

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE COLETA E QUEDA DE PRESSÃO PARA
CICLONES A GÁS ALIMENTADOS COM FINOS DE XISTO**

Laercio Mantovani Frare

Eng^o Químico, UEM, 1996

Orientador: Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira

Co-orientador: Prof. Marcelino Luiz Gimenes, Ph.D

Dissertação de Mestrado submetida à
Universidade Estadual de Maringá, como
parte dos requisitos necessários à
obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Química, área de
Desenvolvimento de Processos.

Maringá – PR - Brasil

Setembro de 1999

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Esta é a versão final da Dissertação de Mestrado apresentada por Laercio Mantovani Frare perante a Comissão Julgadora do Curso de Mestrado em Engenharia Química em 10 de Setembro de 1999.

COMISSÃO JULGADORA



Prof. Nehemias Curvelo Pereira, D.Sc.

Orientador



Prof. Marcelino Luiz Gimenes, Ph.D.

Co-orientador



Prof. José Renato Coury, Ph.D.

Membro



Prof.ª Elisabete Scolin Mendes, Dr. Eng.

Membro

FRARE, LAERCIO MANTOVANI

Estudo da Eficiência de Coleta e Queda de
Pressão Para Ciclones a Gás Alimentados
com Finos de Xisto.

[Paraná] 1999, XXIII, 150 p. 29,7 cm (PEQ/UEM,
M.Sc., Engenharia Química, 1999)

Dissertação – Universidade Estadual de Maringá - PEQ

1. Ciclones
2. Eficiência de Coleta
3. Queda de Pressão
4. Xisto

I. PEQ/UEM II. Título (série)

**A Deus e a minha
esposa Marcia.**

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Dr. Nehemias Curvelo Pereira, pela paciência, amizade, conselhos tão importantes, orientações e incentivos que contribuíram para a melhoria do meu conhecimento profissional e pessoal.

Ao professor Dr. Marcelino Luiz Gimenes, pela amizade, conselhos e orientações no decorrer deste trabalho.

À Professora Dr^a. Elisabete Scolin Mendes, pela amizade, apoio e incentivo durante todo o período de convívio.

Ao Eng^o Pedro Rebola, pelo incentivo, amizade e colaboração no andamento deste trabalho.

Aos amigos Fernando F. Queiroz, Donizete A. Frota e Sebastião P. Guerra pela amizade e colaboração na montagem e manutenção dos equipamentos.

Aos companheiros de laboratório: Marco e Marlon, os quais fizeram do ambiente de trabalho um local amigável e harmonioso.

A Rodrigo E. A. Costa, aluno de iniciação científica, pelo auxílio em algumas corridas experimentais.

À Petrosix, pelo fornecimento da matéria-prima indispensável para o desenvolvimento do trabalho.

Aos funcionários do DEQ/PEQ, que sempre estiveram presentes durante todo nosso convívio, em especial aos amigos Milton, Solange, Edival, Claudemir, Orivaldo, Marilza e Sueleni.

À todos aqueles que não tenham sido mencionados, o meu muito obrigado.

À CAPES, pelo suporte financeiro, sem o qual este trabalho não poderia ter sido efetivado.

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE COLETA E QUEDA DE PRESSÃO PARA CICLONES A GÁS ALIMENTADOS COM FINOS DE XISTO

AUTOR: LAERCIO MANTOVANI FRARE

ORIENTADOR: PROF. NEHEMIAS CURVELO PEREIRA, D.Sc.

CO-ORIENTADOR: PROF. MARCELINO LUIZ GIMENES, Ph.D.

Dissertação de Mestrado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química; Universidade Estadual de Maringá; Av. Colombo, 5790, BL E-46 – 09; CEP 87020-900 – Maringá – PR, Brasil, defendida em 10 de Setembro de 1999. 148 p.

RESUMO

Neste trabalho foram estudadas a eficiência mássica de coleta e queda de pressão do ciclone para várias concentrações de sólidos e diferentes velocidades na alimentação.

Foi construído um equipamento em escala de bancada onde foram realizados os ensaios experimentais. Tal equipamento era composto de um ciclone, um soprador, um alimentador de partículas, um coletor e por dispositivos de medida de pressão. Os ciclones utilizados foram os da configuração Lapple e Stairmand, sendo esse último na configuração de alta eficiência. Ambos possuíam um diâmetro da parte cilíndrica igual a 20,6 cm.

As corridas experimentais foram realizadas com partículas de **xisto**, fornecidas pela PETROSIX/PETROBRAS, com uma massa específica de $2,0371 \text{ g/cm}^3$ e um diâmetro de peneira menor do que $74 \mu\text{m}$. A faixa de trabalho para a concentração de sólidos na alimentação ficou compreendida desde valores próximos a 0,001 até 0,025 kg/m^3 e entre 12 e 17,4 m/s para a velocidade de alimentação.

Os resultados experimentais indicaram que a eficiência mássica de coleta não sofre influência significativa, para ambos os ciclones, nem da concentração e nem da velocidade de alimentação dentro da faixa de condições estudadas.

Os resultados obtidos de queda de pressão, para o escoamento do ar sem partículas, de ambos os ciclones foram bem representados pelos modelos de estimativa de: CASAL e MARTÍNEZ-BENET, (1983), e CREMASCO e NEBRA, (1992).

Os resultados mostraram que, mesmo para pequenas concentrações de partículas na alimentação, a queda de pressão foi inferior quando comparada com o ar escoando sem particulados. A queda de pressão diminuiu com o aumento da concentração de sólidos na alimentação em toda a faixa estudada e os modelos de previsão da queda de pressão com a alimentação foram apenas satisfatórios.

Constatou-se também que a presença de um sistema coletor de partículas diminuiu a queda de pressão dos ciclones.

STUDY OF COLLECTION EFFICIENCY AND PRESSURE DROP FOR GAS CYCLONES LOADING WITH SMALL OIL SHALE PARTICLES

AUTHOR: LAERCIO MANTOVANI FRARE

SUPERVISOR: PROF. NEHEMIAS CURVELO PEREIRA, D.Sc.

CO-SUPERVISOR: PROF. MARCELINO LUIZ GIMENES, Ph.D.

Master Thesis; Chemical Engineering Graduate Program; State University of Maringá, Av. Colombo, 5790, BL E-46 – 09; CEP 87020-900 – Maringá – PR, Brazil, presented on 10th September 1999. 148 p.

ABSTRACT

The effect of solids loading and feed velocities on the pressure drop and overall collection efficiency of cyclone were studied.

To carry out the present work, it was built an small scale equipment composed by a cyclone, a fan, a feeding system, a dust hopper and pressure measuring. Two cyclones were used: a high efficiency Stairmand prototype and Lapple type. Both having an internal cylinder diameter of 20,6 cm.

Experiments were carried out using **oil shale** particles, from PETROSIX/PETROBRAS, with density 2,0371 g/cm³ and diameter less then 74 μm. The solid's loading ranged from 0,001 to 0,025 kg/m³ and gas velocities between 12 and 17,4 m/s.

The experiments results have shown the overall collection efficiency in both cyclones types to be independent of solid's loading and gas velocities, under the conditions studied.

The pressure drop experimental results obtained, without presence of particles, were best fitted with models proposed by : CASAL and MARTÍNEZ-BENET, (1983), and CREMASCO and NEBRA, (1992).

Results have demonstrated that, even for low particle concentration in the feed, the pressure drop was lower than that caused by air (gas phase) in absence of particles. It was observed a decrease in the pressure drop with the increase of solids loading in the range of conditions studied. A satisfactory fitting of pressure drop results was obtained with models including presence of particles in the gas phase.

The results have also demonstrated that the inclusion of dust collection system (dust hopper) decreases the gas pressure drop in the cyclone.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 – O Xisto	3
2.1.1 – O Processo Petrosix.....	3
2.2 – O Ciclone	6
2.2.1 – Características de Operação e Aplicabilidade	10
2.3 – Eficiência de Coleta.....	12
2.3.1 – Efeito da Concentração de Alimentação na Eficiência de Coleta.....	14
2.4 – Modelos Matemáticos Para a Predição da Eficiência de Coleta	19
2.4.1 – Modelo de LAPPLE.....	20
2.4.2 – Modelo de LEITH e LICHT	22
2.4.3 – Modelo de DIETZ.....	31
2.4.4 – Modelo de MOTHES e LÖFFLER.....	36
2.4.5 – Modelo de LI e WANG.....	46
2.5 - Definição e Cálculo da Queda de Pressão	49
2.5.1 – Equações Para o Cálculo de NH.....	51
2.5.2 – Equação de Cremasco e Nebra Para a Predição da Queda de Pressão.	53
2.5.3 – Efeito da Concentração de Alimentação na Queda de Pressão	56
2.5.4 – Efeito de um Cilindro Coletor Sobre a Queda de Pressão de Ciclones	60
2.6 – Estatística para Experimentos	61
2.6.1 – Estimativa da Variância	62
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1 – Material Particulado.....	64
3.2 – Métodos de Caracterização da Matéria-Prima.....	64
3.2.1 – Análise Granulométrica	64
3.2.2 – Modelos de Distribuição	67
3.2.3 – Densidade da Partícula	69
3.3 – Sistema Experimental.....	70
3.3.1 – Os Ciclones Utilizados.....	70
3.3.2 – Alimentador de Finos.....	73
3.3.3 – Tubo de Pitot.....	73
3.3.4 – Alimentação de Ar.....	75
3.3.5 – Manômetro Inclinado.....	75

3.4 – Metodologia Experimental	77
3.4.1 – <i>Velocidade de Alimentação de Ar</i>	77
3.4.2 – <i>Determinação da Queda de Pressão dos Ciclones</i>	78
3.4.3 – <i>Efeito do Coletor de Acrílico na Queda de Pressão</i>	80
3.4.4 – <i>Determinação da Eficiência Mássica dos Ciclones</i>	80
3.5 - Metodologia de Cálculo	80
3.5.1 – <i>Eficiência Mássica de Coleta e Concentração Volumétrica</i>	80
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	82
4.1 – Análise Granulométrica	82
4.2 – Queda de Pressão no ciclone Lapple	86
4.3 – Queda de Pressão no ciclone Stairmand.....	90
4.4 – Influência do coletor sobre a queda de pressão do ciclone Lapple	94
4.5 – Influência do coletor sobre a queda de pressão do ciclone Stairmand.....	96
4.6 – Influência da concentração de sólidos e velocidade de alimentação sobre a queda de pressão do ciclone Lapple	98
4.7 – Influência da concentração de sólidos e velocidade de alimentação sobre a queda de pressão do ciclone Stairmand.....	103
4.8 – Influência da concentração de sólidos e velocidade de alimentação sobre a eficiência mássica do ciclone Lapple.....	108
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	115
5.1 – Conclusões.....	115
5.2 – Sugestões	116
CAPÍTULO 6 – BIBLIOGRAFIA	117
CAPÍTULO 7 – APÊNDICES	121
APÊNDICE A.....	122
APÊNDICE B.....	124
APÊNDICE C	127
APÊNDICE D	130
APÊNDICE E.....	133
APÊNDICE F.....	135

APÊNDICE G	137
APÊNDICE H	141
APÊNDICE I	143
APÊNDICE J	145
APÊNDICE K.....	148
APÊNDICE L	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma do processo Petrosix.....	4
Figura 2.2 – Ilustração de um ciclone com entrada tangencial.....	7
Figura 2.3 – Diversificação das entradas de gás sujo para ciclones: (a) entrada em voluta; (b) e (c) entradas tangenciais; (d) e (e) entradas axiais. (BATEL, 1976)	7
Figura 2.4 – Movimento de uma partícula e do gás no interior de um ciclone	9
Figura 2.5 – Ciclone atuando como separador após um Spray dryer (BATEL, 1976)	11
Figura 2.6 – Exemplo de uma curva de eficiência de coleta granulométrica (DIETZ, 1981).....	13
Figura 2.7 – Eficiência de coleta experimental em função da concentração de alimentação para o ciclone de geometria I (HOFFMANN <i>et al.</i> , 1991).	16
Figura 2.8 – Eficiência de coleta experimental em função da concentração de alimentação para o ciclone de geometria II (HOFFMANN <i>et al.</i> , 1991).	17
Figura 2.9 – Eficiência mássica em função da concentração de alimentação para diferentes geometrias de ciclones (HOFFMANN <i>et al.</i> , 1992).	17
Figura 2.10 – Influência da concentração de sólidos sobre a eficiência de coleta para a alumina (SCHEID, 1992).....	18
Figura 2.11 – Influência da concentração de sólidos sobre a eficiência de coleta para o carvão (SCHEID, 1992).....	19
Figura 2.12 – Curva de eficiência obtida por LAPPLE (LAPPLE, 1951).....	21
Figura 2.13 – Seção transversal de um ciclone (LEITH e LICHT, 1972)	28
Figura 2.14 – Geometria de um ciclone de fluxo reverso (DIETZ, 1981).....	32
Figura 2.15 – Modificação da geometria de um ciclone para análise (DIETZ, 1981).....	32
Figura 2.16 – Geometria modificada de um ciclone para análise (MOTHES e LÖFFLER, 1988).....	38
Figura 2.17 – Figura para a dedução do valor de h_z	39
Figura 2.18 – Geometria do ciclone modificado por LI e WANG (LI e WANG, 1989)	47
Figura 2.19 – Efeito da concentração de sólidos na queda de pressão, YUU <i>et al.</i> , 1978.	57
Figura 2.20 – Modelo de escoamento de partículas no interior de um ciclone (YUU <i>et al.</i> , 1978).....	57
Figura 2.21 – Efeito da concentração de sólidos na velocidade tangencial (YUU <i>et al.</i> , 1978).....	58
Figura 2.22 – Medidas de queda de pressão em função da concentração de alimentação (HOFFMANN <i>et al.</i> , 1991).....	59

Figura 3.1 – Tipos de Pipeta de Andreasen.....	66
Figura 3.2 – Sistema Experimental.....	71
Figura 3.3 – Ilustração do tubo de Pitot	74
Figura 3.4 – Curva de Calibração do tubo de Pitot.	75
Figura 3.5 – Manômetro inclinado com reservatório.	76
Figura 4.1 – Distribuição acumulativa de xisto em função do diâmetro médio das peneiras.....	83
Figura 4.2 – Distribuição granulométrica de finos de xisto.	85
Figura 4.3 – Queda de pressão do ciclone Lapple em função da velocidade de alimentação.....	87
Figura 4.4 – Comparação entre os resultados experimentais e os modelos de CASAL e MARTÍNEZ-BENET (1983) e de STAIRMAND (DIRGO e LEITH, 1985).	88
Figura 4.5 – Comparação entre os resultados experimentais e os modelos de: SHEPHERD e LAPPLE (1939), FIRST (DIRGO e LEITH, 1986), MAROULIS e CREMALIS (1995), CONSTANTINESCU (1984) e BARTH (DIRGO e LEITH, 1985).	89
Figura 4.6 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo de CREMASCO e NEBRA, (1992) (fator de atrito=0,0121).	89
Figura 4.7 – Queda de pressão do ciclone Stairmand em função da velocidade de alimentação.....	90
Figura 4.8 – Comparação entre os pontos experimentais e os modelos de: FIRST (DIRGO e LEITH, 1986), SHEPHERD e LAPPLE (1939), STAIRMAND (DIRGO e LEITH, 1985), BARTH (DIRGO e LEITH, 1985) e CONSTANTINESCU (1984).	92
Figura 4.9 - Comparação entre os resultados experimentais e os modelos de CASAL e MARTÍNEZ-BENET (1983) e de MAROULIS E CREMALIS (1995).....	92
Figura 4.10 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo de CREMASCO e NEBRA, (1992), (fator de atrito=0,0121).	93
Figura 4.11 – Diagrama para interpretação dos resultados da Tabela 4.8.....	95
Figura 4.12 – Diagrama para interpretação dos resultados da Tabela 4.10.	97
Figura 4.13 – Diagrama para interpretação dos resultados da Tabela 4.13.	99
Figura 4.14 – Efeito da concentração na queda de pressão para $V_i = 12,73$ m/s.	100
Figura 4.15 – Efeito da concentração na queda de pressão para $V_i = 14,80$ m/s.	101
Figura 4.16 – Efeito da concentração na queda de pressão para $V_i = 16,86$ m/s.	101
Figura 4.17 – Influência da concentração de alimentação na queda de pressão	102
Figura 4.18 – Comparação entre os pontos experimentais normalizados e as curvas de ajuste dos modelos de SCHEID (1992) e de HOFFMANN <i>et al.</i> (1992) para o ciclone Lapple.....	103

Figura 4.19 – Diagrama para interpretação dos resultados da Tabela 4.16.	105
Figura 4.20 – Efeito da concentração de alimentação sobre a queda de pressão do ciclone Stairmand a 12,75 m/s.	106
Figura 4.21 – Efeito da concentração de alimentação sobre a queda de pressão do ciclone Stairmand a 14,84 m/s.	106
Figura 4.22 – Efeito da concentração de alimentação sobre a queda de pressão do ciclone Stairmand a 17,39 m/s.	107
Figura 4.23 – Efeito da concentração de alimentação sobre a queda de pressão do ciclone Stairmand a diferentes velocidades.	107
Figura 4.24 – Comparação entre os pontos experimentais normalizados e as curvas de ajuste dos modelos de SCHEID (1992) e de HOFFMANN <i>et al.</i> (1992) para o ciclone Stairmand.	108
Figura 4.25 – Interpretação geométrica dos efeitos sobre a eficiência mássica do ciclone Lapple.	110
Figura 4.26 – Influência da concentração e velocidade de alimentação na eficiência mássica de coleta do ciclone Lapple.	111
Figura 4.27 – Interpretação geométrica dos efeitos sobre a eficiência mássica de coleta do ciclone Stairmand.	113
Figura 4.28 – Influência da concentração e velocidade de alimentação na eficiência mássica de coleta do ciclone Stairmand.	114
Figura G.1 – Curva de ajuste do modelo de HOFFMANN <i>et al.</i> , (1992).	139
Figura G.2 – Curva de ajuste do modelo de SCHEID, (1992).	140
Figura J.1 – Curva de ajuste do modelo de HOFFMANN <i>et al.</i> , (1992).	146
Figura J.2 – Curva de ajuste do modelo de SCHEID, (1992).	147

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Configurações geométricas para diferentes modelos de ciclones de acordo com as dimensões da Figura 2.1.	8
Tabela 2.2 - Dimensões dos ciclones utilizado por HOFFMANN <i>et al.</i> , (1991).....	15
Tabela 2.3 – Efeitos de algumas dimensões geométricas dos ciclones que atuam sobre a queda de pressão	50
Tabela 2.4 - Dimensões do ciclone utilizado por YUU <i>et al.</i> , (1978), (D=0,296 m).....	56
Tabela 3.1 – Modelos de distribuição granulométrica	68
Tabela 3.2 - Valores das constantes da equação (175).....	69
Tabela 3.3 - Dimensões dos ciclones Lapple e Stairmand construídos.	72
Tabela 3.4 - Comparação entre as relações geométricas do ciclone Lapple construído e as relações geométricas publicadas por ARAUJO e MASSARANI (1987).	72
Tabela 3.5 – Comparação entre as relações geométricas do ciclone Stairmand construído e as relações geométricas publicadas por ARAUJO e MASSARANI (1987).	73
Tabela 4.1 – Distribuição acumulativa por peneiramento.....	83
Tabela 4.2 – Análise granulométrica por pipeta de Andreasen	84
Tabela 4.3 - Parâmetros do modelo GGS para o xisto peneirado.....	85
Tabela 4.4 - Parâmetros do modelo RRB.	86
Tabela 4.5 – Densidade absoluta do material de testes.....	86
Tabela 4.6 – Valores de NH para o ciclone Lapple.	88
Tabela 4.7 – Valores de NH para o ciclone Stairmand.....	91
Tabela 4.8 – Resultados do planejamento de experimentos para o ciclone Lapple	94
Tabela 4.9 – Efeitos calculados para o planejamento da Tabela 4.8	95
Tabela 4.10 – Resultados do planejamento de experimentos para o ciclone Stairmand..	96
Tabela 4.11 – Efeitos calculados para o planejamento da Tabela 4.10	96
Tabela 4.12 – Níveis dos fatores	98
Tabela 4.13 – Resultados obtidos de queda de pressão em função da concentração de alimentação.....	98
Tabela 4.14 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial do ciclone Lapple.	99
Tabela 4.15 – Níveis dos fatores	104
Tabela 4.16 – Resultados obtidos de queda de pressão em função da concentração de alimentação.....	104
Tabela 4.17 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial do ciclone Stairmand. ...	104
Tabela 4.18 – Níveis dos fatores	109

Tabela 4.19 – Resultados do planejamento de experimentos para a eficiência mássica de coleta do ciclone Lapple.....	109
Tabela 4.20 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial do ciclone Lapple.	109
Tabela 4.21 – Níveis dos fatores	112
Tabela 4.22 – Resultados do planejamento de experimentos para a eficiência mássica de coleta do ciclone Stairmand.	112
Tabela 4.23 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial do ciclone Stairmand. ...	112
Tabela B.1 – Resultados experimentais de queda de pressão em função da velocidade de alimentação para o ciclone Lapple	124
Tabela B.2 – Comparação entre a ΔP experimental e a ΔP calculada pelo modelo de SHEPHERD e LAPPLE.....	124
Tabela B.3 – Comparação entre a ΔP experimental e a ΔP calculada pelo modelo de CASAL e MARTÍNEZ-BENNET.....	124
Tabela B.4 – Comparação entre a ΔP experimental e a ΔP calculada pelo modelo de STAIRMAND.....	125
Tabela B.5 – Comparação entre a ΔP experimental e a ΔP calculada pelo modelo de FIRST	125
Tabela B.6 – Comparação entre a ΔP experimental e a ΔP calculada pelo modelo de MAROULIS E CREMALIS.....	125
Tabela B.7 – Comparação entre a ΔP experimental e a ΔP calculada pelo modelo de CONSTANTINESCUS	126
Tabela B.8 – Comparação entre a ΔP experimental e a ΔP calculada pelo modelo de BARTH.....	126
Tabela B.9 – Comparação entre a ΔP experimental e a ΔP calculada pelo modelo de CREMASCO e NEBRA.	126
Tabela C.1 – Resultados experimentais de queda de pressão em função da velocidade de alimentação para o ciclone Stairmand.....	127
Tabela C.2 – Comparação entre a ΔP experimental e a ΔP calculada pelo modelo de SHEPHERD e LAPPLE.....	127
Tabela C.3 – Comparação entre a ΔP experimental e a ΔP calculada pelo modelo de CASAL e MARTÍNEZ-BENNET.....	127
Tabela C.4 – Comparação entre a ΔP experimental e a ΔP calculada pelo modelo de STAIRMAND.....	128
Tabela C.5 – Comparação entre a ΔP experimental e a ΔP calculada pelo modelo de FIRST	128

Tabela C.6– Comparação entre a ΔP experimental e a ΔP calculada pelo modelo de MAROULIS E CREMALIS.....	128
Tabela C.7 – Comparação entre a ΔP experimental e a ΔP calculada pelo modelo de CONSTANTINESCUS	129
Tabela C.8 – Comparação entre a ΔP experimental e a ΔP calculada pelo modelo de BARTH.....	129
Tabela C.9 – Comparação entre a ΔP experimental e a ΔP calculada pelo modelo de CREMASCO e NEBRA	129
Tabela D.1 – Níveis dos fatores.....	130
Tabela D.2 – Resultados do planejamento de experimentos para o ciclone Lapple.....	130
Tabela D.3 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial.....	131
Tabela E.1 – Níveis dos fatores.....	133
Tabela E.2 – Resultados do planejamento de experimentos para o ciclone Stairmand .	133
Tabela E.3 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial.....	134
Tabela F.1 – Queda de pressão do Lapple em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação de 12,73 m/s.	135
Tabela F.2 – Queda de pressão do Lapple em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação de 14,80 m/s.	135
Tabela F.3 – Queda de pressão do Lapple em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação de 16,86 m/s.	136
Tabela G.1 – Dados normalizados de queda de pressão Para o ciclone Lapple.....	137
Tabela H.1 – Resultados obtidos do planejamento fatorial	141
Tabela H.2– Efeitos calculados para o planejamento fatorial do ciclone Stairmand.....	141
Tabela I.1 – Queda de pressão do Stairmand em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 12,75 m/s.	143
Tabela I.2 – Queda de pressão do Stairmand em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 14,84 m/s.	143
Tabela I.3 – Queda de pressão do ciclone Stairmand em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 17,39 m/s.	144
Tabela J.1 – Dados normalizados de queda de pressão para o ciclone Stairmand	145
Tabela K.1 – Eficiência mássica de coleta do ciclone Lapple em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 12,72 m/s.	148
Tabela K.2 – Eficiência mássica de coleta do ciclone Lapple em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 14,78 m/s.	148
Tabela K.3 – Eficiência mássica de coleta do ciclone Lapple em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 16,86 m/s.	148

Tabela L.1 – Eficiência mássica de coleta do ciclone Stairmand em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 12,75 m/s.	149
Tabela L.2 – Eficiência mássica de coleta do ciclone Stairmand em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 14,84 m/s.	149
Tabela L.3 – Eficiência mássica de coleta do ciclone Stairmand em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 17,39 m/s.	150

NOMENCLATURA

a	Altura da entrada tangencial do ciclone	L
a_p	Aceleração de uma partícula	L/t^2
A_1	Parâmetro do modelo de Mothes e Löffler	-
b	Largura da entrada tangencial do ciclone	L
B	Diâmetro da saída do pó pela parte inferior	L
B_1	Parâmetro do modelo de Mothes e Löffler	-
$c(0)$	Concentração inicial da suspensão	M/L^3
$c(t)$	Concentração de uma amostra retirada da suspensão num tempo t	M/L^3
c_i	Concentração numa determinada região i (Mothes e Löffler)	
C	Concentração de alimentação	M/L^3
C_1	Parâmetro do modelo de Mothes e Löffler	-
$d_{\#}$	Diâmetro de peneira	L
$\bar{d}_{\#}$	Diâmetro médio de Sauter	L
d_{st}	Diâmetro de Stokes	L
D	Diâmetro da parte cilíndrica do ciclone	L
D_a	Momento angular	-
D_1	Parâmetro do modelo de Mothes e Löffler	-
D_e	Diâmetro do tubo de saída do gás limpo do ciclone	L
d_p	Diâmetro de uma partícula sólida	L
D_p	Coeficiente de difusão	L^2/t
dpc	diâmetro de partículas que o ciclone coleta com uma eficiência de 50%.	L
D_r	Coeficiente de difusão turbulenta	L^2/t
E_c	Potência de um soprador	$M.L^2/t^3$
E_f	Eficiência de um soprador	-
f	Fator de atrito de Li e Wang, igual a 0,02	-
F_i	Fluxo de partículas da região i	$M/(t.L^2)$
F_v	Fluxo de partículas que se dirige à parede do modelo de Dietz	$M/(t.L^2)$
F_w	Fluxo de partículas da região 2 para a região 3 do modelo de Dietz	$M/(t.L^2)$
$fa(d_p)$	Fração mássica de partículas alimentadas com um diâmetro d_p	-
$fc(d_p)$	Fração mássica de partículas coletadas com um certo diâmetro d_p	-
g	Aceleração gravitacional	L/t^2

h	Altura da parte cilíndrica do ciclone	L
h_p	Altura da suspensão	L
H	Altura do ciclone (altura da parte cilíndrica mais da parte cônica)	L
K	Parâmetro adimensional	-
k_1	Parâmetro variável com a geometria do ciclone	-
k_2	Parâmetro variável com a geometria do ciclone	-
M	Massa total da amostra contida no conjunto de peneiras	M
m_1, m_2	Parâmetros do modelo de Mothes e Löffler	-
\bullet	Taxa mássica de partículas arrastadas	M/t
m_w		
mc	Massa de sólidos coletados pelo ciclone	M
ma	Massa de sólidos alimentado ao ciclone	M
m_i	Massa da amostra de particulado retido na peneira i	M
m_p	Massa de uma partícula	M
n_0	Concentração de partículas na entrada do ciclone no modelo de Mothes e Löffler	M/L^3
$n_1, n_2,$	Concentração de partículas nas regiões 1, 2 e 3 do modelo de Dietz	M/L^3
n_3		
Ne	Número de voltas que o gás executa no interior do ciclone	-
N_H	Número adimensional	-
Q	Vazão de gás	L^3/t
Q_1	Vazão de gás na região 1 do modelo de Dietz	L^3
Q_z	Vazão de gás na direção axial	L^3
r	Coordenada radial	-
R1, R2	Parâmetros do modelo de Mothes e Löffler	-
R^*	Parâmetro igual a $(D-De)/2$	L
R_p	Raio de uma partícula	L
R_t	Raio do tubo de saída do gás = $De/2$	L
R_v	Raio do vórtice ascendente do gás, igual a R_t	L
R_w	Raio do ciclone = $D/2$	L
R_w^*	Raio do ciclone cilíndrico de Mothes e Löffler	L
R_x	Raio da saída de pó = $B/2$	L
S	Comprimento do tubo de saída do gás no interior do ciclone	L
t	Tempo	t
t_p	Tempo da amostragem na Pipeta de Andreasen	t
t_{min}	Tempo mínimo	t
t_{max}	Tempo máximo	t

t_{res}	Tempo de residência médio	t
T	Temperatura	T
U_d	Velocidade axial média	L/t
U_{pw}	Velocidade radial da partícula próxima à parede do ciclone	L/t
U_t	Velocidade tangencial	L/t
U_{tv}	Velocidade tangencial no vórtice	L/t
U_{tw}	Velocidade tangencial na parede do ciclone	L/t
U_{tw}^*	Parâmetro do modelo de Mothes e Löffler, eq. 76	-
U_r	Velocidade radial	L/t
U_{rp}	Velocidade radial da partícula	L/t
U_z	Velocidade axial	L/t
v_p	Volume de uma partícula esférica	L ³
V_k	Volume de um ciclone do modelo de Mothes e Löffler	L ³
V_H	Volume de um ciclone abaixo do tubo de saída	L ³
V_i	Velocidade de alimentação	L/t
V_{nl}	Volume de um ciclone calculado com o comprimento natural	L ³
V_s	Volume da região anular entre o tubo de saída do gás e o cilindro do ciclone à altura de $a/2$.	L ³
V_t	Velocidade terminal de sedimentação de partículas n	L/t
X	Fração em massa acumulativa de partículas de diâmetro menor que d_p	-
w_t	Velocidade terminal da partícula	L/t
z	Coordenada axial	-

SÍMBOLOS GREGOS

α_H	Parâmetro da equação (160)	-
β_H	Parâmetro da equação (160)	-
α_S	Parâmetro da equação (161)	-
β_S	Parâmetro da equação (161)	-
ℓ	Comprimento característico	L
ξ	Fator de atrito para o modelo de Mothes e Löffler	-
ε	Coeficiente de reentrada (modelo de Li e Wang)	-
$\rho_{\text{água}}$	Densidade da água	M/L ³
ρ_{ar}	Densidade do ar	M/L ³

ρ_g	Densidade do gás	M/L^3
ρ_l	Densidade do líquido	M/L^3
ρ_p	Densidade do sólido	M/L^3
ΔP	Queda de pressão	$M/(L.t^2)$
ΔX	Fração mássica	-
μ_g	Viscosidade dinâmica do gás	$M/(L.t)$
μ_l	Viscosidade dinâmica do líquido	$M/(L.t)$
η_0	Eficiência com baixa concentração de alimentação	-
η	Eficiência mássica	-
$\eta(d_p)$	Eficiência granulométrica	-
θ	Ângulo de saída do gás	rad
ϕ	Ângulo do cone do cilindro	rad

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O ciclone vem sendo usado amplamente nas indústrias químicas como um equipamento eficiente para a remoção de partículas sólidas de correntes gasosas. Esse uso decorre principalmente devido a sua simplicidade de construção, operação e manutenção.

