gás,  $v_t(R_v)$ , responsável pelo arraste. Já o fluxo difusivo de partículas é determinado pelo gradiente de concentração entre essas duas regiões. O comprimento característico para levar em conta esse efeito deve ser a diferença ( $R_c^* - R_v$ ). Daí:

$$j_{2,4} = -D_r \frac{C_2(z) - C_4(z)}{R_c^* - R_v} + [w_t(R_v) - v_r(R_v)] C_4(z),$$
para  $w_t(R_v) \ge v_r(R_v)$ 
(2.118)

$$j_{2,4} = -D_r \frac{C_2(z) - C_4(z)}{R_c^* - R_v} + [w_t(R_v) - v_r(R_v)] C_2(z)$$

$$para \quad w_t(R_v) \leq v_r(R_v)$$
(2.119)

Dr é o coeficiente de difusão turbulenta de Taylor [32] que, nesse caso, é dado por:

$$D_r = 0,052 \frac{(2R_c^* - D_e)}{2} v(R_v) \sqrt{\lambda/8}$$
 (2.91)

Deve ser usado o valor da velocidade do gás na fronteira entre os dois vórtex ( $r = R_v$ )

uma vez que é nessa região que ocorre a troca de partículas entre as regiões 2 e 4.

De modo análogo à equação (2.115), a velocidade terminal de uma partícula na fronteira entre os dois vórtex de gás, R<sub>v</sub>, é dada por:

$$w_t(R_v) = \frac{(\rho_s - \rho_g) d_p^2 v^2(R_v)}{18 \mu R_v}$$
(2.120)

#### Região 3

Essa região é caracterizada pela existência do re-arraste de partículas já depositadas na parede e pelo back-mixing radial e axial de partículas praticamente perfeito, ou seja, a concentração de partículas nessa região (c<sub>3</sub>) deve ser constante.

$$j_2(H-h_3)\pi(R_c^{*2}-R_v^2) - j_4(H-h_3)\pi R_v^2 - j_3(R_c^*)h_3 = 0$$
 (2.121)

 $h_3$  corresponde à altura da região 3 (veja figura 2.13). O fluxo de partículas trocadas entre essa região e a parede do ciclone,  $j_3(R_c^*)$ , é composto pelo número de partículas captadas pela parede e o número de partículas re-arrastadas para fora da superfície da mesma, de volta para o vórtex de gás:

$$j_3(R_c^*) = w_t(R_c^*) c_3 - \frac{M_p}{2\pi R_c^* h_3}$$
 (2.122)

onde  $M_p$  corresponde ao fluxo mássico de partículas re-arrastadas. Esse parâmetro é análogo ao parâmetro  $\alpha$  definido pelo método de Li e Wang. Deve-se notar que os valores de  $M_p$  (assim como o de  $\alpha$ ) e de  $h_3$  não são valores fáceis de se medir ou de se estimar.

# Região 4

$$-\frac{d}{dz}[Q(z) c_4(z)] = -2\pi R_v j_{2,4}(R_v)$$
 (2.123)

O fluxo de partículas  $j_{2,4}$  é dado pelas equações (2.118) e (2.119).

As concentrações de partículas nas regiões 1 e 3 podem ser diretamente calculadas a partir dos respectivos balanços de massa:

$$C_{1}(z) = C_{0} \exp \left[-\frac{2\pi R_{c}^{*} W_{t}(R_{c}^{*}) (z-a/2)}{Q_{0}}\right]$$
 (2.124)

$$C_{3} = \frac{C_{2}(H - h_{3}) + \frac{M_{p}}{\left(Q_{0} \frac{h_{3}}{H - S}\right)}}{1 + \frac{W_{t}(R_{c}^{*}) 2 \pi R_{c}^{*} h_{3}}{\left(Q_{0} \frac{h_{3}}{H - S}\right)}}$$
(2.125)

Os balanços de massa das regiões 2 e 4 constituem um sistema de equações diferenciais cuja solução geral é:

$$C_{2}(z) = R_{1} \left(\frac{H-z}{H-S}\right)^{k_{1}} + R_{2} \left(\frac{H-z}{H-S}\right)^{k_{2}}$$
(2.126)

$$C_{4}(z) = R_{1}\left(\frac{K_{1}-A}{B}\right)\left(\frac{H-z}{H-S}\right)^{K_{1}} + R_{2}\left(\frac{K_{2}-A}{B}\right)\left(\frac{H-z}{H-S}\right)^{K_{2}}$$
(2.127)

onde:

$$K_{1,2} = \frac{A + D}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{A + D}{2}\right)^2 - (AD - BC)}$$
 (2.128)

Os valores das constantes A, B, C e D serão:

• Se 
$$w_t(R_v) \ge v_r(R_v)$$
:

$$A = \frac{2 \pi R_c^* w_t(R_c^*) (H-S)}{Q_0} + \frac{2 \pi R_v D_p(H-S)}{Q_0 (R_c^* - R_v)} - 1$$
 (2.129)

$$B = -\frac{2\pi R_v D_p (H-S)}{Q_0 (R_c^* - R_v)} - \frac{2\pi R_v [w_t (R_v) - v_r (R_v)] (H-S)}{Q_0}$$
(2.130)

$$C = \frac{2 \pi R_v D_p (H-S)}{Q_0 (R_c^* - R_v)}$$
(2.131)

$$D = B - 1$$
 (2.132)

• Se  $w_t(R_v) < v_r(R_v)$ :

$$A = \frac{2\pi R_{c}^{*} w_{t}(R_{c}^{*})(H-S)}{Q_{0}} - \frac{2\pi R_{v} [w_{t}(R_{v}) - v_{r}(R_{v})](H-S)}{Q_{0}} + \frac{2\pi R_{v} D_{p}(H-S)}{Q_{0}(R_{c}^{*} - R_{v})} - 1$$
(2.133)

$$B = -\frac{2 \pi R_v D_p (H-S)}{Q_0 (R_c^* - R_v)}$$
(2.134)

$$C = \frac{2 \pi R_v D_p (H-S)}{Q_0 (R_c^* - R_v)} - \frac{2 \pi R_v [w_t (R_v) - v_r (R_v)] (H-S)}{Q_0}$$
(2.135)

D = B - 1

70

.

(2.132)

$$h_3 = 0 \qquad e \qquad F = 0$$

Nesse caso, as condições de fronteira levam a:

$$R_1 = C_1(S) \tag{2.142}$$

$$R_2 = 0$$
 (2.143)

Finalmente, a eficiência de coleta de uma determinada partícula pode ser calculada através da seguinte equação:

$$\eta(d_p) = 1 - \frac{\text{massa de partículas de diâm. } d_p \text{ que saem do ciclone}}{\text{massa de partículas de diâm. } d_p \text{ que entram no ciclone}}$$

$$\eta(d_p) = 1 - \frac{C_4(S)}{C_0}$$
 (2.144)

onde  $c_0$  é a concentração de partículas de diâmetro d<sub>p</sub> na entrada do ciclone.

# CAPÍTULO 3 MÉTODOS PARA CÁLCULO DE QUEDA DE PRESSÃO

A queda de pressão em um ciclone é proporcional à densidade do gás e varia com o quadrado de sua velocidade de entrada, sendo comumente expressa em termos do número de "cargas" de pressão cinética na entrada (velocity heads),  $\Delta$ H. Esse termo é adimensional e deve ser constante para cada geometria de ciclone, independentemente da velocidade de entrada.

A queda de pressão,  $\Delta P$ , é obtida a partir do valor de  $\Delta H$  através da seguinte relação:

$$\Delta P = \frac{\rho_g v_i^2}{2} \Delta H \tag{3.1}$$

Apesar de a velocidade do gás encontrar-se elevada ao quadrado na equação (3.1), alguns autores defendem que esse expoente pode variar, na realidade, entre 1,5 e 2, sendo normalmente tomado como igual a 2. Essa aproximação pode, muitas vezes, introduzir um certo erro, e é provavelmente uma das causas pela qual as equações até hoje publicadas não permitem o cálculo exato da queda de pressão [8].

Note que, fixado o ciclone a ser estudado ( $\Delta H$ ) e o gás do processo ( $\rho_{g}$ ),  $\Delta P$  torna-se função apenas da velocidade de entrada:

$$\Delta P = K v_i^2 \tag{3.2}$$

onde K passa a ser uma constante característica do conjunto ciclone-gás de processo.

Uma vez estabelecida a equação (3.1) o problema do cálculo da queda de pressão em um ciclone fica reduzido à determinação do valor de  $\Delta H$ . Embora já tenha havido muitas tentativas para se estabelecerem conceitos fundamentais que levem ao cálculo de  $\Delta H$  (ou  $\Delta P$ ), nenhuma delas foi totalmente satisfatória, uma vez que as hipóteses simplificadoras envolvidas sempre

levam a distorções na ponderação de efeitos importantes como a compressão do gás na entrada do equipamento, o atrito na parede e a compressão dos gases na saída. Assim, ainda não foi encontrada, até hoje, uma correlação geral (ou banco de dados) que seja totalmente adequada à execução dessa tarefa [27].

Acentua-se, nesse ponto, o caráter empírico dos métodos para cálculo de queda de pressão disponíveis atualmente na literatura. Diferentes autores propõem suas próprias correlações para cálculo de  $\Delta$ H (ou cálculo direto de  $\Delta$ P) levando em consideração esse ou aquele termo de perda de energia, considerado por eles como sendo o mais relevante. Surgem, assim, equações das formas as mais diversas, resultados dos experimentos individuais de cada pesquisador.

Iinoya [16] investigou o efeito da rugosidade das paredes do ciclone sobre a queda de pressão e verificou que esta diminui com o aumento da primeira. O atrito do gás com a parede aparentemente reduz a intensidade do vórtex. o que leva a uma diminuição da queda de pressão [27]. First [14] observou, em trabalho independente, que a perda de carga do gás devido ao atrito com a parede é uma fração desprezível da perda de carga total.

Bryant et al [7] verificaram que a perda de carga observada em um ciclone que separa sólidos de uma corrente gasosa é menor que a perda de carga observada no mesmo ciclone quando por ele passa um gás limpo sob as mesmas condições de operação. Isso ocorre devido à redução da velocidade tangencial do gás no interior do ciclone, por causa do aumento do atrito com as paredes, resultado da presença de partículas sólidas depositadas sobre elas [5]. Se pouco se sabe, atualmente, sobre como se calcular exatamente a queda de pressão em um ciclone, menor ainda é a disponibilidade de dados que permitam uma avaliação quantitativa do efeito da concentração de sólidos sobre o valor de  $\Delta P$ . Dentre os métodos apresentados a seguir, apenas o método de Zenz leva em consideração esse efeito.

#### 3.1 - Método de Alexander

O método proposto por Alexander [3] pode ser classificado como um método semiempírico, uma vez que ele parte de equações generalizadas e faz uso simultâneo de algumas observações experimentais para poder chegar até a sua equação final.

Alexander avalia, inicialmente, a diferença de pressão através de uma fina camada de gás em movimento rotacional, um ânulo de raio externo  $R_2$  e raio interno  $R_1$ . A força centrífuga devida a esse elemento circular de largura dr e profundidade unitária será:

Força Centrífuga = massa. 
$$\frac{velocidade^2}{raio} = 2\pi r dr \rho \frac{v^2}{r}$$
 (3.3)

O incremento de pressão (dP) devido a esse elemento de gás corresponde ao quociente da força pela área sobre a qual ela aje:

$$dP = \frac{d(Força Centrífuga)}{área}$$
(3.4)

$$Area = (2\pi r) x (1)$$
 (3.5)

Uma vez que  $\rho$  e v na equação (3.3) correspondem à densidade e à velocidade tangencial do gás num ponto r qualquer, podemos relacionar esse ponto ao ponto 2 (R<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>) da seguinte forma:

$$\rho = \frac{\rho_2 P}{P_2} \tag{3.6}$$

$$v = v_2 \left(\frac{R_2}{r}\right)^n \tag{3.7}$$

Sendo a equação (3.7) correspondente à equação (2.29). Substituindo as equações (3.3), (3.5), (3.6) e (3.7) em (3.4) e rearranjando:

$$\frac{dP}{P} = \frac{\rho_2}{P_2} v_2^2 R_2^{2n} \frac{dr}{r^{2n+1}}$$
(3.8)

Integrando (3.8) entre os pontos 2 e 1:

$$\ln\frac{P_1}{P_2} = -\frac{1}{2} \frac{\rho_2 v_2^{2n} R_2^{2n}}{n P_2} \left(\frac{1}{R_1^{2n}} - \frac{1}{R_2^{2n}}\right)$$
(3.9)

Uma vez que  $P_1/P_2$  é muito próximo de 1,  $\ln(P_1/P_2)$  deve ser próximo de zero. Sabendo que:

 $e^{-x} = 1 - x$ , para x muito pequeno,

podemos re-escrever a equação (3.9) da seguinte forma:

$$\frac{P_1}{P_2} = 1 - \frac{1}{2} \frac{\rho_2 v_2^2}{n P_2} \left[ \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{2n} - 1 \right]$$

Rearranjando:

$$P_2 - P_1 = \frac{1}{n} \left[ \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{2n} - 1 \right] \frac{\rho_2 v_2^2}{2}$$
 (3.10)

Note a presença do termo  $\rho_2 v_2^2/2$  que corresponde à carga de pressão cinética na fronteira externa do ânulo tomado como elemento de controle. A equação (3.10) corresponde, assim, à perda de energia de pressão sofrida pelo gás ao passar de R<sub>2</sub> para R<sub>1</sub>.

Alexander avalia, em seguida, a variação de energia cinética sofrida pelo gás nessse percurso. Temos que:

$$v_1 = v_2 \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^n \tag{3.11}$$

Sendo n positivo,  $v_1$  é maior que  $v_2$  e o aumento de energia cinética entre  $R_2$  e  $R_1$  será:

Aumento de  
Energia Cinética = 
$$\frac{\rho_1 v_1^2}{2} - \frac{\rho_2 v_2^2}{2}$$
 (3.12)

Substituindo (3.11) em (3.12) e lembrando que, na prática, pode-se considerar  $\rho_1 = \rho_2$ :

Aumento de  
Energia Cinética = 
$$\left[ \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{2n} - 1 \right] \frac{\rho_2 v_2^2}{2}$$
 (3.13)

A perda total de energia do sistema quando o gás passa do ponto  $R_2$  para  $R_1$  será, portanto, a diferença entre (3.10) e (3.13):

$$\begin{array}{l} Perda \ de \\ Energia \end{array} = \left[ \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{2n} - 1 \right] \left( \frac{1}{n} - 1 \right) \frac{\rho_2 v_2^2}{2} = \left[ \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{2n} - 1 \right] \frac{(1-n)}{n} \frac{\rho_2 v_2^2}{2} \qquad (3.14) \end{array}$$

Finalmente, como última fonte causadora de perda de carga, Alexander leva em consideração a perda de energia devido à saída do gás para fora do ciclone, que consiste na soma da energia rotacional perdida pelo gás com a energia gasta para ele se deslocar radialmente do ponto  $D_e/2$  até o ponto r, próximo ao centro do ciclone, onde ocorre a descarga. Para avaliar quantitativamente a grandeza desse termo assume-se que:

1. O vórtex interno de gás comporta-se como um corpo sólido em movimento giratório ascendente a partir do ponto em que  $r = R_v/2 = D_0/4$ ;

2. A partir desse ponto o valor de n cai rapidamente aproximando-se de n = -1 (rotação de corpo sólido);

3. Quando  $n \approx -1$  a perda de energia corresponde a:

$$\begin{pmatrix} Perda & de \\ Energia \end{pmatrix}_{n=-1} = 1,5 \frac{\rho_2 v^2 (r=D_e/4)}{2}$$

onde o valor de velocidade usado é justamente o valor de v nesse ponto ( $r = R_v/2 = D_e/4$ ). 4. Aproximadamente 20% da massa total de gás sai pela região correspondente a um raio menor ou igual a  $r = D_e/4$ .

A hipóteses acima baseiam-se em observações experimentais sobre o perfil de velocidades do gás na região de saída. Alexander chegou, assim, à seguinte expressão:

$$\frac{Perda \ de \ energia}{devido \ à \ saída \ do \ gás} = f_A \left(\frac{D}{D_e}\right)^{2n} \frac{\rho \ v_w^2}{2}$$
(3.15)

Onde é utilizado o valor da velocidade do gás nas proximidades da parede do ciclone e  $f_A$  é um fator semi-empírico proposto por Alexander cujo valor depende apenas de n:

$$f_{A} = 0,8 \left[ \frac{4 - 2^{2n}}{3n(1-n)} - \frac{1-n}{n} \right] + 0,2 \left[ \frac{(2^{2n} - 1)(1-n)}{n} + 1,5 (2^{2n}) \right]$$
(3.16)

O valor de  $f_A$  para diferentes valores de n é dado diretamente pela Tabela 3.1:

Tabela 3.1- Fator de Alexander,  $f_A$ .

n	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
f <sub>A</sub>	1,90	1,94	2,04	2,21	2,40

Assim, a queda de pressão total observada no ciclone será igual à soma entre a perda de energia pela passagem do gás da parede até o duto de saída (equação 3.14, onde ponto 2= raio até a parede,  $R_c$ , e ponto 1= raio do duto de saída de gás,  $R_i$ ) mais a energia perdida com a saída do gás (equação 3.15):

$$\Delta P = \left\{ \left[ \left( \frac{D}{D_e} \right)^{2n} - 1 \right] \frac{1-n}{n} + f_A \left( \frac{D}{D_e} \right)^{2n} \right\} \frac{\rho v_w^2}{2}$$
(3.17)

Experimentos com vários tipos de ciclones mostraram que a velocidade do gás na parede  $(v_w)$  está relacionada à velocidade na entrada  $(v_i)$  pela seguinte equação:

$$v_{w} = 2,15 \sqrt{\frac{A}{D.D_{e}}} v_{i}$$
(3.18)

onde A é a área de entrada do ciclone (A = a.b). Daí:

$$\Delta P = 4,62 \frac{ab}{D.D_{e}} \left\{ \left[ \left( \frac{D}{D_{e}} \right)^{2n} - 1 \right] \frac{(1-n)}{n} + f_{A} \left( \frac{D}{D_{e}} \right)^{2n} \right\} \frac{\rho v_{i}^{2}}{2}$$
(3.19)

O valor de  $\Delta H$ , portanto, é:

$$\Delta H = 4,62 \frac{ab}{D.D_e} \left\{ \left[ \left( \frac{D}{D_e} \right)^{2n} - 1 \right] \frac{(1-n)}{n} + f_A \left( \frac{D}{D_e} \right)^{2n} \right\}$$
(3.20)

# 3.2 - Método de Shepherd e Lapple

Shepherd e Lapple [28] investigaram vários ciclones com geometria igual ou semelhante à do ciclone de Lapple (Tabela 1.1) e obtiveram a seguinte relação empírica para o cálculo de  $\Delta$ H:

$$\Delta H = K \left[ \frac{a b}{D_{\epsilon}^2} \right]$$
(3.21)

Para o tipo mais comum de geometria, com entrada tangencial, o valor de K foi determinado como igual a 16.

Os testes realizados por Shepherd e Lapple cobriram a seguinte faixa de geometrias:

$$\frac{1}{12} \leq \frac{b}{D} \leq \frac{1}{4} \qquad ; \qquad \frac{1}{4} \leq \frac{a}{D} \leq \frac{1}{2} \qquad ; \qquad \frac{1}{4} \leq \frac{D_e}{D} \leq \frac{1}{2}$$

#### 3.3 - Método de Casal e Martinez-Benet

Segundo Casal e Martinez-Benet [8] os principais fatores responsáveis pela queda de pressão em um ciclone são:

- Expansão do gás na sua passagem para o corpo do ciclone;
- Perdas de energia cinética na trajetória espiral do gás no interior do ciclone;
- Atrito com as paredes internas e com o duto de saída de gás;
- Recuperação da energia cinética como energia de pressão na saída do gás.