O principal parâmetro para a medida do desempenho de um ciclone é a eficiência de coleta, ou seja, a capacidade de retirar a maior quantidade possível das partículas sólidas que alimentam o aparelho. Para isso, pode-se alterar as condições de operação, tais como a velocidade e a concentração de partículas na alimentação. Ao se alterar essas condições para alcançar um desempenho melhor do ciclone, afeta-se outra variável importante no projeto de ciclones, a queda de pressão, a qual influi diretamente nos custos operacionais.

Entretanto, constata-se que essas alterações nem sempre conduzem aos resultados esperados para um determinado tipo de partícula. Levando em consideração esse argumento, uma revisão bibliográfica comprovou que nem todos os autores concordam que um aumento na concentração de alimentação conduz a um incremento na eficiência de coleta, embora todos concordem que o aumento da velocidade de alimentação leva a um aumento da eficiência de coleta, exceto para velocidades muito altas. Para a queda de pressão parece existir uma maior concordância nos resultados, tanto para os ciclones operando com e sem a presença de particulados.

A literatura apresenta vários modelos que são capazes de predizer, de acordo com algumas simplificações e com certa margem de confiança, o valor desses parâmetros de desempenho dos ciclones de acordo com as condições de operação, das dimensões geométricas e das propriedades físicas do sistema, tais como a densidade da partícula, densidade do gás, temperatura, viscosidade do gás. Entre esses modelos, tem-se os para a predição da eficiência de coleta e para a predição da queda de pressão dos ciclones. Os modelos de eficiência de coleta, estimam a eficiência granulométrica, ou seja, a eficiência de coleta para o ciclone, de acordo com o diâmetro de cada partícula

alimentada. Entre os modelos de estimativa de queda de pressão, existem os que calculam a queda de pressão do gás com e sem a presença de particulados. Dessa forma esses modelos usados conjuntamente, desde que corretamente utilizados, auxiliam no dimensionamento de novas unidades industriais.

Tendo isso em mente, a motivação para o desenvolvimento deste trabalho foi a pesquisa das respostas fornecidas por um ciclone quanto a eficiência de coleta e queda de pressão, quando submete-se um sistema, a diferentes velocidades e concentrações de alimentação, para partículas diferentes daquelas encontradas na literatura, bem como a escolha de modelos que possam representar o sistema experimental dentro de um intervalo operacional.

Para tanto foi construído um sistema experimental em escala de bancada composto de um soprador, um alimentador de finos, e dois ciclones nas configurações mais utilizadas: a de Lapple e a de Stairmand de alta eficiência, ambos com um diâmetro interno de cilindro igual a 20,60 cm para estudar o desempenho de ciclones quando alimentados com finos de **xisto**. A escolha desse material particulado se deve ao fato de ter um grande potencial que é explorado pela Superintendência de Industrialização do Xisto, localizada em São Mateus do Sul, PR.

A escolha dos caminhos a serem seguidos durante o levantamento dos dados experimentais foi feita utilizando o planejamento de experimentos para a definição dos valores dos níveis das variáveis e para a previsão dos resultados experimentais.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – O Xisto

O xisto é uma rocha sedimentar que contém um complexo orgânico de composição indefinida, chamada de querogênio, disseminado em seu meio mineral. Não podendo ser facilmente extraído pelos solventes comuns, esta matéria orgânica se transforma em óleo e gás quando a rocha é submetida a temperaturas relativamente elevadas, operação industrial conhecida como retortagem ou pirólise. A importância atribuída ao xisto advém, exatamente, da possibilidade de se produzir do óleo extraído, devidamente beneficiado, e pelos processos convencionais de refinação, os mesmos derivados obtidos do petróleo de poço: nafta, gasolina, querosene, óleo diesel, óleo combustível e coque.

No Brasil existem diversas ocorrências de xisto. A formação Irati, com cerca de 250 milhões de anos, pertence ao conjunto de sedimentos paleozóicos da Bacia Sedimentar do Paraná, que se constitui no maior depósito de xisto conhecido no Brasil. Ocorre nos estados do Mato Grosso do Sul, Goiás, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A formação de Irati na jazida de São Mateus do Sul é caracterizada pela ocorrência de duas camadas de folhelho pirobetuminoso, separadas pela camada intermediária composta por margas dolomíticas e silitos. A combinação das duas camadas fornece teores da ordem de 8,5% em óleo.

Uma jazida de xisto como a da formação de Irati, pela sua característica tabular, com grande extensão lateral e ocorrendo a pouca profundidade é explorada a céu aberto com recuperação simultânea da área minerada.

2.1.1 – *O Processo Petrosix*

O processo Petrosix (Figura 2.1), permite a recuperação do potencial energético contido nos xistos da Formação Irati sob as formas de óleo e gás.

O xisto após detonado e escavado, é transportado por caminhões para o tratamento de minério, onde o material é submetido a diversos processos de britagem e peneiramento. Depois de sofrer este tratamento, o xisto é conduzido para alimentar a unidade de processo com uma distribuição granulométrica definida e a uma vazão adequada à capacidade de processamento.

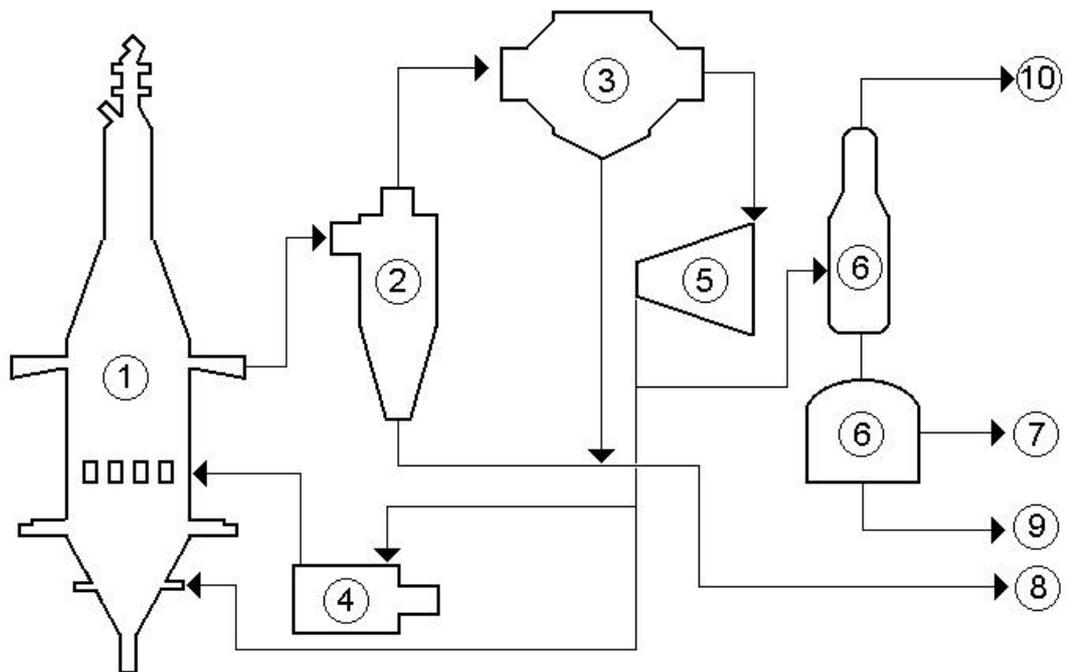


Figura 2.1 – Fluxograma do processo Petrosix.

Na Figura 2.1, os números significam :

- 1 – Retorta Petrosix
- 2 – Ciclone
- 3 – Precipitador Eletrostático
- 4 – Aquecedor
- 5 – Compressor
- 6 – Condensador
- 7 – Óleo leve
- 8 – Óleo pesado
- 9 – Água de retortagem
- 10 – Gás produto

O xisto, numa granulometria adequada, é alimentado continuamente pela parte superior da Retorta Petrosix por meio de um dispositivo que permite a selagem do vaso neste ponto e, ao mesmo tempo, distribui a carga de maneira uniforme no topo do leito de xisto. Daí, o xisto escoar por gravidade, atravessando sucessivamente zonas ditas de secagem, de aquecimento, de retortagem e de resfriamento.

Na zona de retortagem, o xisto sofre uma decomposição térmica (pirólise), liberando a matéria orgânica nele contida sob a forma de óleo e gases. O calor para a retortagem é suprido por uma corrente gasosa a elevada temperatura (reciclo quente), que entra no nível médio da retorta, na zona de retortagem, onde se mistura com uma segunda corrente, mais fria, injetada pelo fundo (reciclo frio), para recuperar o calor sensível do xisto que foi retortado. Estas correntes gasosas são produzidas no próprio processo.

Nas zonas de secagem e aquecimento, a massa gasosa ascendente cede calor para o xisto, resfriando-se, resultando na condensação de vapores de óleo e na conseqüente formação de um fina neblina, que é captada nos Ciclones e Precipitadores Eletrostáticos, constituindo o óleo pesado.

O gás isento de neblina passa através de um Compressor, dividindo-se em três correntes: uma volta para a Retorta, a temperatura relativamente baixa; outra é aquecida em Forno e também volta para a Retorta, a alta temperatura; a última corrente é enviada para o Condensador onde é recuperado o óleo leve. Os gases efluentes deste equipamento são encaminhados para um sistema onde sofrem tratamentos adequados. O xisto exaurido da matéria orgânica é retirado pelo fundo da Retorta através de um sistema de selagem hidráulica, onde se incorpora água para seu resfriamento e posterior rejeito.

Ao longo de todo o processamento de xisto são tomadas medidas cabíveis, objetivando manter as condições ambientais existentes. Uma das principais preocupações é a recomposição do solo minerado. O sistema de mineração permite ao solo manter, na sua camada mais superficial, características bastantes semelhantes às existentes anteriormente à movimentação. Os efluentes líquidos e gasosos são devidamente tratados antes de seu lançamento na atmosfera ou em cursos d'água e este lançamento é controlado pelas normas reguladoras, de modo a não serem ultrapassados os níveis permitidos de elementos poluentes.

2.2 - O Ciclone

Embora existam muitos tipos de coletores de partículas (câmara de poeira, precipitador eletrostático, filtros, etc), a seleção de um tipo apropriado de coletor para um certo material deve ter como base o conhecimento do desempenho do coletor, antecipadamente, de acordo com as condições operacionais. Entre esses aparelhos, encontra-se um dos mais utilizados industrialmente: o ciclone.

O ciclone destina-se, principalmente, a coleta de partículas sólidas de correntes gasosas utilizando-se da força centrífuga. São partículas que: podem ser prejudiciais a algum equipamento do processo, desde que continuem na corrente gasosa; possuem um alto valor agregado, sendo portanto, importante a sua máxima recuperação ou estejam poluindo o ambiente sendo prejudiciais à saúde dos homens e dos animais. Na indústria, o termo “ciclone” inclui coletores mecânicos, sem peças móveis (DOERSCHLAG e MICZEK, 1984). São equipamentos fáceis de construir, de manutenção simples e baixo custo de operação, o que popularizou o seu uso.

Um ciclone com entrada tangencial e fluxo reverso é mostrado na Figura 2.2. De acordo com essa figura, o ciclone pode ser caracterizado por oito dimensões:

D = diâmetro da parte cilíndrica

De = diâmetro do tubo de saída do gás

S = comprimento do tubo de saída do gás no interior do ciclone

H = altura do ciclone

h = altura da parte cilíndrica do ciclone

a = altura do duto de entrada da alimentação

b = largura do duto de entrada da alimentação

B = diâmetro da saída das partículas

Os componentes principais do ciclone apresentado na Figura 2.2 são: uma entrada tangencial, um corpo cilíndrico, uma parte cônica e um tubo de saída do gás limpo. Pode-se, ainda, adicionar um coletor para reter o pó na parte inferior do ciclone. Os ciclones, entretanto, são apresentados sob diversos tipos, obedecendo a um padrão básico, diferindo na forma da entrada das partículas, que pode ser uma entrada tangencial ou axial. Na Figura 2.3 são apresentados alguns ciclones com diferentes entradas para o gás sujo.

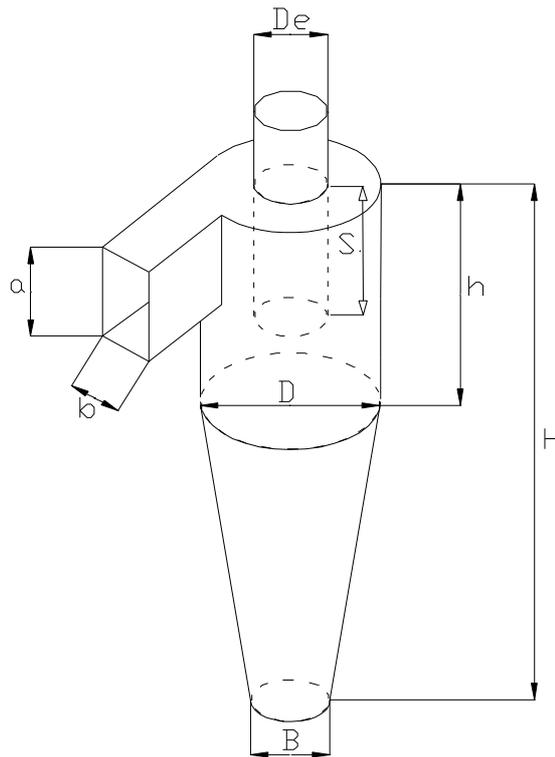


Figura 2.2 – Ilustração de um ciclone com entrada tangencial

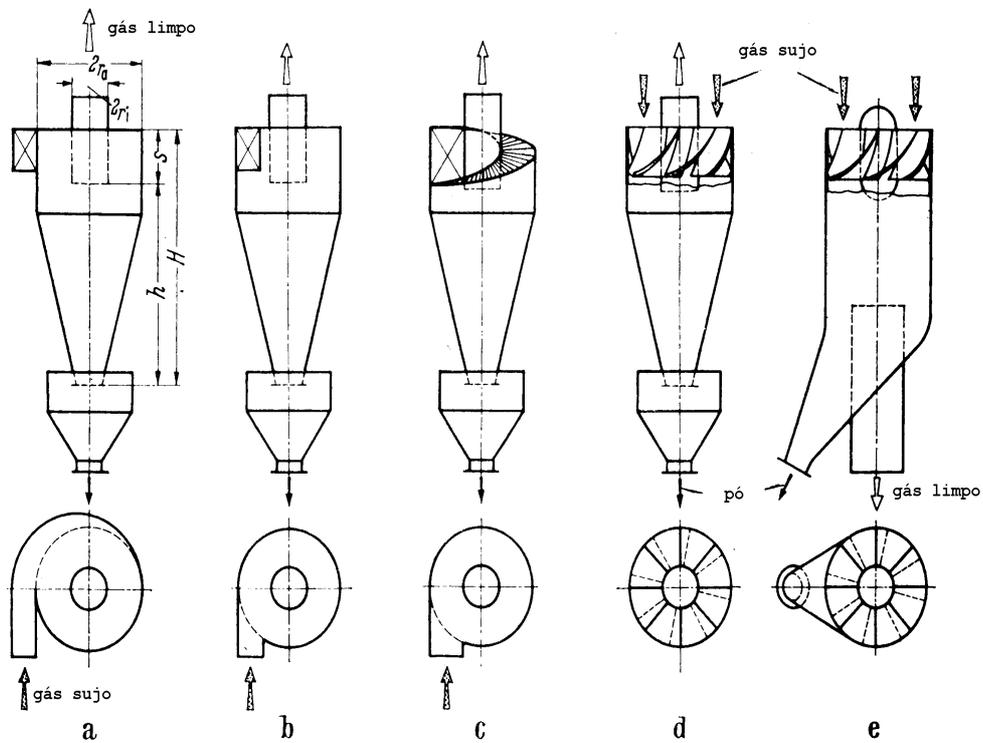


Figura 2.3 – Diversificação das entradas de gás sujo para ciclones: (a) entrada em voluta; (b) e (c) entradas tangenciais; (d) e (e) entradas axiais. (BATEL, 1976)

Existem muitas variações da configuração geométrica dos ciclones, possuindo diferentes proporções entre as dimensões. Pode-se citar as de LAPPLE (1951) e de STAIRMAND (1951) entre as mais conhecidas e utilizadas. Na Tabela 2.1, são apresentadas algumas das proporções geométricas existentes e publicadas na literatura.

Tabela 2.1 - Configurações geométricas para diferentes modelos de ciclones de acordo com as dimensões da Figura 2.1.

Dimensão	STAIRMAND de alta eficiência (1951)	LAPPLE (1951)	SWIFT de alta eficiência (LICHT, 1988, p. 309)
D	1,0	1,0	1,0
a	0,5	0,5	0,44
b	0,2	0,25	0,21
S	0,5	0,625	0,5
De	0,5	0,5	0,4
h	1,5	2,0	1,4
H	4,0	4,0	3,9
B	0,375	0,25	0,4

Os ciclones apresentados na Tabela 2.1 possuem uma entrada tangencial, e para esses ciclones pode-se apresentar uma descrição de como seria a trajetória das partículas no seu interior. O movimento de uma partícula e do gás no interior de um ciclone pode ser visualizado na Figura 2.4.

Após a suspensão gás-sólido entrar no ciclone, inicia um movimento circulatório na seção anular compreendida entre o tubo de saída e o corpo cilíndrico do ciclone, provocando a formação de um vórtice descendente. Esse movimento em espiral estende-se até a base do ciclone. As partículas presentes nessa corrente gasosa, devido à ação da força centrífuga, deslocam-se em direção à parede do ciclone e escoam até o coletor, executando um movimento helicoidal, onde se isolam da influência do movimento circulatório dos gases. O gás, por sua vez, ao se aproximar do final da parte cônica, inverte o seu sentido dirigindo-se à saída do ciclone, o que produz um vórtice interno ascendente. Esse gás que deixa o ciclone, geralmente, possui uma baixa concentração de particulados finos que podem ser retidos posteriormente por um filtro.

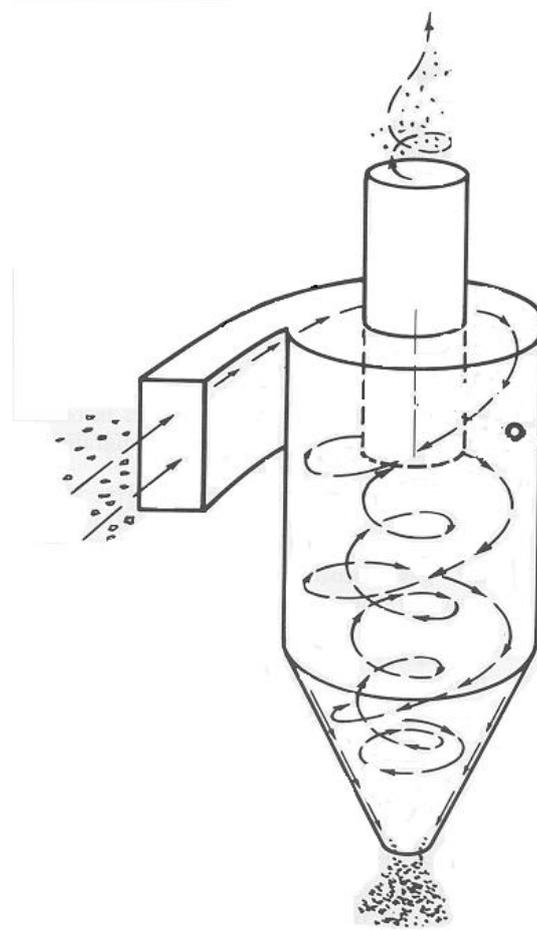


Figura 2.4 – Movimento de uma partícula e do gás no interior de um ciclone

ALEXANDER, (1949), estudando várias configurações de ciclones, observou que se o ciclone era suficientemente longo, o vórtice não alcançava todo o comprimento do ciclone e revertia o seu fluxo a uma distância abaixo do duto de saída do gás limpo. A essa distância, deu o nome de “comprimento natural” do ciclone. Concluiu que esse comprimento dependia das dimensões geométricas do ciclone, mas não da velocidade de alimentação do gás. Deduziu, então, uma equação empírica (equação 01) para calcular o “comprimento natural” do vórtice, L , no interior do ciclone.

$$L = 2,3.De.\left(\frac{D^2}{a.b}\right)^{1/3} \quad (01)$$

A posição do fim do vórtice é um dos parâmetros mais importantes que são levados em consideração no projeto de ciclones. O comprimento natural influencia muitos aspectos no trabalho com ciclones (HOFFMANN *et al.*, 1995):

o espaço onde realmente ocorre a separação no interior do ciclone é aquele acima do fim do vórtice. Então, no projeto de ciclones, o comprimento do ciclone é igual ao comprimento natural.

o transporte de partículas ao longo da parede em direção ao tubo de saída é ineficiente abaixo do fim do vórtice.

Entretanto, uma das conclusões de HOFFMANN *et al.*, (1995), foi a de existir um aumento do “comprimento natural” com o aumento da velocidade de alimentação do gás no ciclone. Este é um fato que ainda não é descrito por nenhuma equação proposta na literatura.

A experiência comprova que as paredes de ciclones ficam sujeitas a um forte desgaste na posição do fim do vórtice. Isso torna-se um problema se as partículas que estão sendo separadas são duras.

2.2.1 - Características de Operação e Aplicabilidade

O ciclone possui uma ampla faixa de condições de operação. Ciclones convencionais podem operar em pressões entre 0,01 e 100 bar (LI *et al.*, 1988), em temperaturas entre 300 e 2000 K (PATTERSON e MUNZ, 1989), a várias concentrações de alimentação e coletar partículas entre 10 e 2000 μm . A maior desvantagem do ciclone é a sua relativa baixa eficiência para partículas menores do que 5 μm de diâmetro (DIRGO e LEITH, 1985).

Os ciclones são normalmente empregados para:

- classificação por tamanho de partículas;
- operações onde a coleta extremamente alta de partículas não é crítica;
- coleta de partículas grossas;
- atuar como aparelhos que fazem uma limpeza prévia em linhas que tenham coletores que retém a maioria das partículas finas.

Uma das aplicações do ciclone é no controle de poluição. Atua também como coletor de produtos após secadores de leite fluidizado, pneumáticos ou spray dryer (SILVA e NEBRA, 1991). O uso de ciclones é favorável para aplicações onde o pó

coletado possui um alto valor e em indústrias de alimentos, onde o produto desejado é um pó, e contaminações com pequenas fibras de um filtro de tecido não podem ser toleradas. Um exemplo de uma dessas aplicações pode ser vista na Figura 2.5.

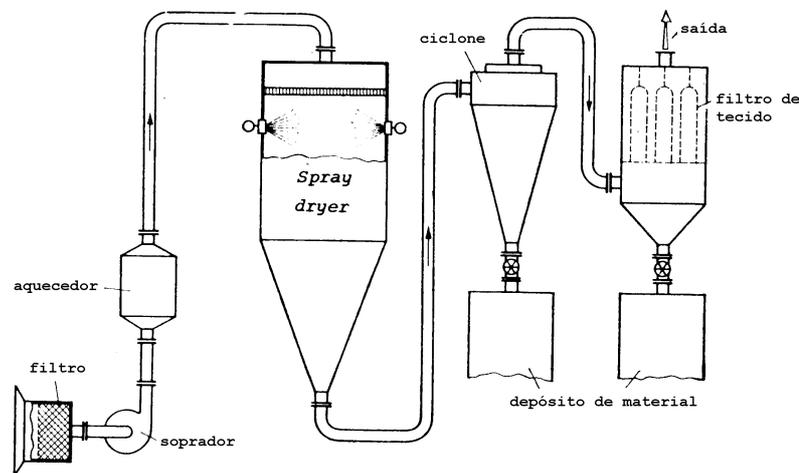


Figura 2.5 – Ciclone atuando como separador após um Spray dryer (BATEL, 1976)

Ainda na plantas químicas, os ciclones internos em reatores catalíticos prevêm a perda de catalisadores reduzindo o custo do processo (LI *et al.*, 1988).

Nos últimos anos, o uso de ciclones tem se estendido além do seu funcionamento convencional e em muitos processos os ciclones estão sendo usados como reatores ou aparelhos para o contato gás-sólido.

SZEKELY e CARR, (1966), citam o uso de ciclones para a secagem de material granular, combustão de combustível sólido e as vantagens de usar o ciclone quando é preciso usar partículas pequenas ou promover um bom contato entre gás e sólido. SILVA e NEBRA, (1991), estudaram a secagem de borra de café em um ciclone. Segundo CREMASCO, (1994), o ciclone também pode ser usado como um reator químico. PERES, (1996), estudou a transferência de calor entre o ar aquecido e particulados em um ciclone com entrada em espiral, propondo uma correlação para o cálculo do coeficiente de transferência de calor gás/parede para o escoamento do gás com particulados e sem particulados.

2.3 - Eficiência de Coleta

A eficiência de coleta mássica, η , é definida como a fração da massa de sólidos alimentados que são retidos pelo ciclone. Matematicamente, a eficiência mássica pode ser escrita da forma apresentada pela equação (02).

$$\eta = \frac{\text{massa coletada}}{\text{massa alimentada}} = \frac{mc}{ma} \quad (02)$$

Ao estudar a eficiência de coleta de um ciclone, o objetivo pode ser o de determinar qual é a eficiência granulométrica de coleta, isto é, com que eficiência o ciclone está coletando partículas de um determinado diâmetro. Desse modo, a eficiência granulométrica pode ser calculada utilizando-se a equação (03).

$$\eta(d_p) = \eta \cdot \frac{fc(d_p)}{fa(d_p)} \quad (03)$$

Na equação (03), $fc(d_p)$ é a fração mássica de partículas coletadas com um certo diâmetro d_p , $fa(d_p)$ é a fração mássica de partículas alimentadas com o mesmo diâmetro e $h(d_p)$ é a eficiência granulométrica.

Desse modo, pode-se imaginar que deveria haver um tamanho crítico de partículas, tal que todas as partículas maiores do que esse tamanho deveriam ser coletadas completamente, e todas as partículas menores não. Mas isso não é verdade. Em cada tipo de coleta, as forças e a maneira como as partículas são coletadas dependem do tamanho da partícula, da sua forma e da sua densidade. Consequentemente, diferentes partículas podem ser coletadas com diferentes graus de eficiência. Quando faz-se um gráfico da eficiência granulométrica em função do diâmetro de partículas, a curva obtida pode ser ilustrada pela Figura 2.6.

A eficiência de coleta de um ciclone é influenciada pelas condições de operação, propriedades físicas do material sólido alimentado e pela geometria do ciclone. Entre as condições de operação, podem ser citadas a velocidade de alimentação e a concentração de sólidos na corrente gasosa de alimentação. Para um mesmo sólido, diferentes ciclones levam a diferentes valores de eficiência. Essas influências são extremamente importantes, tornando-se as motivações muitos trabalhos.

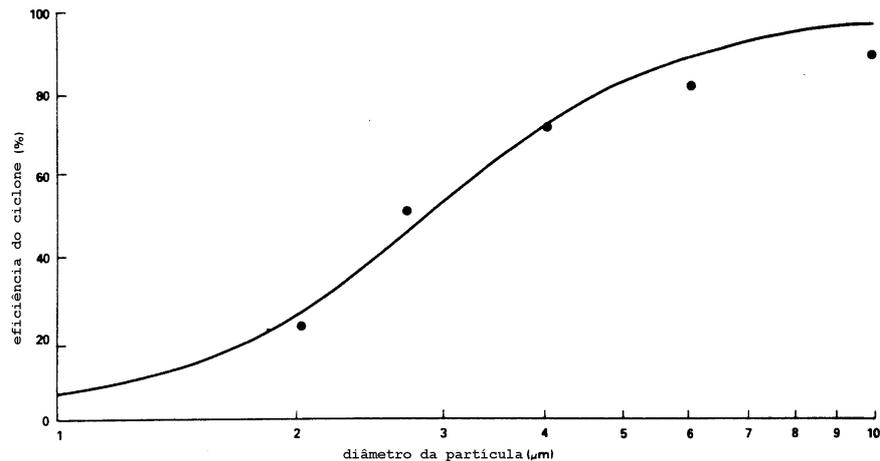


Figura 2.6 –Exemplo de uma curva de eficiência de coleta granulométrica (DIETZ, 1981).

Segundo LAPPLE, (1951), o desempenho de um ciclone pode ser especificado em termos do “diâmetro de corte”, dpc, o qual é o tamanho de partículas que o ciclone irá coletar com uma eficiência de 50%.

Contudo, na prática, STAIRMAND, (1951), diz que um número considerável de partículas menores do que o diâmetro de corte são separadas junto com as partículas grossas, possivelmente pela colisão com elas ou devido a uma agregação de partículas. Também um número de partículas mais grossas que o diâmetro de corte escapam junto com o gás limpo sendo carregadas pelo vórtice interno.

O tamanho da partícula coletada com 50% de eficiência para um ciclone depende das propriedades do sólido, das propriedades do gás, do tamanho do ciclone e das condições operacionais. Segundo LAPPLE, (1951), esse valor pode ser calculado pela equação (04).

$$dpc = \left(\frac{9 \cdot \mu_g \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot Ne \cdot Vi \cdot (\rho_p - \rho_g)} \right)^{1/2} \quad (04)$$

onde μ_g é a viscosidade do gás, **Ne** o número de voltas que o gás executa no interior do ciclone, **Vi** a velocidade de alimentação, ρ_p e ρ_g as densidades do sólido e do gás

respectivamente. Embora LAPPLE, (1951), tenha sugerido que o valor de N_e deveria ser determinado experimentalmente para cada ciclone, para o caso do ciclone Lapple, o valor de N_e usado tem sido 5. MASIN e KOCH, (1968), apresentam uma equação (equação 05) que pode ser usada para estimar o número de voltas que o gás realiza no interior de ciclones comerciais.

$$N_e = 1,54 \cdot \ln(v_i) - 2,2 \quad (05)$$

onde v_i deve ser a velocidade de alimentação do ciclone em ft/s.

MASSARANI, (1986), modificou a equação (04) obtendo a equação (06).

$$\frac{d_{pc}}{D} = K \cdot \left(\frac{\mu_g \cdot D}{Q \cdot (\rho_p - \rho_g)} \right)^{1/2} \quad (06)$$

onde K é um parâmetro adimensional característico da configuração do equipamento, a ser determinado experimentalmente. Para o ciclone com configuração Lapple, o valor de K encontrado por MASSARANI, (1986), foi de 0,095.

2.3.1 – Efeito da Concentração de Alimentação na Eficiência de Coleta.

Em 1949, ALEXANDER fazendo um estudo com vários tipos de ciclones a gás, verificou que mudanças na concentração alteravam a eficiência de coleta. Para um determinado tipo de ciclone, constatou que o aumento da concentração de alimentação provocava um aumento na eficiência de coleta.

MOTHES e LÖFFLER, (1985), em um estudo experimental do movimento e deposição de partículas em ciclones observaram um aumento na eficiência de coleta de 88% a $0,0005 \text{ kg/m}^3$ para 97% a $0,02 \text{ kg/m}^3$. Concluíram que a velocidade tangencial do gás no ciclone diminui com o aumento dos sólidos alimentados, devido à diminuição da força centrífuga no vórtice. Entretanto, as medidas de eficiência de separação mostram um aumento com o aumento da concentração de sólidos alimentados, logo, para altas concentrações, outros mecanismos de separação além dos mecanismos devido ao vórtice devem ocorrer e tem uma maior influência na separação de partículas. Propõem que o aumento da separação deve ser devido à aglomeração de partículas. Com um

aumento da concentração de partículas, mais partículas podem colidir na área de entrada. Se essas colisões resultarem em uma aglomeração das partículas, torna-se possível que pequenas partículas sejam separadas do fluxo gasoso. Esse processo é comparável ao processo de separação em “scrubbers” onde pequenas partículas são coletadas por gotas de água.

HOFFMANN *et al.*, (1991), estudaram a eficiência de coleta mássica. A concentração de sólidos na alimentação situou-se na faixa de, aproximadamente, 0 a 0,040 kg de sólidos por m³ de gás. Os experimentos foram realizados em três ciclones comerciais de geometrias diferentes. Para as geometrias I e II, as velocidades de alimentação foram 10, 15 e 20 m/s. E para a geometria III, apenas a velocidade de 10 m/s. Segundo os autores, duas dessas geometrias podiam ser variações das configuração do ciclone Stairmand de “alta eficiência”.

Tabela 2.2 - Dimensões dos ciclones utilizado por HOFFMANN *et al.*, (1991).

Ciclone	D (m)	De (m)	S (m)	H (m)	B (m)	h (m)	a (m)	b (m)
I	0,20	0,075	0,10	0,80	0,075	0,30	0,10	0,04
II	0,20	0,10	0,10	0,80	0,075	0,30	0,10	0,04

As dimensões do ciclone III não foram fornecidas pelos autores.

As figuras 2.7 e 2.8 apresentam as curvas de eficiência de coleta experimental em função da concentração de alimentação para as geometrias I e II.

Os resultados experimentais da eficiência mássica mostradas nas figuras 2.7 e 2.8 foram ajustadas pela equação (07).

$$\eta = \frac{k_1 C^{k_2} + \eta_0}{k_1 C^{k_2} + 1} \quad (07)$$

onde η_0 e h são as eficiências de separação mássica a uma alimentação com uma concentração próxima de zero e a uma concentração finita, k_1 e k_2 são dois parâmetros variáveis com as geometrias do ciclone, condições operacionais e propriedades dos sólidos. Todos os resultados encontrados por HOFFMANN *et al.*, (1991), puderam ser

aproximados pela equação (07) e não encontraram uma faixa de alimentação na qual não houve melhora no desempenho dos ciclones com o aumento da concentração de sólidos.

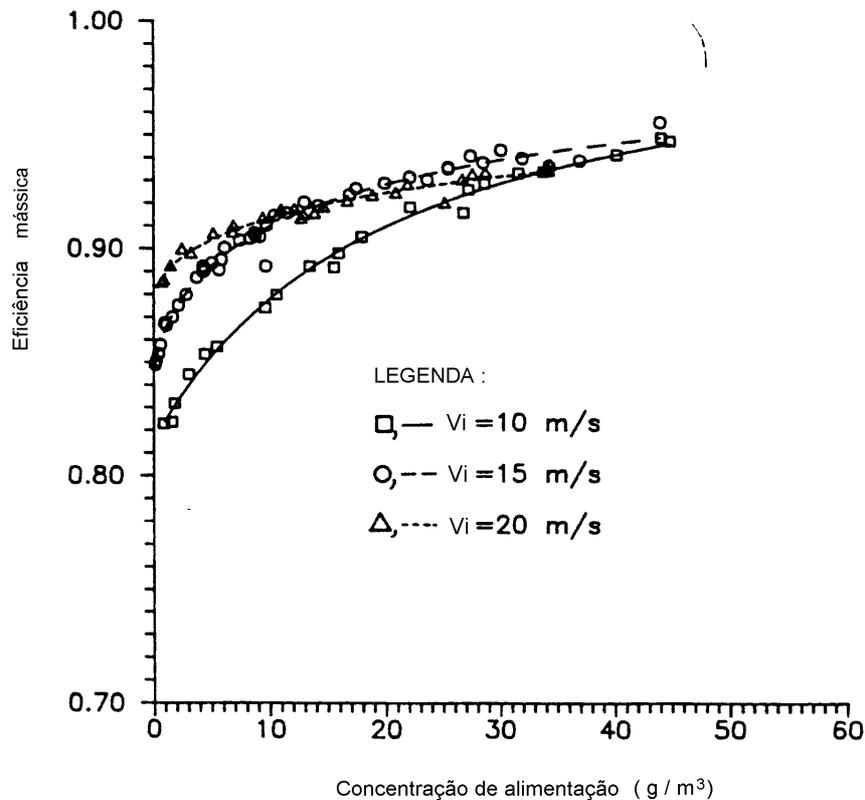


Figura 2.7 – Eficiência de coleta experimental em função da concentração de alimentação para o ciclone de geometria I (HOFFMANN *et al.*, 1991).

HOFFMANN *et al.*, (1992), trabalhando com quatro ciclones de geometrias diferentes em escala industrial, velocidade do gás na seção de entrada de 15 m/s, diâmetro de 0,45 m, obtiveram um aumento de eficiência mássica dos ciclones quando operaram com a concentração de sólidos na alimentação na faixa de 0,005 a 0,130 kg/m³ respectivamente. O sólido utilizado foi “Snowcal 40” (pó de giz) com densidade de 2,64 g/cm³. Para duas das quatro geometrias, a eficiência mássica de coleta aumentou de 80% para 95%. Esses resultados podem ser vistos na Figura 2.9. Outro fato observado por HOFFMANN *et al.*, (1992), foi o da geometria dos ciclones não ser tão importante quando existe um aumento da concentração de alimentação.

Uma das conclusões de HOFFMANN *et al.*, (1992), é que parte do pó é removido na entrada do ciclone por um mecanismo que não está relacionado com a separação do próprio ciclone, enquanto a separação das partículas remanescentes ocorre independentemente da concentração total.

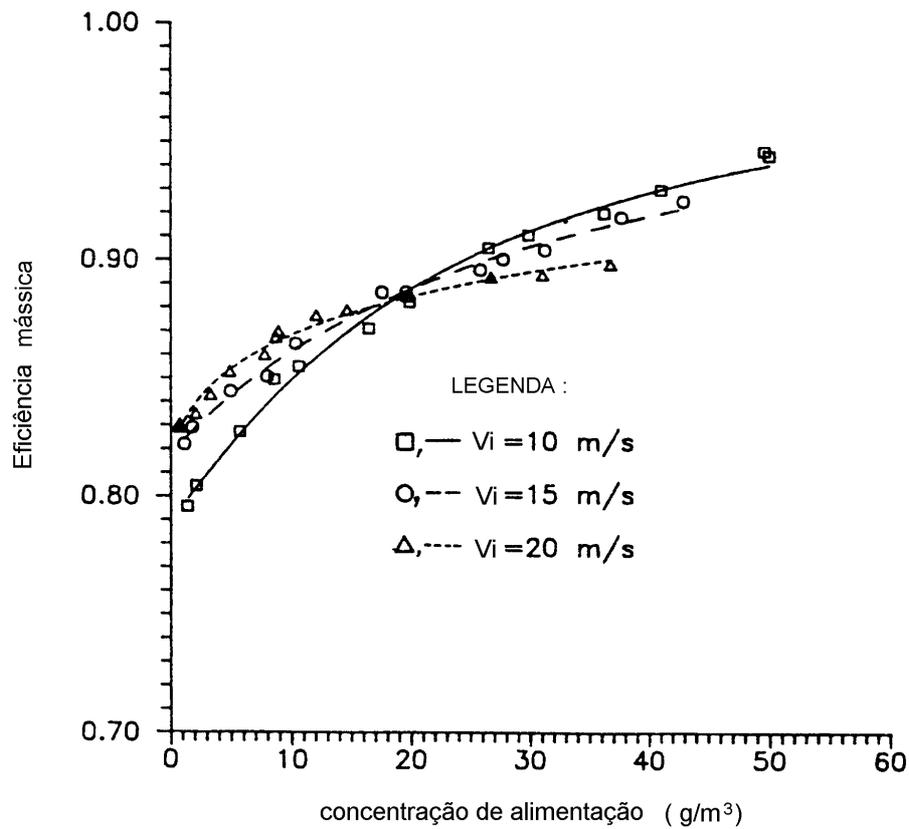


Figura 2.8 – Eficiência de coleta experimental em função da concentração de alimentação para o ciclone de geometria II (HOFFMANN et al., 1991).

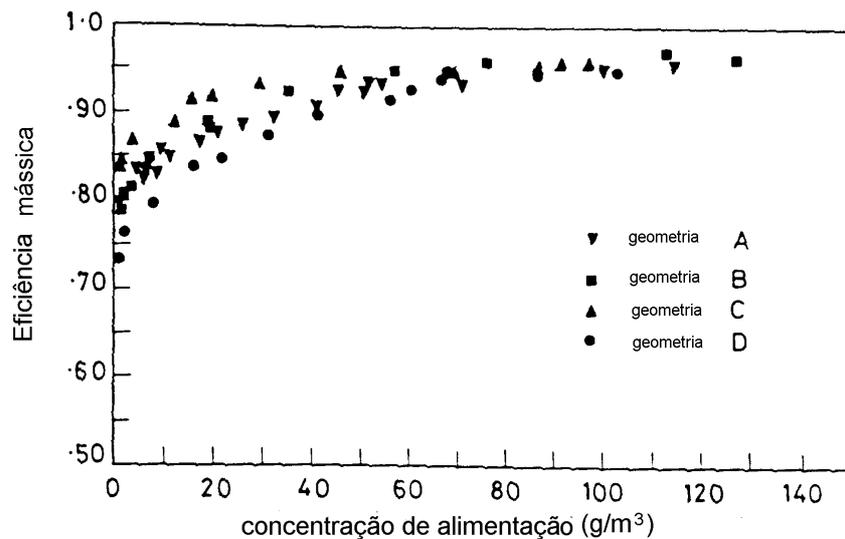


Figura 2.9 – Eficiência mássica em função da concentração de alimentação para diferentes geometrias de ciclones (HOFFMANN et al., 1992).

FASSANI (1997), também observou a tendência do aumento da eficiência mássica com o aumento da concentração de sólidos, até concentrações em torno de 12 kg de FCC por kg de ar. Acima dessa concentração o rendimento passou a diminuir. Para a realização de seus experimentos utilizou um ciclone com diâmetro de 0,154 m, que não obedece a nenhuma geometria padrão, tais como Lapple ou Stairmand. Foram utilizadas partículas de FCC, um catalisador do processo de craqueamento do petróleo, e velocidades de entrada do gás entre 5 e 28 m/s. A concentração de sólidos atingiu valores de até 20 kg de sólido por kg de ar

Em vista do que foi exposto anteriormente, fica claro que a maioria dos autores observaram em seus experimentos um aumento da eficiência de coleta com o aumento da concentração de alimentação.

Entretanto, SCHEID, (1992), observou em seus experimentos que a eficiência mássica de coleta não sofreu qualquer influência das diferentes concentrações dos sólidos na alimentação. O ciclone utilizado por SCHEID, (1992), para a realização do estudo experimental foi o modelo Stairmand, na configuração de alta eficiência, com 20 cm de diâmetro (D). As experiências foram realizadas com três sólidos: quartzo, alumina e carvão com densidades de 2,65 g/cm³, 4,00 g/cm³ e 1,65 g/cm³ respectivamente. A concentração de sólidos situou-se entre 0,001 e 0,050 kg/m³. As Figuras 2.10 e 2.11 exemplificam os resultados encontrados para a alumina e para o carvão, respectivamente.

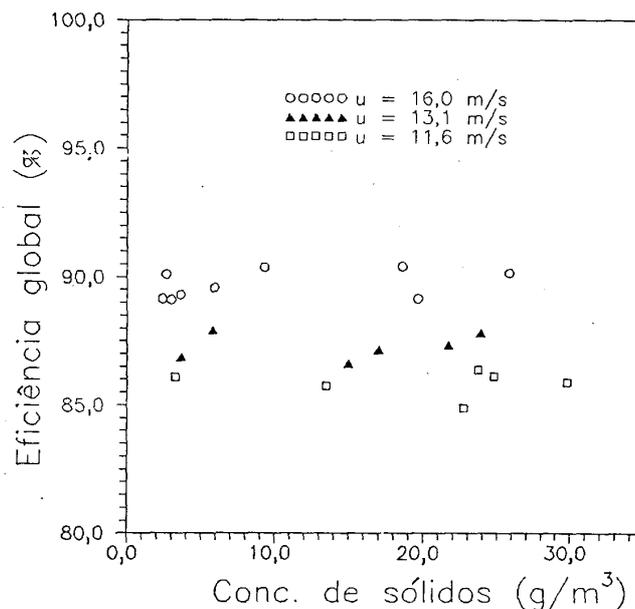


Figura 2.10 – Influência da concentração de sólidos sobre a eficiência de coleta para a alumina (SCHEID, 1992)

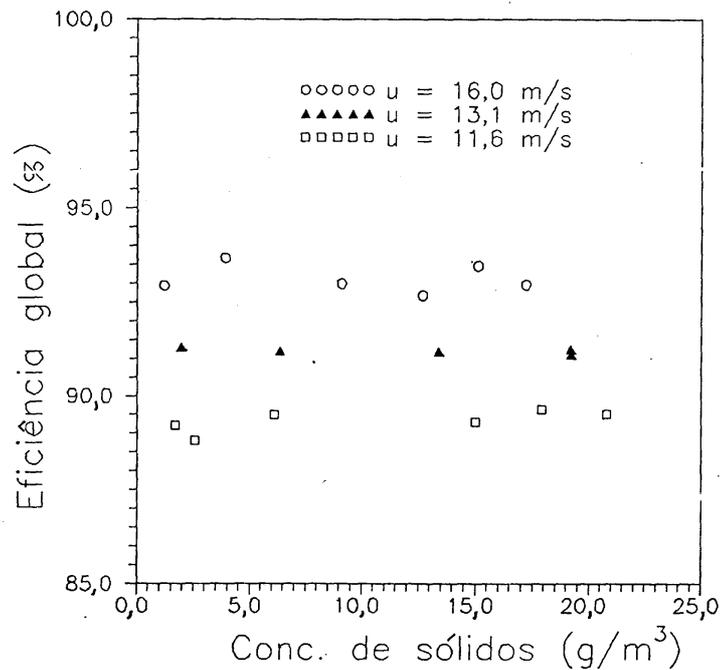


Figura 2.11 – Influência da concentração de sólidos sobre a eficiência de coleta para o carvão (SCHEID, 1992)

Basicamente foram dois os mecanismos propostos por SCHEID, (1992), para explicar tal comportamento: um estaria ligado à aglomeração de partículas e o outro sugere que parte dos sólidos seria removido do fluxo gasoso logo após entrar no ciclone e o pó remanescente sofreria um processo de separação independente da concentração na alimentação.

A divergência nos resultados encontrados em literatura nos conduz ao interesse de pesquisar qual seria o comportamento da eficiência de coleta dos ciclones Lapple e Stairmand quando alimentados com diferentes concentrações de partículas de xisto.

2.4 - Modelos Matemáticos Para a Predição da Eficiência de Coleta

Para o projeto de novos ciclones, torna-se clara a necessidade de métodos que permitam o cálculo antecipado da eficiência de coleta. A literatura tem apresentado um grande número de trabalhos que visam a predição da eficiência de coleta em ciclones. Os modelos matemáticos desenvolvidos foram incorporando cada vez mais hipóteses para tentar simular corretamente os fenômenos que ocorrem no interior do ciclone. A maioria das teorias existentes tentam incorporar as propriedades físicas do material sólido

alimentado ao ciclone, as propriedades físicas do fluido de transporte, as condições de operação e as características geométricas do ciclone. As discrepâncias dos resultados obtidos por um modelo quando comparados com os resultados experimentais reside no fracasso de incorporar corretamente os fenômenos de turbulência no interior do ciclone (LEITH e LICHT, 1972). As teorias existentes para a coleta de partícula para ciclones são numerosas e diferem na sua complexidade (LI e WANG, 1989).

Segundo LICHT, (1988), existem três situações idealizadas que podem servir de ponto de partida para descrever os processos de coleta reais.

A primeira refere-se a um escoamento empistonado, sem uma mistura radial ou axial das partículas que ainda não foram coletadas. Esse modelo assume: que todas as partículas estão distribuídas uniformemente ao longo de uma seção; que todas as partículas são de um mesmo tamanho; que a força de coleta está operando em uma única direção e que a trajetória de todas as partículas são uma família de linhas retas paralelas.

A segunda situação assume uma mistura radial completa das partículas que não foram ainda coletadas. As partículas estão bem misturadas devido à turbulência do fluxo gasoso, estando assim, com concentração sempre uniforme em qualquer seção lateral ou radial perpendicular à superfície de coleta.

E por último, a que assume que em qualquer instante as partículas que não foram coletadas estão uniformemente misturadas ao longo de todo o volume do coletor.

A complexidade dos escoamentos faz com que seja difícil construir um modelo que seja completamente realístico em todos os detalhes.

2.4.1 – Modelo de LAPPLE

Um dos primeiros métodos para a estimativa da eficiência granulométrica quando é conhecida a geometria do ciclone, as condições operacionais e as propriedades do sistema gás-sólido, foi estabelecido por LAPPLE em 1951. O método proposto tem como base o cálculo prévio do diâmetro de corte, d_{pc} , calculado diretamente pela substituição das variáveis na equação (04). Em seguida, a eficiência granulométrica para cada

diâmetro de partícula, d_p , pode ser calculado de acordo com a equação (08). Essa equação é uma aproximação feita através da curva de eficiência granulométrica em função de (d_p/d_{pc}) obtida experimentalmente por LAPPLE e que se encontra na Figura 2.12.

$$\eta(d_p) = \frac{(d_p/d_{pc})^2}{1 + (d_p/d_{pc})^2} \quad (08)$$

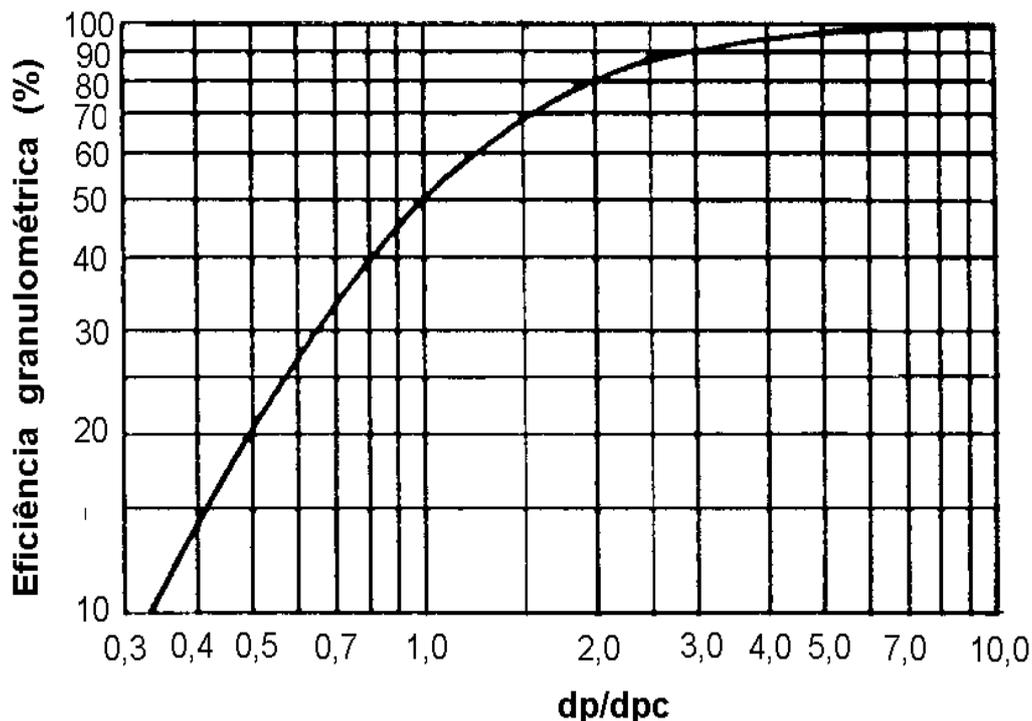


Figura 2.12 – Curva de eficiência obtida por LAPPLE (LAPPLE, 1951).

A equação (08) é o resultado de um esforço para obter um modelo teórico capaz de prever a eficiência de coleta para ciclones. A equação (08) poder ser usada para ciclones da configuração Lapple, como citado na Tabela 2.1.

Uma desvantagem do método de LAPPLE é a de não permitir o cálculo da eficiência granulométrica para ciclones de qualquer configuração. O mais interessante então, seria o uso de modelos que possibilitem o cálculo da eficiência de coleta para qualquer tamanho de partícula, sob certas condições de operação, e qualquer configuração geométrica de ciclones.

2.4.2 – Modelo de LEITH e LICHT

LEITH e LICHT, (1972), afirmam que as tentativas anteriores em desenvolver um modelo teórico para a eficiência de coleta de um ciclone não tiveram muito sucesso. A principal razão desse fracasso é que os modelos não consideraram a turbulência e a retro-mistura das partículas suspensas no gás. LEITH e LICHT, (1972), propuseram um modelo que reconhece a natureza turbulenta dos ciclones. Conseqüentemente o modelo, que incorpora a retro-mistura turbulenta das partículas suspensas no gás, proporciona razoável concordância com os dados.

Segundo LEITH e LICHT, (1972), para iniciar um modelo, é necessário ter uma equação que forneça a componente radial da trajetória de uma partícula individual movendo-se no gás em movimentos circulatorios sob as condições do interior do ciclone. Uma equação diferencial descrevendo este movimento pode ser obtida fazendo-se um balanço de forças na partícula com as seguintes hipóteses:

- (i) a partícula tem a forma esférica;
- (ii) o movimento da partícula não é influenciado pelas partículas nas vizinhanças;
- (iii) a força de arraste tangencial do gás é zero;
- (iv) a velocidade radial do gás é zero;
- (v) a componente tangencial da velocidade da partícula é a mesma do fluxo gasoso, isto é, não existe deslizamento na direção tangencial entre a partícula e o gás;
- (vi) a componente tangencial da velocidade é relacionado com a posição radial por uma forma modificada da equação para o vortex livre em um fluido ideal:

$$U_t \cdot r^n = \text{constante} \quad (10)$$

Onde U_t é a componente tangencial da velocidade, r um raio variável no interior do ciclone que pode ir desde o centro da parte cilíndrica até $D/2$ e n é um parâmetro calculado pela equação (11) proposta por ALEXANDER, (1949).

$$n = 1 - \left[(1 - 0,67 \cdot D^{0,14}) \left(\frac{T}{283} \right)^{0,3} \right] \quad (11)$$

A equação (11) foi obtida por ALEXANDER por meio de observações experimentais. O valor do diâmetro do ciclone, **D**, deve ser substituído em metros e a temperatura, **T**, em graus Kelvin. Para o vortex ideal, *n* assume o valor de 1, mas observações experimentais mostram que *n* pode variar entre 0,5 e 0,9.

Considerando as hipóteses anteriores, um balanço sob o campo de forças que agem na partícula fornece:

$$F_R = m_p \cdot a_p \quad (12)$$

$$F_{\text{centrífuga}} - F_{\text{arraste}} = m_p \cdot a_p \quad (13)$$

$$\frac{m_p \cdot U_t^2}{r} - 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p \cdot U_r = m_p \cdot a_p \quad (14)$$

Pode-se ainda relacionar a massa da partícula, que de acordo com a hipótese (i) é esférica, com a sua densidade e o seu volume.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (15)$$

rearranjando-se a equação (15) chega-se a:

$$m_p = \frac{\pi \cdot \rho_p \cdot d_p^3}{6} \quad (16)$$

Ainda faltam os termos de velocidade e aceleração, que podem ser escritos da seguinte forma:

$$a_p = \frac{d^2 r}{dt^2} \quad (17)$$

$$U_r = \frac{dr}{dt} \quad (18)$$

Substituindo-se as equações (16), (17) e (18) na equação (14), chega-se a:

$$\frac{\rho_p \cdot \pi \cdot d_p^3 U_t^2}{6 \cdot r} - 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p \cdot \frac{dr}{dt} = \frac{\rho_p \cdot \pi \cdot d_p^3}{6} \cdot \frac{d^2 r}{dt^2} \quad (19)$$

Rearranjando-se algébricamente a equação (19), obtém-se a equação (20):

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{18 \cdot \mu}{\rho_p \cdot d_p^2} \cdot \frac{dr}{dt} - \frac{U_t^2}{r} = 0 \quad (20)$$

Usando a equação (10) proposta por ALEXANDER, tem-se:

$$U_t \cdot r^n = U_{tw} \cdot R_w^n \quad (21)$$

Onde U_{tw} é a velocidade tangencial na parede (*wall*) do ciclone e R_w é o raio do centro do ciclone até a parede (na parte cilíndrica). A equação (21) fica pronta para substituir quando assume a seguinte forma:

$$U_t = \frac{U_{tw} \cdot R_w^n}{r^n} \quad (22)$$

E, finalmente, substituindo a equação (22) na equação (20) obtém-se a equação proposta por LEITH e LICHT.

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{18 \cdot \mu}{\rho_p \cdot d_p^2} \cdot \frac{dr}{dt} - \frac{U_{tw}^2 \cdot R_w^{2 \cdot n}}{r^{2 \cdot n + 1}} = 0 \quad (23)$$

Para simplificar, LEITH e LICHT assumiram que seria satisfatório adotar U_{tw} como sendo, aproximadamente, igual à velocidade média do gás na entrada do ciclone, a qual é:

$$U_{tw} = \frac{Q}{a \cdot b} \quad (24)$$

Uma análise mais rigorosa, leva à conclusão de que a velocidade tangencial do vórtice na parede do ciclone deve ser zero. Entretanto, na camada de contorno, uma região na qual as partículas capturadas deslizam pela parede na direção do duto de coleta, deve ser fina. Um pequeno erro é introduzido ajustando $r=r_w$ quando $U_t = U_{tw}$.

A equação (23) não pode ser resolvida imediatamente, até mesmo para o caso idealizado quando $n=1$. Uma solução aproximada pode ser obtida desprezando-se a derivada de segunda ordem. Isso é o equivalente a dizer que as partículas movem-se radialmente com uma velocidade constante.

$$\frac{18 \cdot \mu}{\rho_p \cdot d_p^2} \cdot \frac{dr}{dt} - \frac{U_{tw}^2 \cdot R_w^{2 \cdot n}}{r^{2 \cdot n + 1}} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{U_{tw}^2 \cdot \rho_p \cdot d_p^2 \cdot R_w^{2 \cdot n}}{18 \cdot \mu \cdot r^{2 \cdot n + 1}} \quad (26)$$

Integrando-se a equação (26) para r variando de r_1 até r , e o tempo variando desde 0 até t , onde a partícula alcança a parede $r=R_w$, chega-se a:

$$t = \frac{9 \cdot \mu}{\rho_p \cdot (n + 1)} \cdot \left(\frac{R_w}{d_p \cdot U_{tw}} \right)^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_w} \right)^{2n+2} \right] \quad (27)$$

Supondo que exista uma região central de baixa pressão estendendo-se ao longo de eixo do ciclone, abaixo do duto de saída, o gás deve, gradualmente, mover-se radialmente para dentro. Como um volume de gás passa verticalmente direção abaixo do ciclone, ele é então, gradualmente, retirado da região central numa taxa constante. Diferentes parcelas de gás introduzidas no ciclone ao mesmo tempo podem então ter diferentes tempos de residência. Para simplificar, deseja-se determinar um tempo de residência médio para todo o fluxo gasoso. Isso, segundo LEITH e LICHT pode ser feito da seguinte maneira: o tempo médio da entrada para um nível médio da parte inferior do tubo de saída, mais o tempo de residência médio abaixo desse ponto.

O tempo mínimo de residência médio pode ser calculado assumindo que todo o gás entra no ciclone no ponto médio do duto de entrada ($a/2$). Com essa hipótese:

$$t_{\min} = \frac{V_s}{Q} = \frac{(\text{área da coroa entre o tubo de saída e o tubo cilíndrico}) \cdot \text{altura}}{Q} \quad (28)$$

$$t_{\min} = \frac{\pi \cdot (S - a/2) \cdot (D^2 - D_e^2)}{4 \cdot Q} \quad (29)$$

onde

$$V_s = \frac{\pi \cdot (S - a/2) \cdot (D^2 - D_e^2)}{4} \quad (30)$$

O termo V_s corresponde ao volume compreendido entre o tubo de saída do gás e o corpo cilíndrico do ciclone à altura de ($a/2$).

O tempo de residência adicional variará de zero a um máximo que corresponde ao ponto mais baixo do gás que desce no corpo cônico do ciclone, com um tempo médio adicional sendo tomado como metade desse máximo. O ponto mais baixo do gás que desce não é necessariamente a saída atual do ciclone como o medido pela altura H , mas sim o “comprimento natural”, L , definido por ALEXANDER de acordo com a equação (01).