Foi verificado que algumas das variáveis geométricas do ciclone não exercem efeito algum sobre sua queda de pressão, como, por exemplo, o comprimento do cone (H-h<sub>c</sub>). Após a realização de um extensivo trabalho, Shepherd e Lapple [28] verificaram que o valor de S também não exerce qualquer efeito sobre o valor de  $\Delta P$  (equação 3.21).

Uma série de dados experimentais obtidos da literatura, todos eles relativos a ciclones trabalhando com gases livres da presença de partículas sólidas, foi submetida a uma análise estatística por Casal e Martinez-Benet. O grupo  $\rho v_i^2/2$  ("velocity head") foi relacionado aos

parâmetros a/D, b/D, D/D<sub>e</sub> e ab/D<sub>e</sub><sup>2</sup>. Foram testadas várias expressões com uma ou mais variáveis independentes, sendo os parâmetros de cada equação determinados pelo método dos mínimos quadrados. Os melhores resultados, em termos de exatidão e facilidade de uso, foram obtidos a partir do grupo ab/D<sub>e</sub><sup>2</sup> (que é o mesmo grupo usado por Shepherd e Lapple na equação 3.21) e a equação a que se chegou foi:

$$\Delta H = 11,3 \left(\frac{ab}{D_e^2}\right)^2 + 3,33$$
 (3.22)

#### 3.4 - Método de Zenz

Zenz [34] calcula a perda de carga em um ciclone como sendo igual à soma das contribuições de 5 parcelas diferentes:

- a) Perdas de energia devido à contração do gás na entrada;
- b) Perdas de energia devido à aceleração das partículas sólidas;
- c) Perdas de energia devido ao atrito na parede do ciclone;
- d) Perdas de energia devido à reversão do fluxo de gás;
- e) Perdas de energia devido à contração do gás na saída.

### a) Contração de gás na entrada

Esse termo deve ser levado em consideração quando há uma contração abrupta da área de escoamento do gás no momento de sua entrada no ciclone. Isso acontece, por exemplo, nas aplicações de FCC em que os ciclones encontram-se no interior de grandes reatores (figura 3.1).

A velocidade superficial do gás,  $(v_i)$ , correspondente à area da seção transversal do reator, A, deve ser acelerada até o valor de  $v_i$  (correspondente à área de entrada do ciclone, A). Em casos como esse, a perda de carga devida à contração é dada por:

$$\Delta P_1 = 0.5 \rho_e \left[ v_i^2 \left( 1 + K \right) - v_s^2 \right]$$
(3.23)

onde K é função da razão entre a área da entrada do gás e a área correspondente à sua velocidade superficial (A/A<sub>s</sub>). O valor de K é obtido da tabela abaixo:

Razão de área	К
<b>≅</b> 0	0,50
0,1	0,47
0,2	. 0,43
0,3	0,395
0,4	0,35

Tabela 3.2- Constante K.

### b) Aceleração das partículas sólidas

Se a entrada do ciclone impõe uma contração da àrea de escoamento ao fluxo de gás, assim como este, as partículas sólidas também sofrem aceleração. Assume-se normalmente que as partículas pequenas, de baixa velocidade terminal, deslocam-se com velocidades iguais às do gás, ou seja, são aceleradas de v, para v,. Nesse caso, a perda de carga correspondente será:

$$\Delta P_2 = L v_i (v_i - v_s) \tag{3.24}$$

onde L corresponde à carga de sólidos existente no gás de alimentação, sendo expresso em termos de massa de sólidos por volume de gás.





# c) Atrito na parede

A perda de carga na parede do ciclone é tomada como sendo a perda sofrida pelo fluxo de gás deslocando-se à velocidade  $v_i$  em um tubo reto para N, espiras através do ânulo entre o barril do ciclone e o duto de saída de gás. Esse fluxo ocorre em um tubo imaginário de diâmetro igual ao diâmetro hidráulico da área de entrada:

$$D_{h} = \frac{4 \text{ (área de entrada)}}{(perímetro de entrada)} \rightarrow D_{h} = \frac{4 a b}{2a+2b}$$
(3.25)

O número de espiras é dado por:

$$N_s = \frac{H}{D_h} \tag{3.26}$$

Assumindo que o comprimento desse tubo imaginário por onde o gás escoa é igual a  $\pi DN_s$ , a perda de carga correspondente será:

$$\Delta P_{3} = \frac{2 \pi f \rho_{g} D N_{s} v_{i}^{2}}{D_{h}}$$
(3.27)

sendo f = fator de fricção de Fanning. Normalmente:

 $0,004 \le f \le 0,008$ 

## d) Reversão do fluxo de gás

A perda de carga devida à reversão na direção do fluxo de gás, que passa a se deslocar para cima, é tomada como sendo igual a uma "carga" de pressão cinética na entrada:

$$\Delta P_4 = \frac{\rho_g v_i^2}{2} \tag{3.28}$$

### e) Contração do gás na saída

Finalmente, a perda de carga pela contração na saída é dada por:

$$\Delta P_5 = 0.5 \rho_g \left[ v_o^2 (1+K) - v_b^2 \right]$$
(3.29)

onde:  $v_o =$  velocidade do gás na saída;  $v_b =$  velocidade do gás no barril do ciclone.

O valor de K é dado pela Tabela 3.2, mas a razão de áreas será, agora, (D<sub>e</sub>/D)<sup>2</sup>.

A perda de carga total, portanto, será:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 \tag{3.30}$$

Note que, quando o gás encontra-se livre de sólidos, o termo  $\Delta P_2$  é inexistente.

#### 3.5 - Método de Stairmand

Stairmand [29] considera que a perda de carga total observada em um ciclone é dada pela soma das perdas individuais em três diferentes pontos:

- perdas na entrada;
- perdas no vórtex;
- perdas no duto de saída de gás.

A perda de pressão devida à diferença de nível entre a entrada e a saída deve ser levada em consideração no caso de um tratamento mais rigoroso, mas é desprezada nesta análise, uma vez que tal correção é, em geral, muito pequena em relação às outras perdas.

Temos, então:

$$\begin{cases}
\begin{aligned}
Perda total \\
de "cargas" de \\
energia cinética
\end{aligned} =
\begin{cases}
Perda centrífuga \\
no vórtex
\end{aligned} +
\begin{cases}
Perda cinética \\
na entrada
\end{aligned} +
\begin{cases}
Perda na \\
saída
\end{aligned} -
\begin{cases}
Recuperação de \\
energia na saída
\end{aligned}$$
(3.31)

#### a) Perda centrífuga no vórtex

Para determinar a dissipação de energia devido ao movimento centrífugo do vórtex, considere um elemento anular de fluido que gira no raio r, de largura dr e profundidade unitária. Se v é a velocidade de giro do gás, então a aceleração centrífuga será igual a  $v^2/r$ . O peso desse anel de fluido é dado por  $2\pi r\rho dr$ , de modo que a diferença de pressão devida à rotação desse anel de fluido será:

$$dP = \frac{v^2 2\pi r \rho dr}{r 2\pi r} = \frac{v^2 \rho dr}{r}$$
(3.32)

Antes de se continuar com o desenvolvimento da equação (3.32) uma observação deve ser feita. Segundo Stairmand, a velocidade angular do gás em um vórtex está relacionada à coordenada radial pela seguinte relação:

$$v^2 \cdot r = K = constante \tag{3.33}$$

E assim, a relação entre a velocidade angular no ponto  $R_1$ ,  $v_1$ , e a velocidade angular em um ponto r qualquer, v, é dada por:

$$v = v_1 \sqrt{\frac{R_1}{r}}$$
(3.34)

Se a equação (3.34) for aplicada para r = 0, a velocidade angular no centro do vórtex (eixo do ciclone) seria infinita. Na prática, porém, a velocidade angular aumenta com a diminuição de r até aproximadamente  $r = R_r/2 = D_e/4$ , sendo que a partir desse ponto o gás gira com velocidade constante.

Substituindo (3.33) em (3.32), temos:

$$dP = \frac{\rho K dr}{r^2} \tag{3.35}$$

Integrando (3.35) entre os pontos 1 e 2 (entrada e saída do gás):

$$P_2 - P_1 = \rho K \left[ -\frac{1}{r} \right]_{R_1}^{R_2} \rightarrow \Delta P = \rho K \left[ \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right]$$
(3.36)

Mas 
$$K = v_1^2 R_1 = v_2^2 R_2$$
:

$$\Delta P = \rho \left[ v_2^2 - v_1^2 \right] \implies \Delta P_{centrifuga} = 2 \left[ \frac{\rho v_2^2}{2} - \frac{\rho v_1^2}{2} \right]$$
(3.37)

#### b) Perda na entrada

A perda de energia cinética na entrada é dada simplesmente por uma "carga" de energia cinética na entrada:

.

$$\Delta P_{cinética} = \frac{\rho v_i^2}{2}$$
(3.38)

# c) Perda na saída

A perda de energia com a saída do gás é calculada da seguinte forma: o gás que gira no centro do ciclone possui uma componente de velocidade axial muito pequena ou quase nula, de forma que deve ser fornecida energia para que ele escoe nessa direção. A perda de energia correspondente, então, deverá ser de H' vezes a carga de energia de velocidade ao longo do eixo do ciclone:

$$\Delta P_{saida} = \frac{H' \rho v_z^2}{2}$$
(3.39)

onde H' é um fator que depende da geometria e condições de operação, e deve ser determinado experimentalmente.

d) Energia recuperada

A quantidade de energia teoricamente possível de ser recuperada na saída de gás do ciclone é:

$$\Delta P_{recuperada} = \frac{J\rho v_2^2}{2}$$
(3.40)

onde J é o fator de recuperação de energia, que é função da geometria do duto de saída de gás e pode ser determinado experimentalmente.

Substituindo (3.37), (3.38), (3.39) e (3.40) em (3.31):

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} [2(v_2^2 - v_1^2) + v_i^2 + H v_z^2 - J v_2^2]$$
(3.41)

Foi demonstrado experimentalmente que a perda de carga na saída é de duas cargas de velocidade, ou seja, H'= 2. Além disso, nenhum arranjo do duto de saída proporcionou recuperação apreciável de energia, ou seja, para fins práticos, J = 0.

Substituindo esses valores na equação (3.41):

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} [2(v_2^2 - v_1^2) + v_i^2 + 2v_z^2]$$
 (3.42)

A relação entre a velocidade angular e a velocidade linear do gás no ponto 1 (entrada do ciclone) foi calculada por Stairmand como sendo:

$$\frac{v_1}{v_i} = \phi \tag{3.43}$$

onde:

$$\phi = \frac{\sqrt{\frac{D_e}{2(D-b)} + \frac{4GA'}{ab}} - \sqrt{\frac{D_e}{2(D-b)}}}{\frac{2GA'}{ab}}$$
(3.44)

G é um termo de fricção cujo valor é 0,005 e A' corresponde à área interna do ciclone exposta ao fluxo giratório de gás:

$$A' = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_e^2) + \pi D h_c + \pi D_e S + \frac{\pi}{2} (D + D_b) \left[ (H - h_c)^2 + \left( \frac{D - D_b}{2} \right)^2 \right]^{1/2}$$
(3.45)

Da equação (3.43) temos:

.

$$v_1 = \phi v_i \tag{3.46}$$

Da equação (3.34):

$$v_2 = v_1 \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} = \phi v_i \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}$$
 (3.47)

O ponto  $R_1$  corresponde ao raio de entrada do gás no ciclone. Assumindo-se que todo o gás entra pela região central do duto de entrada de gás, o valor de  $R_1$  pode ser considerado como:

$$R_1 = \frac{D}{2} - \frac{b}{2} \quad \Rightarrow \quad R_1 = \frac{D-b}{2} \tag{3.48}$$

O ponto  $R_2$  corresponde à máxima distância em direção ao centro do ciclone até onde o gás escoa comportando-se como um vórtex que obedece às equações (3.33) e (3.34). Conforme já foi comentado anteriormente, esse ponto será:

$$R_2 = \frac{R_t}{2} = \frac{D_e}{4} \tag{3.49}$$

Substituindo (3.48) e (3.49) em (3.47):

$$v_2 = \phi v_i \sqrt{\frac{2(D-b)}{D_e}}$$
(3.50)

Substituindo (3.46) e (3.50) em (3.42):

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} \left[ 2 \left( \phi^2 v_i^2 \frac{2(D-b)}{D_e} - \phi^2 v_i^2 \right) + v_i^2 + 2v_z^2 \right]$$
$$\Delta P = \frac{\rho}{2} \left[ v_i^2 \left( 1 + 2\phi^2 \left( \frac{2(D-b)}{D_e} - 1 \right) \right) + 2v_z^2 \right]$$
(3.51)

A velocidade axial do vórtex ascendente no centro do ciclone,  $v_z$ , está relacionada à velocidade de entrada,  $v_i$ , pela seguinte relação:

$$\frac{\pi D_e^2}{4} v_z = ab v_i \quad \Rightarrow \quad v_z = \frac{4 ab}{\pi D_e^2} v_i \quad (3.52)$$

Substituindo (3.52) em (3.51):

$$\Delta P = \frac{\rho v_i^2}{2} \left[ 1 + 2\phi^2 \left( \frac{2(D-b)}{D_e} - 1 \right) + 2 \left( \frac{4 ab}{\pi D_e^2} \right)^2 \right]$$
(3.53)

e, portanto:

$$\Delta H = 1 + 2 \phi^2 \left( \frac{2(D-b)}{D_e} - 1 \right) + 2 \left( \frac{4 a b}{\pi D_e^2} \right)^2$$
(3.54)

# 3.6 - Método de Barth

Pela teoria de Barth [4]  $\Delta H$  é dado por:

$$\Delta H = \left(\frac{v_t}{v_o}\right)^2 \left(\frac{4 a b}{\pi D_e^2}\right)^2 (\epsilon_i + \epsilon_o) \qquad (3.55)$$

onde:

ŧ

$$\frac{v_t}{v_o} = \frac{(D_o/2)(D-B)\pi}{2 a b \gamma + h^*(D-b)\lambda \pi}$$
(3.56)

 $\gamma$  e h<sup>\*</sup> são calculados da mesma forma como no método de Barth para cálculo de eficiência (item 2.2.1).

Finalmente:

$$\epsilon_{i} = \frac{D_{e}}{D} \left[ \frac{1}{\left[ 1 - (v_{i}/v_{o})(2/D_{e})h^{*}\lambda \right]^{2}} - 1 \right]$$
(3.57)

$$\epsilon_o = \frac{4.4}{(v_f / v_o)^{2/3}} + 1$$
 (3.58)

e  $\lambda$  é o fator de fricção de Barth.

#### 3.7 - Método de First

Uma vez que a equação de Shepherd e Lapple (3.21) não leva em consideração os efeitos da altura total do ciclone, H, e de seu diâmetro, D, sobre o valor de  $\Delta$ H, First [13] propôs a seguinte fórmula empírica:

.

$$\Delta H = \frac{24ab}{D_e^2} \left[ \frac{D}{h_c (H - h_c)} \right]^{1/3}$$
(3.59)

÷
# CAPÍTULO 4 O SOFTWARE DESENVOLVIDO

#### 4.1- A Estrutura do Programa

De acordo com o primeiro objetivo deste trabalho, mencionado na introdução, foi construído o programa CICLONE.EXE, o qual é capaz de simular a performance de um ciclone qualquer valendo-se, para isso, dos métodos de cálculo descritos nos capítulos anteriores.

Esse programa foi construído sobre uma estrutura que se baseia na existência de um menu de barras inicial a partir do qual se abre uma série de janelas que dão acesso aos diversos tipos de serviços executados pelo programa, bem como possibilitam a entrada e/ou alteração de dados.

O programa foi escrito na linguagem Turbo C (Borland International), versão 2.0, e encontra-se dividido em 23 sub-programas de extensão \*.C e 4 bibliotecas próprias, de extensão \*.H, sendo todos eles agrupados em um único programa executável quando de sua compilação.

As sub-rotinas responsáveis pela criação e gerenciamento do menu de barras, ativação e desativação de janelas e coordenação da entrada de dados foram publicadas em dois artigos escritos por Al Stevens no "Dr. Dobb's Journal" [1,2]. Antes de serem utilizadas, porém, elas sofreram uma série de melhorias executadas por Stragevitch [36]. Depois disso, elas passaram ainda por outras modificações no sentido de se adequarem às necessidades específicas deste projeto.

Os programas em questão são:

# WINDOW.C ENTRY.C WINDOW.H ENTRY.H

O programa WINDOW.C contém as sub-rotinas para criação e gerenciamento de janelas, e a ele está associada a biblioteca WINDOW.H, a qual deve ser incluída em qualquer outro programa que venha a fazer uso de alguma sub-rotina presente em WINDOW.C. O programa ENTRY.C é o responsável pela entrada e alteração de dados através do uso dessa estrutura de janelas. A biblioteca ENTRY.H tem função análoga à de WINDOW.H.

Deixando de lado as pequenas alterações, mais numerosas, porém de difícil discriminação, as melhorias mais significativas realizadas por Stragevitch [36] sobre esses dois programas foram:

Criação de sub-rotinas que permitem a criação de janelas com bordas duplas, ou sem borda alguma, além do tipo padrão com borda simples existente no artigo original;
Criação de sub-rotinas que permitem a criação de janelas com sombra.

O programa MENU.C, responsável pelo controle do menu de barras (assim como sua respectiva biblioteca, MENU.H) foi obtido diretamente da referência [2], tendo sofrido um número menor de modificaçõeş. Além deste foi criado, ainda, o programa ENTRY2.C, juntamente com sua biblioteca correspondente, ENTRY2.H, o qual possibilita a entrada simultânea de duas colunas de dados, o que torna mais confortável ao usuário a entrada dos dados de granulometria.

## 4.2 - Visão Geral

Quando se executa o programa CICLONE.EXE é apresentada, inicialmente, sua tela de abertura. Pressionando qualquer tecla, tem-se acesso, então, ao menu básico (figura 4.1):

Conforme pode ser observado na figura 4.1, o programa oferece seis tipos básicos de serviço:

- 1. Arquivo;
- 2. Cálculo;
- 3. Resultados;
- 4. Impressão;
- 5. Gráfico;
- 6. Banco de Dados.



Figura 4.1 - Menu básico do programa CICLONE.EXE.

Segue abaixo uma breve descrição de cada um destes itens.

# 4.2.1 - A opção "Arquivo"

Esta opção permite acesso aos arquivos de dados de entrada a partir dos quais é feito o cálculo desejado. Esses arquivos possuem as seguintes informações:

a) Dados de operação - informam sobre as condições em que o ciclone trabalha, a saber: temperatura de entrada do gás, densidade do sólido, densidade do gás, viscosidade do gás e velocidade do gás na entrada. b) Dados geométricos do ciclone - incluem as 8 dimensões características do ciclone, a saber:
diâmetro do barril, diâmetro do duto de saída do gás, altura do bocal de entrada, largura do bocal de entrada, penetração do duto de saída de gás, comprimento do cilindro, comprimento do ciclone e o diâmetro do duto de saída dos sólidos (figura 4.2).

c) Análise granulométrica dos sólidos - o que deve incluir os diâmetros de partículas existentes na alimentação e suas respectivas porcentagens mássicas.

d) Dados adicionais - são eles: fator de correção de Barth, fator de correção de Zenz, tipo de entrada, carga (concentração) de sólidos na alimentação, razão de áreas, coeficiente de re-arraste de Li e Wang e coeficiente de atrito de Mothes e Löffler.



Gerenciamento dos arquivos de entrada de dados

Figura 4.2 - Dados de entrada para execução de cálculos.

O fator de correção de Barth corresponde à constante K que deve multiplicar o segundo termo da equação (2.14), conforme já comentado no item 2.2.1. Se K = 1 temos o método de

Barth original, se K = 4, temos o método de Barth modificado por Dirgo e Leith [10]. Independentemente desses dois valores, K pode assumir qualquer outro valor que permita um melhor ajuste entre dados experimentais e resultados obtidos através de cálculo.