O tempo máximo de residência do gás que deve ser adicionado ao tempo mínimo, será:

$$t_{\max} = \frac{V_{nl}}{Q} \quad (31)$$

onde V_{nl} é o volume efetivo da porção inferior do ciclone que pertence ao comprimento natural, onde o vórtice inverte o sentido. Esse volume efetivo é igual ao volume total do ciclone no nível do tubo de saída até o nível do comprimento natural, menos o volume da região central do ciclone onde o fluxo de gás é ascendente. Tomando o diâmetro do vórtice central sendo igual ao do tubo de saída do gás, teremos:

$$V_{nl} = \frac{\pi \cdot D^2 (h - S)}{4} + \frac{\pi}{4} \cdot \frac{(L + S - h)}{3} \cdot D^2 \cdot \left[1 + \frac{d}{D} + \frac{d^2}{D^2} \right] - \frac{\pi \cdot D_e^2 \cdot L}{4} \quad (32)$$

onde

$$d = D - (D - B) \left[\frac{S + L - h}{H - h} \right] \quad (33)$$

Se o comprimento natural do vórtice, L , for menor do que a altura $(H-S)$, então o valor de V_{nl} é calculado pela equação (32). Entretanto, se o comprimento natural do vórtice, L , for maior do que a altura do ciclone $(H-S)$, então o valor de V_H é calculado pela equação (34).

$$V_H = \frac{\pi \cdot D^2 (h - S)}{4} + \frac{\pi \cdot D^2 \cdot (H - h)}{4 \cdot 3} \cdot \left[1 + \frac{B}{D} + \frac{B^2}{D^2} \right] - \frac{\pi \cdot D e^2 \cdot (H - S)}{4} \quad (34)$$

Assim sendo, o tempo de residência médio total do gás dentro de um ciclone será dado por:

$$t_{res} = t_{min} + t_{max} \quad (35)$$

$$t_{res} = \frac{V_s + V_{nl}/2}{Q} \quad \text{ou} \quad \frac{V_s + V_H/2}{Q} = \frac{k_c \cdot D^3}{Q} \quad (36)$$

Aqui k_c é uma constante adimensional para um ciclone qualquer, isto é, k_c depende somente das proporções relativas das várias dimensões.

Torna-se evidente que a hipótese (iv) que foi feita para a dedução da equação (24) não é satisfatória para a porção do ciclone que fica abaixo do duto de saída do gás. Desse modo, correções podem ser feitas para o efeito da velocidade radial do fluxo gasoso interno constante (U_r) sobre a força de arraste da partícula. Isso pode conduzir para a seguinte equação diferencial:

$$\frac{\rho_p \cdot \pi \cdot d_p^3 \cdot U_t^2}{6 \cdot r} - 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p \cdot (U_t - U_r) = \frac{\rho_p \cdot \pi \cdot d_p^3}{6} \cdot \frac{d^2 r}{dt^2} \quad (37)$$

e da mesma forma como foi feito anteriormente, chega-se a:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{18 \cdot \mu}{\rho_p \cdot d_p^2} \cdot \frac{dr}{dt} - \frac{U_t^2 \cdot R_w^{2 \cdot n}}{r^{2 \cdot n + 1}} + \frac{18 \cdot \mu}{\rho_p \cdot d_p^2} U_r = 0 \quad (38)$$

Nessa equação, U_r deve ser estimado como:

$$U_r = \frac{Q}{\pi \cdot D_e \cdot L} = \frac{U_{tw} \cdot a \cdot b}{\pi \cdot D_e \cdot L} \quad (39)$$

O efeito líquido tende em reduzir a eficiência de coleta calculada. Este termo foi desprezado porque os valores medidos de U_r são baixos e de fato, aproximam-se de zero na parede onde é feita a coleta.

Não existem dados publicados da distribuição de partículas dentro do ciclone. Entretanto, está claro que três mecanismos, pelo menos, podem causar a mistura das partículas não coletadas.

- (1) Como o gás que está abaixo do tubo de saída move-se radialmente em direção ao centro arrastando o gás para fora, as partículas tenderão a ir juntas.
- (2) A turbulência e fronteiras dentro do ciclone ajudam na mistura das partículas.
- (3) Também, observou-se que algumas partículas sofrem um re-arraste da parede do ciclone para o fluxo gasoso.

Desse modo, a força de arraste, a mistura turbulenta e o re-arraste de partículas são suficientes para garantir que uma concentração uniforme de partículas não coletadas é mantida durante o escoamento através de qualquer seção transversal de um ciclone, isto é, que a mistura é completa. Considere uma seção transversal de um ciclone, como mostrado na Figura 2.13. Num tempo dt , todas as partículas a uma distância dR , ou menor da parede do ciclone, movem-se para a parede e são coletadas. As partículas irão percorrer uma distância $rd\theta$ tangencialmente e dL verticalmente.

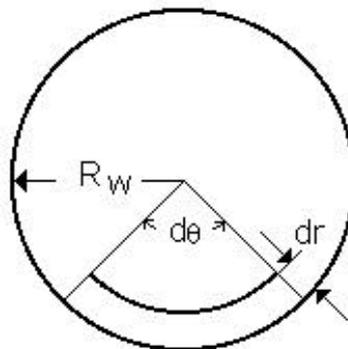


Figura 2.13 – Seção transversal de um ciclone (LEITH e LICHT, 1972)

O número de partículas removidas, dn' , será:

$$-dn' = \frac{d\theta}{2} \cdot [R_w^2 - (R_w - dr)^2] \cdot c \cdot dL \quad (40)$$

onde c é a concentração das partículas. O número total de partículas nesse setor que são removidas é:

$$n' = \frac{d\theta}{2} \cdot R_w^2 \cdot c \cdot dL \quad (41)$$

A fração das partículas removidas no tempo dt , é então:

$$\frac{-dn'}{n'} = \frac{2 \cdot R_w \cdot dr - (dr)^2}{R_w^2} \quad (42)$$

E, desprezando o termo de segunda ordem na equação diferencial:

$$\frac{-dn'}{n'} = \frac{2 \cdot dr}{R_w} \quad (43)$$

Para relacionar a fração de partículas coletadas com o tempo médio de residência, é necessário expressar a equação (43) em termos do tempo. Isso pode ser feito através da equação (27), a qual foi desenvolvida para mostrar a relação entre o tempo e a posição radial de um única partícula no vórtice. Diferenciando-se (27) tem-se:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{R_w \cdot \rho_p}{18 \cdot \mu} \cdot \left(\frac{dp \cdot U_{tw}}{R_w} \right)^2 \cdot \left[\frac{\rho_p \cdot (n+1)}{9 \cdot \mu} \cdot \left(\frac{dp \cdot U_{tw}}{R_w} \right)^2 \cdot t \right]^{-(2 \cdot n+1)/(2 \cdot n+2)} \quad (44)$$

Combinando as equações (43) e (44) chega-se a:

$$\int_{n_0'}^{n'} \frac{dn'}{n'} = - \int_0^t \frac{\rho_p}{9 \cdot \mu} \cdot \left(\frac{dp \cdot U_{tw}}{R_w} \right)^2 \cdot \left[\frac{\rho_p \cdot (n+1)}{9 \cdot \mu} \cdot \left(\frac{dp \cdot U_{tw}}{R_w} \right)^2 \cdot t \right]^{-(2 \cdot n+1)/(2 \cdot n+2)} \cdot dt \quad (45)$$

$$\ln \frac{n'}{n_0'} = -2 \cdot \left(\frac{\rho_p \cdot (n+1) \cdot d_p^2 \cdot U_{tw}^2}{9 \cdot \mu \cdot R_W^2} \cdot t \right)^{1/(2 \cdot n+2)} \quad (46)$$

Exponenciando a equação (46) e substituindo na fórmula da eficiência granulométrica de coleta, obtém-se:

$$\eta(d_p) = 1 - \exp\{-2 \cdot [P \cdot \Psi]^{1/(2n+2)}\} \quad (47)$$

onde

$$\Psi = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot U_{tw} \cdot (n+1)}{18 \cdot \mu \cdot D} \quad (48)$$

$$P = \frac{8 \cdot k_c}{k_a \cdot k_b} \quad (49)$$

$$k_a = \frac{a}{D} \quad (50)$$

$$k_b = \frac{b}{D} \quad (51)$$

A equação (47) permite então calcular a eficiência granulométrica de coleta para ciclones.

CLIFT *et al.*, (1991), criticaram a forma como LEITH e LICHT, (1972), definiram o tempo de residência para a partícula. LEITH e LICHT, (1972), assumiram que a partícula entra no ciclone a uma distância $a/2$ do topo do ciclone, desprezando assim esse volume entre o topo do ciclone até a altura $a/2$. Segundo CLIFT *et al.*, (1991), assumindo que na maioria dos ciclones ocorre uma aproximação geométrica, onde

$$a \approx S$$

pode-se rescrever a equação (30) por :

$$V_s = \pi \cdot S \cdot \left(\frac{D^2 - D_e^2}{4} \right) \quad (52)$$

Para o cálculo da eficiência de coleta, será usada a equação desenvolvida por LEITH e LICHT (1972) e a equação com o tempo de residência corrigido por CLIF *et al.*, (1991).

2.4.3 – Modelo de DIETZ

DIETZ, (1981), aponta duas características inadequadas do modelo de LEITH e LICHT, (1972).

Primeiro, enquanto a distribuição do tempo de residência do gás dentro do ciclone é reconhecida, somente o tempo médio de residência é usado na análise. Tempos de residência mais curtos podem resultar num significativo arraste de partículas e uma perda na eficiência do ciclone.

Segundo, a hipótese de que o gás é misturado uniformemente através de uma seção transversal do ciclone e torna-se mais limpo progressivamente quando o tempo de residência aumenta, ignora a natureza do fluxo reverso do ciclone.

No modelo de DIETZ, (1981), é proposto a existência de três regiões de fluxo dentro do ciclone. As três regiões são: a região de entrada, a região anular de fluxo descendente e a região central de fluxo ascendente. A Figura 2.14 apresenta as localizações dessas três áreas.

DIETZ, (1981), apresenta as características que um modelo de predição de eficiência deve apresentar:

- incluir a geometria do ciclone;
- reconhecer a importância da mistura turbulenta;
- fornecer uma distribuição de tempos de residência do gás;
- não assumir um mistura completa nas regiões central e anular.
- permitir a troca de partículas entre a região central e a região anular.

DIETZ, (1981), modificou a geometria cone-cilíndrica do ciclone para a forma de um cilindro para facilitar a análise matemática (Figura 2.15).

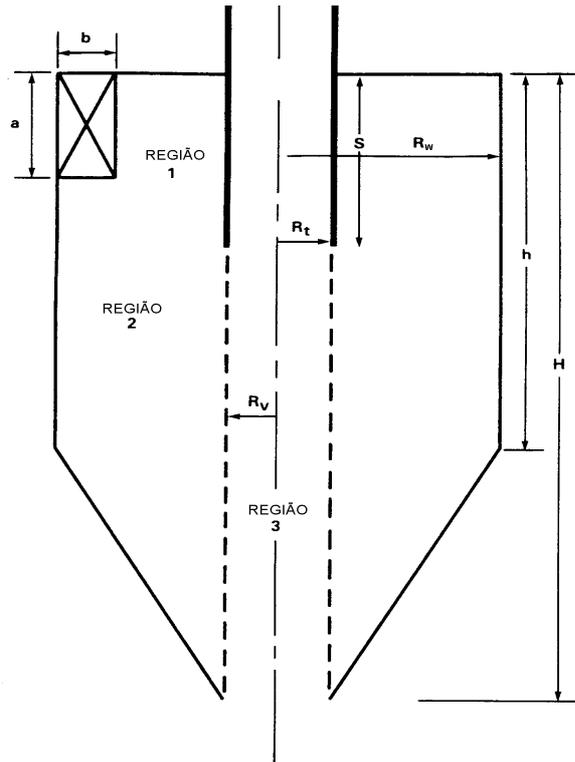


Figura 2.14 – Geometria de um ciclone de fluxo reverso (DIETZ, 1981)

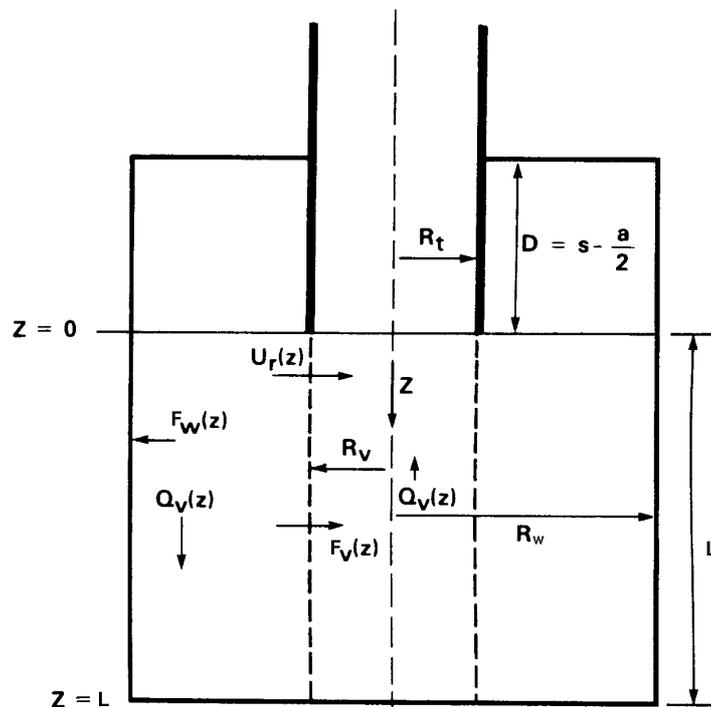


Figura 2.15 – Modificação da geometria de um ciclone para análise (DIETZ, 1981).

O ciclone da Figura 2.15 é separado nas seguintes regiões:

- (1) a região central do ciclone, onde a velocidade do gás é essencialmente ascendente (região 3);
- (2) a região de periferia entre a região central e a parede do ciclone, onde a velocidade do gás é essencialmente descendente (região 1 e 2).

As regiões 1 e 2 são divididas na região entre o topo do ciclone e a parte inferior do tubo de saída do gás e a parte abaixo do tubo de saída do gás, respectivamente. Na geometria modificada (Figura 2.15), o raio do ciclone ($R_w=D/2$) e o raio do tubo de saída ($R_t=De/2$) não sofrem mudanças em relação ao ciclone que está sendo analisado. O comprimento do tubo de saída do gás no interior do ciclone, S , é substituído pelo valor $(S-a/2)$, isto é, a alimentação entra no nível médio da entrada. O comprimento do ciclone usado no modelo é igual ao comprimento do ciclone que está sendo analisado, considerando como ponto inicial a partir da parte inferior do tubo de saída do gás até a parte de saída das partículas. Se esse comprimento é maior do que o “comprimento natural” (equação 01), L , então o comprimento dado por ALEXANDER deve ser usado.

DIETZ, (1981), assume em seu modelo um perfil de concentração radial uniforme. O gás contendo partículas, ao entrar no ciclone, sofre uma variação da sua concentração na direção axial, z , devido à migração das partículas em direção à parede ou devido à troca de partículas entre as regiões.

Na região 1, a variação da concentração das partículas na direção axial é devido à migração das partículas para a parede, onde são coletadas. A equação (53) representa esse balanço.

$$\frac{d}{dz}[Q_1 \cdot n_1] = -2 \cdot \pi \cdot R_w \cdot F_w(z) \quad (53)$$

Onde Q_1 é a taxa de escoamento volumétrico na região 1, F_w é o fluxo de partículas que se dirige para a parede do ciclone, conseqüentemente, F_w deverá ser multiplicado pela área que atravessa, que é dada por $2 \cdot \pi \cdot R_w$.

Na região 2, a variação da concentração das partículas é dada pelas que são coletadas na parede e as que migram para a região central, isto é, uma migração da região 2 para a região 3. A equação (54) apresenta esse balanço.

$$\frac{d}{dz} [Q_v(z) \cdot n_2] = -2 \cdot \pi \cdot R_w \cdot F_w(z) - 2 \cdot \pi \cdot R_v \cdot F_v(z) \quad (54)$$

Onde F_v é o fluxo de partículas da região anular, 2, para a região central, 3, e R_v o raio do vórtice central ascendente. DIETZ considera que:

$$R_v = R_t \quad (55)$$

Na região 3, a taxa volumétrica do gás tem direção ascendente, sendo portanto de sinal contrário ao eixo z . A variação da concentração é dada pelas partículas que são captadas pelo vórtice central, logo:

$$-\frac{d}{dz} [Q_v(z) \cdot n_3] = 2 \cdot \pi \cdot R_v \cdot F_v(z) \quad (56)$$

A velocidade radial da partícula, U_{pw} , na parede do ciclone, onde a velocidade radial do gás é zero, pode ser calculada diretamente do balanço entre a força inercial e a força de arraste (assumindo a lei de Stokes para partícula esférica: $F_d = 6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot R_p \cdot U_{pw}$).

$$6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot R_p \cdot U_{pw}(z) = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \rho_p \cdot R_p^3 \cdot U_{tw}^2 / R_w \quad (57)$$

DIETZ, (1981), assumiu a geometria da partícula como sendo esférica.

Os resultados do modelo de DIETZ, (1981), demonstram uma boa concordância com os resultados obtidos experimentalmente em ciclones. Na equação (57), R_p é o raio da partícula e U_{tw} é a velocidade tangencial do gás, logo:

$$U_{pw}(z) = \frac{2 \cdot \rho_p \cdot R_p^2 \cdot U_{tw}^2}{9 \cdot \mu \cdot R_w} \quad (58)$$

e o fluxo de partículas é dado por:

$$F_w = n_1 \cdot U_{pw} \quad (59)$$

Para calcular a velocidade das partículas no vórtice, pode-se usar a equação (60).

$$U_{pv}(z) = \frac{2 \cdot \rho_p \cdot R_p^2 \cdot U_{tv}^2}{9 \cdot \mu \cdot R_v} \quad (60)$$

Para completar o modelo, só falta especificar o modelo de escoamento dentro do ciclone. DIETZ, (1981), incorporou as seguintes hipóteses ao sistema físico:

- a velocidade radial na região central é constante;

$$U_r(z) = U_{ro} = \frac{Q_1}{2 \cdot \pi \cdot R_v \cdot L} \quad (61)$$

- a taxa de escoamento volumétrica axial é dada por;

$$Q_r(z) = Q_{ro} \cdot \left(1 - \frac{z}{L}\right) \quad (62)$$

- a velocidade tangencial não varia axialmente;
- a dependência radial da velocidade tangencial é dada pela equação (22) de ALEXANDER;

Com todas as equações definidas, as equações (53), (54) e (55) tornam-se um sistema de equações diferenciais ordinárias. A solução analítica é dada por:

$$n_1(z) = n_o \cdot \exp\left[\frac{-2 \cdot \pi \cdot R_w \cdot U_{pw} \cdot (z+D)}{Q_v}\right] \quad (63)$$

$$n_2(z) = n_1(z=0) \cdot [1-z/L]^\delta \quad (64)$$

e

$$n_3 = n_1(z=0) \cdot \left[\frac{A-\delta}{E}\right] \cdot [1-z/L]^\delta \quad (65)$$

onde

$$\delta = \frac{1}{2} \cdot [A-1-E] + \frac{1}{2} \cdot \left[(E-A-1)^2 + 4 \cdot A \cdot E\right]^{1/2} \quad (66)$$

$$A = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_w \cdot L \cdot U_{pw}}{Q_v} \quad (67)$$

e

$$E = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_t \cdot L \cdot U_{pv}}{Q_v} \quad (68)$$

A eficiência do ciclone é dada, finalmente, pela equação (69).

$$\eta(d_p) = 1 - \frac{n_3(z=0)}{n_0} \quad (69)$$

LICHT, (1988), apresenta uma forma que deixa ainda mais fácil a utilização da equação (69). As equações são:

$$\eta = 1 - \left[K_0 - (K_1^2 + K_2)^{0.5} \right] \cdot \exp \left[- \left(\frac{\pi \cdot (2 \cdot S - a) \cdot \rho_p \cdot d_p^2 \cdot V_i}{18 \cdot \mu \cdot a \cdot b} \right) \right] \quad (70)$$

$$K_0 = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \left(\frac{De}{D} \right)^{2 \cdot n} \cdot \left(1 + \frac{9 \cdot \mu \cdot a \cdot b}{\pi \cdot \rho_p \cdot L \cdot d_p^2 \cdot V_i} \right) \right] \quad (71)$$

$$K_1 = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{De}{D} \right)^{2 \cdot n} \cdot \left(1 + \frac{9 \cdot \mu \cdot a \cdot b}{\pi \cdot \rho_p \cdot L \cdot d_p^2 \cdot V_i} \right) \right] \quad (72)$$

$$K_2 = \left(\frac{De}{D} \right)^{2 \cdot n} \quad (73)$$

2.4.4 – Modelo de MOTHERS e LÖFFLER

MOTHERS e LÖFFLER, (1988), apresentam resultados experimentais de curvas de eficiência granulométrica e o desenvolvimento de um modelo matemático para o cálculo da eficiência de coleta em ciclones. A descrição teórica do mecanismo para a remoção de partículas em ciclones foi feito pelo cálculo da trajetória das partículas. As principais conclusões que MOTHERS e LÖFFLER, (1988), obtiveram foram:

- (1) A velocidade tangencial do gás depende somente do raio e não é uma função da coordenada axial do ciclone. A variação radial da velocidade tangencial do

gás é determinada pela geometria do ciclone, pela rugosidade da parede e pela concentração de partículas.

- (2) O transporte de partículas nos ciclones pode ser devido a um processo no qual o movimento difusivo é superposto a um movimento médio. Enquanto o movimento médio das partículas determina o diâmetro de corte do ciclone, a contribuição devido à turbulência influencia a forma da curva de eficiência. Ambos os mecanismos para o transporte de partículas deve ser levado em consideração no projeto de ciclones.
- (3) A superfície que divide o vórtice ascendente e o vórtice descendente tem um papel decisivo na remoção de partículas.
- (4) A reentrada, tanto de partículas que já haviam sido coletadas na parte cônica do corpo do ciclone quanto a de partículas do coletor aumenta a concentração de partículas na parte inferior do ciclone.

No novo modelo proposto por MOTHES e LÖFFLER, (1988), o interior do corpo do ciclone é dividido em quatro regiões (Figura 2.16). As regiões são:

- região de entrada (1);
- região de remoção de partículas com vórtice descendente de gás (2);
- região de remoção de partículas na base do equipamento (3);
- região de remoção de partículas com vórtice ascendente de gás (4);

Os parâmetros fluidodinâmicos que MOTHES e LÖFFLER, (1988) usam no modelo desenvolvido são apresentados a seguir. A velocidade tangencial do gás na parede do ciclone pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\frac{U_{tw}}{U_d} = \frac{1}{\xi \cdot h_z^*} \left[\sqrt{\frac{1}{4} + \xi \cdot h_z^* \cdot \frac{U_{tw}^*}{U_d}} - \frac{1}{2} \right] \quad (74)$$

com ξ igual ao coeficiente de atrito. O intervalo para os valores do coeficiente de atrito proposto por MOTHES e LÖFFLER, (1988), compreende o valor inferior de 0,0065 e o superior de 0,0075. As demais constantes da equação (74) podem ser calculadas pelas seguintes equações:

$$U_d = \frac{Q}{\pi \cdot R_w^2} \quad (75)$$

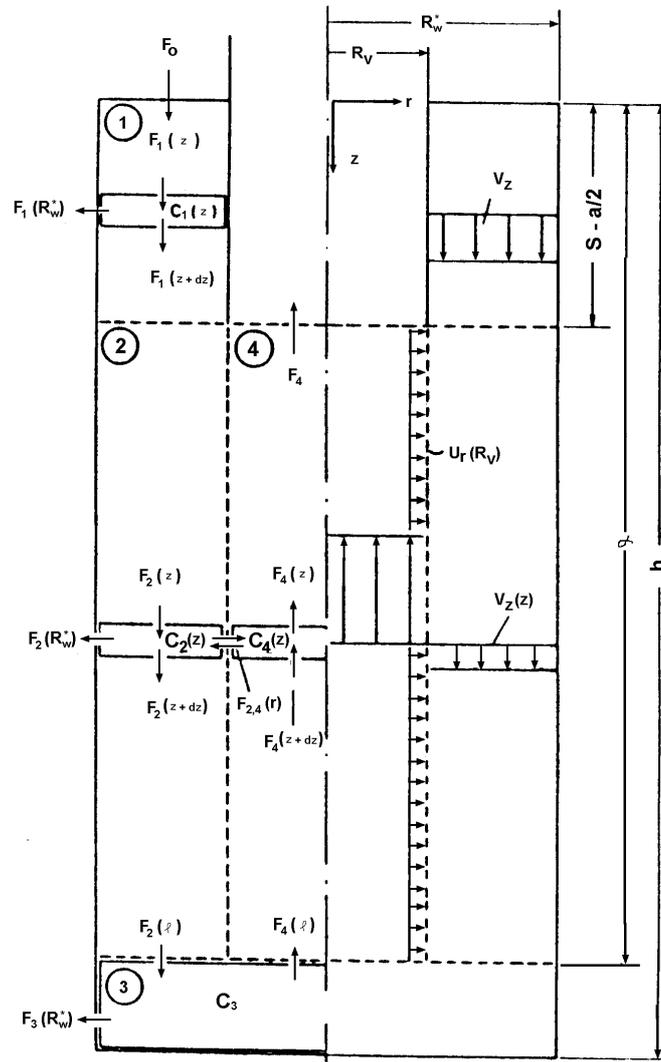


Figura 2.16 – Geometria modificada de um ciclone para análise (MOTHES e LÖFFLER, 1988)

$$\frac{U_{tw}^*}{U_d} = \frac{\pi \cdot R_w^2}{a \cdot b \cdot \beta^*} \quad (76)$$

$$\beta^* = -0,204 \cdot \frac{b}{R_w} + 0,889 \quad (77)$$

$$h_z^* = \frac{a}{R_w} \cdot \left[\frac{2 \cdot \pi - \arccos\{(b/R_w - 1)\}}{2 \cdot \pi} - 1 \right] + \frac{h_z}{R_w} \quad (78)$$

Para o cálculo do valor de h_z da equação (78), deve-se analisar a Figura 2.17.

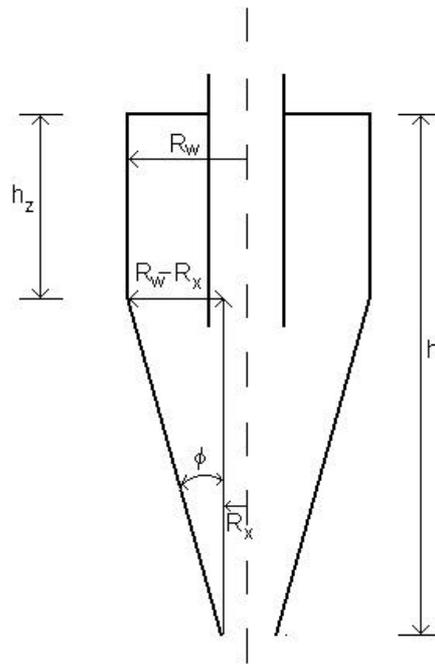


Figura 2.17 – Figura para a dedução do valor de h_z .

De acordo com a Figura 2.17, tem-se:

$$\tan(\phi) = \frac{R_w - R_x}{h - h_z} \quad (79)$$

ou ainda

$$h_z = h - \frac{(R_w - R_x)}{\tan(\phi)} \quad (80)$$

O valor de R_x equivale ao raio de saída do duto inferior, isto é, $B/2$. Pode-se agora calcular a dependência radial da velocidade tangencial usando a velocidade tangencial na parede do ciclone, U_{tw} .

$$U_t = \frac{U_{tw}}{\frac{r}{R_w} \left[1 + Da \left(1 - \frac{r}{R_w} \right) \right]} \quad (81)$$

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

$$Da = \frac{U_{tw}}{U_d} \left(\xi + \frac{\xi}{\text{sen}(\phi)} \right) \quad (82)$$

A velocidade radial do gás nas proximidades das paredes pode ser assumida como sendo desprezível.

$$U_r(R_w) = 0 \quad (83)$$

Mas assume um valor constante no vórtice central em toda a altura do ciclone, e esse valor pode ser calculado pela equação (84).

$$U_r(R_v) = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot R_v \cdot (H - S)} \quad (84)$$

onde R_v é o raio do vórtice, sendo igual a $De/2$.

MOTHES e LÖFFLER, (1988), substituem a geometria cone-cilindro do ciclone por uma geometria cilíndrica, entretanto, o volume total do ciclone foi mantido o mesmo para que o tempo de residência não fosse afetado. No modelo, isso não foi realizado pela alteração da altura do ciclone, H , mas sim pela mudança do raio do ciclone, R_c , para um novo valor dado por R_w^* .

$$\text{Volume do ciclone} = V_k = \pi \cdot R_w^* \cdot H \quad (85)$$

O volume do ciclone cone-cilindro é calculado pela seguinte equação:

$$V_k = \frac{\pi}{3} \cdot (H - h_z) \cdot (R_w^2 + R_x^2 + R_w \cdot R_x) + \pi \cdot R_w^2 \cdot h_z \quad (86)$$

A velocidade axial do gás é calculada pela seguinte expressão:

$$U_z(z) = \frac{Q \cdot (H - z)}{\pi \cdot (R_w^{*2} - R_v^2) \cdot (H - S)} \quad (87)$$

O fluxo volumétrico na direção axial é dado por:

$$Q_z = Q \cdot \frac{(H-z)}{(H-S)} \quad (88)$$

No cálculo da variação axial da concentração das partículas no interior do ciclone, MOTHERS e LÖFFLER, (1988), assumiram uma perfeita mistura radial em cada região do modelo. As partículas escoam dentro do separador com uma concentração n_o a uma taxa de escoamento volumétrico Q_{vo} .

➤ Região de entrada (1).

Na região de entrada do ciclone, as partículas movem-se em fluxo descendente com a mesma velocidade do gás e uma certa quantidade é coletada pela parede do ciclone. Um balanço material fornece:

$$\frac{d}{dz} [Q_{vo} \cdot c_1(z)] = -2 \cdot \pi \cdot R_w^* \cdot F_1(R_w^*) \quad (89)$$

onde $F_1(R_w^*)$ é o fluxo de partículas em direção à parede do ciclone (geometria modificada) na região 1, e pode ser calculado da seguinte maneira:

$$F_1(R_w^*) = w_t(R_w^*) \cdot c_1(z) \quad (90)$$

na equação (75), w_t é a velocidade terminal das partículas e nas vizinhanças da parede pode ser calculada pela seguinte equação:

$$w_t(R_w^*) = \frac{(\rho_p - \rho_g) \cdot d_p^2 \cdot U_{tw}(R_w^*)}{18 \cdot \mu \cdot R_w^*} \quad (91)$$

➤ Região de remoção de partículas com vórtice descendente de gás (2)

A concentração de partículas nessa região (2) é determinada pela deposição de partículas nas paredes e pela troca difusiva e convectiva com a região 4. Um balanço de massa fornece:

$$\frac{d}{dz} [Q_z \cdot c_2(z)] = -2 \cdot \pi \cdot R_w^* \cdot F_2(R_w^*) + 2 \cdot \pi \cdot R_v \cdot F_{2,4}(R_v) \quad (92)$$

o fluxo de partículas em direção à parede $F_2(R_w^*)$, é dado novamente por:

$$F_2(R_w^*) = w_t(R_w^*) \cdot c_2(z) \quad (93)$$

O termo $F_{2,4}$ representa a troca difusiva e convectiva de partículas entre as regiões 2 e 4. A direção do fluxo convectivo depende se a velocidade terminal das partículas é maior ou menor do que a velocidade radial do gás no vórtice central, $U_r(R_v)$. O fluxo difusivo de partículas é determinado pelo gradiente de concentração entre essas duas regiões (2 e 4). A diferença entre os dois raios, $R_w^* - R_v$, foi escolhido como uma distância característica para considerar esse efeito. O fluxo difusivo de partículas depende do coeficiente de difusão.

$$F_{2,4}(R_v) = -D_p \cdot \frac{c_2(z) - c_4(z)}{R_w^* - R_v} + \{w_t(R_v) - U_r(R_v)\} \cdot c_4(z) \quad (94)$$

A equação (94) é válida quando $w_t(R_v) \geq U_r(R_v)$. Quando a velocidade radial do gás é maior do que a velocidade terminal das partículas, $w_t(R_v) < U_r(R_v)$, $F_{2,4}$ é calculado pela equação (95).

$$F_{2,4}(R_v) = -D_p \cdot \frac{c_2(z) - c_4(z)}{R_w^* - R_v} + \{w_t(R_v) - U_r(R_v)\} \cdot c_2(z) \quad (95)$$

e a velocidade terminal pode ser obtida pela equação (96).

$$w_t(R_v) = \frac{(\rho_p - \rho_g) d_p^2 \cdot U_{iv}^2(R_v)}{18 \cdot \mu \cdot R_v} \quad (96)$$

➤ Região de remoção de partículas na base do equipamento (3)

Essa região de remoção de partículas é caracterizada, por um lado, pela reentrada das partículas que já foram coletadas, e por outro lado, pela mistura radial e axial quase perfeita das partículas. O balanço de massa nessa região fornece:

$$F_2(\ell) \cdot \pi \cdot (R_w^{*2} - R_v^{*2}) - F_4(\ell) \cdot \pi \cdot R_w^{*2} - F_3(R_w^*) \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_w^* \cdot (H - \ell) = 0 \quad (97)$$

O fluxo de partículas $F_3(R_w^*)$ é composto das partículas depositadas na parede e por aquelas que são retiradas novamente das paredes.

$$F_3(R_w^*) = w_t(R_w^*) \cdot c_3 - \frac{\dot{m}_w}{2 \cdot \pi \cdot R_w^* \cdot (H - \ell)} \quad (98)$$

onde \dot{m}_w é a taxa mássica das partículas que são rearrastadas. Assumindo que 10% do fluxo gasoso atravessa a região de remoção de partículas (3), a próxima expressão fornece o comprimento característico, ℓ do modelo da geometria modificada.

$$\ell = H - \frac{H - S}{10} \quad (99)$$

➤ Região de remoção de partículas com vórtice ascendente de gás (4)

O balanço de massa sobre essa região é dado por:

$$\frac{d}{dz} [Q_v(z) \cdot c_4(z)] = -2 \cdot \pi \cdot R_v \cdot F_{2,4}(R_v) \quad (100)$$

e o fluxo de partículas $F_{2,4}(R_v)$ é calculado de acordo com as equações (94) e (95).

As concentrações de partículas na região de entrada (1), assim como na região (3), podem ser calculadas diretamente com a ajuda dos balanços de massa, logo:

$$c_1(z) = c_0 \cdot \exp \left[- \frac{2 \cdot \pi \cdot w_t(R_w^*) \cdot (z - a/2)}{Q} \right] \quad (101)$$

$$c_3 = \frac{c_2(\ell) + \frac{\dot{m}_w}{\left(Q \cdot \frac{(H - \ell)}{(H - S)} \right)}}{1 + \frac{w_t(R_w^*) \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_w^* \cdot (H - \ell)}{\left(Q \cdot \frac{(H - \ell)}{(H - S)} \right)}} \quad (102)$$

Os balanços de massa das regiões (3) e (4) constituem um sistema de equações diferenciais, e a solução geral é apresentada pelas equações (103) e (104).

$$c_2(z) = R_1 \cdot \left(\frac{H-z}{H-S} \right)^{m_1} + R_2 \cdot \left(\frac{H-z}{H-S} \right)^{m_2} \quad (103)$$

$$c_4(z) = R_1 \cdot \left(\frac{m_1 - A_1}{B_1} \right) \left(\frac{H-z}{H-S} \right)^{m_1} + R_2 \cdot \left(\frac{m_2 - A_1}{B_1} \right) \left(\frac{H-z}{H-S} \right)^{m_2} \quad (104)$$

com

$$m_{1,2} = \frac{A_1 + D_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{A_1 + D_1}{2} \right)^2 - (A_1 \cdot D_1 - B_1 \cdot C_1)} \quad (105)$$

Na equação 105, m_1 é a soma da primeira parte com a segunda e m_2 é a primeira parte menos a segunda. Os valores de A_1 , B_1 , C_1 e D_1 podem ser calculados de acordo com as seguintes condições:

❖ Se $w_t(R_v) \geq U_r(R_v)$:

$$A_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_w^* \cdot w_t(R_w^*) \cdot (H-S)}{Q} + \frac{2 \cdot \pi \cdot R_v \cdot D_p \cdot (H-S)}{Q \cdot (R_w^* - R_v)} - 1 \quad (106)$$

$$B_1 = - \frac{2 \cdot \pi \cdot R_v \cdot D_p \cdot (H-S)}{Q \cdot (R_w^* - R_v)} - \frac{2 \cdot \pi \cdot R_v \cdot [w_t(R_v) - U_r(R_v)] \cdot (H-S)}{Q} \quad (107)$$

$$C_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_v \cdot D_p \cdot (H-S)}{Q \cdot (R_w^* - R_v)} \quad (108)$$

$$D_1 = B_1 - 1 \quad (109)$$

❖ Se $w_t(R_v) < U_r(R_v)$:

$$A_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_w^* \cdot w_t(R_w^*) \cdot (H-S)}{Q} - \frac{2 \cdot \pi \cdot R_v \cdot [w_t(R_v) - U_r(R_v)] \cdot (H-S)}{Q} + \frac{2 \cdot \pi \cdot R_v \cdot D_p \cdot (H-S)}{Q \cdot (R_w^* - R_v)} - 1 \quad (110)$$

$$B1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_v \cdot D_p \cdot (H - S)}{Q \cdot (R^* - R_v)} \quad (111)$$

$$C1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_v \cdot D_p \cdot (H - S)}{Q \cdot (R_w^* - R_v)} - \frac{2 \cdot \pi \cdot R_v \cdot [w_t(R_v) - U_t(R_v)] \cdot (H - S)}{Q} \quad (112)$$

$$D1 = B - 1 \quad (113)$$

Com as seguintes condições de contorno:

$$c_2(S) = c_1(S)$$

$$c_4(\ell) = c_3$$

as constantes R1 e R2 tornam-se:

$$R_1 = c_1(S) - R_2 \quad (114)$$

$$R_2 = \frac{c_1(S) + \frac{G1}{\left[\left(\frac{H-\ell}{H-S} \right)^{m_2} \left(1 - \frac{E1 \cdot (m_1 - A1)}{B1} \right) \right]}}{1 - \frac{\left(\frac{B1 - E1 \cdot (m_2 - A1)}{B1 - E1 \cdot (m_1 - A1)} \right)}{\left(\frac{H-\ell}{H-S} \right)^{m_1 - m_2}}} \quad (115)$$

com

$$G1 = \frac{\dot{m}_w}{\left[Q \cdot \left(\frac{H-\ell}{H-S} \right) \right]} \quad (116)$$

$$E1 = 1 + \frac{w_t(R_w^*) \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_w^* \cdot (H - \ell)}{Q \cdot \left(\frac{H-\ell}{H-S} \right)} \quad (117)$$

A eficiência de separação é dada pela razão entre a massa de partículas de um determinado diâmetro, d_p , coletadas e a massa de partículas do mesmo diâmetro presentes na alimentação.

$$\eta(d_p) = 1 - \frac{c_4(S)}{c_0} \quad (118)$$

Na equação (118), c_0 é a concentração de partículas na entrada e $c_4(S)$ é a concentração para a partícula de um mesmo diâmetro na entrada do tubo de saída, calculada pela equação (104).

2.4.5 – Modelo de LI e WANG

LI e WANG, (1989), desenvolvem um modelo matemático para descrever o movimento de partículas no ciclone. Não assumem uma velocidade radial da partícula constante nem um perfil radial de concentração uniforme, para as partículas que não foram coletadas dentro do ciclone.

O modelo inclui o salto de partículas ou a reentrada e a difusão turbulenta para as partículas próximas à parede do ciclone. A eficiência de coleta para partículas de qualquer tamanho, para ciclones de qualquer geometria pode ser calculada, diretamente, pela expressão resultante.

Para simplificar a análise, LI e WANG (1989), modificam a geometria do ciclone convencional (cone-cilindro) para a de um cilindro. Essa nova geometria é apresentada na Figura 2.18. Nessa nova geometria, tanto o raio do ciclone quanto o raio do tubo de saída do gás são mantidos os mesmos. O comprimento do tubo de saída do gás no interior do ciclone, S , é modificado para $(S-a/2)$.

Desprezando-se a difusão turbulenta através do interior do fluido no ciclone, assim como a velocidade de deposição de partículas na direção z , e tendo como base as equações da continuidade e conservação de partículas, um novo modelo de distribuição de partículas no ciclone é dado por:

$$U_{rp} \cdot \frac{\partial c}{\partial r} + U_t \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial c}{\partial \theta} = 0 \quad (119)$$

onde a equação (119) é válida no seguinte intervalo : $0 \leq \theta \leq \theta_1$.

Na equação (119), U_r é a velocidade radial da partícula, θ é uma coordena angular e U_t é a velocidade tangencial do gás. Com a consideração da difusão turbulenta e salto de partículas, as condições de contorno são:

$$c = c_0 \quad \text{em} \quad \theta = 0$$

$$Dr \cdot \frac{\partial c}{\partial r} = (1 - \epsilon) \cdot U_r \cdot c \quad \text{em} \quad r = D/2$$

Onde Dr é o coeficiente de difusão turbulenta, que pode ser calculado pela seguinte equação:

$$Dr = 0,052 \cdot R^* \cdot U_t \cdot \sqrt{f/8} \quad (120)$$

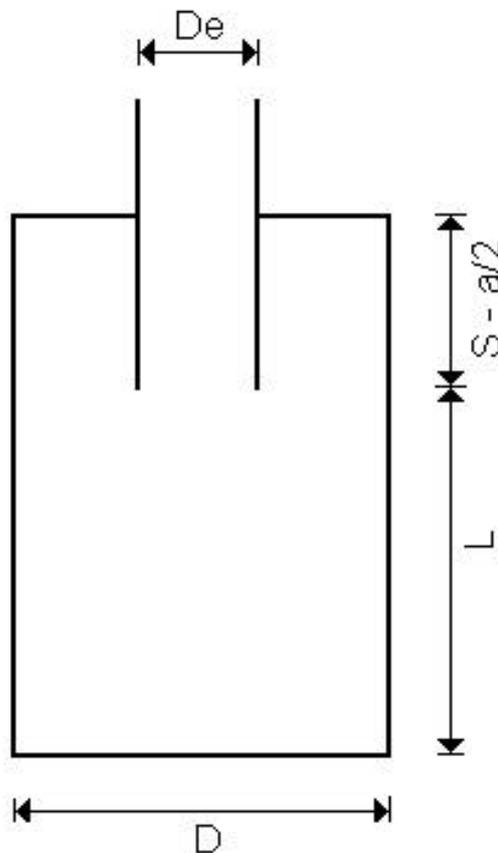


Figura 2.18 – Geometria do ciclone modificado por LI e WANG (LI e WANG, 1989)

Na equação (120), U_t é a velocidade tangencial do gás, f o fator de atrito, que é assumido como sendo igual a 0,02 e R^* pode ser calculado pela equação (121).

$$R^* = \frac{D - De}{2} \quad (121)$$

Para resolver a equação (119) precisa-se de expressões que forneçam a dependência da velocidade radial da partícula e da velocidade tangencial do gás como função do raio r . A velocidade radial da partícula, U_{rp} , pode ser calculada diretamente de um balanço entre a força centrífuga devido ao fluxo gasoso, e a força de arraste (assumindo a lei de Stokes) devido à velocidade radial do gás.

$$U_{rp}(r) = \frac{(\rho_p - \rho_g) d_p^2 \cdot U_t}{18 \cdot \mu \cdot r} \quad (122)$$

A dependência radial da velocidade tangencial é calculada usando as equações (11) e (21) propostas por ALEXANDER.

$$U_t(r) = \frac{(1-n) \cdot Q}{b \cdot \left[\left(\frac{D}{2} \right)^{1-n} - \left(\frac{De}{2} \right)^{1-n} \right] \cdot r^n} \quad (123)$$

A distribuição de concentração é então obtida, substituindo-se as equações (122) e (123) na equação (119).

$$c(r, \theta) = \frac{c_0 \cdot (D/2 - De/2) \cdot \exp \left[-\lambda \cdot \left(\theta - \frac{r^{1+n}}{k \cdot (1+n)} \right) \right]}{\int_{De/2}^{d/2} \exp \left(\frac{r^{1+n}}{k \cdot (1+n)} \right) dr} \quad (124)$$

onde

$$k = \frac{(1-n) \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot d_p^2 \cdot Q}{18 \cdot \mu \cdot b \cdot \left[\left(\frac{D}{2} \right)^{1-n} - \left(\frac{De}{2} \right)^{1-n} \right]} \quad (125)$$

e

$$\lambda = \frac{(1-\varepsilon) \cdot k \cdot U_{pw}}{Dr \cdot (D/2)^n} \quad (126)$$

De acordo com a definição de eficiência individual, a eficiência de coleta do ciclone é:

$$\eta = 1 - \frac{c_1(\theta_1)}{c_0} \quad (127)$$

A concentração média das partículas, c_1 , em $\theta=\theta_1$, é:

$$c_1 = c_0 \cdot \exp\{-\lambda \cdot \theta_1\} \quad (128)$$

Então, a expressão resultante da eficiência de coleta para partículas de qualquer tamanho e para ciclones de qualquer geometria é dada por:

$$\eta = 1 - \exp\{-\lambda \cdot \theta_1\} \quad (129)$$

onde

$$\theta_1 = 2 \cdot \pi \cdot \frac{(S+L)}{a} \quad (130)$$

Na equação (130), L é o “comprimento natural” dado pela equação (01). Entretanto, se o “comprimento natural” for maior do que a altura do que (H-S), então L assume o valor de:

$$L = H - S \quad (131)$$

2.5 - Definição e Cálculo da Queda de Pressão

O gás, ao passar por um ciclone, sofre uma queda de pressão, isto é, uma diferença entre a pressão estática do gás no duto de entrada e no duto de saída do ciclone. Segundo CASAL e MARTÍNEZ-BENET, (1983), e LICHT, (1988), alguns fatores que contribuem para a perda de energia são os seguintes :

- ◆ perdas devido à expansão ou compressão do gás quando entra no ciclone.
- ◆ perdas devido ao atrito do gás com as paredes dentro do ciclone
- ◆ perda de energia cinética devido ao movimento em espiral dentro do ciclone.
- ◆ perdas devido ao atrito do gás em movimento rotacional no tubo de saída do gás.

SHEPHERD e LAPPLE (1939), num estudo experimental com vários ciclones, todos de diâmetro (D) igual a 0,3048 m, verificaram a influência de algumas dimensões geométricas na queda de pressão. Na Tabela 2.3 tem-se as conclusões que obtiveram.

Tabela 2.3 – Efeitos de algumas dimensões geométricas dos ciclones que atuam sobre a queda de pressão

Dimensão	Resultado sobre a queda de pressão
Altura da entrada do ciclone (a)	Com um aumento de a , observou-se um aumento da queda de pressão
Largura da entrada do ciclone (b)	Com um aumento de b , observou-se um aumento da queda de pressão
Diâmetro do tubo de saída do gás (De)	Com um aumento de De , observou-se uma diminuição da queda de pressão
Comprimento do tubo de saída do gás no interior do ciclone (S)	Parece não ter grande influência sobre a queda de pressão
Variação no diâmetro do ciclone (D)	Pouca influência sobre a queda de pressão

Os custos de energia devido à queda de pressão (ΔP) representam os maiores custos de operação para os ciclones (DIRGO e LEITH, 1986). Pode-se calcular a potência necessária de um soprador (E_c) pela equação (132).

$$E_c = \frac{Q \cdot \Delta P}{E_f} \quad (132)$$

Onde E_f é a eficiência do soprador. Portanto, para um aumento da queda de pressão, é necessário um soprador de maior potência e, conseqüentemente, tem-se um maior consumo de energia, aumentando-se os custos operacionais.

O valor da queda de pressão sofrida pelo gás, isento de partículas, ao passar por um ciclone pode ser tanto medido experimentalmente quanto calculado. A equação (133) permite o cálculo da queda de pressão.

$$\Delta P = 0,5 \cdot \rho_g \cdot V_i^2 \cdot N_H \quad (133)$$

onde ρ_g é a densidade do gás, V_i é a velocidade de alimentação e N_H é um valor adimensional. Existem muitas equações disponíveis na literatura que permitem prever qual será a queda de pressão de um ciclone estimando um valor para a variável N_H da equação (133).

2.5.1 – Equações Para o Cálculo de N_H

Neste sub-item, muitas vezes as equações são apresentadas pelos autores sem mencionar qual foi o procedimento matemático para obtê-las.

SHEPHERD e LAPPLE (1939), sugerem a equação (134) para o cálculo de N_H

$$N_H = \frac{16.a.b}{D_e^2} \quad (134)$$

CASAL e MARTÍNEZ-BENET, (1983), ao analisarem a influência de algumas proporções geométricas dos ciclones sobre a queda de pressão, concluíram que o comprimento do cone (H-h) não apresenta efeito significativo. Usando de dados publicados na literatura para o escoamento de gás no interior do ciclone (isento de partículas) e análise estatística, CASAL e MARTÍNEZ-BENET, (1983), desenvolveram a seguinte correlação:

$$N_H = 11,3 \cdot \left(\frac{a.b}{D_e^2} \right)^2 + 3,33 \quad (135)$$

O grupo " $0,5 \cdot \rho_g \cdot V_i^2$ " ("*velocity head*"), conhecido como a pressão dinâmica da entrada, foi relacionado com os parâmetros a/D , b/D , De/D , ab/De^2 e os melhores resultados foram obtidos a partir do grupo ab/De^2 .

STAIRMAND (DIRGO e LEITH, 1986), também desenvolveu um conjunto de equações que permitem avaliar o valor de N_H a partir das dimensões do ciclone. Essas equações são apresentadas a seguir.

$$N_H = 1 + 2 \cdot \Phi^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot (D-b)}{De} - 1 \right) + 2 \cdot \left(\frac{4 \cdot a \cdot b}{\pi \cdot De^2} \right) \quad (136)$$

onde:

$$\Phi = \frac{\sqrt{\frac{De}{2 \cdot (D-b)} + \frac{4 \cdot G \cdot A_3}{a \cdot b}} - \sqrt{\frac{De}{2 \cdot (D-b)}}}{\frac{2 \cdot G \cdot A_3}{a \cdot b}} \quad (137)$$

$$A_3 = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - De^2) + \pi \cdot D \cdot h + \pi \cdot De \cdot S + \frac{\pi}{2} \cdot (D+B) \cdot \left[(H-h)^2 + \left(\frac{D-B}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (138)$$

O parâmetro A_3 é a área superficial do ciclone exposta ao movimento giratório do gás e G é um fator com um valor de 0,005.

FIRST (DIRGO e LEITH, 1986), por sua vez, apresenta a seguinte correlação:

$$N_H = \frac{24 \cdot a \cdot b}{De^2} \cdot \left[\frac{D^2}{h \cdot (H-h)} \right]^{1/3} \quad (139)$$

MAROULIS e CREMALIS, (1995), ao desenvolverem um programa de simulação para ciclones com entrada tangencial, usaram a equação (140) para o cálculo do valor de N_H .

$$N_H = \frac{20 \cdot a \cdot b}{De^2} \cdot \left[\frac{S/D}{(H/D) \cdot (h/D) \cdot (B/D)} \right]^{1/3} \quad (140)$$

A equação (139) e a (140) consideram o efeito do comprimento do cone e o comprimento do duto de saída do gás no interior do ciclone, respectivamente, o que segundo SHEPHERD e LAPPLE (1939) e, ainda, CASAL e MARTÍNEZ-BENET, (1983), não tem efeito sobre a queda de pressão. Essa verificação poderá ser feita durante a análise dos resultados de queda de pressão.

CONSTANTINESCU, (1984), apresenta a equação (141) para ciclones com entrada tangencial.

$$N_H = \frac{4 \cdot a \cdot b}{(D-2 \cdot b)^2} \quad (141)$$

Segundo DIRGO e LEITH, (1986), o modelo de BARTH apresenta as seguintes equações para o cálculo de N_H :

$$N_H = \left(\frac{v_t}{v_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{4 \cdot a \cdot b}{\pi \cdot De^2} \right)^2 \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_0) \quad (142)$$

$$\frac{v_t}{v_0} = \frac{(De/2) \cdot (D-b) \cdot \pi}{(2 \cdot a \cdot b \cdot \tau^*) + h^* \cdot (D-b) \cdot \lambda \cdot \pi} \quad (143)$$

$$\tau^* = 1 - 1,2 \cdot (b/D) \quad (144)$$

A altura h^* depende da relação entre a o diâmetro do tubo de saída do gás e o diâmetro da saída do pó do ciclone. Se $De \leq B$, a equação usada para o cálculo de h^* é a (145).

$$h^* = (h - S) \quad (145)$$

Se $De > B$, a equação usada para o cálculo de h^* é a (146).

$$h^* = \frac{(H-h) \cdot (D-De)}{(D-B)} + (h - S) \quad (146)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{De}{D} \cdot \left[\frac{1}{\left(1 - (v_t/v_0) \cdot (2/De) \cdot h^* \cdot \lambda \right)^2} - 1 \right] \quad (147)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{4,4}{(v_t/v_0)^{2/3}} + 1 \quad (148)$$

O termo l é o fator de fricção de BARTH, com um valor estimado de 0,02.

2.5.2 – Equação de Cremasco e Nebra Para a Predição da Queda de Pressão.

CREMASCO e NEBRA (1992), desenvolveram uma correlação para o cálculo da queda de pressão, para ciclones com entrada tangencial, considerando a influência dos dutos de entrada e saída dos gases desses equipamentos. CREMASCO e NEBRA,

(1992), fazem as suas considerações partindo da equação de Navier-Stokes escrita em coordenadas cilíndricas para a coordenada r e considera as componentes axial e radial desprezíveis face à componente tangencial. Admitem que a ação do campo centrífugo é maior do que a do campo gravitacional e que o efeito da viscosidade do gás não é significativo. Assim, obtiveram a equação (149).

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\rho_g \cdot U_t^2}{r} \quad (149)$$

A distribuição da velocidade na região compreendida entre a periferia das paredes do ciclone até a interface onde o movimento do gás começa a se comportar analogamente à rotação de um corpo rígido, é dada pela relação obtida por ALEXANDER (1949) (equação 10).

$$U_t \cdot r^n = \text{constante} = k \quad (10)$$

Substituindo (10) em (149) tem-se:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\rho_g \cdot (k \cdot r^{-n})^2}{r} \quad (150)$$

$$\frac{dp}{dr} = \rho_g \cdot k^2 \cdot r^{-2 \cdot n - 1} \quad (151)$$

Integrando a equação (151) de r_1 a r_2 , obtém-se a queda de pressão.

$$\Delta P = \rho_g \cdot k^2 \cdot \int_{r_1}^{r_2} r^{-2 \cdot n - 1} \cdot dr \quad (152)$$

O valor de r_1 , corresponde ao raio de uma seção transversal na qual a pressão é igual à pressão de saída do ciclone. Para ciclones com a saída de gás aberto para a atmosfera, r_1 tem um valor entre 0,60 e 0,65 de R_i (YUU *et al.*, 1978). CREMASCO e NEBRA, (1992), utilizaram um valor de 0,65.

$$r_1 = \frac{\gamma \cdot De}{2} \quad (153)$$

Com γ igual a 0,65. YUU *et al.*, (1978), encontraram que, se a saída do gás não está aberta para a atmosfera, então r_1 deve ter um valor de $0,78.R_t$. E, o outro limite de integração, r_2 , corresponde ao raio da parte cilíndrica do ciclone: $R_w = D/2$. Desse modo, chega-se à equação (154).

$$\Delta P = \frac{\rho_g \cdot k^2 \cdot 2^{2n}}{2 \cdot n \cdot D^{2n}} \left(1 - \left(\frac{D}{\gamma \cdot De} \right)^{2n} \right) \quad (154)$$

Para a resolução da equação (154) precisa-se determinar os valores de k e n . As equações usadas por CREMASCO e NEBRA, (1992), foram:

$$k = V_i \cdot \left(\frac{U_{tw}}{U_d} \right) \cdot Ac \cdot (D/2)^2 \quad (155)$$

com a razão U_{tw}/U_d sendo calculada pela equação (74). O termo Ac pode ser calculado pela equação (156).

$$Ac = \frac{4 \cdot a \cdot b}{\pi \cdot D^2} \quad (156)$$

Para o cálculo de n , pode-se usar a equação (157) e para Da a equação (82).

$$n = \frac{\log(R^* \cdot (1 + Da \cdot (1 - R^*)))}{\log(R^*)} \quad (157)$$

onde

$$R^* = \frac{\gamma \cdot De}{D} \quad (158)$$

Devido aos bons resultados de outras correlações que utilizam o grupo adimensional $(a \cdot b / De^2)$ no cálculo da queda de pressão, CREMASCO e NEBRA, (1992), combinaram esse grupo com a equação (154) obtendo a equação (159).

$$\Delta P = 2,332 \left(\frac{a \cdot b}{De^2} \right)^{0,665} \left(\frac{\rho_g \cdot k^2 \cdot 2^{2n}}{2 \cdot n \cdot D^{2n}} \right) \left(\left(\frac{D}{\gamma \cdot De} \right)^{2n} - 1 \right) \quad (159)$$

Se todas as variáveis da equação (159) forem usadas no sistema S.I de unidades, obtém-se a queda de pressão em Pa (Pascal).

2.5.3 – Efeito da Concentração de Alimentação na Queda de Pressão

SHEPHERD E LAPPLE, (1939), estudaram o comportamento da queda de pressão de ciclones quando submetidos a diferentes concentrações de sólidos. Ao alimentarem o ciclone com uma concentração de 0,0046 a 0,0069 kg/m³, a queda de pressão foi 7% menor do que sem a alimentação de sólidos. Para uma concentração de 0,046 a 0,069 kg/m³, a queda de pressão foi reduzida em 16% em relação a queda de pressão sem alimentação de sólidos.

YUU *et al.*, (1978), investigaram a redução na queda de pressão devido à concentração de sólidos na alimentação. Para esse estudo, usaram um ciclone de dimensões apresentadas na Tabela 2.4. A configuração não é parecida com nenhuma conhecida.

Tabela 2.4 - Dimensões do ciclone utilizado por YUU *et al.*, (1978), (D=0,296 m).

De/D	S/D	h/D	H/D	a/D	b/D
0,513	0,5405	0,743	2,095	0,3716	0,186

A faixa de concentração de sólidos estudada compreendeu o intervalo de 0 a 0,071 kg/m³. As velocidades de alimentação ficaram entre 5 e 25 m/s e foram usados três espécies de partículas: Pó de PVC com uma densidade de 1,33 g/cm³; “Fly Ash” com densidade de 2,00 g/cm³ e Pó de Manganês, com densidade de 4,37 g/cm³.

As observações de YUU *et al.*, (1978), retratam uma diminuição de 30% no valor da queda de pressão, até mesmo, para concentrações extremamente baixas de 0,0002 kg/m³. Na faixa de 0,0015 a 0,05 kg/m³, a razão entre a queda de pressão do ciclone com o gás contendo partículas e a queda de pressão do ciclone com o gás isento de partículas na mesma velocidade de alimentação, era independente da concentração de sólidos. Mas voltava a decrescer para valores acima de 0,050 kg/m³. A Figura 2.19 apresenta os resultados encontrados por YUU *et al.*, (1978), que mostra o efeito da concentração sobre a queda de pressão para uma velocidade de alimentação constante.

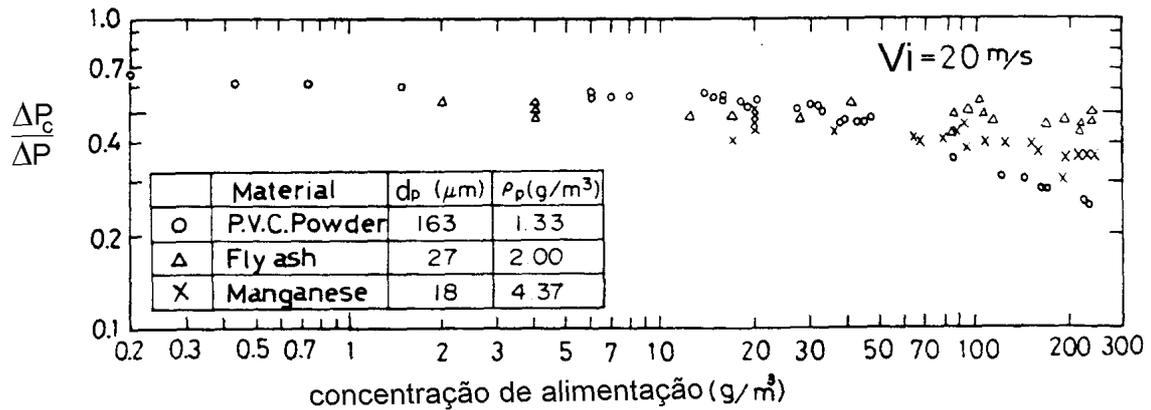


Figura 2.19 – Efeito da concentração de sólidos na queda de pressão, YUU et al., 1978.

Fica evidente, pela análise da Figura 2.19, que mesmo para pequenas concentrações, existe uma redução na queda de pressão.

Observações feitas, do modelo de escoamento gás-partículas em um ciclone transparente feito de acrílico, indicaram que a largura da faixa de partículas que juntam-se para percorrer a parede do ciclone pareceu ser constante até $0,05 \text{ kg}/\text{m}^3$, embora a espessura da faixa de partículas tenha aumentado na direção radial. A Figura 2.20 ilustra essas faixas de partículas em escoamento. Para concentrações em torno de $0,05 \text{ kg}/\text{m}^3$, a trajetória das partículas subitamente expandiu-se e cobriu toda a parede cilíndrica do ciclone.