O tipo de entrada deve ser especificado como sendo tangencial ou voluta. Essa informação é utilizada apenas pelo método de Zenz para cálculo da eficiência, uma vez que ele usa curvas distintas para o cálculo em cada uma dessas situações.

Foi observado, na SIX, que ao se utilizar o método de Zenz para cálculo de eficiência, se o denominador da fração no interior da raiz na equação (2.8) for multiplicado por 2, de modo que ela se iguale à equação (2.6), são obtidos muitas vezes melhores resultados. Assim, a variável "fator de correção de Zenz" pode assumir o valor 1, quando se deseja trabalhar com a equação (2.8), ou 2, se o uso da equação (2.6) associada ao método de Zenz é preferido.

O valor da carga (concentração) de sólidos permite que o método de Zenz faça a correção dos valores de eficiência calculados levando-se em consideração essa variável.

A razão de áreas corresponde à razão entre a área de entrada do gás, no ciclone, e a área por onde ele escoava antes de entrar no equipamento. Essa variável é necessária para o cálculo da constante K na equação (3.23).

O coeficiente de re-arraste de Li e Wang corresponde ao parâmetro  $\alpha$  presente na equação (2.87) e, finalmente, o coeficiente de atrito de Mothes e Löffler ( $\xi$ ) é usado nas equações (2.103) e (2.106).

A opção "Criar" nessa janela do menu (fig 4.1) permite a criação de um novo arquivo de dados de entrada, da mesma forma como "Alterar" permite a alteração de algum item de um arquivo já existente. "Mostrar" deve ser usado quando se deseja ver, na tela, os dados de um determinado arquivo e "Ler Dados" simplesmente carrega um arquivo na memória do micro, de modo que ele possa ser usado para cálculo. Após uma das quatro alternativas anteriores ter sido executada, os dados do arquivo de entrada permanecerão residentes na memória do computador e o nome desse arquivo é escrito na tela (fig 4.2). Nessa situação o item "Imprimir" permite a impressão desse arquivo de dados de entrada. Finalmente, o item "Legenda", se escolhido, mostra na tela uma figura semelhante à figura 1.1, de modo que o usuário não tenha dúvidas a respeito

da nomenclatura utilizada pelo programa ao lidar com os dados geométricos do ciclone.

O item "Sair" (assim como a tecla "ESC") encerra a execução do programa.

## 4.2.2 - A opção "Cálculo"

Através desta opção é feito o cálculo, propriamente dito, da eficiência de separação ou queda de pressão associados às condições especificadas no arquivo de dados de entrada carregado na memória do computador através da opção anterior.

O item "Queda de Pressão" permite que o cálculo seja feito para outros valores de velocidade de entrada do gás, além daquele especificado no arquivo de entrada, de forma que um gráfico possa ser construído. Para isso, basta que se defina a faixa de velocidades (menor e maior valor de  $v_i$ ) a ser coberta e o número de pontos a serem calculados, conforme pode ser visto na figura 4.3. Sempre que um determinado cálculo é executado, os resultados são apresentados na tela (figuras 4.4 e 4.5) e, se o usuário assim o desejar, eles podem ser gravados em disco através da opção "Gravar Resultados".



Calculo de eficiencia ou de queda de pressao

... Figura 4.3 - Definição da faixa de velocidades para cálculo de queda de pressão.



Calculo de eficiencia ou de queda de pressao

Figura 4.4 - Exemplo de cálculo de eficiência.

Arquivo	Calculo	Resultados I = Metodo de St	Impressao Grafico airmand	Bco Dados
		Resultad	05:1	
	ponto	Velocidade	Queda de Pressao	
		(m/s)	(Pa)	
	1	2.0000	9.3313	
	2	4.0000	37.3252	
	3	6.0000	83.9817	
	4	8.0000	149.3007	
	5	10.0000	233.2824	
	6	12.0000	335.9266	
	7	14.0000	457.2335	
	18	16.0000	597.2029	
	9	18.0000	755.8349	
	10	20.0000	933.1295	
	L <sub>ESC</sub> —	<u> </u>	PgUp/END	
Arquivo de o	lados: C	:\dirgo.dad		

Calculo de eficiencia ou de queda de pressao

Figura 4.5 - Exemplo de cálculo de queda de pressão.

#### 4.2.3 - A opção "Resultados"

O item "Arquivo Corrente" (figura 4.6) permite que sejam vistos, mais uma vez, os resultados relativos ao último cálculo realizado pelo programa. O item "Outro Arquivo" exibe na tela resultados de uma simulação anterior que tenham sido gravados em disco através do item "Gravar Resultados" da opção "Cálculo".



Mostra um arquivo de resultados ja existente

Figura 4.6 - A opção "Resultados".

#### 4.2.4 - A opção "Impressão"

De forma análoga ao caso anterior, "Arquivo Corrente" (figura 4.7) determina a impressão dos resultados presentes na memória do computador no momento da solicitação desse serviço. "Outro Arquivo" executa a impressão de um outro arquivo existente em disco.



Impressao de um arquivo de resultados

Figura 4.7 - A opção "Impressão".

#### 4.2.5 - A opção "Gráfico"

Mais uma vez, "Arquivo Corrente" (figura 4.8) mostra o gráfico relativo ao último cálculo realizado pelo programa, e "Outro Arquivo" mostra o gráfico correspondente a um arquivo já existente em disco. Caso haja disponibilidade de dados experimentais, esta opção permite que eles sejam vistos juntamente com a curva de eficiência (ou de queda de pressão) obtida via cálculo, o que permite uma melhor visualização da capacidade do método utilizado em reproduzir esses dados.



Mostra o grafico associado a um determinado arquivo de resultados

Figura 4.8 - A opção "Gráfico".

#### 4.2.6 - A opção "Banco de Dados"

Essa opção é análoga à opção "Arquivo", sendo que os itens "Criar", "Alterar", "Mostrar", "Ler Dados" e "Imprimir" fazem com um arquivo do Banco de Dados exatamente o que os itens correspondentes em "Arquivo" fazem com um arquivo de entrada de dados (figura 4.9).

O Banco de Dados consiste em um conjunto de 108 arquivos que se encontram à disposição do usuário e que dispõem, cada um, de dados experimentais de eficiência e/ou queda de pressão obtidos por um dado pesquisador quando ele operou um ciclone sob determinadas condições de operação. Dos 108 arquivos disponíveis no Banco de Dados, 80 foram obtidos da literatura e 28 correspondem aos resultados dos testes realizados na SIX.

Além dos dados de operação, geometria do ciclone e valores experimentais obtidos para eficiência de coleta e/ou queda de pressão, cada arquivo do banco de dados dispõe, ainda, de

informações sobre o tipo de material separado, fonte de onde os dados foram obtidos e informações gerais.

A partir do momento em que um arquivo do banco de dados é carregado para a memória do computador, seus pontos experimentais podem ser vistos sobrepostos à curva de pontos calculados por um dos métodos de cálculo disponíveis, o que permite uma avaliação direta da capacidade do método em reproduzir a situação real.

Finalmente, o item "Reset" desativa da memória do computador o arquivo do banco de dados previamente carregado.

Arguivo	Calculo	Resultados	Impressao	Grafico	Bco Dados
ALYUIVO		- Banco de Da 1 IOLE 2 IOLE 3 IOLE 4 IZLE 5 IZLE 6 IZLE	dos: 2. BDD 3. BDD 1. BDD 2. BDD 2. BDD 2. DD		Criar Alterar Mostrar Ler Dados Imprimir Reset
		7 IZLE	4.BDD		
	1	8 IZLE	5.BDD		
	ł	9 IZLE	C6.BDD		
		10 IZLE	.BDD		
	L,	ESC	ENTER		
Banco de dado Arquívo de da Arquivo de re	os: ados: esultados:	C:\dirgo.bdd C:\dirgo.dad C:\dirgo.res	e		

Gerenciamento dos arquivos do Banco de Dados

Figura 4.9 - Escolha de um arquivo do banco de dados.

# 4.3 - Observações sobre as Rotinas de Cálculo

Apesar de todos os métodos de cálculo presentes no programa já terem sido discutidos nos capítulos anteriores, alguns deles sofreram algumas modificações a fim de que pudessem ter

seu uso adaptado ao computador. Tais adaptações serão descritas nos próximos sub-itens.

#### 4.3.1 - Método de Zenz para Cálculo de Eficiência

A fim de que esse método pudesse ser empregado, as figuras 2.2, 2.3 e 2.4 tiveram de ser transformadas em equações algébricas. Isso foi feito pelo Eng. Valmor N. Vieira, da SIX, que forneceu as respectivas equações de aproximação já prontas para a realização deste trabalho. São elas:

• Para o cálculo de N<sub>s</sub> (figura 2.4):

$$N_{s} = 6 \left[ 1 - \exp\left(-0, 0288 \, v_{i}^{0,91}\right) \right]$$
(4.1)

onde  $v_i$  é dada em m/s.

• Para o cálculo da eficiência de coleta a baixas concentrações de sólidos (figura 2.2):

Entrada Tangencial:

$$\eta_0(d_p) = k_1 + k_2(d_p/d_c) + k_3(d_p/d_c)^2 + k_4(d_p/d_c)^3 + k_5(d_p/d_c)^4$$
(4.2)

Para  $0 \le d_p/d_c < 0,17$ :

$$k_1 = k_2 = k_4 = k_5 = 0,0;$$
  $k_3 = 69,2.$ 

Para  $0,17 \le d_p/d_c \le 1,00$ :

Para 1,00 <  $d_p/d_c \le 4,00$ :

 $k_1 = -5,22004;$  $k_2 = 80,7766;$  $k_3 = -30,9022;$  $k_4 = 5,80033;$  $k_5 = -0,424478.$ 

Para  $4,00 < d_p/d_c < 10,00$ :

$k_i = 44,1636;$	$k_2 = 19,4557;$	$k_3 = -3,15801;$
$k_4 = 0,260426;$	$k_s = -0,00833.$	

Para  $d_p/d_c \ge 10,00$ :

 $k_1 = 100,00;$   $k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = 0,00.$ 

Entrada em Voluta:

$$\eta_{0}(d_{p}) = -0,03 - 16,81d_{p}/d_{c} + 72,93(d_{p}/d_{c})^{2} - 46,47(d_{p}/d_{c})^{3} + 13,721(d_{p}/d_{c})^{4} - 1,978(d_{p}/d_{c})^{5} + 0,118(d_{p}/d_{c})^{6} - 0,00104(d_{p}/d_{c})^{7} (4.3)$$

Se (S<a) o valor de  $\eta$  deve ser multiplicado por um fator de correção K, que é dado por:

$$K = 0,789 + 1,82(S/a) - 8,266(S/A)^{2} + 19,113(S/a)^{3} - 19,328(S/a)^{4} + 1,289(S/a)^{5} + 10,915(S/a)^{6} - 5,278(S/a)^{7} - 0,057(S/a)^{8}$$
(4.4)

• Para a correção dos valores de eficiência em função da concentração de sólidos na alimentação (figura 2.3):

Para n<sub>0</sub>= 99,99%:

$$\eta = 99,8 + 0,1035\log_{10}(carga) - 0,0175[\log_{10}(carga)]^2$$
 (4.5)

Para  $\eta_0 = 99\%$ :

$$\eta = 98,406 + 1,324 [1 - \exp(-0,58.carga^{0,429})]$$
(4.6)

Para  $\eta_0 = 97\%$ :

$$\eta = 94,0317 + 5,50726 [1 - \exp(-0,75923.carga^{0,3229})]$$
(4.7)

Para  $\eta_0 = 94\%$ :

$$\eta = 81,3896 + 17,9483 [1 - exp(-1,2027.carga0,2757)]$$
 (4.8)

Para  $\eta_0 = 85\%$ :

$$\eta = 71,8869 + 27,0744 [1 - \exp(-0,656614.carga^{0,403637})] \quad (4.9)$$

÷

Para  $\eta_0 = 65\%$ :

$$\eta = 41,3835 + 56,6278[1 - exp(-0,539175.carga0,459782)]$$
 (4.10)

Para  $\eta_0 = 55\%$ :

 $\eta = 40,2056 + 56,9587 [1 - \exp(-0,306429.carga^{0,499495})]$  (4.11)

Para  $\eta_0 = 35\%$ :

 $\eta = 27,6077 + 66,3141 [1 - exp(-0,130226.carga^{0,50428})]$  (4.12)

Para  $\eta_0 = 10\%$ :

 $\eta = 10,25 + 3,25 \log_{10}(carga) + 2,75 [\log_{10}(carga)]^2$  (4.13)

onde a carga de sólidos deve ser dada em (grains/ft3).

A figura (2.3), conforme já foi comentado anteriormente, deve ser usada apenas para correção do valor da eficiência global de coleta, não sendo adequada para correção de valores individuais de eficiência. Entretando, é desejável que esses valores também sejam conhecidos. Assim, como forma de estimá-los, foram adotados 2 procedimentos, os quais foram denominados de "Método de Zenz Aproximado" e "Método de Zenz Adaptado".

# Método de Zenz Aproximado

A partir das eficiências individuais de coleta a baixa concentração,  $\eta_0[i]$ , e da figura 2.3, são obtidas estimativas das eficiências individuais corrigidas,  $\eta_1[i]$ . A eficiência global de coleta é calculada como:

$$\eta_1 = \sum (\eta_1[i], m[i])$$
 (4.14)

# Método de Zenz Adaptado

Primeiramente é obtida a correção para o valor da eficiência global de coleta  $(\eta_2)$  a partir do valor de  $\eta_0$  e da figura 2.3. As eficiências individuais, então, são calculadas a partir das eficiências individuais do caso anterior pela seguinte relação:

$$\eta_{2}[i] = 1 - (1 - \eta_{1}[i]) \frac{(1 - \eta_{2})}{(1 - \eta_{1})}$$
(4.15)

A equação (4.15) nada mais é do que um ajuste dos valores de  $\eta_1[i]$ , que são transformados para  $\eta_2[i]$ , de forma que o somatório de ( $\eta_2[i].m[i]$ ) se iguale ao valor de  $\eta_2$  obtido da figura (2.3).

De qualquer forma, é de se esperar que sejam errôneos os valores de  $\eta_1[i]$ ,  $\eta_1 \in \eta_2[i]$  obtidos conforme descrito anteriormente.

## 4.3.2- Método de Alexander para Cálculo de Queda de Pressão

A equação (3.16) para cálculo do fator de Alexander,  $f_A$ , apresenta problemas de divisão por zero quando n = 0. Para evitar esse problema, os pontos da Tabela 3.1 foram aproximados pelo seguinte polinômio do quarto grau:

 $f_{A} = 1,9 + 0,141669n - 0,0625114n^{2} + 2,08335n^{3} - 1,56251n^{4}$  (4.16)

Assim, quando do cálculo da queda de pressão através do método de Alexander, se o valor de n estiver entre 0,0 e 0,8, o programa utiliza a equação (4.16) para calcular o valor de  $f_A$ . Se n > 0,8, então a equação (3.16) é usada.

#### 4.3.3- Método de Zenz para cálculo de Queda de Pressão

Assim como no item anterior, os valores presentes na Tabela 3.2 também foram aproximados por um polinômio do quarto grau, de modo que o valor da constante K possa ser determinado em função da razão de áreas (r.):

$$K = 0,5 - 0,125r_a - 2,625r_a^2 + 10r_a^3 - 12,5r_a^4$$
 (4.17)

O valor de r, é dado por:

4

$$r_a = \frac{A}{A_s} \tag{4.18}$$

onde A é a área de entrada do ciclone, e A, corresponde à área por onde o gás escoa antes de entrar no ciclone. O valor de v, correspondente à área A, utilizado na equação (3.23), pode ser calculado como:

$$v_s = r_a \cdot v_j \tag{4.19}$$

Note que, quando  $r_a = 1$ ,  $v_s = v_i e o$  valor de  $\Delta P_1$  dado pela equação (3.23) deve ser nulo, uma vez que, nesse caso, não há contração do fluxo de gás na entrada do ciclone. Para que isso aconteça, o valor de K também deve ser nulo. Assim, para determinar valores de K correspondentes a valores de r maiores que 0,4 (extrapolação dos valores presentes na Tabela 3.2), foi acrescentado o ponto ( $r_a = 1 \rightarrow K = 0$ ) aos pontos da Tabela 3.2, e uma nova aproximação do conjunto de pontos foi feita, originando o seguinte polinômio:

$$k = 0,500465 - 0,306574r_{a} - 0,156813r_{a}^{2} - 0,0370769r_{a}^{3}$$
 (4.20)

Assim, o programa adota o seguinte procedimento:

• Se  $0 \le r_a \le 0,4 \Rightarrow o$  valor de K é determinado pela equação (4.17); • Se  $r_a > 0,4 \Rightarrow o$  valor de K é determinado pela equação (4.20).

# CAPÍTULO 5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

# 5.1- O Aparato Experimental

Conforme já foi comentado anteriormente, será realizada neste capítulo a comparação entre dados experimentais e dados obtidos através dos métodos de cálculo descritos nos capítulos 2 e 3. Para isso, serão utilizados não apenas dados obtidos da literatura como também os dados conseguidos através de uma série de experimentos realizados na SIX no período entre 04/04 e 10/06/94.

Esses experimentos foram executados em uma unidade de bancada composta por dois silos para armazenamento de material, um ejetor e o ciclone, além de um compressor para geração do fluxo de gás, válvulas de controle e medidores. O esquema do aparato experimental utilizado encontra-se representado na figura 5.1:



Figura 5.1- Aparato experimental utilizado.

O procedimento experimental é muito simples: o silo 1 é primeiramente carregado com uma massa conhecida do material a ser separado, finos de catalisador de FCC, e é anotado o peso do silo 2, vazio. Ajusta-se, então, a vazão desejada de ar no compressor e, uma vez feito isso, é aberta a válvula abaixo do silo 1, de modo que o sólido escoe e se misture à corrente gasosa. O escoamento se dá por gravidade e devido à ação do ejetor, que tem um efeito de sucção. Com isso, é alimentada uma mistura de ar e particulados na entrada do ciclone, sendo que o material separado é recolhido no silo 2 e, em seguida, pesado.

Foram usados 3 ciclones: dois de acrílico e um de chapa de metal. Os ciclones de acrílico possuíam o duto de saída de gás móvel, o que permitiu que fossem usados dois tamanhos diferentes de duto de saída em cada ciclone, de forma que duas novas geometrias fossem obtidas. Pode-se considerar, assim, que os testes foram feitos com 5 ciclones diferentes (A, B, C, D e E). As dimensões dos ciclones encontram-se na tabela 5.1:

Ciclone:	Α	В	, C	D	Е
D (m)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,15
a/D	0,70	0,70	0,70	0,70	0,67
b/D	0,30	0,30	0,30	0,30	0,47
D <sub>c</sub> /D	0,50	0,37	0,63	0,37	0,50
S/D	0,67	0,67	0,70	0,70	0,63
h_/D	1,43	1,43	0,53	0,53	1,43
H/D	5,17	5,17	1,12	1,12	5,17
D <sub>b</sub> /D	0,44	0,44	0,27	0,27	0,50

Tabela 5.1 - Dimensões dos Ciclones Utilizados nos Testes.

Foram feitos 8 testes no ciclone A, 6 no ciclone B, 6 no ciclone C, 6 no ciclone D e, por fim, 24 testes no ciclone E, em um total de 50 experimentos.

Amostras de sólidos foram retiradas da entrada (silo 1) e da saída (silo 2) do ciclone para execução da análise granulométrica. Esta foi feita em 13 das amostras de entrada e em 28 das amostras de saída. Isso porque foi assumido que as amostras de entrada referentes aos testes realizados em um mesmo dia seriam equivalentes entre si. Dessa forma, pôde ser gerado um conjunto de 28 arquivos completos com dados experimentais relativos à eficiência de coleta.

A queda de pressão no ciclone relativa a cada teste foi medida diretamente através de um manômetro de tubo em U com coluna d'água.