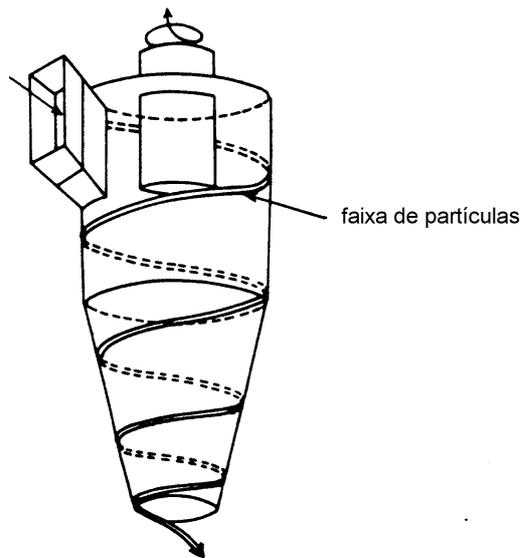


Figura 2.20 – Modelo de escoamento de partículas no interior de um ciclone (YUU et al., 1978)

YUU *et al.*, (1978), também estudaram o efeito da concentração de sólidos na velocidade tangencial no interior do ciclone. Segundo os autores, a principal razão para a redução de pressão é o aumento do atrito na parede do ciclone diminuindo a velocidade tangencial. A Figura 2.21 apresenta esses resultados.

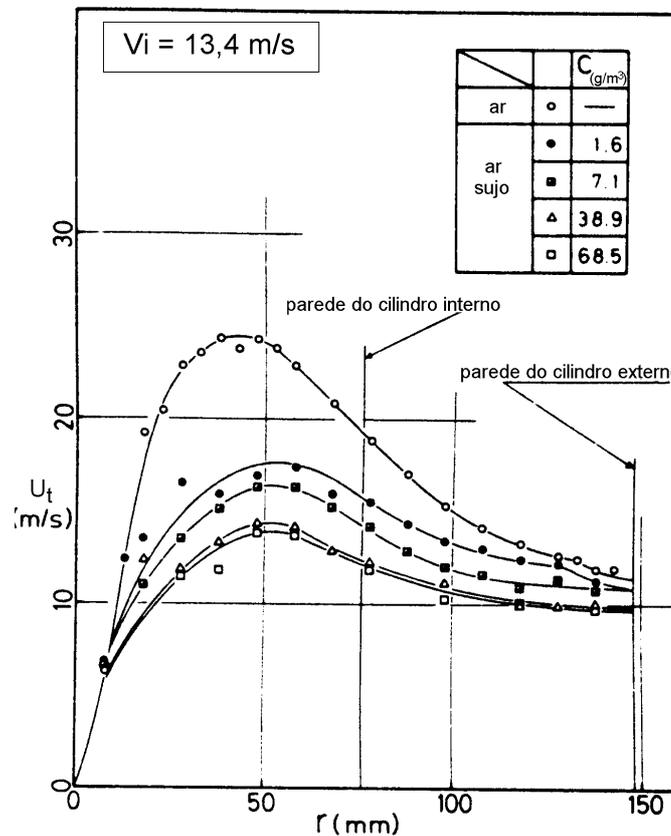


Figura 2.21 – Efeito da concentração de sólidos na velocidade tangencial (YUU *et al.*, 1978)

A queda de pressão também parece ser influenciada pelas características do material alimentado, já que houve uma redução na queda de pressão com as diferentes partículas estudadas por YUU *et al.*, (1978).

Ainda, para examinar o efeito das partículas unidas escoando junto à parede do ciclone, YUU *et al.*, (1978), revestiram a parede do ciclone com um líquido pegajoso e partículas de PVC escoando juntamente com um gás ficaram aderidas. Então, ar puro foi alimentado, e a distribuição de velocidades tangencial foi medida e apresentou valores menores, quando comparados com a parede do ciclone limpa. Concluíram que a principal razão para a redução de queda de pressão é o aumento do atrito, devido ao movimento das partículas junto à parede, reduzindo a velocidade tangencial.

HOFFMANN *et al.*, (1991), além de estudarem o efeito da concentração de alimentação na eficiência de coleta, avaliaram também o efeito sobre a queda de pressão. Na Figura 2.22, tem-se os resultados encontrados para a variação da queda de pressão em função da concentração da alimentação para o ciclone de geometria I, como descrito na Tabela 2.2.

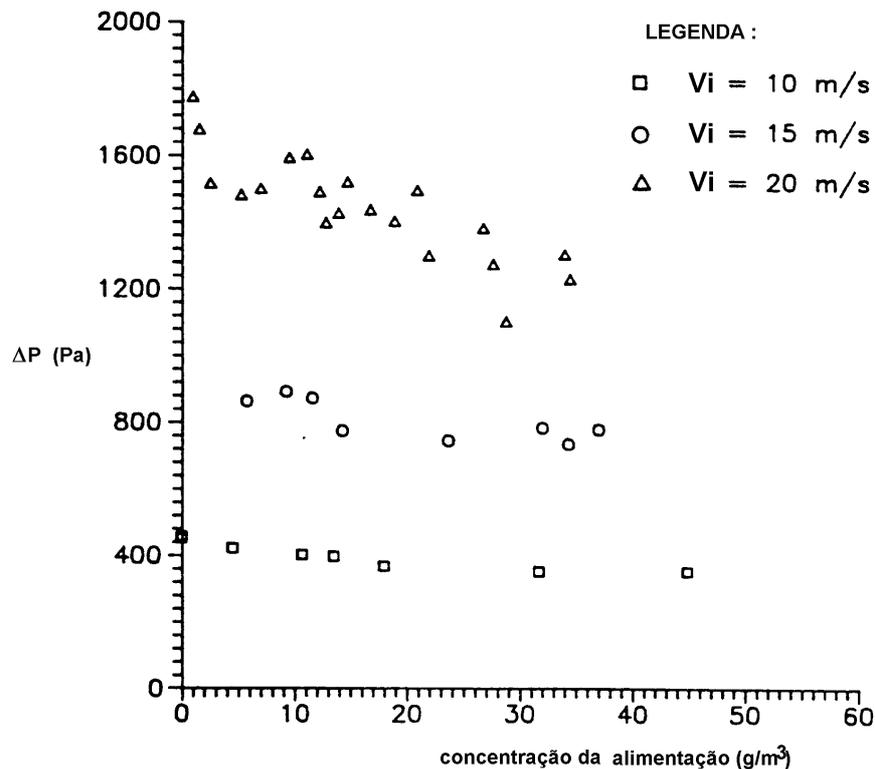


Figura 2.22 – Medidas de queda de pressão em função da concentração de alimentação (HOFFMANN *et al.*, 1991)

HOFFMANN *et al.*, (1992), estudaram a influência da concentração de sólidos em quatro diferentes modelos de ciclones, todos com $D=0,45\text{m}$, com as operações sendo realizadas sob condições ambientes, velocidade de alimentação de 15 m/s e uma alimentação de 0,0005 a 0,13 kg/m^3 . Um forte decréscimo da queda de pressão com o aumento da concentração de sólidos na alimentação é observado para cada geometria estudada. Observaram uma redução de 30% na queda de pressão a uma alimentação de 0,1 kg/m^3 . Os dados experimentais obtidos foram ajustados pela seguinte equação:

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P} = 1 - \alpha_H \cdot C^{\beta_H} \quad (160)$$

Onde: ΔP_c é a queda de pressão para o gás com partículas; C é a concentração de sólidos na entrada do ciclone, em kg/m^3 ; ΔP é a queda de pressão para o gás sem partículas e α_H e β_H são constantes. HOFFMANN *et al.*, (1992), usaram um valor de 1,26 e 0,6 para α_H e β_H , respectivamente.

SCHEID, (1992), também comprovou a redução de queda de pressão com o aumento da concentração de sólidos, trabalhando com alumina, quartzo e carvão em um ciclone Stairmand com configuração de “alta eficiência”. Os resultados experimentais de queda de pressão foram normalizados e um ajuste forneceu a equação (161).

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P} = \frac{1}{1 + \alpha_s \cdot C^{\beta_s}} \quad (161)$$

Onde C é a concentração de sólidos na alimentação, em g/m^3 , α_s e β_s são constantes obtidas do ajuste experimental que valem, para as condições do trabalho de SCHEID, 0,0248 e 0,831, respectivamente.

Pelo que foi exposto neste item, percebe-se que todos os autores pesquisados concordam no fato de que a queda de pressão sofre uma redução em seu valor quando ocorre um aumento da concentração de sólidos na alimentação.

2.5.4 – Efeito de um Cilindro Coletor Sobre a Queda de Pressão de Ciclones .

HOFFMANN *et al.*, (1996), investigaram, através de simulações numéricas, a influência da presença de um sistema coletor de sólidos no ciclone. O sistema coletor teve influência significativa no modelo de escoamento, quando incluído na simulação. Em termos de eficiência de coleta, a separação de partículas foi melhor com a inclusão do sistema de coleta na simulação. O ciclone utilizado na simulação foi o Stairmand de “alta eficiência”.

MEYER, (1998), verificou, através de simulações numéricas, a influência do sistema de coleta de sólidos na queda de pressão total do ciclone. Utilizou em suas simulações: um ciclone Lapple com D igual a 0,1020 m e velocidade de alimentação de 15,2 m/s e um ciclone Stairmand, com D igual a 0,2960 m e velocidade de alimentação de 9,8 m/s.

Os resultados mostraram que a queda de pressão total entre a entrada e a saída do gás, sofre uma influência significativa do escoamento do interior do coletor. O efeito do sistema coletor é de redução da queda de pressão de ciclones. MEYER, (1998), atribui esse fato devido a atenuação do escoamento vorticial no interior do ciclone.

Como os resultados encontrados são de simulações, tal comportamento dos ciclones quanto a queda de pressão pode ser estudado experimentalmente.

2.6 – Estatística para Experimentos

Ao usar alguns métodos estatísticos no desenvolvimento de um trabalho experimental, deseja-se avançar de forma coerente na pesquisa de quais as variáveis que realmente influenciam no processo estudado.

Sabe-se que o melhor resultado pode ser encontrado ao se variar todas as variáveis ao mesmo tempo, a razão para isso é que elas podem se influenciar mutuamente, e o valor ideal para uma delas pode depender do valor de outra. Este comportamento que recebe o nome de iteração entre as variáveis, é um fenômeno que ocorre com muita frequência. Usando-se de *planejamentos experimentais* baseados em procedimentos estatísticos pode-se extrair do sistema em estudo o máximo de informações úteis, fazendo um número mínimo de experimentos. A essência de um bom planejamento consiste em planejar um experimento de forma que ele seja capaz de fornecer exatamente o tipo de informação que procuramos. Conseqüentemente, um dos problemas mais comuns é determinar a influência de uma ou mais variáveis sobre a variável de interesse, ou seja, como a resposta está sendo influenciada pela combinação das variáveis que estão sendo manipuladas. Para isso, pode-se usar do método de *planejamento fatorial* apresentado por NETO *et al.*, (1985).

Para executar um planejamento fatorial é preciso, em primeiro lugar, especificar os *níveis* em que cada fator será estudado. Os *níveis* são na verdade os valores que as variáveis que estão sendo manipuladas assumem. Um planejamento fatorial requer a execução de experimentos para todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores. Isso é feito por meio dos ensaios experimentais que são necessários. Para estudar um efeito sobre a resposta é preciso fazê-lo variar e observar o resultado dessa variação. Isso obviamente implica na realização de ensaios em pelo menos dois níveis desse fator

(NETO *et al.*, 1995). Um planejamento fatorial em que todas as variáveis são estudadas em apenas dois níveis é portanto o mais simples de todos eles. Havendo k fatores, isto é, k variáveis controladas pelo experimentador, o planejamento de dois níveis irá requerer a realização de 2^k ensaios diferentes, sendo chamado por isso de *planejamento fatorial* 2^k .

Para cada variável, deve-se escolher dois níveis de valores, obviamente um maior e um menor. Ao maior será atribuído o sinal “+” e ao menor o sinal “-”. Isso será importante na hora de construir a *matriz de planejamento*. É importante que as experiências sejam feitas em duplicata para trabalhar-se com um valor médio da resposta procurada. Isto permitirá obter uma estimativa do erro experimental associado à determinação de uma resposta individual. A realização de repetições deve refletir também a variabilidade do processo em toda a faixa de estudo, e não apenas numa determinada combinação de níveis. A partir das repetições realizadas, pode-se obter uma estimativa do erro experimental. A extensão deste erro será importante para decidir se existem ou não efeitos estatisticamente significativos dos fatores sobre a resposta.

Um método para estimar o erro experimental, é avaliar qual a significância estatística dos efeitos de interação entre as variáveis. NETO *et al.*, (1995), recomenda que a repetição dos experimentos deva ser autêntica, isto é, ao realizar o mesmo experimento por uma segunda vez, deve-se realizar todas as etapas do processo.

2.6.1 – Estimativa da Variância

No caso em que o número de repetições é o mesmo em todos os ensaios, a estimativa da variância experimental é simplesmente a média aritmética das variâncias observadas nos ensaios individuais. No caso geral, se cada ensaio foi repetido N vezes e se houver M ensaios diferentes, a estimativa conjunta da variância experimental será dada pela equação (162):

$$s^2 = \frac{v_1 \cdot s_1^2 + v_2 \cdot s_2^2 + \dots + v_M \cdot s_M^2}{v_1 + v_2 + \dots + v_M} \quad (162)$$

onde $v_i = N - 1$ é o número de graus de liberdade de s_i^2 . A estimativa da variância do i -ésimo ensaio é dada pela equação (163):

$$s_i^2 = \frac{1}{(N-1)} \cdot \sum_{i=1}^N \left(x_i - \bar{x}_i \right)^2 \quad (163)$$

onde x_i é o valor observado para uma variável e \bar{x}_i é o valor médio das observações.

Ao realizar um experimento, o uso de técnicas estatísticas apropriadas podem ajudar não só no planejamento dos experimentos como na análise dos resultados. Se o erro não for levado em consideração, corre-se o risco de chegar-se à conclusões equivocadas sobre o resultado final de uma experiência.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados todos os procedimentos que foram adotados para a caracterização da matéria-prima, além de uma descrição detalhada do sistema experimental e a identificação de cada uma de suas funções assim como as etapas cumpridas para realizar cada ensaio experimental.

3.1 – Material Particulado

A matéria-prima utilizada para todos os testes experimentais, que necessitavam de um material particulado, foi o **xisto** da região de São Mateus do Sul, fornecida pela Petrosix/Petrobras. Entretanto, o xisto fornecido pela empresa apresentou uma granulometria superior à necessária para a realização dos ensaios devido às dimensões do aparato experimental construído. Visto este fato, as partículas foram moídas e o material resultante foi peneirado para que apenas as partículas de diâmetro menor do que 74 μm fossem utilizadas nos testes.

3.2 – Métodos de Caracterização da Matéria-Prima

3.2.1 – *Análise Granulométrica*

No estudo da granulometria do xisto, utilizado nos ensaios experimentais, foram utilizados dois métodos: para as partículas maiores do que 74 μm , a análise granulométrica foi feita por peneiramento e as partículas menores foram analisadas com o auxílio de uma pipeta de Andreasen.

No peneiramento a separação de partículas é função apenas do tamanho. O peneiramento consiste em fazer passar uma amostra de material por malhas progressivamente menores. O ensaio consiste em colocar sobre a peneira mais grossa utilizada a amostra. O conjunto de peneiras são colocadas umas sobre as outras em ordem decrescente de tamanhos. No trabalho em questão, foi utilizadas a série Tyler.

Para essa série, a razão entre o tamanho de uma peneira e a sua anterior deve ser $\sqrt{2}$. As peneiras são classificadas pela abertura da peneira, isto é, o espaço livre mínimo entre os bordos das aberturas, e o número de aberturas em cada polegada linear é conhecido como *mesh*.

Para realizar o peneiramento, foram necessárias as seguintes peneiras: 10, 14, 28, 35, 48, 65, 100, 150 e 200 mesh; um vibrador mecânico e uma balança semi-analítica. O procedimento para analisar uma amostra de xisto pode ser descrito da seguinte maneira: para o conjunto de peneiras disponíveis, determinou-se a massa de cada uma, em seguida, adicionou-se a amostra de xisto na primeira peneira (10 mesh) e estas foram colocadas no agitador mecânico em ordem decrescente (mesh). As peneiras eram deixadas no agitador por, aproximadamente, 20 minutos. Retiravam-se as peneiras e na balança semi-analítica determinava-se a sua nova massa. Esta etapa de retirar, pesar e voltar a agitar foi realizada até que as massas das peneiras com o xisto não variasse com o tempo. Deste modo, calculava-se a massa de xisto em cada peneira e também a fração mássica.

As equações a seguir foram utilizadas na análise granulométrica.

$$\Delta X = \frac{m_i}{M} \quad (164)$$

$$\bar{d}_{\#} = \frac{1}{\sum_i^n \left(\frac{\Delta X}{d_{\#}} \right)} \quad (165)$$

onde: ΔX é a fração mássica

m_i é a massa de amostra de material particulado na peneira i

M é a massa total da amostra contida nas peneiras

$d_{\#}$ é o diâmetro de peneira, sendo obtido da média aritmética entre duas peneiras

$\bar{d}_{\#}$ é o diâmetro médio de Sauter

O pó de xisto que passou pela peneira de 200 mesh foi analisado com o auxílio de uma Pipeta de Andreasen. A Figura 3.1 ilustra tipos de Pipeta de Andreasen. Essa faz a análise de tamanho de partículas por um método indireto de medida, pois baseia-se na medida da velocidade de decantação da partícula num fluido. No método da pipeta, a concentração de uma suspensão muda devido a sedimentação das partículas.

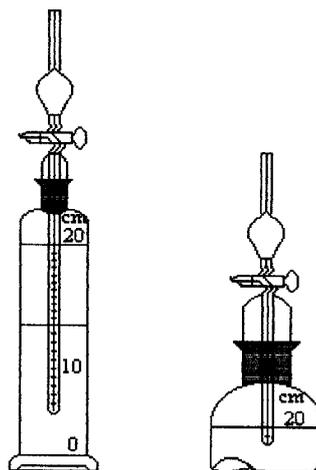


Figura 3.1 - Tipos de Pipeta de Andreasen.

O emprego da Pipeta de Andreasen conduz de um modo simples, confiável e pouco oneroso à distribuição de tamanhos expressa em termos de diâmetro da esfera, de densidade igual a do sólido, que tem a mesma velocidade terminal que a partícula no movimento lento (regime de Stokes), ou seja, d_{st} (diâmetro de Stokes). Desse modo, é possível estabelecer a relação entre a concentração medida num dado tempo e a fração em massa das partículas menores do que um certo diâmetro (X). As equações que fornecem X e d_{st} são dadas a seguir.

$$X(d_{st}) = \frac{c(t)}{c(0)} \quad (166)$$

$$d_{st} = \left(\frac{18 \cdot \mu_l \left(\frac{h_p}{t_p} \right)}{g \cdot (\rho_s - \rho_l)} \right)^{1/2} \quad (167)$$

onde : $c(t)$ é a concentração da amostra num tempo t

$c(0)$ é a concentração inicial da suspensão

g é a aceleração gravitacional

h_p é a altura da suspensão

t_p é o tempo da amostragem

ρ_s é a densidade do sólido

ρ_l é a densidade do líquido

μ_l é a viscosidade do líquido

A técnica da Pipeta de Andreasen é recomendada para partículas na faixa de 3 a 70 μ m.

Para a caracterização da amostra de xisto de diâmetro menor do que 74 μ m pelo método da Pipeta de Andreasen utilizou-se os seguintes materiais: uma Pipeta de Andreasen, um cronômetro, uma balança analítica, becheres, hexametáfosfato de sódio e uma estufa.

A partir da amostra de xisto recolhida no fundo das peneiras, separou-se, aproximadamente 8 g. Adicionou-se na pipeta uma solução contendo 0,1% em peso de hexametáfosfato de sódio até aproximadamente a marca de 15 cm. Adicionou-se então à solução a massa de xisto formando assim a suspensão. Completou-se então o volume até a marca de 20 cm. Anotou-se a altura inicial da suspensão. Agitou-se a suspensão de modo a torná-la homogênea e então iniciou-se a retirada de amostras em intervalos de tempo. Os intervalos foram: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 e 256 minutos. A retirada de cada amostra foi feita durante 20 segundos, começando 10 segundos antes do tempo de amostragem e terminando 10 segundos depois. A cada amostragem, a altura da suspensão na pipeta era anotada. Cada amostra era pesada em um becher de massa conhecida e levada para a estufa. A estufa estava a uma temperatura de, aproximadamente, 105 °C. Após 24 horas os becheres eram retirados da estufa e determinada a sua nova massa. Tinha-se assim a massa recolhida no dado tempo de amostragem.

3.2.2 – Modelos de Distribuição

Os resultados obtidos da análise granulométrica por peneiramento e por pipeta de Andreasen podem ser representados por modelos de distribuição. Segundo MASSARANI (1986), os modelos de dois parâmetros de GATES-GAUDIN-SCHUMANN (CGS), ROSIN-RAMMLER-BENNET (RRB) e LOG-NORMAL (LN) descrevem satisfatoriamente a maioria dos casos de interesse. Na Tabela 3.1 tem-se as equações desses modelos, onde X é a fração em massa das partículas com diâmetro menor do que d_p .

As equações (168) e (169) podem ser utilizadas de uma forma linear, permitindo avaliar se o modelo se ajusta ou não aos dados da distribuição granulométrica apenas pela verificação do coeficiente de correlação da reta obtida.

Tabela 3.1 – Modelos de distribuição granulométrica

Modelo	Equações
GATES-GAUDIN-SCHUMANN	$X = \left(\frac{d_p}{k}\right)^m$ (168)
ROSIN-RAMMLER-BENNET	$X = 1 - e^{-(d_p/D')^n}$ (169)
LOG-NORMAL	$X = (1 + \operatorname{erf}(z_L))/2$ $z_L = \ln(d_p/d_{p_{50}})/(\sqrt{2} \cdot \ln \sigma)$ (170) $\operatorname{erf}(z_L) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{z_L} e^{-z^2} \cdot dz$

A linearização das equações (168) e (169) são representadas pelas equações (171) e (172) respectivamente.

$$\ln X = -m \cdot \ln K + m \cdot \ln d_p \quad (171)$$

$$\ln \left(\ln \left(\frac{1}{1-X} \right) \right) = -n \cdot \ln D' + n \cdot \ln d_p \quad (172)$$

Onde **K**, **m**, **n** e **D'** são os parâmetros dos modelos. Entretanto, para o modelo LOG-NORMAL não pode ser usada essa mesma metodologia. MASSARANI (1986), indica que um conjunto de dados de uma distribuição granulométrica será representado pelo modelo LOG-NORMAL se, em um gráfico de $\ln(d_p)$ em função de X em escala de probabilidades, os pontos estiverem alinhados sob uma reta. LAWLESS, (1978), apresenta um conjunto de equações (173, 174 e 175) que possibilitam uma nova maneira de avaliar se os dados de uma distribuição granulométrica são representados pelo modelo LN.

$$t_L = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{X^2} \right)} \quad (173)$$

$$t_L = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1-X)^2} \right)} \quad (174)$$

$$z_L = t_L - \frac{d_1 + d_2 \cdot t + d_3 \cdot t^2}{1 + d_4 \cdot t + d_5 \cdot t^2 + d_6 \cdot t^3} \quad (175)$$

A Equação (173) é válida no intervalo $0 \leq X \leq 0,5$. Os valores de d_1 , d_2 , d_3 , d_4 , d_5 e d_6 da equação (175) são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Valores das constantes da equação (175)

d_1	2,515517
d_2	0,802853
d_3	0,010328
d_4	1,432788
d_5	0,189269
d_6	0,001308

O cálculo de z_L é feito da seguinte maneira: se o valor de X é maior do que 0,50, calcula-se t_L pela equação (174) e z_L pela equação (175), senão, calcula-se t_L pela equação (173), z_L pela equação (175) e faz-se z_L igual a $-z_L$. Com o valor de z_L calculado, pode-se fazer um gráfico de $\ln(d_p)$ versus z_L . Se os pontos obedecem a uma distribuição LN, pode-se encontrar a equação da reta que passa por esses pontos com um coeficiente de correlação próximo de 1. O valor médio do diâmetro de partícula (d_{p50}) é dado pela função exponencial do coeficiente linear e o desvio padrão (σ) é dado pela função exponencial do coeficiente angular.

3.2.3 – Densidade da Partícula

A determinação da densidade do xisto foi feita utilizando-se um picnômetro. Os materiais utilizados foram: um picnômetro de 25 ml, termômetro, balança analítica, água destilada e uma tabela de densidade da água em função da temperatura.

Inicialmente, determinou-se o volume real do picnômetro, já que devido à variações de temperatura este pode fornecer um volume diferente do apresentado no frasco. Para isso, usou-se a água para encontrar o verdadeiro volume. Determinou-se a massa do picnômetro vazio, depois, com o termômetro, determinou-se a temperatura da água destilada e adicionou-se a água ao picnômetro. Determinou-se então a massa do picnômetro mais a massa de água. Por diferença, tem-se a massa real de água no interior do picnômetro e com o auxílio da tabela de densidade, encontrou-se qual o volume do picnômetro. O picnômetro deve ser limpo e seco. Uma vez determinado o

volume real do picnômetro, colocou-se uma certa quantidade de xisto no seu interior. Determinou-se então a massa do picnômetro mais a massa do xisto. Completou-se o volume do picnômetro com água destilada e determinou-se a massa do conjunto. Desta maneira, tinha-se a massa de xisto, a massa de água e conseqüentemente, o volume de água. Conhecendo o volume que a água ocupa e o volume real do picnômetro, determinou-se o volume da amostra de xisto. Como já era conhecida a massa da amostra, determinou-se a densidade do xisto usado nos testes. O xisto usado para o cálculo da densidade também apresentava granulometria inferior a 74 μ m.

3.3 – Sistema Experimental

A Figura 3.2 ilustra a disposição do sistema experimental em escala de bancada que foi utilizada para a realização dos experimentos de eficiência de coleta e queda de pressão em ciclones. Esse módulo encontra-se instalado no Laboratório de Engenharia Química III, do Departamento de Engenharia Química, bloco D-90, UEM. Nessa figura, os números que aparecem representam:

- 1 – ciclone
- 2 – alimentador de finos de xisto
- 3 – linha de ar comprimido
- 4 – tubo de Pitot
- 5 – soprador
- 6 – coletor de acrílico
- 7 – manômetro inclinado
- 8 – sistema de válvulas
- 9 – tomada piezométrica de pressão
- 10 – mangueiras de plástico
- 11 – tubo de PVC

As letras **a – a'**, **b – b'**, **c – c'**, **d – d'** e **e – e'** representam os pontos de ligação por mangueiras de plástico.

3.3.1 - Os Ciclones Utilizados

Os ciclones escolhidos para a realização dos ensaios experimentais dessa dissertação seguiram os modelos Lapple e Stairmand respeitando as dimensões publicadas por ARAUJO e MASSARANI, (1987). As dimensões geométricas dos ciclones construídos são apresentadas na Tabela 3.3.

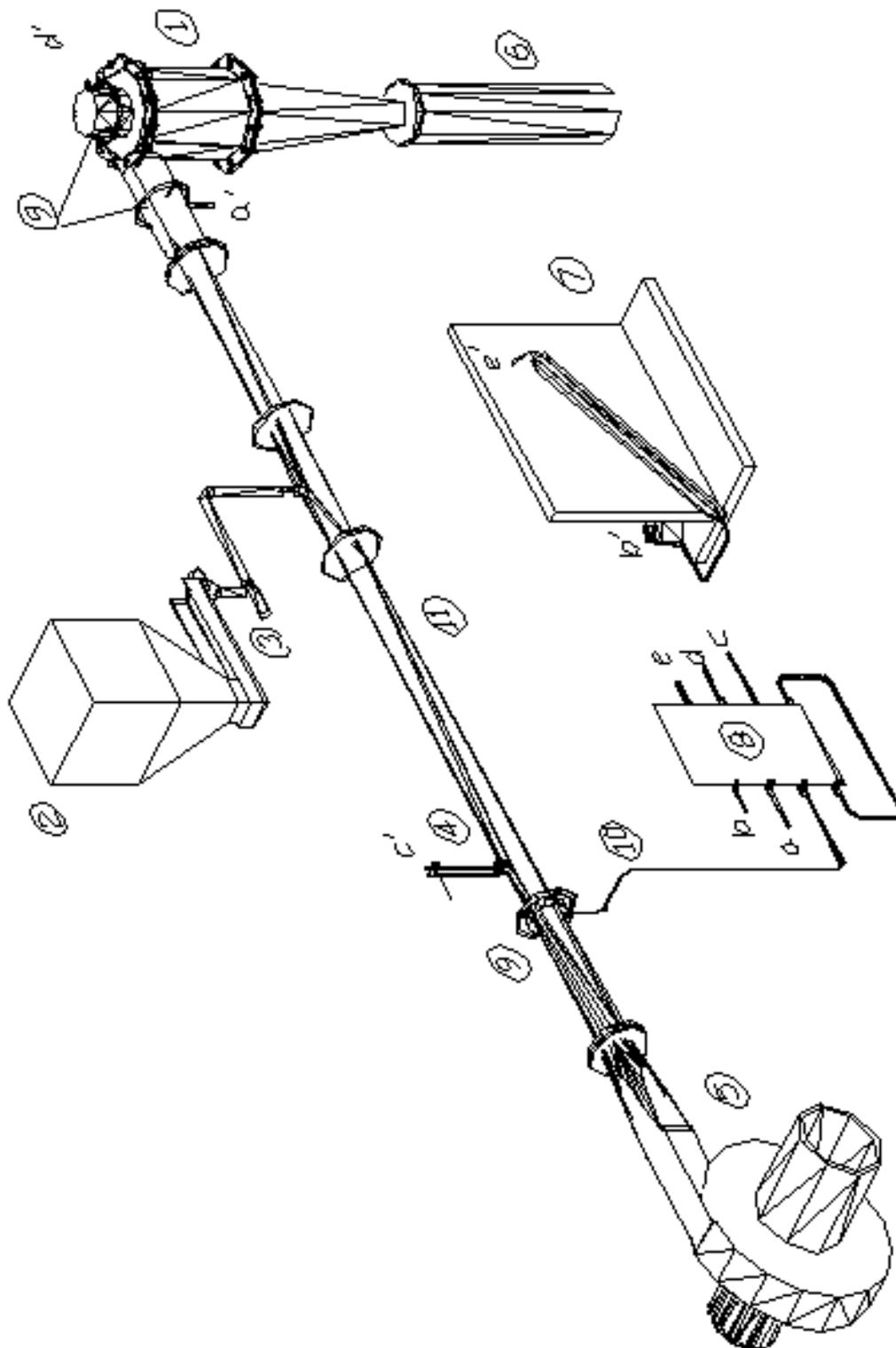


Figura 3.2 – Sistema Experimental

Tabela 3.3 - Dimensões dos ciclones Lapple e Stairmand construídos.

Dimensão	Ciclone Lapple (mm)	Ciclone Stairmand (mm)
a	103,71	103,17
b	52,40	41,40
D	206,13	206,63
De	106,70	106,41
h	414,00	310,66
H	816,00	827,03
B	51,22	73,70
S	128,20	103,91

Nas tabelas 3.4 e 3.5 são apresentados os desvios entre as relações geométricas dos ciclones construídos para os testes experimentais e os valores publicados por ARAÚJO e MASSARANI (1987).

Tabela 3.4 - Comparação entre as relações geométricas do ciclone Lapple construído e as relações geométricas publicadas por ARAUJO e MASSARANI (1987).

Relação Geométrica	Lapple ⁽¹⁾	Lapple ⁽²⁾	desvio (%)
a/D	0,5033	0,50	0,66
b/D	0,2542	0,25	1,68
De/D	0,5176	0,50	3,52
h/D	2,0084	2,00	0,42
H/D	3,9587	4,00	1,03
B/D	0,2485	0,25	0,60
S/D	0,6219	0,625	0,49

Na Tabela 3.4, o índice 1 representa as relações entre as dimensões para o ciclone do tipo Lapple que foi construído e o índice 2, são as relações do ciclone Lapple segundo ARAUJO e MASSARANI (1987).

Tabela 3.5 – Comparação entre as relações geométricas do ciclone Stairmand construído e as relações geométricas publicadas por ARAUJO e MASSARANI (1987).

Relação Geométrica	Stairmand ⁽³⁾	Stairmand ⁽⁴⁾	desvio (%)
a/D	0,4993	0,50	0,14
b/D	0,2004	0,20	0,18
De/D	0,5149	0,50	2,99
h/D	1,5053	1,50	0,23
H/D	4,0025	4,00	0,06
B/D	0,3568	0,375	4,88
S/D	0,5029	0,50	0,58

(3) ciclone Stairmand construído

(4) ciclone Stairmand segundo ARAUJO e MASSARANI (1987)

A extremidade retangular da entrada dos ciclones que são conectadas ao tubo de PVC foram modificadas para permitir um encaixe sem obstruções evitando o acúmulo de pó de xisto nesse local. Na saída do gás limpo pelo topo do ciclone foi adaptado um filtro de tecido para recolher as partículas de xisto não coletadas pelo ciclone. Na saída de pó pela parte inferior do ciclone foi adaptado um coletor cilíndrico de acrílico, o qual era conectado para coletar o pó de xisto retido pelo ciclone. O coletor cilíndrico de acrílico possui um diâmetro interno de 131,50 mm e uma altura de 585,0 mm.

3.3.2 – Alimentador de Finos

Para realizar a alimentação do pó de xisto, foi utilizado um alimentador da marca NORMA, modelo CE-5b que possui um silo com capacidade de 20 litros para armazenar o pó a ser alimentado e uma calha vibratória. A mudança das taxas de alimentação de pó de xisto era obtida por alterações da frequência de vibração da calha. O xisto ao deixar a calha vibratória era aspirado por uma linha de ar comprimido e injetado no tubo de PVC, onde juntava-se à corrente gasosa produzida pelo ventilador e era, então, alimentado ao ciclone.

3.3.3 – Tubo de Pitot

Para a medida de vazão, foi utilizado um tubo de Pitot. A Figura 3.3 ilustra o tubo de Pitot conectado ao tubo de PVC.

A pressão obtida é igual à média de quatro tomadas de pressão oriunda de quatro perfurações no tubo de PVC que comunicam-se por mangueiras plásticas.

O instrumento era usado para realizar as leituras de ΔP e medir a velocidade dentro do tubo de PVC em pontos que foram igualmente espaçados. Esse espaçamento era alcançado por meio de uma escala com menor divisão de 1 mm.

Após obtido um perfil de velocidades ao longo do diâmetro do tubo, a velocidade média do gás escoando no interior do tubo de PVC era obtida por meio de uma integração numérica pelo método de Simpson. No Apêndice A, são ilustradas as equações para o tubo de Pitot e o método de Simpson.

A velocidade fornecida pela equação do tubo de Pitot num determinado ponto no interior do tubo de PVC foi comparada com a velocidade no mesmo ponto por um outro instrumento de medida de velocidade de ar. Para a calibração do tubo de Pitot, foi usado um anemômetro de fio quente, marca INDUSLAB, modelo Testo 425. Desse modo, para cada velocidade fornecida pelo tubo de Pitot em um ponto, comparava-se com a velocidade fornecida pelo anemômetro no mesmo ponto. Assim, obteve-se uma equação que relacionava a velocidade do tubo de Pitot com a velocidade do anemômetro. A velocidade do anemômetro é que foi utilizada como a correta. A Figura 3.4 apresenta curva de calibração do tubo de Pitot.

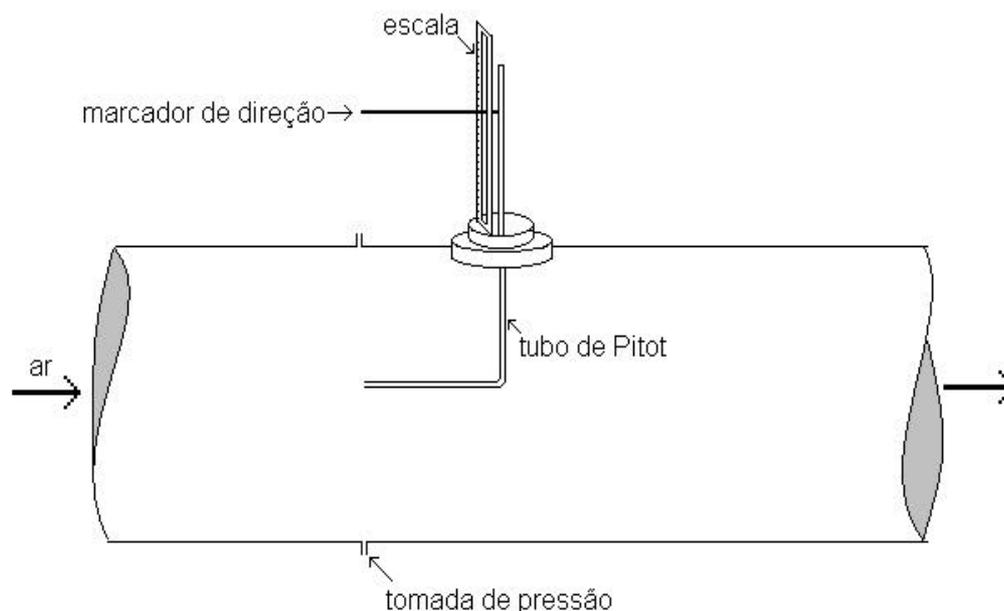


Figura 3.3 – Ilustração do tubo de Pitot

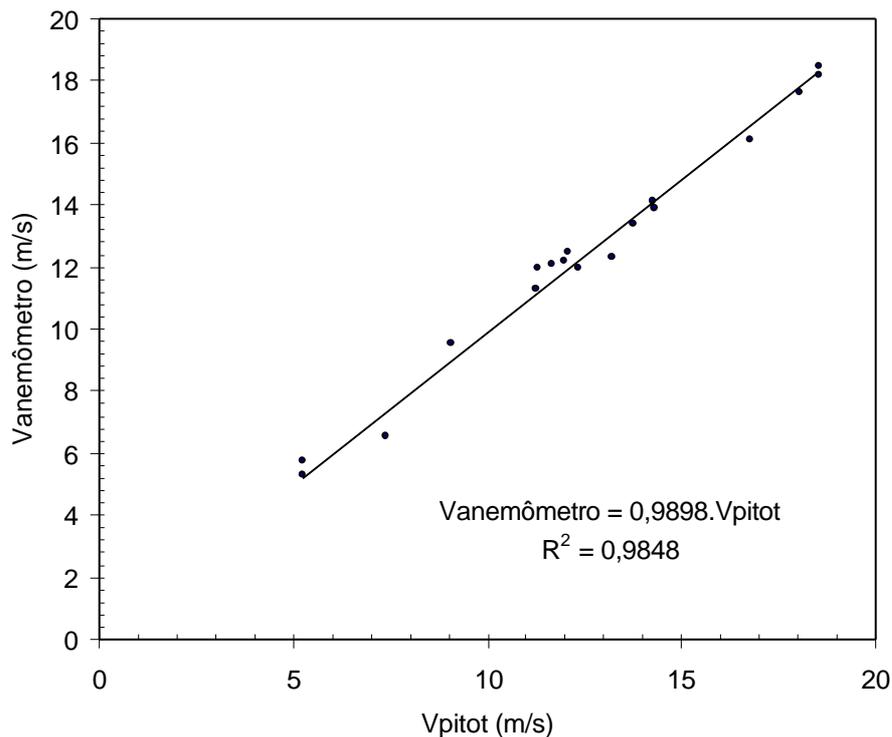


Figura 3.4 – Curva de Calibração do tubo de Pitot.

A equação de calibração é dada então por:

$$V_{\text{anemômetro}} = 0,9898 \cdot V_{\text{pitot}} \quad (176)$$

3.3.4 - Alimentação de Ar

O ar era alimentado através de um soprador, com uma potência de 1 CV, e por uma tubulação de ar comprimido. O ar comprimido era responsável pela alimentação de partículas no sistema experimental.

3.3.5 - Manômetro Inclinado

Para alcançar uma melhor precisão na medida de pequenas diferenças de pressão por manômetros de colunas líquidas, optou-se por usar um manômetro inclinado com reservatório. A Figura 3.5 descreve o princípio de construção do manômetro. Este instrumento de medida tem como uma das pernas um reservatório de diâmetro muito maior do que o diâmetro do tubo que forma a perna inclinada, de tal modo que as

variações de nível do tubo inclinado produzam pequenas mudanças no nível do reservatório

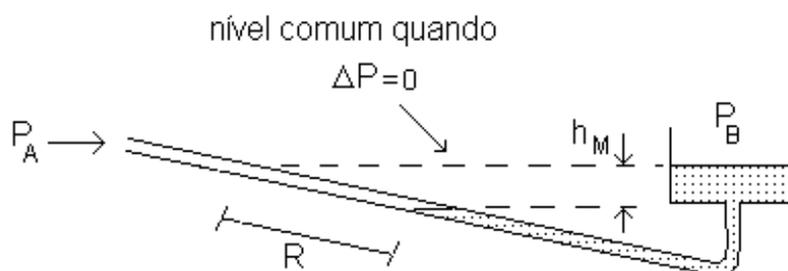


Figura 3.5 – Manômetro inclinado com reservatório.

Manômetros simples de coluna de líquido não necessitam de calibração se eles são construídos de forma a minimizar os erros devido à capilaridade. Para evitar o erro devido à capilaridade, o diâmetro do tubo deve ser suficientemente grande e o fluido manométrico deve ter uma densidade de tal modo que a capilaridade seja desprezível em comparação com a leitura do instrumento de medida. O efeito da capilaridade é praticamente desprezível para tubos com diâmetro interno de 12,7mm ou maiores. A equação manométrica para o instrumento de medida apresentado na Figura 3.5, com a perna inclinada possuindo um ângulo com o eixo horizontal de α e fluido manométrico com densidade ρ_l , pode ser :

$$P_A - P_B = \gamma \cdot (R \cdot \text{sen} \alpha) \quad (177)$$

Onde:

P_A pressão na extremidade do tubo inclinado

P_B pressão no reservatório

$\gamma = \rho_l \cdot g$

R o deslocamento do líquido no interior do tubo de vidro

Esse tipo de manômetro permitiu medidas precisas da velocidade do ar escoando no interior do tubo em direção ao ciclone e da queda de pressão no interior do ciclone com e sem alimentação devido às mudanças de ângulo, permitindo maior sensibilidade à medida. O fluido manométrico escolhido para a realização das medidas foi a água.

3.4 – Metodologia Experimental

De posse dos equipamentos e instrumentos de medidas que foram citados anteriormente, pode-se estabelecer quais foram as etapas necessárias para realizar cada ensaio experimental

3.4.1 - Velocidade de Alimentação de Ar.

O cálculo da velocidade de alimentação do ar ao ciclone era feito de duas maneiras. A primeira, consistia em levantar o perfil de velocidades com o tubo de Pitot, calcular a velocidade média, $\langle v_2 \rangle$, com o uso da Regra de Simpson e depois corrigi-la com a equação (176). Uma vez calculada a velocidade na posição do tubo de PVC onde encontrava-se o tubo de Pitot, era preciso calcular a velocidade de alimentação na entrada do ciclone. Para isso, pela equação da continuidade, deduziu-se a equação (178).

$$V_i = \frac{\rho_2 \cdot \langle V_2 \rangle \cdot A_2}{\rho_1 \cdot A_1} \quad (178)$$

onde:

V_i é a velocidade média de alimentação do ciclone

ρ_1 é a densidade do ar na entrada do ciclone

A_1 é a área de entrada do ciclone

$\langle V_2 \rangle$ é a velocidade média lida pelo tubo de Pitot, corrigida pela equação (176)

ρ_2 é a densidade do ar no tubo de Pitot

A_2 é a área do tubo onde está o tubo de Pitot

Na equação (178), ρ_1 depende da temperatura e da pressão no interior do tubo na entrada do ciclone, ρ_2 depende da temperatura e pressão no ponto onde está o tubo de Pitot. Assim sendo, determinava-se a pressão estática no tubo de Pitot e na entrada do ciclone e a temperatura do gás. E, com o auxílio da equação dos gases ideais, calculava-se a densidade do ar. Com isso era possível determinar a velocidade de alimentação do ar no ciclone e a queda de pressão sofrida pelo ciclone. Essa maneira de calcular a vazão de entrada era feita quando o ar comprimido não era adicionado junto com o ar do soprador.

A segunda maneira de calcular a velocidade de alimentação consistiu de fazer um caminho inverso. Com os pontos experimentais obtidos anteriormente, ajustou-se uma curva de queda de pressão para o ciclone em função da velocidade de alimentação. Quando adicionava-se ar comprimido no sistema para permitir a alimentação de finos, determinava-se a queda de pressão com o auxílio do manômetro inclinado e com a curva obtida durante o ensaio determinava-se qual era então a velocidade de alimentação. Para cada ciclone foi usada uma curva de queda de pressão em função da velocidade de alimentação. Para o ciclone Lapple, a curva usada é a apresentada pela equação (179) e para o ciclone Stairmand a curva usada é a apresentada pela equação (180).

$$\Delta P = 6,8413 \cdot V_i^2 - 110,41 \cdot V_i + 796,43 \quad (179)$$

$$\Delta P = -0,8987 \cdot V_i^2 + 119,46 \cdot V_i - 1007,46 \quad (180)$$

Onde:

V_i é a velocidade do ar na entrada do ciclone

ΔP a queda de pressão sofrida pelo ciclone em Pa.

3.4.2 – Determinação da Queda de Pressão dos Ciclones.

A queda de pressão em ciclones pode ser influenciada pela presença de particulados no ar que alimenta o ciclone. Dessa forma, determinou-se a queda de pressão para o ciclone sendo alimentado com: ar isento de finos de xisto e ar com finos de xisto. Para o ar isento de finos de xisto, onde não era adicionado ar comprimido ao tubo de PVC, todas as etapas necessárias são descritas pelo *procedimento I*.

❖ *procedimento I*

O soprador era ligado, e esperava-se em torno de uma hora para que o sistema entrasse em condições permanentes de operação, pois a temperatura no interior do tubo de PVC apresentava-se maior que a temperatura ambiente devido ao aquecimento provocado pelo ventilador. Levantava-se o perfil de velocidades utilizando o tubo de Pitot. Media-se a pressão estática na parede onde localizava-se o tubo de Pitot e na entrada do ciclone. Media-se temperatura ambiente e a temperatura do ar no interior do tubo. Por intermédio do centro de meteorologia, sabia-se qual o valor da pressão atmosférica.

A queda de pressão sofrida pelo gás ao passar pelo ciclone era determinada com o auxílio do manômetro inclinado. A queda de pressão do ciclone é a diferença entre pressão estática na entrada do ciclone e a pressão estática no tubo de saída do gás limpo

Tanto na entrada quanto na saída, cada tomada de pressão era composta de quatro perfurações na parede metálica do ciclone. Todas as perfurações da tomada de pressão da entrada comunicavam-se por meio de tubos de plástico que então eram conectados ao manômetro.

A metodologia para avaliar a queda de pressão dos ciclones quando submetidos a uma alimentação com finos de xisto é apresentado pelo *procedimento II*.

❖ *procedimento II*

Eram ligados o soprador e o ar comprimido e esperava-se um tempo de, aproximadamente, uma hora. Uma amostra de xisto com diâmetro menor do que 0,074 mm era recolhida do peneiramento e quarteada sucessivamente e recolhia-se uma amostra que era guardada para posterior análise granulométrica. O xisto restante era pesado e adicionado ao silo do alimentador de partículas ainda desligado.

Eram medidos: a temperatura no interior do tubo, a pressão estática no tubo de PVC, a pressão estática na entrada do ciclone e a queda de pressão do ciclone.

Com a queda de pressão determinava-se, como citado anteriormente, a velocidade de alimentação do ciclone que estava sendo usado. Pesava-se o pote coletor de acrílico e era recolocado no sistema experimental. Eram acionados, simultaneamente, o cronômetro e o alimentador de partículas numa frequência determinada.

Media-se a queda de pressão do ciclone em intervalos de 15 segundos, para, posteriormente, calcular o valor médio da queda de pressão ao longo de todo o tempo da alimentação dos finos de xisto.

Após o término da corrida experimental, a massa do coletor de acrílico era determinada. Anotava-se também a temperatura ambiente, a pressão atmosférica e o tempo de alimentação.

3.4.3 – Efeito do Coletor de Acrílico na Queda de Pressão

Para avaliar a influência de um coletor na queda de pressão de ciclones, realizava-se basicamente o *procedimento I* e em seguida retirava-se o coletor de acrílico e media-se a nova queda de pressão do ciclone. Sendo portanto válida a velocidade de alimentação determinada com a presença do coletor acoplado ao ciclone.

3.4.4 – Determinação da Eficiência Mássica dos Ciclones.

O *procedimento II* descreve todas as etapas para avaliar a eficiência mássica do ciclone. Após determinada a massa alimentada de finos de xisto ao ciclone e a massa recolhida pelo coletor de acrílico a eficiência mássica pode ser calculada.

3.5 - Metodologia de Cálculo

3.5.1 - Eficiência Mássica de Coleta e Concentração Volumétrica

Uma vez medidas a massa de sólidos alimentada e a massa de sólidos coletada, a eficiência mássica era calculada pela equação (181).

$$\eta = \frac{m_c}{m_a} \quad (181)$$

onde:

m_c é a massa coletada pelo ciclone

m_a é a massa alimentado ao ciclone

Uma vez medidos o intervalo de tempo de alimentação, a massa de sólidos alimentada e a massa de sólidos recolhida, a taxa mássica de sólidos alimentados era calculada pela equação (182).

$$\dot{m}_p = \frac{m_a}{t_a} \quad (182)$$

onde:

\dot{m}_p é a taxa mássica de sólidos alimentados

t_a é o tempo da alimentação

Conhecidas a taxa mássica de alimentação de e a vazão de ar (Q), a concentração volumétrica de sólidos (C) era calculada utilizando a equação (183).

$$C = \frac{\dot{m}_p}{Q} \quad (183)$$

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos testes realizados neste trabalho. Eles serão agrupados da seguinte forma:

- ❖ Caracterização do material particulado usado
- ❖ Estudo da queda de pressão no ciclone Lapple e comparação com os modelos teóricos de predição
- ❖ Estudo da queda de pressão no ciclone Stairmand e comparação com os modelos teóricos de predição
- ❖ Influência do coletor sobre a queda de pressão do ciclone Lapple
- ❖ Influência do coletor sobre a queda de pressão do ciclone Stairmand
- ❖ Influência da concentração de sólidos e velocidade de alimentação sobre a queda de pressão do ciclone Lapple
- ❖ Influência da concentração de sólidos e velocidade de alimentação sobre a queda de pressão do ciclone Stairmand
- ❖ Influência da concentração de sólidos e velocidade de alimentação sobre a eficiência mássica do ciclone Lapple
- ❖ Influência da concentração de sólidos e velocidade de alimentação sobre a eficiência mássica do ciclone Stairmand

4.1 – Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada à partir de uma amostra de xisto fornecida pela empresa Petrosix/Petrobras. A amostra foi moída e caracterizada com o uso de peneiras e pipeta de Andreasen segundo o procedimento descrito no sub-item 3.2.1, e os resultados são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Distribuição acumulativa por peneiramento.

Sistema Tyler Mesh	$d_{\#}$ (mm)	Massa retida na peneira (g)	Fração mássica (ΔX)	Fração acumulativa	$\frac{\Delta X}{d_{\#}}$
+ 10	1,6800	8,10	0,04976	0,95024	0,02962
-10 +14	1,435	6,48	0,03981	0,91043	0,02774
-14 +20	1,0155	40,72	0,25015	0,66028	0,24634
-20 +28	0,7180	17,24	0,10591	0,55437	0,14751
-28 +35	0,5075	21,39	0,13140	0,42296	0,25892
-35 +48	0,3585	11,83	0,07267	0,35029	0,20272
-48 +65	0,2535	16,84	0,10345	0,24684	0,40810
-65 +100	0,1795	10,78	0,06622	0,18061	0,36894
-100 +150	0,1270	5,14	0,03158	0,14904	0,24863
-150 +200	0,0895	4,74	0,02912	0,11992	0,32535
-200	0,074	19,52	0,11992	-----	1,62049
SOMA	----	162,78	1,00000	-----	3,88436

A distribuição granulométrica pode ser vista na Figura 4.1.

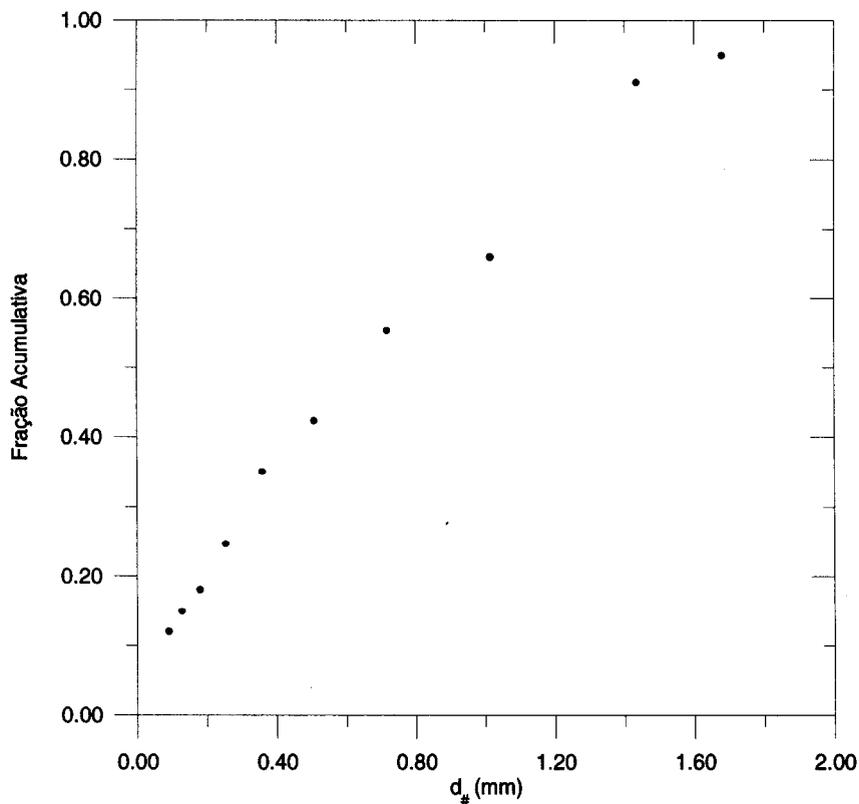


Figura 4.1 – Distribuição acumulativa de xisto em função do diâmetro médio das peneiras.

De posse dos resultados apresentados na Tabela 4.1, determinou-se o diâmetro médio de Sauter das partículas, segundo a equação (165) do sub-item 3.2.1.

$$\bar{d}_{\#} = \frac{1}{\sum_i^n \left(\frac{\Delta X}{d_{\#}} \right)} = \frac{1}{3,88463} = 0,2574 \text{ mm}$$

$$\bar{d}_{\#} = 0,2574 \text{ mm}$$

As partículas de xisto com diâmetro menor do que $74\mu\text{m}$ tiveram a sua distribuição granulométrica analisada com o auxílio de uma pipeta de Andreasen.

O xisto com essa granulometria ($d_p < 74\mu\text{m}$) é que foi alimentado aos ciclones Lapple e Stairmand em todos os ensaios experimentais que necessitaram de material particulado.

Os resultados obtidos da análise com pipeta são apresentados na Tabela 4.2 e seguem o procedimento descrito no sub-item 3.2.1.

Tabela 4.2 – Análise granulométrica por pipeta de Andreasen

tempo (min)	altura da suspensão (cm)	Altura média da suspensão (cm)	c(t)	X	d_{st} (mm)
1	19,9	20,15	0,01199	0,76693	0,08013
2	19,4	19,65	0,01224	0,78334	0,05595
4	18,9	19,15	0,01184	0,75767	0,03906
8	18,4	18,65	0,01005	0,64291	0,02725
16	17,8	18,1	0,00851	0,5446	0,01899
32	17,3	17,55	0,0072	0,4609	0,01322
64	16,8	17,05	0,00606	0,38777	0,00921
128	16,2	16,5	0,00521	0,33341	0,00641
240	15,6	15,9	0,00457	0,29211	0,00459

Altura inicial da suspensão = 20,4 cm

Densidade da suspensão à 26°C = 0,9963 g/ml

Concentração inicial da suspensão = 0,01563 g/ml

Na Tabela 4.2 os valores de X e d_{st} foram calculados pelas equações (166) e (167) do sub-item 3.2.1.

A distribuição granulométrica pode ser vista na Figura 4.2.

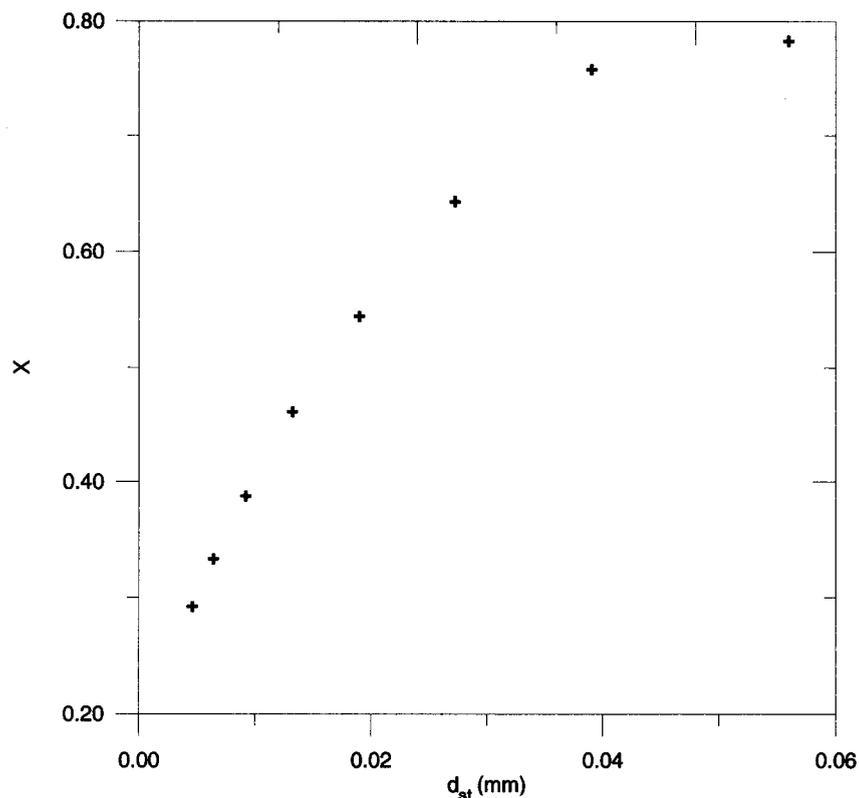


Figura 4.2 – Distribuição granulométrica de finos de xisto.

As análises granulométricas apresentadas nas tabelas 4.1 e 4.2, permitiram determinar um modelo de distribuição que melhor representava essas amostras de xisto. E para essa determinação, seguiu-se o procedimento descrito no sub-item 3.2.2

Para a distribuição granulométrica do xisto peneirado, o modelo escolhido foi o de GGS (GATES-GAUDIN-SCHUMANN) e para o xisto alimentado ao ciclone, o modelo escolhido foi o RRB (ROSIN-RAMMLER-BENNET). As tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os parâmetros dos modelos GGS e RRB obtidos para as amostras de xisto analisadas.

Tabela 4.3 - Parâmetros do modelo GGS para o xisto peneirado.

Modelo	Material	m	k
GGS	xisto peneirado	0,7287	1,6960

Onde **m** e **k** são os parâmetros do modelo GGS.

Tabela 4.4 - Parâmetros do modelo RRB.

Modelo	Material	n	D'(mm)
RRB	xisto alimentado	0,635	0,0265

Onde **n** e **D'** são os parâmetros do modelo RRB.

A medida da densidade absoluta do material de testes foi feita conforme descrito no sub-item 3.2.3. O resultado dessa determinação é apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Densidade absoluta do material de testes.

Material	r_p (g/cm³)
xisto alimentado	2,0371

A massa específica do material apresentado na Tabela 4.5 é o resultado da média de três determinações experimentais.

4.2 – Queda de Pressão no ciclone Lapple

A determinação experimental da queda de pressão em função da velocidade, foi determinada seguindo o *procedimento 1*, conforme descrito no sub-item 3.4.2, num total de 6 corridas experimentais.

Através dos dados experimentais obtidos de queda de pressão (ΔP) e velocidade de alimentação (V_i), pode-se construir um gráfico de ΔP em função de V_i . Tais resultados podem ser vistos na Figura 4.3.

Os dados relacionados com a determinação experimental, podem ser encontrados no Apêndice B, nas tabelas de B.1 a B.9.