Para a realização dos testes do ciclone E foi montada uma nova bancada, exatamente igual àquela onde foram realizados os primeiros testes (figura 5.1), com mudança apenas nas dimensões dos silos e no tipo de material dos mesmos. Nessa nova bancada houve problemas na medição do valor da queda de pressão no ciclone, sendo que a leitura oscilava muito. Assim, dos 24 testes realizados no ciclone E, apenas em 5 deles pôde ser feita uma leitura razoável do valor de queda de pressão, totalizando, assim, um conjunto de 31 leituras de queda de pressão em todos os ciclones utilizados. A apresentação e discussão de alguns dos resultados obtidos encontra-se no item 5.2.2.

#### 5.2- Eficiência de Coleta

### 5.2.1- Dados da Literatura

Dirgo e Leith [10] realizaram uma série de experimentos em um ciclone de Stairmand com diâmetro de 0,305 m. Foram coletados pontos de eficiência de separação para 5 diferentes velocidades de entrada. O material utilizado para separação foi um óleo mineral que era nebulizado em uma corrente de ar através de um gerador de spray. Os dados completos a respeito das condições de operação, dimensões do ciclone e eficiências de coleta em função da granulometria encontram-se no Apêndice A, arquivos de número 1 a 5. A figura 5.2 ilustra os dados experimentais obtidos:



Figura 5.2 - Influência da velocidade de entrada do gás sobre a eficiência de coleta [10].

As curvas desse gráfico encontram-se em acordo com o que é esperado teoricamente, ou seja, a eficiência de coleta aumenta com o diâmetro da partícula e, para um mesmo diâmetro , é tanto maior quanto maior for a velocidade de entrada.

Maiores eficiências de separação também são obtidas com a diminuição da área de entrada do ciclone, e isto está diretamente relacionado ao respectivo aumento da velocidade de entrada do gás [18,20,25].

A figura 5.3 ilustra o efeito do diâmetro do duto de saída de gás (De) sobre a eficiência

de coleta. Os dados experimetais foram obtidos por Kim e Lee [20] em um ciclone de 3,11 cm de diâmetro e geometria próxima a do ciclone de Stairmand. Informações detalhadas sobre esses pontos encontram-se no Apêndice A, arquivos números 6 a 9.



Figura 5.3 - Efeito do diâmetro do duto de saída sobre a eficiência de coleta [20].

As curvas indicam que a eficiência de coleta aumenta com a diminuição do diâmetro do duto de saída de gás, o que também corresponde ao esperado pela teoria. Se o diâmetro do duto de saída for muito grande, quase do tamanho do próprio diâmetro do ciclone, por exemplo, é de se esperar que a formação dos 2 vórtex no interior do mesmo não seja tão bem definida, prejudicando a separação dos sólidos. Se, por outro lado, o duto de saída de gás possuir um diâmetro pequeno, deverão se formar as duas espirais de fluxo de gás de forma bem definida, sendo a espiral interna mais longa e mais estreita, e isso garantirá uma melhor separação dos sólidos. Percebe-se, assim, a importância do efeito das dimensões do duto de saída sobre a

eficiência apresentada pelo ciclone, que é devida a seu papel decisivo na determinação dos padrões de fluxo no interior desse equipamento [20].

As figuras 5.4 e 5.5 comparam os dados experimentais obtidos por Dirgo e Leith [10] com os valores calculados por cada um dos métodos estudados. A velocidade de entrada, nesse caso, é de 15 m/s (arquivo número 3 do Apêndice A). Pode-se observar que:

1. Os métodos de Lapple, de Zenz, Iozia-Leith e Dietz fornecem valores de eficiência muito baixos, a menos que o diâmetro da partícula seja muito pequeno. Para partículas cujas eficiências giram em torno de 20% ou menos, porém, esses métodos fornecem resultados melhores.

2. O método de Leith e Licht calcula eficiências muito altas para partículas pequenas, e eficiências muito baixas para partículas grandes, de modo que a curva correspondente não se aproxima dos valores experimentais para nenhuma faixa de diâmetros.

3. Os melhores resultados foram obtidos pelos métodos de Barth, Mothes-Löffler e Li-Wang. Apesar de nenhuma das três curvas correspondentes reproduzir exatamente os pontos experimentais, elas apresentam o formato correto, de forma que dão valores aceitáveis ao longo de toda a faixa de diâmetros.

Dentre os métodos de Lapple, Zenz, Iozia-Leith e Dietz, o método de Lapple foi o que melhor representou os valores de baixa eficiência. A incapacidade desse método em fornecer uma boa representação dos pontos experimentais não é surpreendente, se for levado em consideração o fato de que ele considera  $N_{i} = 5$ , independentemente das condições experimentais. Dirgo e Leith estimaram que, nas condições de seu experimento,  $N_{i}$  é aproximadamente igual a 10 ~ 12. A utilização do valor correto de  $N_{i}$  levaria à obtenção de maiores valores de eficiência, melhorando o ajuste mas, ainda assim, os resultados não seriam muito bons, uma vez que esse método é incapaz de reproduzir o formato da curva experimental. Ainda que deslocada para cima, a curva de Lapple continuaria apresentando o mesmo formato mais suave que o real, ou seja, não há como realizar um ajuste perfeito, independentemente do valor de  $N_{i}$  que seja tomado.

O método de Zenz gerou uma curva muito similar à de Lapple, cujos valores são apenas um pouco inferiores aos dela. Os valores da curva de Zenz indicada na figura 5.4 foram obtidos



Figura 5.4- Dados experimentais obtidos por Dirgo e Leith [10],  $v_i = 15$  m/s.



Figura 5.5- Dados experimentais obtidos por Dirgo e Leith [10],  $v_i = 15$  m/s.

utilizando-se a equação (2.6) para obtenção do diâmetro crítico, e não a equação (2.8) conforme Zenz propõe. Se a equação (2.8) tivesse sido usada, valores ainda menores de eficiência teriam sido obtidos, piorando, assim, o ajuste. A similaridade das curvas geradas por esses métodos é natural, uma vez que eles partem da mesma abordagem. Uma vez que Dirgo e Leith não informaram os valores de concentração de partículas sob os quais seus experimentos foram realizados, não foi possível realizar a devida correção nos valores de eficiência de Zenz. Sem dúvida alguma tal correção melhoraria o ajuste da curva, uma vez que ela levaria a maiores valores de eficiência. Porém, ainda mais uma vez esse ajuste seria sofrível, devido ao formato da curva de Zenz que, assim como a de Lapple, é muito suave em relação à curva de pontos experimentais.

A aparente inadequação do método de Leith e Licht em reproduzir qualquer ponto experimental é resultado de uma das hipóteses básicas de seu modelo, que assume ausência de perfis de concentração de partículas no interior do ciclone. Segundo esse modelo, a turbulência no interior desse equipamento é suficiente para garantir uma mistura radial completa das partículas não coletadas em cada secção transversal do ciclone (perpendicular ao seu eixo). Com isso, há uma normalização dos valores de eficiência de coleta ao longo de toda a faixa de diâmetros e a curva gerada irá sempre superestimar eficiências para pequenos diâmetros e subestimar as eficiências dos diâmetros maiores. Ou seja, ela apresentará sempre valores "médios" de eficiência e um formato mais suave.

O método de Dietz também assume perfis uniformes de concentração radial em cada uma das três regiões de seu modelo, mas, o simples fato de assumir a existência de 3 regiões de características distintas (e permitir o intercâmbio de partículas entre essas regiões) já levou a uma melhoria na capacidade do método de reproduzir dados experimentais. Pelo menos na faixa de pequenos diâmetros de partículas o método se aproxima, ainda que sofrivelmente, dos valores experimentais.

O fato de a curva experimental ser mais abrupta do que as curvas obtidas por estes dois últimos métodos é um indicativo de que o efeito da turbulência não é tão forte quanto elas assumem.

Diferentes pesquisadores verificaram, em trabalhos independentes, que há de fato um

gradiente de partículas no vórtex do ciclone. Especialmente no caso das partículas maiores, a concentração nas proximidades da parede do ciclone é muito maior (cerca de duas ordens de magnitude) que no centro do mesmo [10]. As concentrações das partículas menores ( $0,5\mu$ m ~  $3,5\mu$ m) por outro lado, são bem mais uniformes, sendo quase que independentes da posição radial no cilindro do ciclone. As partículas menores, assim, com menor influência da força centrífuga, estão mais sujeitas aos efeitos da turbulência. Isso explica o fato de o método de Dietz reproduzir melhor os valores de eficiência para partículas pequenas. O mesmo pode ser dito em relação aos métodos de Lapple e de Zenz, uma vez que eles assumem que a concentração de partículas é radialmente uniforme na entrada do ciclone e ao longo do caminho percorrido pelo gás no interior do mesmo.

O método de Barth foi um dos que melhor reproduziu os pontos experimentais, se não o melhor. Deve-se salientar aqui, que ele foi utilizado acoplado à modificação sugerida por Dirgo e Leith [10], ou seja, a equação (2.14) foi multiplicada por K = 4 antes de ser usada no cálculo da eficiência pela equação (2.15). Esse ajuste é totalmente empírico e foi determinado por esses pesquisadores para "calibrar" o método de Barth ao seu aparato experimental. Sem esse cuidado, a curva obtida estaria deslocada para a direita, ou seja, apresentaria menores valores de eficiência. O ajuste quase perfeito da curva com os pontos não foi, portanto, tão natural. Isso não deve, porém, anular os méritos desse método, uma vez que ele foi capaz de reproduzir exatamente o formato da curva experimental, coisa que os outros métodos (com excessão dos métodos de Mothes-Löffler e de Li-Wang) não foram capazes de fazer.

Ao que tudo indica, apesar de o valor de  $v_t^*$  dado pela equação (2.13) ser incorreto, a forma da curva de Barth de eficiência versus  $v_t/v_t^*$  é perfeitamente adequada a um ciclone de Stairmand.

O valor de K, porém, deve variar de instalação para instalação, e dever ser previamente determinado, se possível, de forma a se garantirem bons resultados.

Apesar de análogo ao método de Barth, o método de Iozia e Leith apresentou resultados sensivelmente inferiores. Isso é, sem dúvida, fruto do excessivo número de parâmetros empíricos existentes nesse método (equações 2.23, 2.24 e 2.28), o que torna muito restrita sua faixa de aplicabilidade. Nas condições de operação em que Iozia e Leith trabalharam, esse método

apresentou ótimos resultados (figuras 5.8 e 5.9). Em condições diferentes, porém, fica difícil dizer se ele funcionará bem ou não.

O método de Mothes e Löffler, apesar de partir de hipóteses similares às usadas por Dietz, apresentou resultados bem melhores que este último, sendo eles quase tão bons quanto os obtidos pela curva de Barth. Isso se deve provavelmente ao fato de o método ser mais bem elaborado, levando em consideração alguns fatores ignorados por Dietz, como o efeito da difusão turbulenta (equação 2.91) e a correção no valor do raio do ciclone (equação 2.110) necessária para garantir que o volume do mesmo seja mantido constante quando sua geometria cônicocilíndrica é transformada para a de um cilindro comum. O uso da equação (2.110) fornece um valor de R<sub>e</sub><sup>\*</sup>, utilizado pelo método, menor que o valor real do raio do ciclone, R<sub>e</sub>, e, conforme scrá comentado mais adiante, é sabido que ciclones com diâmetros pequenos proporcionam maiores eficiências de separação que ciclones maiores operando em condições de operação idêntica. Além disso, Mothes e Löffler não consideram que as partículas possuem velocidade radial constante, sendo esta uma das hipóteses do modelo de Dietz.

Em oposição ao método de Barth, o método de Mothes e Löffler não foi "calibrado" ao aparato experimental usado por Dirgo e Leith. Isso podia ser feito através da determinação de valores adequados para o coeficiente de atrito,  $\xi$  (nesse caso foi usado simplesmente o valor médio proposto por Mothes e Löffler,  $\xi = 0,007$ ) e para o coeficiente de difusão turbulenta, Dr, conforme Mothes e Lóffler fizeram no artigo em que propõem o seu método [25]. Se isso tivesse sido feito, teria sido obtido, sem dúvida, um melhor ajuste de sua curva aos pontos experimentais.

Finalmente, o método de Li e Wang também apresentou bons resultados, sendo capaz de reproduzir o formato sigmóide da curva de pontos experimentais. Tal habilidade pode ser atribuída ao fato desse método se basear em poucos parâmetros empíricos, tendo sido desenvolvido a partir das equações genéricas da continuidade e de conservação de partículas. Ele não assume um perfil de concentração radial uniforme de partículas não coletadas no interior do ciclone e , assim como o método de Mothes e Löffler, leva em consideração o efeito da difusão turbulenta e não considera que as partículas possuam velocidade radial constante. Todos esses fatores aproximam o modelo do que ocorre, de fato, no interior do ciclone, e isso é refletido

pelos bons resultados gerados pelo método.

Assim como o método de Mothes e Löffler, o método de Li e Wang também não foi "calibrado" ao aparato experimental de Dirgo e Leith. Isso poderia ser feito através de Dr, ou de  $\alpha$ , coeficiente de re-arraste. Entretanto, uma vez que, nesse caso, o material separado foi um óleo mineral, o valor de  $\alpha$  é necessariamente zero, dado que, uma vez que as gotas de óleo chegam à parede do ciclone, elas não podem ser novamente capturadas pelo fluxo de gás. Isso vale também para o método de Mothes e Löffler, ou seja, o valor de M<sub>p</sub>, na equação (2.122) foi assumido como zero e a região 3 do modelo deixou de existir.

Deve-se notar, ainda, que apesar de o método de Barth ter requerido uma "calibragem" para fornecer bons resultados, coisa de que os métodos de Mothes-Löffler e Li-Wang não necessitaram, estes dois últimos são bem mais complexos que o primeiro, ou seja, o método de Barth exigiu cálculos bem mais simples para fornecer resultados tão bons quanto os resultados dos métodos de Mothes-Löffler e de Li-Wang.

As figuras 5.6 e 5.7 são análogas às figuras 5.4 e 5.5, sendo que a única diferença é que a velocidade de entrada é mais alta,  $v_i = 25$  m/s (arquivo número 5 do Apêndice A).

Verifica-se de imediato que todas as observações feitas para os dois gráficos anteriores também se aplicam nesse caso. A única diferença é que o aumento das eficiências individuais tornou os métodos de Dietz, Lapple e Zenz ainda mais inadequados para representação dos resultados. Com o aumento da força centrífuga, mesmo as partículas menores tornaram-se menos sujeitas aos efeitos da turbulência e, com isso, saíram do escopo de validade desses métodos. Os métodos de Leith e Licht, e Iozia e Leith apresentam performances comparáveis ao caso anterior. Mais uma vez os melhores resultados correspondem ao método de Mothes e Löffler e, em especial, aos métodos de Barth e Li-Wang.

Entretanto, maiores conclusões não devem ser tiradas a partir da análise de um único conjunto de dados experimentais, como tem sido feito até agora. Dados provenientes de outras fontes devem ser analisados.



Figura 5.6- Dados experimentais obtidos por Dirgo e Leith [10],  $v_i = 25$  m/s.



Figura 5.7- Dados experimentais obtidos por Dirgo e Leith [10],  $v_i = 25$  m/s.

1

As figuras 5.8 e 5.9 trazem dados relativos aos experimentos realizados por Iozia e Leith [18] usados por eles para determinação dos parâmetros de seu método.

A velocidade de entrada foi de 22,72 m/s e o ciclone utilizado possuía diâmetro de de 0,25 m e geometria de Stairmand. O material separado também foi um óleo mineral (método de Li-Wang:  $\alpha = 0$ ; método de Mothes e Löffler:  $M_p = 0$ ,  $\xi = 0,007$ ). A folha de dados completa relativa a esse teste encontra-se no Apêndice A, correspondendo ao arquivo de número 10. O comportamento verificado nas figuras anteriores repete-se também nesse caso, com algumas tênues diferenças. São elas:

a) Agora foi o método de Iozia e Leith o que melhor se ajustou aos pontos experimentais. Isso não deve, porém, ser tomado como um ponto a favor desse método, uma vez que foi a partir deste conjunto de dados que os respectivos pesquisadores fizeram o ajuste das equações que calculam os parâmetros de seu modelo, ou seja, a boa performance do método é uma consequência natural.

b) O método de Mothes e Löffler forneceu uma curva um pouco mais suave que as correspondentes aos métodos de Barth modificado e Li-Wang, e, com isso, ajustou-se melhor aos dados experimentais que os dois últimos. Essa tendência do método de Mothes e Löffler de gerar curvas um pouco mais suaves que as curvas de Barth e Li-Wang também pode ser observada nas figuras anteriores. Neste caso, esses dois últimos métodos superestimaram um pouco os valores de eficiência. Esse efeito é, sem dúvida, atenuado, no caso do método de Barth, se ele for usado em sua forma original.

As figuras 5.10 e 5.11 trazem curvas referentes a um ciclone de geometria próxima ao do ciclone de Lapple com diâmetro de apenas 2,19 cm, sendo que os dados experimentais foram obtidos por Kim e Lee [20]. O material separado também foi um óleo em aerosol e a velocidade de entrada é de 2,03 m/s. Os dados completos relativos a esse experimento encontram-se no Apêndice A, arquivo número 11.



Figura 5.8- Dados experimentais obtidos por Iozia e Leith [18],  $v_i = 22,72$  m/s.



Figura 5.9- Dados experimentais obtidos por Iozia e Leith [18],  $v_i = 22,72$  m/s.



Figura 5.10- Dados experimentais obtidos por Kim e Lee [20],  $v_i = 2,03$  m/s.



Figura 5.11- Dados experimentais obtidos por Kim e Lee [20],  $v_i = 2,03$  m/s.

Sabe-se que um ciclone com diâmetro pequeno apresenta maiores eficiências (e maiores perdas de carga) do que um outro com diâmetro maior operando nas mesmas condições. Essa observação pode parecer contraditória à primeira vista, se for levado em consideração o fato de que o tempo de residência das partículas é maior num ciclone grande, o que dá mais oportunidade delas serem coletadas. Entretanto, um diâmetro excessivamente grande pode desfavorecer o processo de coleta devido ao abrandamento da formação do vórtex. Essa observação se reflete nos métodos de cálculo através dos valores de eficiência de coleta relativamente altos que eles forneceram para esta situação. Apesar disso, as tendências continuam as mesmas:

a) Os métodos de Lapple, Zenz e Dietz deram valores relativamente maiores de eficiência, se comparados com os casos anteriores. Apesar disso, ainda encontram-se longe de serem adequados, devido ao formato muito suave das curvas geradas.

 b) O método de Leith e Licht também continuou fornecendo uma curva suave, com valores "médios" de eficiência, por assim dizer.

c) Os métodos de Barth, Iozia-Leith, Li-Wang e Mothes-Löffler apresentaram valores muito altos de eficiência, sendo que os três últimos dão valores próximos a 100% já para os menores diâmetros de partículas.

Nota-se, assim, uma queda na performance de todos eles, provavelmente devido ao fato do diâmetro do ciclone usado (D = 2,19 cm) ser muito pequeno estando, assim, provavelmente fora da faixa dentro da qual esses métodos foram elaborados.

Deve-se ressaltar que, neste caso, foi utilizada a forma original do método de Barth, ou seja, a equação (2.14) não foi multiplicada por 4 (K= 1), segundo a sugestão de Dirgo e Leith [10]. Se isso tivesse sido feito, a curva relativa a esse método apresentaria resultados ainda piores (próximos de 100% já desde o menor diâmetro de partícula), confirmando assim a previsão desses autores de que o formato das curvas é extremamente dependente da geometria do ciclone e condições de operação. Se, por outro lado, multiplicarmos a equação (2.14) por K = 0,3, será obtida uma nova curva, indicada na figura 5.10, que, conforme pode-se verificar facilmente, proporciona o melhor ajuste dos dados experimentais dentre todas as curvas representadas. Isso

vem apenas corroborar a versatilidade do método de Barth. Modificações no valor de  $\xi$ , numa tentativa de melhorar a curva de Mothes e Löffler, não geram variações significativas, pelo menos enquanto esse valor se mantém dentro da faixa de 0,0065  $\leq \xi \leq$  0,0075, segundo a sugestão destes autores.

Finalmente, como último conjunto de dados a ser analisado neste item, encontram-se os obtidos por Patterson e Münz [35], representados nas figuras 5.12 e 5.13. Esses dados correspondem à separação de sílica de uma corrente gasosa através de um ciclone de Lapple com diâmetro D = 0,102 m e à velocidade de entrada  $v_i = 15$  m/s. A folha de dados correspondente encontra-se no Apêndice A, arquivo número 12.

Verifica-se, neste caso, que o método de Lapple apresentou resultados melhores do que os apresentados anteriormente, certamente usufruindo da geometria de ciclone adequada. Acompanhando o método de Lapple, o método de Zenz também apresenta melhorias. Neste caso, o valor da concentração de sólidos na entrada do ciclone era disponível ( $C_0 = 44 \text{ g/m}^3$ ) e, assim, foi possível fazer a correção do método de Zenz em função da concentração na entrada. Apenas o método de Zenz Adaptado é representado na figura 5.12, uma vez que ele deve apresentar valores mais adequados de eficiência do que o método de Zenz Aproximado, conforme já foi comentado no item 4.3.1 do capítulo anterior. De fato, essa correção promove uma melhoria da performance do método que, neste caso, tornou-se ainda melhor que a do método de Lapple.

Os métodos de Leith-Licht e de Dietz apresentam comportamentos similares aos apresentados nos casos anteriores, assim como os métodos de Barth (modificado), Li-Wang e Mothes-Löffler, sendo que o último apresentou resultados levemente melhores que os dos outros dois.

O fato de o método de Li e Wang ter fornecido valores muito altos de eficiência é provavelmente fruto da consideração de que o re-arraste foi nulo ( $\alpha = 0$ ) durante o processo de separação. Neste caso o material separado foi um sólido (sílica), o que significa que pode ter havido re-arraste. De fato, se o valor de  $\alpha$  for arbitrariamente definido como 0,3 para a execução dos cálculos do método de Li e Wang (re-arraste = 30%), a curva assim obtida ajusta-se quase perfeitamente aos pontos experimentais.



Figura 5.12- Dados experimentais obtidos por Patterson e Münz [35],  $v_i = 15$  m/s.



Figura 5.13- Dados experimentais obtidos por Patterson e Münz [35],  $v_i = 15$  m/s.
Surpreendentemente, o método de lozia e Leith forneceu, neste caso, os melhores resultados dentre todos os métodos utilizados, o que confirma, mais uma vez, que quanto mais acentuado for o caráter empírico de um método de cálculo, tanto mais dependente será a sua capacidade de reproduzir dados experimentais das condições em que esses dados foram obtidos.

O aumento das eficiências de coleta em função da concentração de sólidos, conforme foi visto na correção do método de Zenz, é devido ao efeito de aglomeração das partículas, de acordo com o que já foi comentado anteriormente. A presença dos sólidos no fluxo gasoso provoca uma diminuição da aceleração centrífuga responsável pela remoção das partículas do vórtex, mas surge, em contrapartida, um novo mecanismo de remoção que é tanto mais atuante quanto maior for a concentração de sólidos. Nesses casos, a remoção de partículas pode ser encarada como sendo o resultado de dois processos independentes de separação em série [25].

#### 5.2.2- Dados obtidos na SIX

A figura 5.14 apresenta as curvas experimentais de eficiência obtidas em dois dos testes realizados na unidade de bancada da SIX descrita no item 5.1. O teste 5A corresponde ao teste número 5 realizado no ciclone A, e o teste 15C, de modo análogo, refere-se ao teste de número 15, feito no ciclone C. Em ambos os testes foi realizada análise granulométrica de amostras colhidas na entrada e na saída do ciclone. A partir desses dados, juntamente com os valores conhecidos da massa de sólidos alimentado no silo 1 e da massa recuperada no silo 2, foi calculada a eficiência de coleta referente a cada diâmetro de partícula, gerando, assim, as duas curvas da figura 5.14. Os dados completos referentes às condições de operação em que estes testes foram realizados encontram-se no Apêndice A, arquivos número 13 e 14.

A observação das curvas dessa figura revela uma série de comportamentos que contrariam o esperado:



Figura 5.14 - Curvas de eficiência referentes aos testes realizados na PETROBRÁS-SIX.

1. As eficiências de coleta relativas aos diâmetros menores são excepcionalmente altas, sendo que há uma tendência inicial de <u>queda</u> da eficiência com o aumento do diâmetro da partícula.

2. Depois de assumir o comportamento normal (aumento da eficiência com o aumento do diâmetro), as curvas tornam a se desviar do esperado apresentando novas quedas nos valores de eficiência para os maiores tamanhos de partícula, sendo que, no caso do teste 15C, são os maiores diâmetros que apresentam as menores eficiências (!).

3. No caso do teste 5A, após uma queda em seu valores, a curva de eficiência volta a subir com o aumento do diâmetro de partícula ultrapassando o limite de eficiência = 100% e chegando a alcançar valores de eficiência de até 223%.

Todos os 28 testes executados na SIX geraram curvas de eficiência semelhantes a uma das duas curvas da figura 5.14. Tais resultados encontram-se evidentemente mascarados por uma série de erros experimentais e, da análise das condições em que os testes foram realizados, e a

partir de observações feitas durante a execução dos mesmos, foram tiradas as seguintes conclusões:

a) As altas eficiências de coleta observadas para as partículas menores (0,5  $\mu$ m  $\approx$  1,4  $\mu$ m) são provavelmente devidas à geração de finos durante o processo de separação. Enquanto percorrem seu caminho ao longo da tubulação e, principalmente no interior do ciclone, as partículas sólidas colidem umas contra as outras, e também contra as paredes do equipamento. Com isso, as partículas maiores podem se quebrar, gerando partículas menores, normalmente de diâmetros bastante reduzidos. Dependendo da extensão desse efeito, pode haver uma diminuição do número das partículas grandes (que são "consumidas"), que é contrabalanceada por um aumento ("produção") do número de partículas pequenas, que apresentariam, nesse caso, eficiências de coleta excepcionalmente altas, conforme foi observado.

b) Entre a execução de um teste e outro era passado ar limpo pela instalação, a fim de limpar as tubulações. Foi observado, porém, que apesar desse cuidado, partículas maiores ficavam retidas ao longo dos tubos e, assim, além de haver um processo de retenção das partículas grandes pela tubulação (justificando, assim, as quedas das curvas de eficiência), havia a possibilidade de que partículas alimentadas em um teste acabassem sendo coletadas nos testes seguintes (se fossem usadas vazões mais altas, capazes de arrastar as partículas presas nos tubos), quando saíam, finalmente, da tubulação.

Durante a troca de um dos ciclones utilizados pelo ciclone seguinte, para iniciar uma nova bateria de testes, alguns dos tubos foram vistoriados e pôde-se observar um grande acúmulo de partículas de catalisador em seu interior. Além disso, foi verificada a presença de uma quantidade significativa de partículas de ferrugem que poderiam eventualmente ser carregadas pelo fluxo de gás e coletadas pelo ciclone, juntando-se, nesse caso, às partículas maiores quando da realização da análise granulométrica das respectivas amostras.

c) Nem todos os testes tiveram analisadas tanto uma amostra de sua saída como uma amostra do material em sua entrada (como foi o caso dos testes de número 5 e de número 15, representados na figura 5.14). Nestes casos, foi assumido que a distribuição granulométrica da amostra da alimentação realizada para um dos testes, num determinado dia, aplica-se para todos os testes

realizados nesse mesmo dia. Assim, por exemplo, no dia 27/04/94 foram feitos os testes de número 35 a 39, mas foi efetuada análise granulométrica apenas do material que alimentou o ciclone durante o teste número 39. Os resultados desta análise foram usados, então, para calcular as eficiências dos testes número 35,36,37,38 e 39, o que, no caso dos quatro primeiros testes, pode ser ainda mais uma fonte de erros.

d) A análise granulométrica do material sólido revelou quantidades muito pequenas das partículas menores ( $d_p \approx < 1 \mu m$ ) e das partículas maiores ( $d_p \approx > 30 \mu m$ ), tanto nas amostras de entrada (silo 1) como nas amostras de saída (silo 2). Com isso, pequenos desvios nas medidas das frações mássicas desses diâmetros (devido à sensibilidade do aparelho de medida) podem gerar grandes erros nos valores de eficiência calculados.

Do que foi exposto acima pode-se perceber, agora, como foi possível, por exemplo, que no caso do teste número 15 as partículas de diâmetro 0,5  $\mu$ m apresentaram eficiência de coleta de 90%, enquanto que para as partículas de 88,1  $\mu$ m foram verificadas eficiências de apenas 5%.

Apesar destes desvios, é de se esperar que pelo menos uma faixa de diâmetros apresente valores relativamente confiáveis de eficiência de coleta, sendo essa faixa correspondente às partículas pequenas o bastante para serem carregadas pela corrente de ar até o ciclone sem ficarem retidas no tubos, e que estão menos sujeitas ao processo de fragmentação devido às colisões, mas que, por outro lado, são grandes o suficiente para não se misturarem aos finos produzidos por esse processo. Tais diâmetros devem corresponder à primeira porção crescente da curva 5A (d<sub>p</sub>  $\leq 12,9 \mu$ m) e ao único trecho crescente da curva 15C (d<sub>p</sub>  $\leq 36,3 \mu$ m). Esses trechos foram, então, reproduzidos nas figuras 5.15 a 5.18 juntamente com os resultados obtidos através do oito métodos de cálculo que estão sendo analisados. Os primeiros pontos experimentais presentes nestas figuras devem ser desprezados, por se tratarem dos finos.

As figuras 5.15 e 5.16 trazem as curvas relativas ao teste 5A. A geometria do ciclone A é algo intermediário entre as geometrias de Lapple e de Stairmand, o diâmetro é de 0,30 m, e a velocidade de entrada foi de 8,96 m/s (dados completos no Apêndice A, arquivo número 13).

Os métodos de Lapple, Zenz e Dietz mantiveram suas tendências de fornecerem valores de eficiência muito baixos, assim como o método de Leith e Licht continuou gerando uma curva



Figura 5.15- Curvas de eficiência relativas ao teste 5A,  $v_i = 8,96$  m/s.



Figura 5.16- Curvas de eficiência relativas ao teste 5A,  $v_i = 8,96$  m/s.

de forma suave. Entretanto, uma vez que neste caso a curva experimental também apresenta um aspecto mais suave, esse método acabou fornecendo desvios (para menos) praticamente da mesma magnitude dos desvios (para mais) apresentados pelos métodos de Barth, Li-Wang e Iozia-Leith. O método de Mothes e Löffler também apresenta desvios, se bem que um pouco memoros, maso o melhor ajuste foi realizado, neste caso, pelo método de Zenz quando o efeito da concentração de sólidos na entrada ( $C_0 = 89,48$  g catalisador/ m<sup>3</sup> ar) foi levado em consideração.

Algumas diferenças podem ser observadas nas figuras 5.17 e 5.18, relativas ao teste número 15 (ciclone C). Neste caso, o diâmetro do ciclone também era de 0,3 m, a velocidade de entrada foi de 6,57 m/s, tendo sido a concentração de sólidos igual a 20,69 g/m<sup>3</sup>. A geometria do ciclone usado é próxima à geometria do ciclone de Lapple (dados completos no Apêndice A, arquivo número 14).

Neste caso, os melhores ajustes foram conseguidos pelos métodos de Lapple, Zenz Adaptado e, pela primeira vez, também pelo método de Leith e Licht. O método de Iozia e Leith apresentou resultados melhores que os gerados por Barth, Li-Wang e Mothes-Löffler.

Essa inversão de papéis entre os métodos de ajuste usualmente bom (pelo que foi visto no item anterior), e os outros, geralmente deficientes, é devida unicamente ao formato mais suave da curva de dados experimentais. Ou seja, não se pode fazer generalizações, dizendo-se que esse ou aquele método é sempre ruim, enquanto que um certo outro apresentará sempre bons resultados. Tudo depende das condições de operação em que se trabalha e do tipo de equipamento usado.

Note que as curvas de dados experimentais obtidas na SIX (figuras 5.15 a 5.18) e a curva experimental obtida por Patterson e Münz [35] (figuras 5.12 e 5.13) são mais suaves que as curvas anteriores, obtidas por Dirgo e Leith [10] (figuras 5.4 a 5.7), Iozia e Leith (figuras 5.8 e 5.9) e Kim e Lee [20] (figuras 5.10 e 5.11). O que diferencia estes dois conjuntos de curvas é que, enquanto no primeiro grupo o material separado era um sólido (finos de catalisador de FCC e sílica, respectivamente), no segundo conjunto foi usado sempre um óleo como fase mais pesada, garantindo que o re-arraste de partículas fosse nulo. Foram obtidas, daí, curvas experimentais de separação mais abruptas, de formato sigmóide e bem representadas pelos métodos de Barth (modificado ou não), Mothes-Löffler, e Li-Wang.



Figura 5.17- Curvas de eficiência relativas ao teste 15C,  $v_i = 6,57$  m/s.



Figura 5.18- Curvas de eficiência relativas ao teste 15C,  $v_i = 6,57$  m/s.

No caso do primeiro grupo de curvas, as curvas experimentais obtidas foram mais suaves (especialmente as curvas relativas aos testes realizados na SIX) e, em todos os casos, elas foram muito bem ajustadas pelo método de Zenz Adaptado e, em maior ou menor grau, pelos métodos de Lapple e de Leith-Licht.

O re-arraste de partículas tem a tendência de diminuir os perfis radiais de concentração de partículas não coletadas no interior do ciclone, além de aumentar a turbulência. A atuação da força centrífuga do gás deixa de ser tão preponderante, as eficiências caem, e esse efeito é mais pronunciado no caso das partículas de diâmetros médios, que deveriam apresentar eficiências de coleta de um determinado valor e, no entanto, não o fazem, devido às perdas por re-arraste (os finos continuam sendo perdidos, e as partículas muito grandes também continuam a ser coletadas, independentemente da ocorrência de re-arraste ou não). Com isso, ocorre uma suavização do formato da curva de eficiência, de forma normalmente sigmóide, que passa a assumir um formato que tende a ser parabólico, conforme pode ser observado nas curvas 5.15 a 5.18. Nessas condições são favorecidos os métodos de cálculo que partem de hipóteses que assumem distribuições radiais uniformes de partículas no ciclone (= ausência de perfis de concentração), ou seja, os métodos de Leith Licht, Dietz, Lapple e Zenz. De fato, foi observada uma sensível melhora na performance desses métodos em detrimento dos métodos de Barth, Mothes-Löffler e Li-Wang.

Os métodos de Mothes-Löffler e Li-Wang também podem gerar resultados um pouco melhores nestas condições, desde que se tenha conhecimento prévio do grau em que o re-arraste ocorre, ou seja, que sejam conhecidos os valores de  $\alpha$  e de M<sub>p</sub>, respectivamente. É praticamente impossível, porém, prever os valores destes parâmetros, ou mesmo medi-los, e, assim, a menos que isso seja feito de alguma maneira, a única alternativa remanescente é utilizá-los como parâmetros empíricos de ajuste, exatamente da mesma forma como Dirgo e Leith [10] fizeram quando criaram um parâmetro K= 4 para ajustar o método de Barth aos seus resultados.

Esse procedimento deve melhorar o ajuste dos métodos de Li-Wang e Mothes-Löffler aos pontos experimentais, mas não necessariamente tornará bom esse ajuste. Tudo depende do formato da curva experimental de eficiência em questão. Assim, apesar do uso de um valor de  $\alpha$  maior que zero tornar possível um ajuste quase perfeito do método de Li e Wang aos dados de Patterson e Münz [35] (figura 5.13), conforme foi comentado anteriormente, por mais que se aumentasse o valor de  $\alpha$ , não foi possível conseguir um bom ajuste deste método aos dados experimentais obtidos na SIX (figuras 5.16 e 5.18), uma vez que as respectivas curvas experimentais não se ajustam ao formato típico das curvas geradas pelo método de Li e Wang. Estudo semelhante não foi feito, porém, com o método de Mothes e Löffler.

#### 5.3- Queda de Pressão

#### 5.3.1- Dados Obtidos na SIX

A análise dos valores de queda de pressão obtidos nos testes da SIX será feita através do cálculo do valor de  $\Delta$ H para cada um dos 5 ciclones que foram utilizados. Esse fator, conforme já comentado no capítulo 3, é adimensional e depende apenas da geometria do ciclone, devendo ser único para cada geometria. O valor de  $\Delta$ H é dado pela equação (5.1), análoga à equação (3.1):

$$\Delta H = \frac{2 \Delta P}{\rho_g v_i}$$
(5.1)

As tabelas 5.2 a 5.6 trazem os valores de  $\Delta P$  observados em cada teste realizado e os respectivos valores calculados de  $\Delta H$ :

n <sup>o</sup>	v <sub>i</sub> (m/s)	T(°C)	ΔP(Pa)	ΔH
1	7,23	32,0	196,12	6,86
2	9,04	33,0	451,07	10,09
3	7,07	33,0	147,09	5,40
4	7,13	38,5	176,51	6,48
5	8,96	44,5	274,57	6,50
6	7,13	37,5	166,70	6,10
7	8,91	41,0	372,63	8,81
8	9,09	36,0	441,27	9,86

Tabela 5.2 - Valores de  $\Delta P$  e  $\Delta H$  Relativos ao Ciclone A

Tabela 5.3 - Valores de  $\Delta P$  e  $\Delta H$  Relativos ao Ciclone B

.

nº	v <sub>i</sub> (m/s)	T(°C)	ΔP(Pa)	ΔH
9	7,02	29,5	431,46	15,83
10	8,65	32,8	715,84	17,43
11	7,07	28,8	460,88	16,63
12	7,25	32,5	441,27	15,33
13	9,23	45,0	882,54	19,60
14	9,17	48,0	813,89	18,49

nº	v <sub>i</sub> (m/s)	T(°C)	ΔP(Pa)	ΔH
15	6,57	36,5	88,25	3,80
16	6,23	36,0	88,25	4,21
17	6,56	42,0	58,84	2,58
18	8,42	27,0	166,70	4,23
19	8,35	32,5	127,48	3,35
20	8,43	38,5	166,70	4,38

Tabela 5.4 - Valores de  $\Delta P$  e  $\Delta H$  Relativos ao Ciclone C

Tabela 5.5 - Valores de  $\Delta P$  e  $\Delta H$  Relativos ao Ciclone D

nº	v <sub>i</sub> (m/s)	T( <sup>°</sup> C)	ΔP(Pa)	ΔH
21	6,33	35,0	441,27	20,27
22	5,93	36,0	382,43	20,10
23	6,19	28,0	460,88	21,63
24	8,07	29,0	, 833,51	23,00
25	8,04	35,0	813,89	23,09
26	8,05	35,5	813,89	23,06

Tabela 5.6 - Valores de  $\Delta P$  e  $\Delta H$  Relativos ao Ciclone E

n°	v <sub>i</sub> (m/s)	T( <sup>°</sup> C)	ΔP(Pa)	ΔН
27	16,31	38,0	2314,21	15,86
28	1,44	20,0	49,03	41,57
29	1,58	20,0	88,25	62,13
30	1,96	20,0	177,67	53,82
31	1,83	20,0	137,28	72,00

A fim de que a equação (5.1) pudesse ser empregada foi determinado o valor da densidade do ar para cada um dos testes realizados. Isso foi feito a partir da seguinte relação, derivada da lei dos gases ideais:

$$\rho_g = \frac{29000(0,943 + \Delta P/10333)}{82,05 T}$$
(5.2)

onde:

 $\Delta P$  = queda de pressão no ciclone (mm H<sub>2</sub>O);

T = temperatura (K).

O valor 0,943 corresponde à pressão atmosférica em São Mateus do Sul (atm).

Apesar de o valor de  $\Delta$ H dever ser único para cada ciclone, as tabelas anteriores mostram que houve variações em seu valor. Assim, foi determinado o valor médio desse parâmetro para cada geometria ( $\Delta$ H médio), de modo que ele possa ser comparado com os valores experimentais. Como forma de medir a dispersão dos pontos observados em torno da média, foi determinada a variância ( $\sigma^2$ ) em cada caso;

Tabela 5.7 - Valores Médios de  $\Delta H$ 

	<b>ΔH</b> médio	$\sigma^2$
Ciclone A	7,51	2,85
Ciclone B	17,22	2,20
Ciclone C	3,76	0,40
Ciclone D	21,86	1,66
Ciclone E	49,08	375,6

A variância de uma variável x em torno do valor médio,  $x_m$ , pode ser calculada pela seguinte relação:

$$\sigma^2 = \sum \frac{(x - x_m)^2}{n}$$
(5.3)

onde: n = número de pontos analisados

A verificação da tabela 5.7 indica que, apesar de os 4 primeiros ciclones terem apresentado valores relativamente bons de  $\Delta H$ , e isso se reflete pelos baixos valores de variância obtidos, os valores de  $\Delta H$  para o ciclone E variaram excessivamente em torno da média ( $\sigma^2 = 375,6$ ). Isso já era de se esperar pois, conforme foi comentado no item 5.1, houve problemas nas leituras de pressão durante os testes realizados neste ciclone. Deste modo, serão analisados apenas os valores relativos aos outros 4 ciclones.

Foram calculados, então, os valores de  $\Delta H$  fornecidos através de cada um dos sete métodos de cálculo de queda de pressão disponíveis no programa desenvolvido. Os valores obtidos encontram-se na tabela 5.8, juntamente com os valores experimentais médios.

Ciclone	Α	В	С	D	$\sigma^2$
ΔH experimental	7,51	17,22	3,76	21,86	ann rann fain stàr Alb
Alexander	10,87	21,78	6,32	21,83	9,66
Shepherd	13,44	24,99	8,37	24,99	31,65
Casal	11,28	30,83	6,41	30,83	71,73
Zenz	3,16	7,30	1,76	6,92	86,13
Stairmand	5,71	13,58	5,97	22,66	5,50
Barth	10,78	21,11	9,51	35,42	60,69
First	17,22	32,02	27,70	82,64	1145,20

Tabela 5.8 - Valores de  $\Delta H$  Relativos a Cada Método

O valor da variância nessa tabela corresponde ao desvio global de cada método em representar o valor de  $\Delta H$  experimental para os 4 ciclones estudados:

$$\sigma^{2} = \sum \frac{(\Delta H_{m \neq todo} - \Delta H_{exp})^{2}}{4}$$
 (5.4)

Da tabela 5.8 pode-se verificar que os melhores métodos, nesse caso, foram os métodos de Stairmand ( $\sigma^2 = 5,5$ ) e de Alexander ( $\sigma^2 = 9,66$ ). Apesar de ter sido o melhor método de cálculo, não se pode dizer, propriamente, que o método de Stairmand tenha dado bons resultados em todos os casos. No caso do Ciclone C, por exemplo, ele estimou um valor de  $\Delta$ H aproximadamente 59% maior que o valor experimental. Entretanto, os outros métodos forneceram desvios ainda maiores.

Para o emprego do método de Zenz foi considerado que o valor da razão de aréas,  $r_a$ , usado para determinação do valor de K, na equação (3.23), era igual a 1. Com isso, K = 0,  $v_i = v_s$  (veja item 4.3.3) e  $\Delta P_1 = \Delta P_2 = 0$  (equações 3.23 e 3.24). Isso significa que, neste caso, não estão sendo levadas em consideração, para o cálculo de  $\Delta H$  através do método de Zenz, as perdas de pressão devido à contração do fluxo de gás na entrada do ciclone ( $\Delta P_1$ ) e à aceleração das partículas sólidas ( $\Delta P_2$ ), o que justifica os baixos valores de  $\Delta H$  fornecidos pelo método.

Os métodos de Casal e de Barth apresentaram performances equiparáveis ( $\sigma^2 = 71,73$ e  $\sigma^2 = 60,69$ , respectivamente), enquanto que o método de Shepherd e Lapple foi um pouco melhor ( $\sigma^2 = 31,65$ ) que eles. O método de First, por outro lado, apresentou resultados particularmente ruins ( $\sigma^2 = 1145$ ), excessivamente altos (para o Ciclone C, por exemplo, ele fornece um valor de  $\Delta$ H 637% maior que o valor experimental).

#### 5.3.2- Dados da Literatura

Foram escolhidos alguns conjuntos de dados, obtidos da literatura, para serem

tratados de forma análoga ao que foi feito no item anterior, de modo a se obterem maiores informações a respeito da capacidade de predição dos métodos que estão sendo estudados.

Inicialmente serão analizados os dados obtidos por Dirgo e Leith [10] em seu Ciclone de Stairmand com 0,3 m de diâmetro. As folhas de dados completas encontram-se no Apêndice A (arquivos de números 1 a 5).

nº	v <sub>i</sub> (m/s)	ΔP(Pa)	ΔH
1	5,1	87	5,53
2	10,0	336	5,56
3	15,0	785	5,77
4	20,0	1407	5,82
5	25,0	2205	5,83

Tabela 5.9 - Valores de  $\Delta P$  e  $\Delta H$  (Dirgo e Leith [10]).

 $\Delta H \text{ médio} = 5,70; \sigma^2 = 0,017$ 

Tabela 5.10 - Valores médios de  $\Delta H$  (Dirgo e Leith [10]).

	ΔH	σ²
ΔH Experimental	5,70	
Alexander	5,26	0,194
Shepherd	6,42	0,518
Casal	5,14	0,314
Zenz	2,73	8,821
Stairmand	3,86	3,386
Barth	6,38	0,462
First	9,21	12,320

Neste caso, o melhor método foi o de Alexander ( $\sigma^2 = 0,194$ ), seguido pelos métodos de Casal e Martinez-Benet ( $\sigma^2 = 0,314$ ), Barth ( $\sigma^2 = 0,462$ ) e Shepherd e Lapple ( $\sigma^2 = 0,518$ ). O método de Stairmand não foi tão adequado neste caso como no item anterior. O método de First continuou apresentado os piores resultados.

Também neste caso (assim como em todos os casos apresentados nesse item) os baixos valores de  $\Delta$ H apresentados pelo método de Zenz são devidos ao fato de que ele não está levando em consideração o efeito da queda de pressão na entrada do ciclone. Isso não pôde ser feito uma vez que não era disponível o valor da razão de áreas (r<sub>a</sub>) necessário para o emprego da equação (3.23).

Os próximos dados a serem analisados foram obtidos por Kim e Lee [20] em um ciclone com diâmetro de 2,19 cm. As informações completas encontram-se no Apêdice A, arquivos de número 15 e 16.

nº	v <sub>i</sub> (m/s)	ΔP(Pa)	ΔH
1	2,87	44	10,68
2	4,25	104	11,52

Tabela 5.11 - Valores de  $\Delta P \in \Delta H$  (Kim e Lee [20]).

 $\Delta H \text{ médio} = 11,10; \sigma^2 = 0,176$ 

O melhor método neste caso foi o de Barth ( $\sigma^2 = 0.72$ ; erro = -7.7%). Todos os outros apresentaram resultados que se desviam muito do valor experimental de  $\Delta H$ . Isso se deve provavelmente ao fato de que o ciclone em questão possui um diâmetro muito pequeno, provavelmente fora da faixa dentro da qual esses métodos foram desenvolvidos.

	ΔH	σ²
ΔH Experimental	11,1	
Alexander	4,07	49,42
Shepherd	6,24	23,62
Casal	5,04	36,72
Zenz	2,37	76,21
Stairmand	1,51	91,97
Barth	10,25	0,72
First	19,98	78,85

Tabela 5.12 - Valures médios de  $\Delta H$  (Kim e Lee [20]).

As tabelas 5.13 e 5.14 referem-se a dados obtidos por Boysam et al [6] em um ciclone de 0,20 m de diâmetro e geometria parcialmente semelhante à do ciclone de Stairmand. Os dados completos correspondem ao arquivo número 17 do Apêndice A.

Tabela 5.13 - Valores de  $\Delta P \in \Delta H$  (Boysan et al [6]).

nº	v <sub>i</sub> (m/s)	ΔP(Pa)	ΔН
1	4,06	100,0	12,13
2	5,40	210,0	14,40
3	13,62	1310,0	14,12

 $\Delta H \text{ médio} = 13,55; \sigma^2 = 1,021$ 

	ΔH	σ²
ΔH Experimental	13,55	
Alexander	10,27	10,76
Shepherd	11,95	2,56
Casal	9,62	15,44
Zenz	4,67	78,85
Stairmand	8,72	23,33
Barth	17,73	17,47
First	32,64	364,43

Tabela 5.14 - Valores médios de  $\Delta H$  (Boysan et al [6]).

Neste caso, o melhor método foi o de Shepherd e Lapple (o<sup>2</sup> = 2,56; erro = -11,8%).
Finalmente, como último conjunto de dados a ser analisado, encontram-se alguns
dados obtidos por Iozia e Leith [18] quando da elaboração de seu método para cálculo de
eficiência. O ciclone utilizado tem diâmetro de 0,25 m e geometria de Stairmand. As folhas
de dados correspondentes são os arquivos de números 18, 19 e 10, que se encontram no
Apêndice A.

Tabela 5.15 - Valores de  $\Delta P \in \Delta H$  (Iozia e Leith [18]).

nº	v <sub>i</sub> (m/s)	ΔP(Pa)	ΔH
1	7,52	100	3,54
2	15,20	400	3,46
3	22,72	1000	3,87

 $\Delta H \text{ médio} = 3,62; \sigma^2 = 0,032$ 

	ΔH	σ <sup>2</sup>
<b>Δ</b> H Experimental	3,62	
Alexander	5,13	2,28
Shepherd	6,40	7,73
Casal	5,13	2,28
Zenz	2,74	0,77
Stairmand	3,87	0,063
Barth	6,35	7,45
First	9,81	38,32

Tabela 5.16 - Valores médios de  $\Delta H$  (Iozia e Leith [18]).

Neste caso, o método de Stairmand voltou a apresentar os melhores resultados ( $\sigma^2 = 0.063$ ; erro = 7%).

A tabela 5.17 apresenta a soma das variâncias apresentadas por cada um dos métodos estudados em todas as análises feitas neste item e no item anterior (5.3.1), ou seja, foram somados os valores de variância presentes nas tabelas 5.8, 5.10, 5.12, 5.14 e 5.16, de forma que fossem obtidos os valores totais de variância relativos a cada método.

Segundo essa tabela, em termos gerais, o método de Shepherd e Lapple foi o que apresentou o melhor desempenho. Isso não quer dizer, porém, que esse método seja melhor do que os outros. Conforme foi visto anteriormente, a performance individual de cada método varia muito de caso para caso e, apesar de o método de Shepherd e Lapple ter apresentado um bom desempenho na média, apenas em um caso ele forneceu os melhores resultados (dados de Boysan et al [6], tabela 5.14). O método de Stairmand, por outro lado, que na colocação geral ficou apenas em quarto lugar, foi o único a apresentar os melhores resultados em dois casos diferentes (dados da SIX, na tabela 5.8, e dados de Iozia e Leith [18], tabela 5.16). O problema com esse método foi que, para os outros conjunto de dados, ele apresentou

resultados bem inferiores.

	Método	o <sup>2</sup>
10	Shepherd	66,08
2°	Alexander	72,31
30	Barth	86,79
4°	Stairmand	124,25
5°	Casal	126,48
6°	Zenz	250,78
7°	First	1639,1

Tabela 5.17 - Valores totais de Variância ( $\sigma^2$ ).

Além disso, com excessão do método de First, que gerou sempre os piores resultados, excessivamente altos, e do método de Zenz, que forneceu sempre valores muito baixos de  $\Delta$ H, devido a não estar levando em considéração a queda de pressão na entrada do ciclone, não foi observado nenhum comportamento sistemático na performance dos demais métodos que pudesse dar alguma pista a respeito de quando eles funcionam bem, e quando não. Todos eles superestimaram o valor de  $\Delta$ H em algumas ocasiões, e subestimaram-no em outras. Mesmo o método de Stairmand, que deu bons resultados quando estimou o valor do  $\Delta$ H do ciclone utilizado por Iozia e Leith (tabela 5.16), de geometria de Stairmand, não foi o melhor método para o cálculo do  $\Delta$ H do ciclone de Dirgo e Leith (tabela 5.10), que também possuía geometria de Stairmand. Assim, nem mesmo o tipo de geometria do ciclone utilizado pode ser empregado como um parâmetro para prever quais métodos dão uma boa estimativa para o valor de  $\Delta$ H, e quais métodos são inadequados para isso, sob determinadas condições.

#### 5.4- Efeito da Concentração sobre a Perda de Carga

Segundo observações feitas por diversos pesquisadores, o aumento da concentração de sólidos na entrada do ciclone tem o efeito de aumentar a eficiência de coleta e diminuir a perda de carga observada durante o processo de separação.

A maioria dos dados experimentais reportados na literatura não informa, porém, as concentrações utilizadas na alimentação dos ciclones durante a realização dos testes, o que torna difícil um estudo quantitativo desse efeito. Contudo, essas informações são conhecidas no caso dos testes executados na SIX, e é interessante que elas sejam analisadas. A tabela 5.18 traz os dados de eficiência, queda de pressão, velocidade e concentração de sólidos na entrada do ciclone A:

	v <sub>i</sub> (m/s)	$C_0 (g/m^3)$	$\Delta P (mm H_2O)$	eficiência (%)
1	7,23	94,30	20	70,70
2	9,04	89,81	46	75,70
3	7,07	71,34	15	67,90
4	7,13	34,52	18	63,87
5	8,96	89,48	28	74,49
6	7,13	11,41	17	64,12
7	8,91	17,14	38	62,42
8	9,09	20,27	45	70,07

Tabela 5.18 - dados de Operação do Ciclone A (teste SIX).

Comparando, por exemplo, o teste número 5 com o teste número 7, ambos com aproximadamente a mesma velocidade de entrada ( $v_i \approx 8,9$  m/s), verifica-se que o teste 5, com maior concentração de sólidos que o teste 7, apresentou, de fato, maior eficiência e menor perda de carga. Entretanto, se os testes número 4 e 6 ( $v_i = 7,13$  m/s) forem comparados, verifica-se que, apesar da diferença nos valores de concentração (34 g/m<sup>3</sup> contra 11 g/m<sup>3</sup>), os valores de eficiência e de queda de pressão obtidos são praticamente os mesmos (63~64% e 18~17 mm H<sub>2</sub>O). O mesmo pode ser dito com relação aos pontos 2 e 8: a perda de carga foi igual nos dois casos (45~46 mm H<sub>2</sub>O) e, apesar da eficiência obtida ter sido um pouco maior no caso do ponto 2 (~76%, contra 70% para o ponto 8), essa diferença é muito pequena para ser assumida como significativa em vista da série de erros experimentais envolvidos na realização destes testes, conforme foi comentado no item 5.2.2.

A análise dos dados relativos aos demais ciclones (B, C, D e E) apresenta esse mesmo tipo de resultados, ou seja, as variações, quando existentes, são muito pequenas para estarem seguramente fora da faixa dos erros experimentais. Assim, nenhuma conclusão positiva pôde ser tirada.

## CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foram apresentados oito métodos para cálculo de eficiência e sete métodos para o cálculo de queda de pressão de um ciclone. A confiabilidade desses métodos foi avaliada comparando-se os resultados obtidos através de seu uso com pontos experimentais obtidos ou da literatura ou dos testes realizados na SIX especialmente para isso.

Trabalhou-se com os ciclones de tipo mais comum, de fluxo reverso e entrada tangencial, cobrindo uma faixa de diâmetros de barril entre 2 cm e 30,5 cm. As proporções geométricas foram sempre iguais ou próximas às do ciclone de Stairmand ou às do ciclone de Lapple (Tabela 1.1). Foram usadas velocidades de entrada entre 1,44 m/s e 25 m/s. As conclusões a que se chegou são as seguintes:

1. Em primeiro lugar, não se podem fazer generalizações definitivas. A natureza empírica/semiempírica dos métodos estudados torna o seu desempenho altamente dependente das condições de operação em que se trabalha e do tamanho e geometria do ciclone utilizado. Métodos que dão ótimos resultados em um caso podem fornecer resultados totalmente errôneos em uma situação diferente. Apesar disso, porém, a partir do que foi observado neste trabalho foram traçadas algumas linhas gerais de direcionamento que se encontram nos próximos itens. Tais linhas, contudo, devem ser sempre encaradas com reservas.

#### A. Com relação ao cálculo de eficiência

2. Se não há possibilidade de haver re-arraste do material a ser coletado (líquido, óleo, etc...) os métodos de Barth, Mothes-Löffler e Li-Wang são os que tendem a dar os melhores resultados. Nestes casos, a curva de eficiência apresenta um formato sigmóide bem definido e, enquanto o método de Mothes e Löffler tem uma tendência a apresentar curvas levemente mais suaves que a curva experimental (eficiências um pouco maiores que as reais para as partículas de pequenos diâmetros e eficiências um pouco menores para os diâmetros maiores), o método de Li-Wang tem

exatamente a tendência oposta, gerando curvas levemente mais abruptas. O método de Barth pode dar o melhor ajuste de todos, mas para isso é necessário que se encontre o valor adequado da constante K que deve multiplicar a equação (2.14) antes de ela ser usada. Isso pode tanto dar uma maior versatilidade ao método como, por outro lado, pode ser uma desvantagem em relação aos outros dois (Li-Wang, Mothes-Löffler), que não necessitam desse tipo de informação para fornecerem bons resultados.

3. Ainda com relação às situações em que não pode haver o re-arraste de partículas, foi verificado que, em condições que desfavorecem a atuação da força centrífuga no interior do ciclone (baixas velocidades de entrada, pequenos diâmetros de partícula) os métodos de Dietz, Zenz e especialmente o método de Lapple dão resultados um pouco melhores.

4. Na ausência de re-arraste, o método de Leith e Licht gerou sempre resultados inadequados devido ao formato parabólico da curva que ele calcula.

5. Se ocorre re-arraste de partículas (separação de sólidos) é recomendado o uso dos métodos de Zenz Adaptado ou de Lapple, sendo que o segundo dá resultados tanto melhores quanto mais próxima for a geometria do ciclone em questão à do ciclone utilizado por Lapple (Tabela 1.1). Nos casos em que a correção do método de Zenz em função da concentração na entrada não puder ser feita (para gerar o método de Zenz Adaptado), os valores de eficiência de Zenz não corrigidos também foram relativamente bons, se bem que inferiores aos de Lapple.

6. Dependendo do grau de re-arraste o método de Leith e Licht pode dar um ajuste muito bom ou apenas razoável.

7. Quando há re-arraste de sólidos o uso do método de Barth deve ser evitado. A curva gerada por ele não corresponde ao formato parabólico das curvas reais de eficiência obtidas nestas situações. O uso do método de Li e Wang e/ou de Mothes e Löffler pode até ser tentado, desde que se conheçam os valores adequados dos respectivos parâmetros de re-arraste ( $\alpha$ , M<sub>p</sub>) a serem utilizados. Mesmo assim, é possível que um bom ajuste não seja conseguido.

8. Nada pode ser dito com segurança a respeito do método de Iozia e Leith. Ele forneceu ajustes bons e ajustes ruins tanto para condições em que havia re-arraste como em condições em que não havia (compare, por exemplo, os bons ajustes das figuras 5.8 [sem re-arraste] e 5.12 [com re-arraste], com os ajustes sofríveis verificados nas figuras 5.6 [sem re-arraste] e 5.15 [com re-

arraste]), tornando difícil, assim, a predição de seu desempenho. Isso deve ser função do maior número de parâmetros empíricos em que esse método se baseia.

9. Todos as observações acima foram válidas para ciclones com diâmetros variando entre 10 cm e 30,5 cm. Quando foi usado um ciclone bem pequeno, com diâmetro de 3,11 cm, todos os métodos forneceram ajustes ruins, provavelmente porque não foram desenvolvidos para trabalhar nessa faixa de diâmetros. O único resultado bom, nesse caso, foi obtido pelo método de Barth, após ele ter sido ajustado aos pontos experimentais pela determinação do valor de K, parâmetro que deve multiplicar a equação (2.14), como sendo igual a 0,3.

#### B. Com relação ao cálculo de queda de pressão

10. O método de First deve ser evitado, uma vez que ele calcula valores excessivamente altos para  $\Delta H$ .

11. O método de Zenz não pôde ser adequadamente analisado, uma vez que ele requer que o usuário defina o grau de redução da área de escoamento do gás quando este entra no ciclone, a fim de se avaliar a perda de carga na entrada do equipamento. Uma vez que esta informação não se encontrava disponível nos conjuntos de dados 'de que se dispunha, foi desprezada a contribuição desse efeito para o cálculo dos valores de  $\Delta$ H. Com isso, foram gerados valores de  $\Delta$ H bem menores que os reais, e os desvios observados foram altos.

12. Todos os métodos apresentados, com excessão do método de Barth, foram inadequados para o cálculo de  $\Delta$ H em um ciclone de diâmetro muito pequeno, D = 2,19 cm. Isso é um indicativo de que esse método possui uma faixa de aplicação mais ampla do que os outros.

13. Nenhuma outra conclusão pôde ser tirada. Os demais métodos comportaram-se de forma totalmente imprevisível, fornecendo resultados às vezes bons, às vezes ruins; em alguns casos com erros positivos e, em outros, com erros negativos. Nenhum padrão de comportamento pôde ser detectado, e nem, tampouco, puderam ser encontrados indicativos que dêem pistas de quando um método dará um bom ajuste e quando não. Isso é, sem dúvida, fruto do caráter altamente empírico destes métodos.

14. Em alguns casos, mesmos os métodos de melhor ajuste forneceram valores de  $\Delta$ H com erros ainda muito altos (veja, por exemplo, o caso do ciclone C na Tabela 5.8).

15. Não pôde ser verificada, nos testes realizados na SIX, a influência da concentração de sólidos sobre a perda de carga do ciclone. A razão para isso é, provavelmente, o fato de se ter trabalhado dentro de uma faixa estreita de concentrações (6,67 g/m<sup>3</sup>  $\leq C_0 \leq 94,30$  g/m<sup>3</sup>) nos testes em que a leitura de pressão foi confiável, ou seja, nos testes realizados nos ciclones A, B, C e D.

#### Sugestões para a continuidade deste trabalho:

1. Foi construído um banco de dados experimentais com dados de eficiência de coleta e/ou queda de pressão que contém 80 arquivos obtidos da literatura e 28 arquivos gerados pelos testes executados na SIX. A maior parte destes arquivos foi analisada para a execução deste trabalho (apenas os resultados mais significativos foram mostrados aqui), mas não todos. Seria interessante que esse banco de dados fosse totalmente explorado a fim de se verificar se as conclusões apresentadas acima são mantidas ou se surge algum fato novo que venha a contradizer alguma delas ou a acrescentar novas informações.

2. Seria interessante que a performance dos métodos apresentados neste trabalho fosse avaliada dentro de outras faixas de tamanhos de ciclones, especialmente para aqueles com diâmetros maiores que 30 cm. Para isso seria necessário que fossem obtidos, primeiramente, dados experimentais para comparação dos resultados, uma vez que todos os dados disponíveis no banco de dados construído são referentes a ciclones com diâmetros de 30,5 cm ou menos.

3. Poderia ser feito um estudo da influência do parâmetro  $M_p$  (fluxo de partículas re-arrastadas) sobre a performance do método de Mothes e Löffler, e do efeito que diferentes valores da difusividade turbulenta ( $D_r$ ) têm sobre as curvas obtidas pelos métodos de Mothes-Löffler e Li-Wang. Tais parâmetros (juntamente com o coeficiente de re-arraste ( $\alpha$ ) do método de Li e Wang) podem vir a ser usados como parâmetros de ajuste, de forma análoga ao parâmetro K, sugerido por Dirgo e Leith [10] para ser usado com o método de Barth.

4. Não foi possível determinar, neste trabalho, nenhuma diretriz que dê indicações de quando um

ou outro método para cálculo de queda de pressão tem uso mais indicado. Apesar de nossa opinião de que isso não poderá ser feito, devido ao caráter empírico destes métodos, é indicado que, caso haja interesse, esse estudo seja continuado numa tentativa de que, talvez a partir de um maior número de observações, alguns padrões de comportamento sejam encontrados.

5. O método de Zenz para cálculo de queda de pressão não pôde ser avaliado de modo apropriado. Da mesma forma, não puderam ser tiradas conclusões elucidativas a respeito de quando o método de Iozia e Leith funciona bem, e quando não. Quando do prosseguimento deste estudo, especial atenção deve ser conferida a estes dois pontos.

6. Caso haja interesse, pode ser realizada a otimização do uso dos diferentes métodos utilizados neste trabalho através do ajuste de seus parâmetros aos dados experimentais obtidos na SIX.

# **Apêndice** A

## Folhas de Dados

.

## **ARQUIVO DO BANCO DE DADOS**

.

#### Número do Arquivo: 1

### A. Dados de operação:

1.	Temperatura de operação:	19,12	2°C
2.	Densidade do sólido:	860,00	Kg/m3
3.	Densidade do gás:	1,2095	Kg/m3

- 4. Viscosidade do gás:5. Velocidade de entrada: 0,018093 cp
- 5,1 m/s
- B. Dados do ciclone:

1. Diâmetro do barril:	0,305 m
2. Diâmetro do duto de saída do gás:	0,152 m
3. Altura do bocal de entrada:	0,152 m
4. Largura do bocal de entrada:	0,061 m
5. Penetração do duto de saída do gás:	0,152 m
6. Comprimento do cilindro:	0,457 m
7. Comprimento do ciclone:	1,22 m
8. Diâmetro do duto de saída de sólidos	s: 0,114 m

C. Eficiências de coleta observadas:

Diâmetro da partícula (µm)	Eficiência (%)
1,3500	0,0000
2,1400	0,0000
2,8600	0,0000
3,5000	2,4000
4,2700	2,9300
5,0000	10,6700
5,8400	33,6000
6,5700	71,1300
7,3800	77,0700

D. Queda de Pressão: 87,00 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: óleo mineral.

F. Fonte de dados:

Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions Dirgo, J. e Leith, D. Aerosol Science and Technology 4: 401-415 (1985)

.

G. Observações: Design: Stairmand.

### **ARQUIVO DO BANCO DE DADOS**

#### Número do Arquivo: 2

### A. Dados de operação:

1.	Temperatura de operação:	19,12	2°C
2.	Densidade do sólido:	860,00	Kg/m3
3.	Densidade do gás:	1,2095	Kg/m3

- 4. Viscosidade do gás:5. Velocidade de entrada: 0,018093 cp
- 10,0 m/s
- B. Dados do ciclone:

1.	Diâmetro do barril:	0,305 m
2.	Diâmetro do duto de saída do gás:	0,152 m
3.	Altura do bocal de entrada:	0,152 m
4.	Largura do bocal de entrada:	0,061 m
5.	Penetração do duto de saída do gás:	0,152 m
6.	Comprimento do cilindro:	0,457 m ,
7.	Comprimento do ciclone:	1,22 m
8.	Diâmetro do duto de saída de sólidos:	0.114 m

#### C. Eficiências de coleta observadas:

Diâmetro da partícula (µm)	Eficiência (%)
1,3500	2,4000
2,1400	5,8700
2,8600	5,3300
3,5000	37,8700
4,2700	58,4000
5,0000	83,2000
5,7500	92,2700

D. Queda de Pressão: 336,00 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: óleo mineral.

F. Fonte de dados:

Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions Dirgo, J. e Leith, D. Aerosol Science and Technology 4: 401-415 (1985)

G. Observações: Design: Stairmand.

#### **ARQUIVO DO BANCO DE DADOS**

#### Número do Arquivo: 3

#### A. Dados de operação:

- 1. Temperatura de operação: 19,12 °C
- 2. Densidade do sólido: 860,00 Kg/m3
- 3. Densidade do gás: 1,2095 Kg/m3
- 4. Viscosidade do gás: 0,018093 cp
- 5. Velocidade de entrada: 15,0 m/s
- B. Dados do ciclone:

1.	Diâmetro do barril:	0,305 m
2.	Diâmetro do duto de saída do gás:	0,152 m
3.	Altura do bocal de entrada:	0,152 m
4.	Largura do bocal de entrada:	0,061 m
5.	Penetração do duto de saída do gás:	0,152 m
6.	Comprimento do cilindro:	0,457 m
7.	Comprimento do ciclone:	1,22 m
8.	Diâmetro do duto de saída de sólidos:	0,114 m

C. Eficiências de coleta observadas:

Diâmetro da partícula (μm)Eficiência (%)1,35003,47002,140022,40002,860025,10003,500077,30004,270085,10005,000096,0000

D. Queda de Pressão: 785,00 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: óleo mineral.

F. Fonte de dados:

Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions Dirgo, J. e Leith, D. Aerosol Science and Technology 4: 401-415 (1985)

G. Observações: Design: Stairmand.

#### **ARQUIVO DO BANCO DE DADOS**

#### Número do Arquivo: 4

### A. Dados de operação:

1.	Temperatura de operação:	19,12	2 °C
2.	Densidade do sólido:	860,00	Kg/m3
3.	Densidade do gás:	1,2095	Kg/m3

- 4. Viscosidade do gás:
   5. Velocidade de entrada: 0,018093 cp
- 20,0 m/s
- B. Dados do ciclone:

1.	Diâmetro do barril:	0,305 m
2.	Diâmetro do duto de saída do gás:	0,152 m
3.	Altura do bocal de entrada:	0,152 m
4.	Largura do bocal de entrada:	0,061 m
5.	Penetração do duto de saída do gás:	0,152 m
6.	Comprimento do cilindro:	0,457 m
7.	Comprimento do ciclone:	1,22 m
8.	Diâmetro do duto de saída de sólidos:	0,114 m

#### C. Eficiências de coleta observadas:

Diâmetro da partícula (µm)	Eficiência (%)
1,3500	8,8000
2,1400	50,6700
2,8600	61,3300
3,5000	93,3300
4,2700	94,4000
5,0000	96,2000

Apêndice A - Folhas de Dados

D. Queda de Pressão: 1407,00 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: óleo mineral.

F. Fonte de dados:

Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions Dirgo, J. e Leith, D. Aerosol Science and Technology 4: 401-415 (1985)

.

G. Observações: Design: Stairmand.
#### Número do Arquivo: 5

# A. Dados de operação:

1.	Temperatura	de operação:	19,12 ℃
<u>~</u>	5 111 1	/1' 1	

- 860,00 Kg/m3 2. Densidade do sólido: 1,2095 Kg/m3
- 3. Densidade do gás: 4. Viscosidade do gás: 0,018093 cp
- 5. Velocidade de entrada:
- 25,0 m/s
- B. Dados do ciclone:

1.	Diâmetro do barril:	0,305 m
2.	Diâmetro do duto de saída do gás:	0,152 m
3.	Altura do bocal de entrada:	0,152 m
4.	Largura do bocal de entrada:	0,061 m
5.	Penetração do duto de saída do gás:	0,152 m
6.	Comprimento do cilindro:	0,457 m
7.	Comprimento do ciclone:	1,22 m
8.	Diâmetro do duto de saída de sólidos:	0,114 m

Eficiência (%)	
16,2700	
75,4700	
82,1300	
97,3300	
96,1000	

D. Queda de Pressão: 2205,00 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: óleo mineral.

F. Fonte de dados:

Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions Dirgo, J. e Leith, D. Aerosol Science and Technology 4: 401-415 (1985)

,

G. Observações: Design: Stairmand.

# Número do Arquivo: 6

# A. Dados de operação:

1.	Temperatura de operação:	20,00	)°C
2.	Densidade do sólido:	980,00	Kg/m3
3.	Densidade do gás:	1,0000	Kg/m3
4.	Viscosidade do gás:	0.0200	cn

- 4. Viscosidade do gás:0,0200 cp5. Velocidade de entrada:4,25 m/s
- B. Dados do ciclone:

1.	Diâmetro do barril:	0,0311 m
2.	Diâmetro do duto de saída do gás:	0,0080 m
3.	Altura do bocal de entrada:	0,0103 m
4.	Largura do bocal de entrada:	0,0070 m
5.	Penetração do duto de saída do gás:	0,0360 m
6.	Comprimento do cilindro:	0,0450 m
7.	Comprimento do ciclone:	0,0950 m
8.	Diâmetro do duto de saída de sólidos:	0,0150 m

Diâmetro da partícula (µm)	Eficiência (%)
3,2000	63,6000
4,3400	93,4000
4,6800	96,2000
5,2200	99,0000
5,8000	100,0000
6,1800	100,0000
6,7100	100,0000

D. Queda de Pressão: 220,00 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: dioctil ftalato (aerosol).

.

F. Fonte de dados: Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones Kim, J. C. e Lee, K. W. Aerosol Science and Technology 12: 1003-1015 (1990)

G. Observações:

Ciclone número: II-1.

 $Vazao = 0.3067 e^{-3} m^{3/s}$ .

# Número do Arquivo: 7

# A. Dados de operação:

1.	Temperatura de operação:	20,00	) °C
2.	Densidade do sólido:	980,00	Kg/m3
3.	Densidade do gás:	1,0000	Kg/m3
4.	Viscosidade do gás:	0,0200	ср

- 5. Velocidade de entrada: 4,25 m/s
- B. Dados do ciclone:

1. Diâmetro do barril:	0,0311 m
2. Diâmetro do duto de saída do gás:	0,0080 m
3. Altura do bocal de entrada:	0,0103 m
4. Largura do bocal de entrada:	0,0070 m
5. Penetração do duto de saída do gás:	0,0360 m
6. Comprimento do cilindro:	0,0450 m .
7. Comprimento do ciclone:	0,0950 m
8. Diâmetro do duto de saída de sólidos:	0,0150 m

Diâmetro da partícula (µm)	Eficiência (%)	
3,2800	70,0000	
4,0900	86,0000	
4,4000	88,0000	
5,0000	92,2000	
5,8000	95,8000	
6,3500	96,4000	
6,6000	98,6000	
7,2000	98,6000	

D. Queda de Pressão: 170,00 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: dioctil ftalato (aerosol).

F. Fonte de dados: Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones Kim, J. C. e Lee, K. W. Aerosol Science and Technology 12: 1003-1015 (1990)

G. Observações:

Ciclone número: II-2.

Vazao = 0.3067 e-3 m3/s.

# Número do Arquivo: 8

# A. Dados de operação:

1.	Temperatura de operação:	20,00	)°C
2.	Densidade do sólido:	980,00	Kg/m3
3.	Densidade do gás:	1,0000	Kg/m3
4.	Viscosidade do gás:	0,0200	ср
~	** 1 * 5 1 1 . 1	100	1

- 5. Velocidade de entrada: 4,25 m/s
- B. Dados do ciclone:

1.	Diâmetro do barril:	0,0311 m
2.	Diâmetro do duto de saída do gás:	0,0080 m
3.	Altura do bocal de entrada:	0,0103 m
4.	Largura do bocal de entrada:	0,0070 m
5.	Penetração do duto de saída do gás:	0,0360 m
6.	Comprimento do cilindro:	0,0450 m .
7.	Comprimento do ciclone:	0,0950 m
8.	Diâmetro do duto de saída de sólidos:	0,0150 m

Diâmetro da partícula (µm)	Eficiência (%)	
3,3600	0,0000	
3,8000	18,0000	
4,6000	65,6000	
5,1100	78,0000	
5,7500	90,0000	
6,2800	92,2000	
6,7600	96,0000	
7,8500	100,0000	

D. Queda de Pressão: 124,00 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: dioctil ftalato (aerosol).

F. Fonte de dados: Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones Kim, J. C. e Lee, K. W. Aerosol Science and Technology 12: 1003-1015 (1990)

G. Observações:

Ciclone número: II-3.

Vazao = 0.3067 e-3 m3/s.

# Número do Arquivo: 9

# A. Dados de operação:

1.	Temperatura	de operação:	20,00 °C

- 2. Densidade do sólido: 980,00 Kg/m3
- 3. Densidade do gás: 1,0000 Kg/m3
- 4. Viscosidade do gás: 0,0200 cp
- 5. Velocidade de entrada: 4,25 m/s
- B. Dados do ciclone:

1.	Diâmetro do barril:	0,0311 m
2.	Diâmetro do duto de saída do gás:	0,0080 m
3.	Altura do bocal de entrada:	0,0103 m
4.	Largura do bocal de entrada:	0,0070 m
5.	Penetração do duto de saída do gás:	0,0360 m
6.	Comprimento do cilindro:	0,0450 m ,
7.	Comprimento do ciclone:	0,0950 m
8.	Diâmetro do duto de saída de sólidos:	0,0150 m

Diâmetro da partícula (µm)	Eficiência (%)	
4,6600	28,0000	
5,3800	51,8000	
5,8000	72,0000	
6,2300	84,0000	
6,6000	86,6000	
7,2700	95,0000	
9,9400	100,0000	

D. Queda de Pressão: 120,00 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: dioctil ftalato (aerosol).

F. Fonte de dados: Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones Kim, J. C. e Lee, K. W. Aerosol Science and Technology 12: 1003-1015 (1990)

G. Observações:

Ciclone número: II-2.

Vazao = 0.3067 e-3 m3/s.

# Número do Arquivo: 10

# A. Dados de operação:

1.	Temperatura de operação:	20,00	) °C
2.	Densidade do sólicio:	876,00	Kg/m3
3.	Densidade do gás:	1.0000	Kg/m3

- 3. Densidade do gas:1,0000 Kg4. Viscosidade do gás:0,0200 cp
- 5. Velocidade de entrada: 22,72 m/s
- B. Dados do ciclone:

1.	Diâmetro do barril:	0,250 m
2.	Diâmetro do duto de saída do gás:	0,125 m
3.	Altura do bocal de entrada:	0,125 m
4.	Largura do bocal de entrada:	0,050 m
5.	Penetração do duto de saída do gás:	0,125 m
6.	Comprimento do cilindro:	0,375 m
7.	Comprimento do ciclone:	1,000 m
8.	Diâmetro do duto de saída de sólidos:	0,0925 m

Diâmetro da partícula (µm)	Eficiência (%)	
1,2500	5,4500	
1,9400	45,8200	
2,6900	57,4500	
3,3900	62,7300	
4,0900	85,2700	
4,8000	90,1800	
5,5100	93,8200	
6,2400	98,9100	
6,8700	98,0000	

Apêndice A - Folhas de Dados

D. Queda de Pressão: 1000,00 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: óleo mineral.

.

F. Fonte de dados:
The Logistic Function and Cyclone
Fractional Efficiency
Iozia, D. L. e Leith, D.
Aerosol Science and Technology
12: 598-606 (1990)

G. Observações:

Teste numero 3.

# Número do Arquivo: 11

# A. Dados de operação:

1.	Temperatura de operação:	20,00 °C
2.	Densidade do sólido:	980,00 Kg/m3
3.	Densidade do gás:	1,0000 Kg/m3
4.	Viscosidade do gás:	0,0200 cp
5	Volocidado do entrado:	2 97 m/c

- 5. Velocidade de entrada: 2,87 m/s
- B. Dados do ciclone:

1. Diâmetro do barril:	0,0219 m
2. Diâmetro do duto de saída do gás:	0,0080 m
3. Altura do bocal de entrada:	0,0103 m
4. Largura do bocal de entrada:	0,0070 m
5. Penetração do duto de saída do gás:	0,0360 m
6. Comprimento do cilindro:	0,0450 m
7. Comprimento do ciclone:	0,0950 m
8. Diâmetro do duto de saída de sólidos	: 0,0150 m

Diâmetro da partícula (µm)	Eficiência (%)	
3,0400	0,0000	
3,8000	12,4000	
4,3800	30,6000	
4,9200	40,0000	
5,3600	56,0000	
5,9100	82,0000	
6,5600	95,8000	
7,0800	97,6000	
7,7800	97,8000	

D. Queda de Pressão: 60,00 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: dioctil ftalato (aerosol).

F. Fonte de dados: Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones Kim, J. C. e Lee, K. W. Aerosol Science and Technology 12: 1003-1015 (1990)

G. Observações:

Ciclone número: I-1.

 $Vazao = 0.2067 e^{-3} m^{3/s}$ .

# Número do Arquivo: 12

# A. Dados de operação:

1.	Temperatura de operação:	20,00	°C
2.	Densidade do sólido:	2600,00	Kg/m3
3.	Densidade do gás:	1,0000	Kg/m3

- 4. Viscosidade do gás: 0,0200 cp
- 5. Velocidade de entrada: 15,02 m/s
- B. Dados do ciclone:

1.	Diâmetro do barril:	0,102 m
2.	Diâmetro do duto de saída do gás:	0,0508 m
3.	Altura do bocal de entrada:	0,0508 m
4.	Largura do bocal de entrada:	0,0254 m
5.	Penetração do duto de saída do gás:	0,108 m
6.	Comprimento do cilindro:	0,203 m
7.	Comprimento do ciclone:	0,406 m
8.	Diâmetro do duto de saída de sólidos:	0,0254 m

Diâmetro da partícula (µm)	Eficiência (%)	
0,1900	0,0000	
1,0900	17,9200	
1,3900	50,0000	
1,6800	90,0000	
3,7300	98,4400	
7,3100	99,1100	

Apêndice A - Folhas de Dados

D. Queda de Pressão: 933,00 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: sílica.

F. Fonte de dados: Cyclone Collection Efficiencies at Very High Temperatures Patterson, P. A., Munz, R. J. The Canadian Journal of Chemical Engineering Volume 67, Abril 1989, pag.321-328.

G. Observações:

Teste: SA-09.

Dados obtidos da figura 5, pag.323.

Concentracao de solidos: 44 g/m3.

# Número do Arquivo: 13

# A. Dados de operação:

1.	Temperatura de operação:	44,50	°C
2.	Densidade do sólido:	1500,00	Kg/m3
3.	Densidade do gás:	1,0523	Kg/m3
4.	Viscosidade do gás:	0,01928	ср

- 5. Velocidade de entrada: 8,93 m/s
- B. Dados do ciclone:

1.	Diâmetro do barril:	0,300 m	
2.	Diâmetro do duto de saída do gás:	0,150 m	
3.	Altura do bocal de entrada:	0,210 m	
4.	Largura do bocal de entrada:	0,090 m	
5.	Penetração do duto de saída do gás:	0,200 m	
6.	Comprimento do cilindro:	0,430 m	,
7.	Comprimento do ciclone:	1,550 m	
8.	Diâmetro do duto de saída de sólidos:	0,132 m	

Diâmetro da partícula	. (μm)	Eficiência	(%)
-----------------------	--------	------------	-----

0.5000	62.6836
0.9000	45.4003
1.2000	44.1515
1.4000	45.7998
1.6000	47.6973
1.9000	50.0812
2.2000	53.5363
2.6000	56.9199

Diâmetro da partícula ( $\mu$ m)

o da partícula (μm)	Eficiência (%)
3.0000	60.6919
3.4000	64.7505
4.0000	69.6825
4.6000	75.1914
5.3000	80.2747
6.2000	84.9538
7.2000	88.4266
8.3000	91.1386
9.3000	92.3393
11.1000	92.5684
12.9000	92.0519
15.0000	90.2822
17.4000	87.3798
20.1000	84.2828
23.3000	79.5042
27.0000	73.9618
31.3000	67.8923
36.3000	63.3203
42.1000	78.4131
48.8000	128.6723
56.6000	204.8584
65.5000	215.1991
76.0000	223.4829
88.1000	204.8584

D. Queda de Pressão: 274,5569 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: catalisador de FCC.

F. Fonte de dados:

Teste realizado na PETROBRÁS-SIX.

G. Observações:

Teste 5A.

#### Número do Arquivo: 14

#### A. Dados de operação:

1.	Temperatura de operação:	36,50 °C	
2.	Densidade do sólido:	1500,00 Kg/m	3
3.	Densidade do gás:	1,0774 Kg/m3	3
4.	Viscosidade do gás:	0,018902 cp	
_		· · · · · ·	

- 5. Velocidade de entrada: 6,57 m/s
- B. Dados do ciclone:

1.	Diâmetro do barril:	0,300 m
2.	Diâmetro do duto de saída do gás:	0,190 m
3.	Altura do bocal de entrada:	0,210 m
4.	Largura do bocal de entrada:	0,090 m
5.	Penetração do duto de saída do gás:	0,210 m
б.	Comprimento do cilindro:	0,160 m
7.	Comprimento do ciclone:	0,335 m
8.	Diâmetro do duto de saída de sólidos:	0,080 m

C. Eficiências de coleta observadas:

Diâmetro da partícula (µm) Eficiência (%)

٠

0.5000	89,7680
0.9000	25.5649
1.2000	19.0317
1.4000	18.6883
1.6000	18.6261
1.9000	18.9432
2.2000	20.0159
2.6000	21.9724

Diâmetro da partícula ( $\mu$ m)

ro da partícula (µm)	Eficiência (%)
3.0000	23.9818
3.4000	26.2947
4.0000	29.5590
4.6000	34.2564
5.3000	39.3891
6.2000	45.4130
7.2000	51.3984
8.3000	56.3957
9.3000	60.4659
11.1000	64.5137
12.9000	68.6729
15.0000	72.3756
17.4000	76.2371
20.1000	79.5932
23.3000	83.6475
27.0000	89.1114
31.3000	95.1850
36.3000	97.9817
42.1000	84.4758
48.8000	46.0781
56.6000	21.7850
65.5000	11.0707
76.0000	6.7054
88.1000	5.5071

D. Queda de Pressão: 88,2536 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: catalisador de FCC.

F. Fonte de dados:

Testes realizados na PETROBRÁS-SIX.

G. Observações:

Teste 15C.

# Número do Arquivo: 15

# A. Dados de operação:

1.	Temperatura de operação:	20,00	)°C
2.	Densidade do sólido:	980,00	Kg/m3
3.	Densidade do gás:	1,0000	Kg/m3
4.	Viscosidade do gás:	0,0200	ср

- 5. Velocidade de entrada: 2,87 m/s
- B. Dados do ciclone:

1. Diâmetro do barril:	0,0219 m
2. Diâmetro do duto de saída do gás:	0,0136 m
3. Altura do bocal de entrada:	0,0103 m
4. Largura do bocal de entrada:	0,0070 m
5. Penetração do duto de saída do gás:	0,0360 m
6. Comprimento do cilindro:	0,0450 m
7. Comprimento do ciclone:	0,0950 m
8. Diâmetro do duto de saída de sólidos:	0,0150 m

Diâmetro da partícula (µm)	Eficiência (%)	
6,0000	9,2500	
6,9100	47,6000	
7,2500	41,4000	
8,4000	84,0000	
9,5000	92,0000	

D. Queda de Pressão: 44,00 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: dioctil ftalato (aerosol).

F. Fonte de dados: Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones Kim, J. C. e Lee, K. W. Aerosol Science and Technology 12: 1003-1015 (1990)

G. Observações:

Ciclone número: I-3.

Vazao = 0.2067 e-3 m3/s.

# Número do Arquivo: 16

# A. Dados de operação:

1.	Temperature de operação:	20,00 °C
2.	Densidade 👍 sólido:	980,00 Kg/m3
3.	Densidade do gás:	1,0000 Kg/m3
4.	Viscosidade do gás:	0,0200 cp
5	Valagidada da antrada:	1 75 m/s

- 5. Velocidade de entrada: 4,25 m/s
- B. Dados do ciclone:

1.	Diâmetro do barril:	0,0219 m
2.	Diâmetro do duto de saída do gás:	0,0136 m
3.	Altura do bocal de entrada:	0,0103 m
4.	Largura do bocal de entrada:	0,0070 m
5.	Penetração do duto de saída do gás:	0,0360 m
6.	Comprimento do cilindro:	0,0450 m
7.	Comprimento do ciclone:	0,0950 m
8.	Diâmetro do duto de saída de sólidos:	0,0150 m

.

Diâmetro da partícula (µm)	Eficiência (%)	
4,5800	0,0000	
6,0000	37,8000	
6,9100	78,0000	
7,7300	95,0000	
8,4000	100,0000	
9,5000	100,0000	

D. Queda de Pressão: 104,00 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: dioctil ftalato (aerosol).

F. Fonte de dados: Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones Kim, J. C. e Lee, K. W. Aerosol Science and Technology 12: 1003-1015 (1990)

G. Observações:

Ciclone número: I-3.

Vazao = 0.3067 e-3 m3/s.

÷

\_\_\_\_\_

# Número do Arquivo: 17

# A. Dados de operação:

1.	Temperatura de operação:	20,00 °C
2.	Densidade do sólido:	Kg/m3
2	Densidade do aás:	1 0000 Ko/m?

- 3. Densidade do gás:1,0000 Kg/m34. Viscosidade do gás:0,0200 cp
- 5. Velocidade de entrada: ----- m/s

#### B. Dados do ciclone:

1.	Diâmetro do barril:	0,203 m
2.	Diâmetro do duto de saída do gás:	0,064 m
3.	Altura do bocal de entrada:	0,102 m
4.	Largura do bocal de entrada:	0,030 m
5.	Penetração do duto de saída do gás:	0,102 m
6.	Comprimento do cilindro:	0,330 m
7.	Comprimento do ciclone:	0,432 m
8.	Diâmetro do duto de saída de sólidos:	0,075 m

#### C. Eficiências de coleta observadas:

Diâmetro da partícula ( $\mu$ m) Eficiência (%)

\_\_\_\_\_

D. Queda de Pressão:

Queda de pressão (Pa)	
100,00	
210,00	
1310,00	

E. Material Separado da Corrente Gasosa: material não especificado.

F. Fonte de dados: A Fundamental Mathematical Modelling Approach to Cyclone Design Boysan, F., Ayers, W. H. e Swithenbank, J. Trans IChemE, Vol. 60, 1982 pag. 222-230.

G. Observações:

Dados obtidos da figura 3, pag. 226.

Assumiu-se geometria de Stairmand para se determinar o diametro da saida de solidos [Db].

# Número do Arquivo: 18

# A. Dados de operação:

1.	Temperatura	de	operação:	20,00 °	°C	
----	-------------	----	-----------	---------	----	--

- 2. Densidade do sólido: 876,00 Kg/m3
- 3. Densidade do gás: 1,0000 Kg/m3
- 4. Viscosidade do gás: 0,0200 cp
- 5. Velocidade de entrada: 7,52 m/s

## B. Dados do ciclone:

1.	Diâmetro do barril:	0,250 m
2.	Diâmetro do duto de saída do gás:	0,125 m
3.	Altura do bocal de entrada:	0,125 m
4.	Largura do bocal de entrada:	0,050 m
5.	Penetração do duto de saída do gás:	0,125 m
6.	Comprimento do cilindro:	0,375 m
7.	Comprimento do ciclone:	1,000 m
8.	Diâmetro do duto de saída de sólidos:	0,0925 m

Diâmetro da partícula (µm)	Eficiência (%)	
1,2500	6,3600	
1,9400	11,6400	
2,6900	17,4500	
3,3900	28,0000	
4,0900	42,0000	
4,8000	49,6400	
5,5100	70,0000	
6,2400	72,0000	
6,8700	80,0000	

D. Queda de Pressão: 100,00 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: óleo mineral.

F. Fonte de dados:
The Logistic Function and Cyclone
Fractional Efficiency
Iozia, D. L. e Leith, D.
Aerosol Science and Technology
12: 598-606 (1990)

G. Observações:

Teste numero 2.

Número do Arquivo: 19

#### A. Dados de operação:

1.	Temperatura	de operação:	20,00 °C
_			

- 2. Densidade do sólido: 876,00 Kg/m3
- 3. Densidade do gás: 1,0000 Kg/m3
- 4. Viscosidade do gás: 0,0200 cp
- 5. Velocidade de entrada: 15,20 m/s

#### B. Dados do ciclone:

1.	Diâmetro do barril:	0,250 m
2.	Diâmetro do duto de saída do gás:	0,125 m
3.	Altura do bocal de entrada:	0,125 m
4.	Largura do bocal de entrada:	0,050 m
5.	Penetração do duto de saída do gás:	0,125 m
6.	Comprimento do cilindro:	0,375 m
7.	Comprimento do ciclone:	1,000 m
8.	Diâmetro do duto de saída de sólidos:	0,0925 m

#### C. Eficiências de coleta observadas:

Diâmetro da partícula ( $\mu$ m) Eficiência (%) 1,2500 -2,7200 1,9400 23,8200 2,6900 23,6400 3,3900 37,0900 4.0900 72,0000 4,8000 73,6400 5,5100 75,6300 86,1800 6,2400 6,9800 91,6400

D. Queda de Pressão: 400,00 Pa

E. Material Separado da Corrente Gasosa: óleo mineral.

ł

F. Fonte de dados:
The Logistic Function and Cyclone
Fractional Efficiency
Iozia, D. L. e Leith, D.
Aerosol Science and Technology
12: 598-606 (1990)

G. Observações:

Teste numero 1.

#### **BIBLIOGRAFIA**

[1] Stevens, A."Eating an Elephant: The Project Begins"Dr. Dobb's Journal, September 1988, p. 112-119.

[2] Stevens, A.
"Screen Control, Programming as Art, and C++"
Dr. Dobb's Journal, October 1988, p. 108-115.

[3] Alexander, R. McK."Fundamentals of Cyclone Design and Operation"Proc. Australas Inst. Min. Metall. (New Series), 152-153, p.203-228, (1949).

[4] Barth, W. (1950)
Brennst. Waerme Kraft
"Design and Layout of the Cyclone Separator on the Basis of New Investigations"
8:1, citado por Dirgo et al, [10,11].

[5] Beeckmans, J. M. and Morin, B."The Effect of Particulate Solids on Pressure Drop Across a Cyclone" Powder Technology, 52 (1987), p.227-232.

[6] Boysam, F.; Ayers, W. H. and Swithenbank, J. "A Fundamental Mathematical Modelling Approach to Cyclone Design" Trans IChemE, Vol. 60, 1982, p. 222-230.

[7] Bryant, H. S.; Silverman, R. W. and Zenz, F. A. "How Dust in Gas Affects Cyclone Pressure Drop" Hydrocarbon Processing, June 1983, p.87-90.

[8] Casal, J. and Martinez-Benet, J. M."A Better Way to Calculate Cyclone Pressure Drop" Chemical Engineering, January 24, p.99-100, (1983).

[9] Dietz, P. W."Collection Efficiency of Cyclone Separators"Aiche Journal, vol.27, nº 6, p. 888-892, (1981).

[10] Dirgo, J. and Leith, D."Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions"Aerosol Science and Technology, 4:401-415 (1985).

[11] Dirgo, J. and Leith, D."Performance of Theoretically Optimised Cyclones"Filtration & Separation, March/April 1985, p.119-125.

[12] Enliang, L. and Yingmin, W. "A New Collection Theory of Cyclone Separators" Aiche Journal, vol.35, n° 4, p.666-669, (1989).

[13] First, M. W. Am. Soc. Mech. Eng. Paper No. 49-A-127, 1949, citado por Kang et al [19].

[14] First, M. W."Fundamental Factors in the Design of Cyclone Dust Collectors"Doctoral Thesis, Harvard University, May 1950, citado por Perry et al [27].

[15] Foust, A. S.; Wenzel, L. A.; Clump, C. W.; Maus, L. e Andersen, L. B.
"Princípios das Operações Unitárias"
Editora Guanabara Dois, 2a. edição, cap. 22.

[16] Iinoya Mem. Fac. Eng. Nagoya Univ., 5 (2), September 1953, citado por Perry et al [27].

 [17] Iozia, D. L. and Leith, D.
 "Effect of Cyclone Dimensions on Gas Flow Pattern and Collection Efficiency" Aerosol Science and Technology, 10: 491-500 (1989).

[18] Iozia, D. L. and Leith, D."The Logistic Function and Cyclone Fractional Efficiency" Aerosol Science and Technology, 12:598-606 (1990).

[19] Kang, S. K.; Kwon, T. W. and Kim, D. "Hydrodynamic Characteristics Of Cyclone Reactors" Powder Technology, 58 (1989), 211-220.

[20] Kim, J. C. and Lee, K. W. "Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones" Aerosol Science and Technology, 12:1003-1015 (1990).

[21] Lapple, C. E. (1950)Ind. Hyg. Q. 11:40, citado por Dirgo et al [10].

[22] Leith, D. and Licht, W."The Collection Efficiency of Cyclone Type Particle Collectors - A New Theoretical Approach" AIChE SYMPOSIUM SERIES, nº 126, vol.68, p.196-206 (1972).

[23] Mehta, Dilip Comunicação privada a Leith et al [22].

[24] Meissner, P."Zur Berechnung des Strömungsfeldes im Zyclonabscheider" (Calculation of Flow Field in a Cyclone separator)Chem.Ing.Tech., 50, No. 6, p. 471, (1978), citado por Mothes et al [25].

[25] Mothes, H. and Löffler, F. "Prediction of Particle Removal in Cyclone Separators" International Chemical Engineering, vol.28, n° 2, p.231-240 (1988).

[26] Muschelknautz, E. "Die Berechnung von Zyclonabscheidern für Gase" (Modelling of Gas Cyclone Separators) Chem.Ing.Tech., 44, No. 1 and 2, p. 63-71, (1972), citado por Mothes et al [25].

[27] Perry, R. H.; Green, D.W. and Maloney J.O.
"Perry's Chemical Engineers Handbook"
cap. 20, 6<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill Book Company.

[28] Shepherd, C. B. and Lapple, C. E."Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors"Ind. Eng. Chem., Vol. 32, (9) p.1246-1248, 1940, citado por Casal et al [8].

[29] Stairmand, C. J. "Pressure Drop in Cyclone Separators" Engineering 168:409-412 (1949).

[30] Stairmand, C. J. (1951) Trans. Inst. Chem. Eng. 29:356, citado por Kim et al [20].

[31] Swift, P. (1969)"Dust Control in Industry - 2"Steam Heat. Eng. 38:453, citado por Dirgo et al [10].

[32] Taylor, G."The Dispersion of Matter in Turbulent Flow Through a Pipe" Proc.Roy.Soc., London, Ser. A, 233, p.446-468, (1954).

[33] Vieira, V. N., Pittol, R.
"Perda de Carga em Ciclones"
Relatório de trabalho realizado na Superintendência da Industrialização do Xisto (SIX), Petrobrás, unidade de São Mateus do Sul (1992).

[34] Zenz, F. A."Cyclone Separators"Chapter 11 in "Manual on Disposal of Refinery Wastes: Volume on Atmosferic Emissions", API Publication 931, American Petroleum Institute, Washington, DC. 1975.

[35] Patterson, P. A and Münz, R. J."Cyclone Collection Efficiencies at Very High Temperatures"The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 67, april 1989, p. 321-328.

[36] Stragevitch, L.Programas desenvolvidos para atividades de ensino (1993/1994).Departamento de Processos Químicos, FEQ, UNICAMP.

#### ABSTRACT

The goal of this work was to develop a software which calculates the collection efficiency and pressure drop observed in a cyclone under known operational conditions. The creation of this software was solicited by the São Mateus do Sul (PR) unit of PETROBRÁS-SIX, due to its interest in having this kind of tool for the cyclone design and/or simulation.

The software has eight different methods for the prediction of efficiency, and seven methods oriented for pressure drop calculations. All of them are empiric or semi-empiric.

In order to evaluate the accuracy achieved by each method, a data bank containing 108 files with experimental results was constructed: 80 files were obtained from the literature and the other 28 files were generated by a set of tests carried out in a test system at PETROBRÁS-SIX.

These data were used to analyse the performance of each method present in the developed software.