A curva que ajusta os pontos experimentais apresentados na Figura 4.3 é dada pela equação (179) do sub-item 3.4.1.

$$\Delta P = 6,84133 \cdot v_i^2 - 110,41 \cdot v_i + 796,43 \quad (179)$$

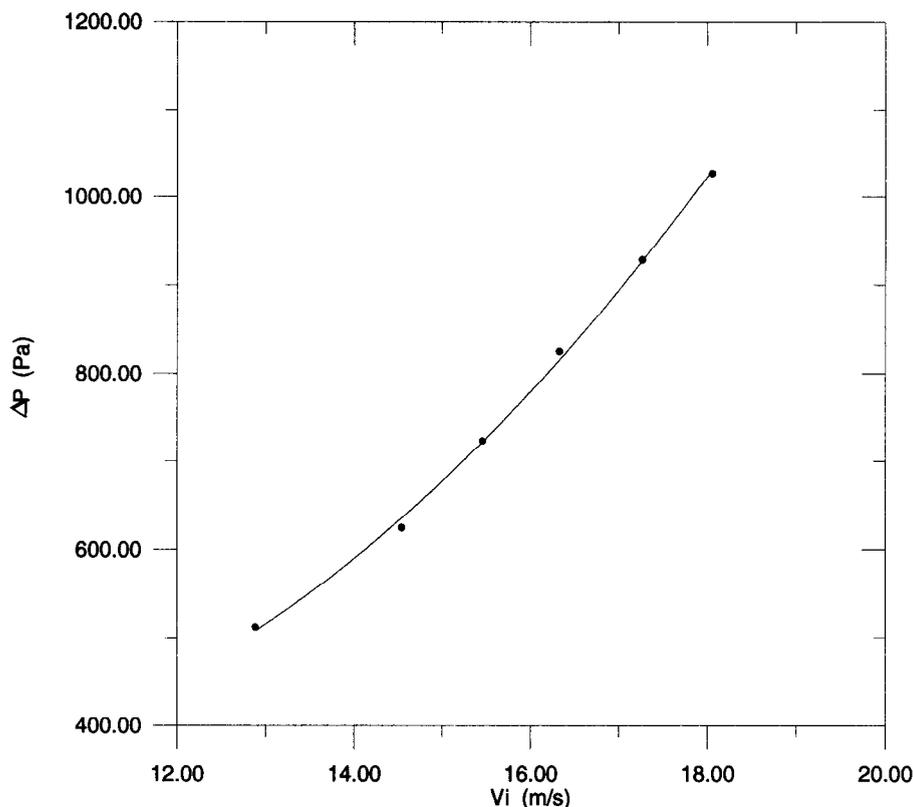


Figura 4.3 – Queda de pressão do ciclone Lapple em função da velocidade de alimentação.

Observa-se, ao analisar-se a Figura 4.3, que a queda de pressão do ciclone Lapple aumenta com o aumento da velocidade do gás na entrada. Esse comportamento já era esperado, uma vez que a equação (133) do item 2.5 mostra que a queda de pressão é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade de alimentação.

De posse desses valores encontrados, fez-se uma comparação com as determinações de equações teóricas citadas na revisão bibliográfica que permitem a predição da queda de pressão de ciclones. Querendo com isso verificar qual o melhor modelo capaz de estimar os valores de queda de pressão obtidos experimentalmente. Todos os modelos levantados na revisão bibliográfica para predição de queda de pressão foram utilizados.

Na Tabela 4.6 são apresentados os valores de N_H calculados segundo os modelos teóricos. Os valores de N_H são então usados na equação (133) do item 2.5 para calcular os valores de ΔP . Na Figura 4.4 é feita uma comparação entre os valores experimentais e

os valores previstos pelos modelos de STAIRMAND (DIRGO e LEITH, 1985) e de CASAL e MARTÍNEZ-BENET (1983).

Tabela 4.6 – Valores de N_H para o ciclone Lapple.

MODELO	N_H
SHEPHERD e LAPPLE (1939)	7,63698
STAIRMAND (DIRGO e LEITH, 1985)	5,71298
FIRST (DIRGO e LEITH, 1986)	7,20822
BARTH (DIRGO e LEITH, 1985)	7,07423
CASAL e MARTÍNEZ-BENET (1983)	5,90444
CONSTANTINESCU (1984)	2,11697
MAROULIS e CREMALIS (1995)	3,00238

Na Figura 4.5 é feita a comparação entre os valores experimentais e os modelos de : SHEPHERD e LAPPLE (1939), FIRST (DIRGO e LEITH, 1986), MAROULIS e CREMALIS (1995), CONSTANTINESCU (1984) e BARTH (DIRGO e LEITH, 1985). E na Figura 4.6 o modelo proposto por CREMASCO e NEBRA (1992), é comparado com os resultados experimentais.

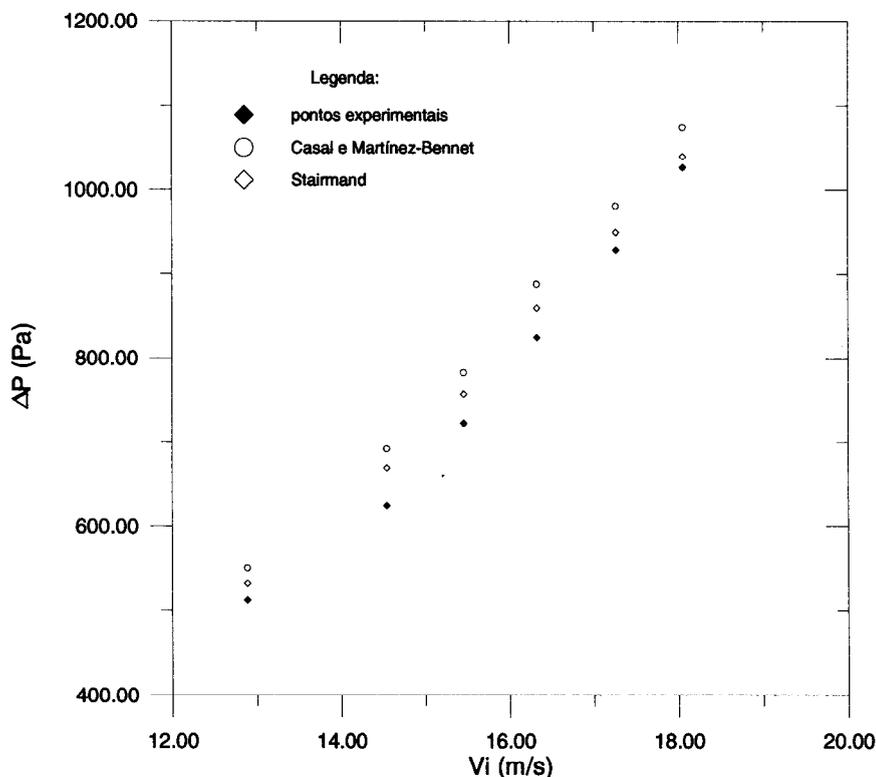


Figura 4.4 – Comparação entre os resultados experimentais e os modelos de CASAL e MARTÍNEZ-BENET (1983) e de STAIRMAND (DIRGO e LEITH, 1985).

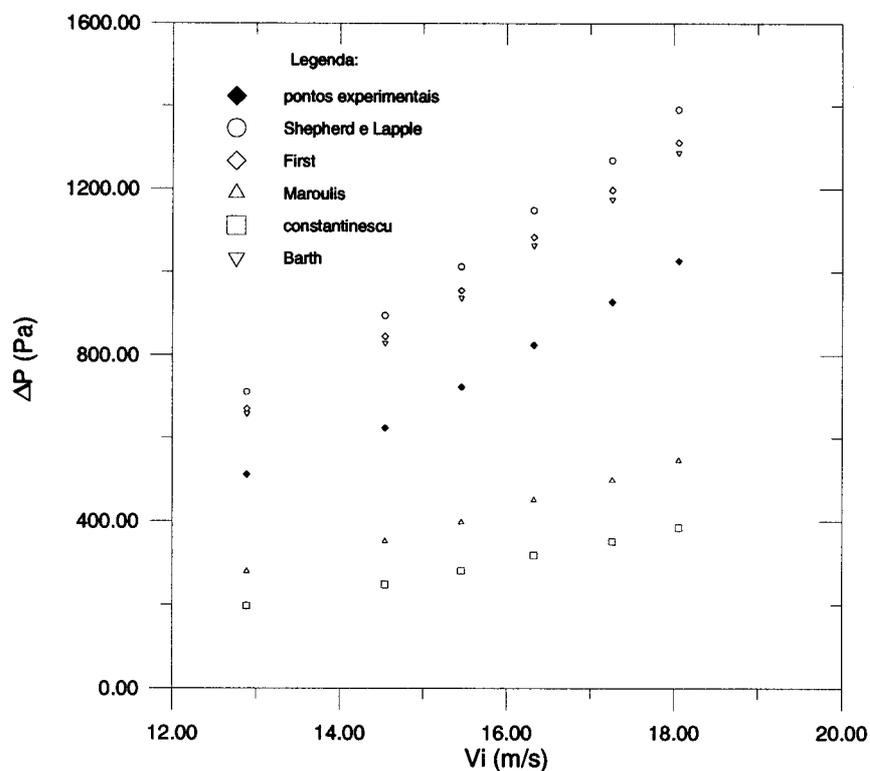


Figura 4.5 – Comparação entre os resultados experimentais e os modelos de: SHEPHERD e LAPPLE (1939), FIRST (DIRGO e LEITH, 1986), MAROULIS e CREMALIS (1995), CONSTANTINESCU (1984) e BARTH (DIRGO e LEITH, 1985).

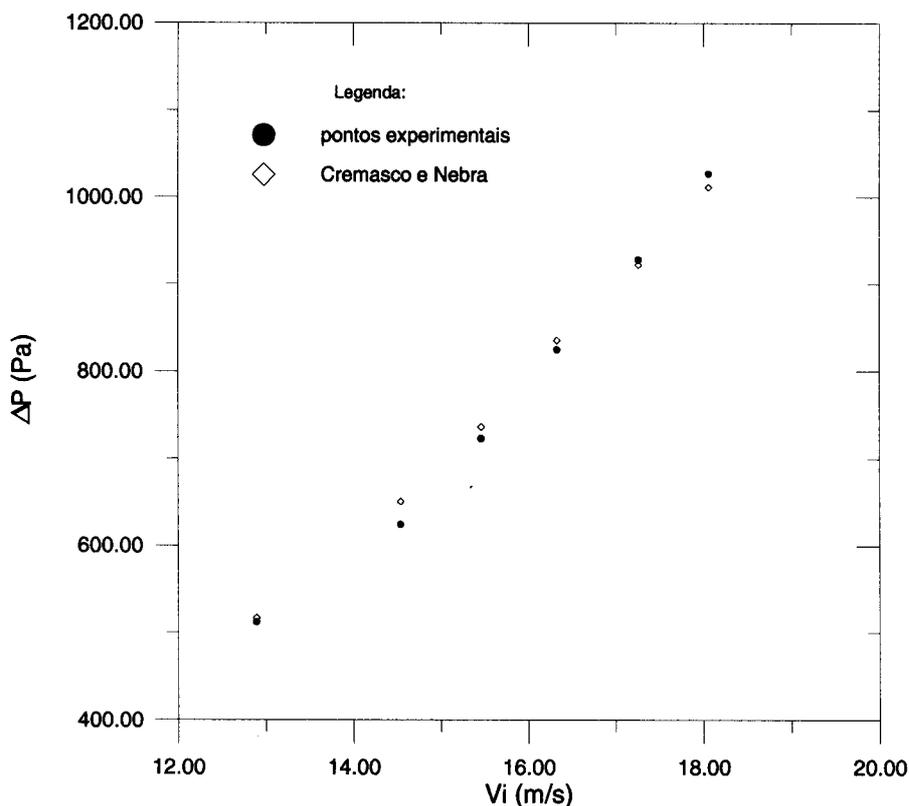


Figura 4.6 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo de CREMASCO e NEBRA, (1992) (fator de atrito=0,0121).

De acordo com uma análise feita nas figuras 4.4, 4.5 e 4.6 pode-se concluir que os melhores modelos para estimar a queda de pressão do ciclone Lapple para o sistema experimental construído para a dissertação são : CASAL-MARTÍNEZ-BENET, (1983), STAIRMAND (DIRGO e LEITH, 1985) e a correlação de CREMASCO e NEBRA, (1992).

4.3 – Queda de Pressão no ciclone Stairmand

Seguindo o mesmo procedimento do item 4.2, fez-se o mesmo estudo da variação da queda de pressão em função da velocidade para o ciclone do tipo Stairmand. Para a obtenção dos resultados foram feitos 9 ensaios experimentais.

Os dados obtidos podem ser encontrados no Apêndice C, nas tabelas C.1 a C.9.

A Figura 4.7 apresenta os resultados da queda de pressão do ciclone Stairmand em função da velocidade de alimentação.

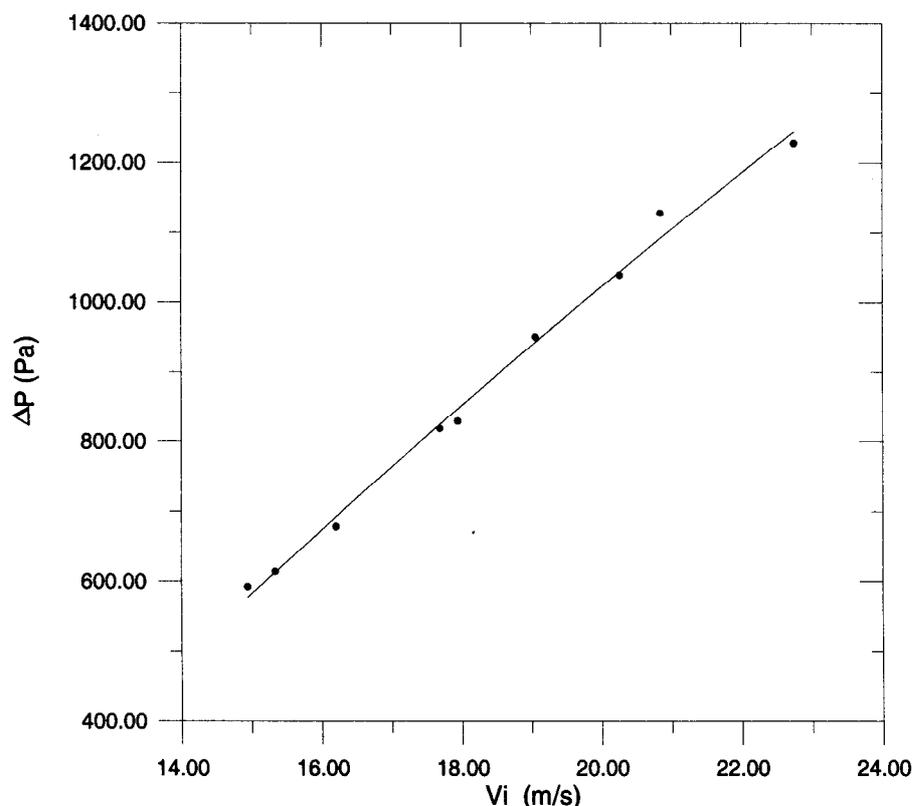


Figura 4.7 – Queda de pressão do ciclone Stairmand em função da velocidade de alimentação.

A curva que ajusta os pontos experimentais apresentados na Figura 4.7 é dada pela equação (180) do sub-item 3.4.1.

$$\Delta P = -0,8987 \cdot v_i^2 + 119,46 \cdot v_i - 1007,46 \quad (180)$$

Também para o ciclone Stairmand, a sua queda de pressão aumenta com o aumento da velocidade do gás na entrada.

Os valores de N_H para os modelos apresentados no sub-item 2.5.1 são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Valores de N_H para o ciclone Stairmand.

MODELO	N_H
SHEPHERD e LAPPLE (1939)	6,035439
STAIRMAND (DIRGO e LEITH, 1985)	5,487386
FIRST (DIRGO e LEITH, 1986)	5,823451
BARTH (DIRGO e LEITH, 1985)	5,549732
CASAL e MARTÍNEZ-BENET (1983)	4,937889
CONSTANTINESCU (1984)	1,114197
MAROULIS e CREMALIS (1995)	4,650658

De posse desses valores calculados, determinou-se o perfil de queda de pressão calculado pelos modelos para o ciclone Stairmand para diferentes velocidades de alimentação e comparou-se com os valores experimentalmente obtidos. Dessa forma, foi possível, determinar qual o melhor modelo para esse ciclone.

Na Figura 4.8 comparou-se os resultados experimentais apresentados na Figura 4.7 com os valores estimados pelos modelos de FIRST (DIRGO e LEITH, 1986), SHEPHERD e LAPPLE (1939), STAIRMAND (DIRGO e LEITH, 1985), BARTH (DIRGO e LEITH, 1985) e CONSTANTINESCU, (1984).

Na Figura 4.9, os modelos empregados para a comparação foram: CASAL e MARTÍNEZ-BENET, (1983), e o de MAROULIS e CREMALIS, (1995). O modelo de CREMASCO e NEBRA, (1992), foi comparado na Figura 4.10.

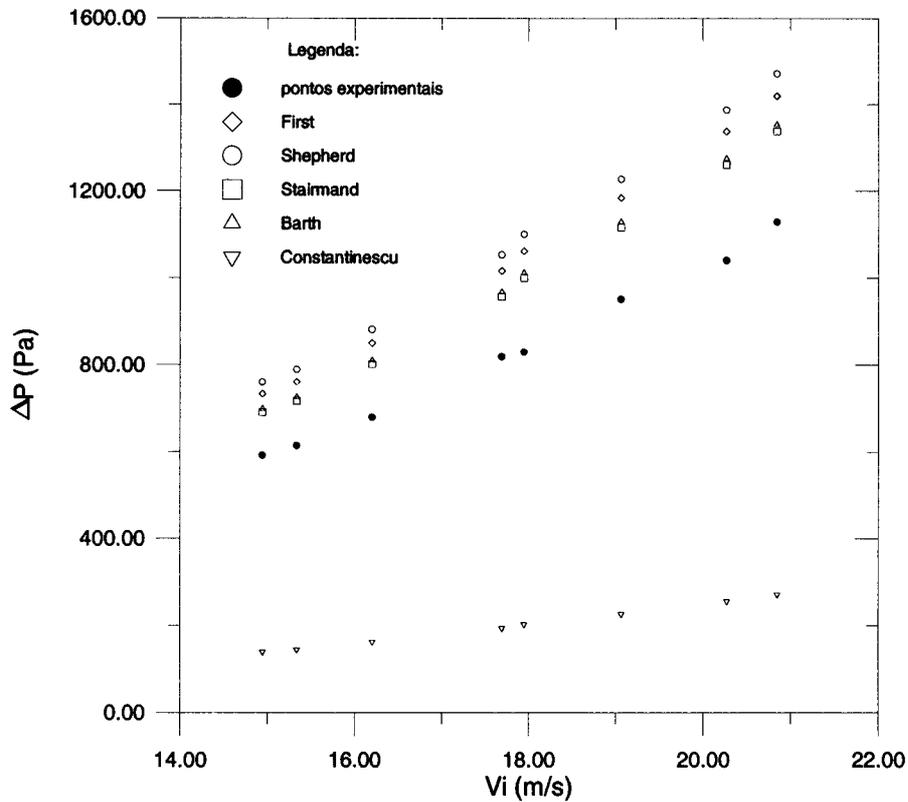


Figura 4.8 – Comparação entre os pontos experimentais e os modelos de: FIRST (DIRGO e LEITH, 1986), SHEPHERD e LAPPLE (1939), STAIRMAND (DIRGO e LEITH, 1985), BARTH (DIRGO e LEITH, 1985) e CONSTANTINESCU (1984).

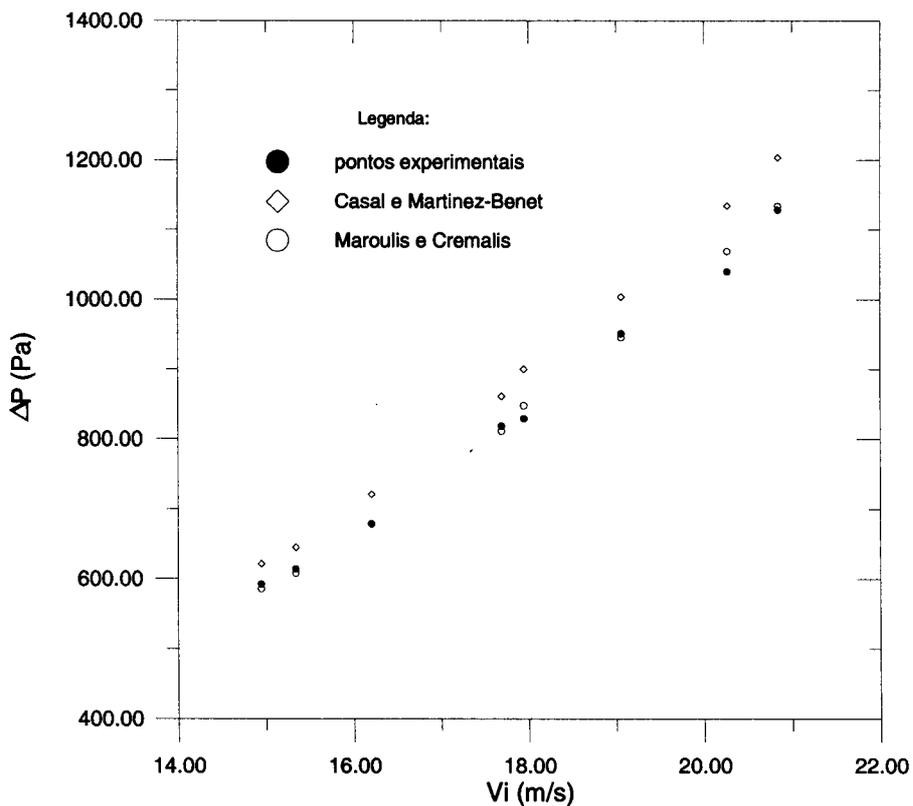


Figura 4.9 - Comparação entre os resultados experimentais e os modelos de CASAL e MARTÍNEZ-BENET (1983) e de MAROULIS E CREMALIS (1995).

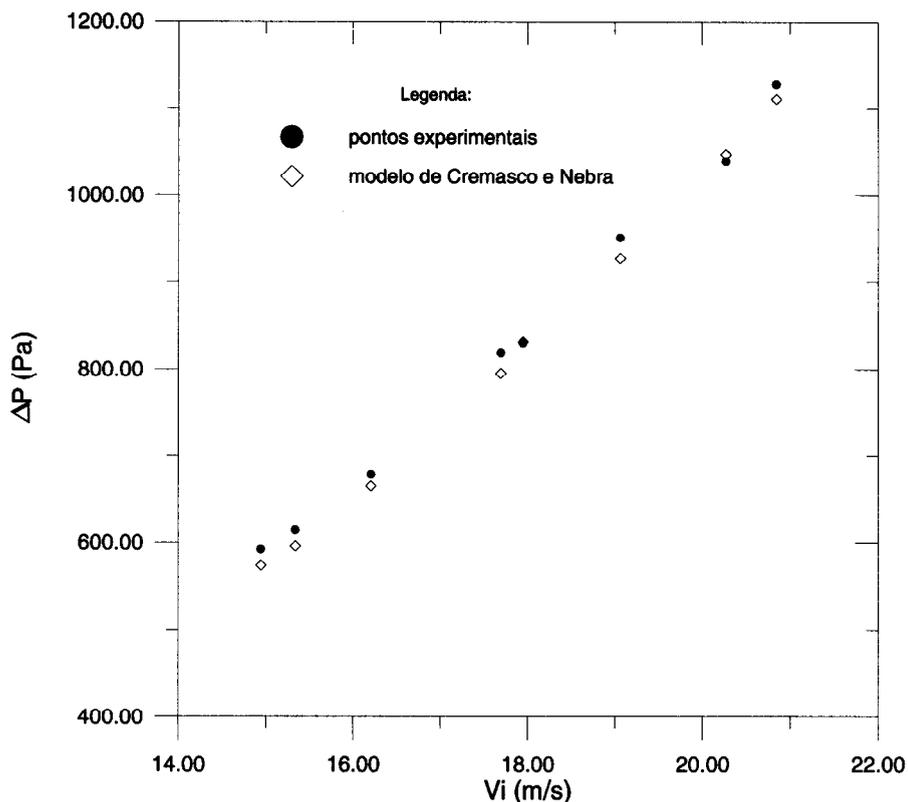


Figura 4.10 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo de CREMASCO e NEBRA, (1992), (fator de atrito=0,0121).

Entre os modelos apresentados, para o ciclone Stairmand, os que apresentaram melhores resultados foram os modelos de: CASAL e MARTÍNEZ-BENET, (1983), MAROULIS e CREMALIS, (1995) e, o modelo de CREMASCO e NEBRA, (1992).

Para ambos os ciclones, os modelos de CREMASCO e NEBRA, (1992), e CASAL e MARTÍNEZ-BENET, (1983), apresentaram boa concordância com os resultados experimentais. Isso está de acordo com o que foi verificado na revisão bibliográfica, onde o modelo de CASAL e MARTÍNEZ-BENET, (1983), é constantemente citado como um dos melhores modelos. O modelo de CREMASCO e NEBRA, (1992), mostrou-se muito eficiente no cálculo da queda de pressão dos ciclones. Para o modelo de CREMASCO e NEBRA, (1992), é possível alterar o valor do fator de atrito, possibilitando assim que diferentes tipos de materiais de construção de ciclones sejam considerados durante a simulação.

4.4 - Influência do coletor sobre a queda de pressão do ciclone Lapple

Para avaliar qual a influência sobre a queda de pressão de um coletor de pó acoplado ao ciclone, decidiu-se realizar alguns testes experimentais seguindo um planejamento de experimentos. Foram realizados 8 testes experimentais para o ciclone do tipo Lapple.

A metodologia seguiu o procedimento descrito no sub-item 3.4.3 do capítulo anterior.

Para esse estudo, escolheu-se dois níveis de velocidade de alimentação, sendo o inferior (sinal “-”) igual a 12,95 m/s e o nível superior (sinal “+”) igual a 16,91 m/s, respectivamente. O ciclone operando sem coletor será representado pelo sinal “-“ e operando com coletor, pelo sinal “+”.

A Tabela 4.8 apresenta os resultados do planejamento experimental.

Tabela 4.8 – Resultados do planejamento de experimentos para o ciclone Lapple

V_i (m/s)	Coletor	DP (Pa)		DP_{médio} (Pa)
-	-	532,227	534,347	533,287
+	-	928,747	932,988	930,868
-	+	513,143	515,264	514,204
+	+	884,218	886,338	885,278

Os cálculos dos efeitos principais e de interação envolvendo o planejamento experimental do tipo 2² são apresentados no Apêndice D, deixando para este item apenas a interpretação dos resultados.

Os ensaios da Tabela 4.8 foram realizados em duplicata, para que fosse possível estimar o valor do erro experimental, e a partir disso, avaliar a significância estatística dos efeitos.

A Tabela 4.9 reúne os resultados da análise feita aos dados da Tabela 4.8.

Tabela 4.9 – Efeitos calculados para o planejamento da Tabela 4.8

	Estimativa \pm erro padrão
Média global	715,91 \pm 0,9917
Vi	384,33 \pm 1,9834
Coletor	-32,34 \pm 1,9834
Vi x Coletor	-13,25 \pm 1,9834

O desvio padrão envolvido nessa determinação experimental corresponde à 1,9835 (Apêndice D). Somente será considerado significativo o efeito que superar o valor de 5,5061. Aplicando esse critério aos valores da Tabela 4.9, conclui-se que todos os efeitos são significativos.

Para avaliar o efeito do coletor na queda de pressão do ciclone em operação, pode-se utilizar a Figura 4.11. Com o auxílio dessa figura pode-se dar uma interpretação geométrica dos efeitos calculados, representando cada efeito em um eixo. Como se tem apenas dois fatores, o espaço definido é um plano, no qual os quatro ensaios ocupam os vértices de um quadrado.

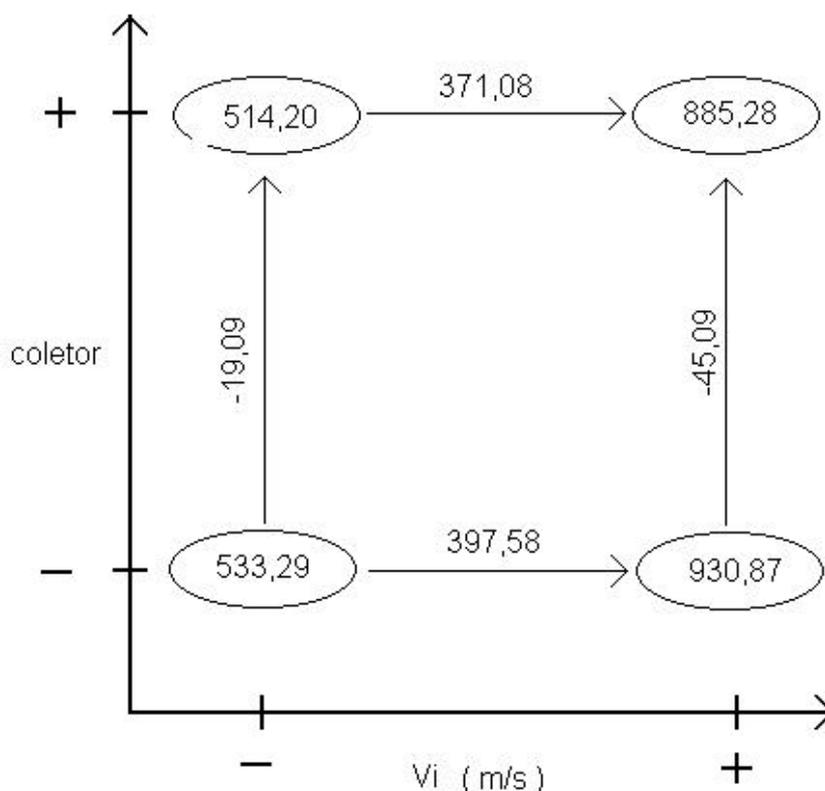


Figura 4.11 – Diagrama para interpretação dos resultados da Tabela 4.8.

A existência do efeito de interação significativo indica que os efeitos principais devem ser interpretados conjuntamente. Examinando a Figura 4.11 pode-se concluir que:

- ❖ o aumento da velocidade aumenta a queda de pressão, mas esse efeito é mais pronunciado quando o ciclone está operando sem o coletor de finos.
- ❖ ao adicionar o coletor no ciclone, diminui a queda de pressão, e esse efeito é mais pronunciado a velocidade de 16,91 m/s do que a 12,95 m/s (-45,09 Pa contra -19,09 Pa)

4.5 - Influência do coletor sobre a queda de pressão do ciclone Stairmand.

A Tabela 4.10 apresenta os resultados do planejamento experimental.

Tabela 4.10 – Resultados do planejamento de experimentos para o ciclone Stairmand

Vi (m/s)	Coletor	DP (Pa)		DP _{médio} (Pa)
-	-	498,319	496,207	497,263
+	-	764,371	770,705	767,538
-	+	491,984	491,989	491,987
+	+	753,813	755,925	754,869

Os ensaios da Tabela 4.10 foram realizados em duplicata, para que fosse possível estimar o valor do erro experimental, e a partir disso, avaliar a significância estatística dos efeitos. A Tabela 4.11 reúne os resultados da análise feita aos dados da Tabela 4.10. Os cálculos são encontrados no Apêndice E.

Tabela 4.11 – Efeitos calculados para o planejamento da Tabela 4.10

	Estimativa ± erro padrão
Média global	627,914 ± 1,2374
Vi	266,578 ± 2,4749
Coletor	-8,972 ± 2,4749
Vi x Coletor	-3,696 ± 2,4749

O desvio padrão envolvido nessa determinação experimental corresponde à 2,4749 (Apêndice E). Somente será considerado significativo o efeito que superar o valor de 6,8731. Aplicando esse critério aos valores da Tabela 4.11, conclui-se que o efeito de interação é significativo.

Para avaliar o efeito do coletor na queda de pressão do ciclone em operação, pode-se utilizar a Figura 4.12.

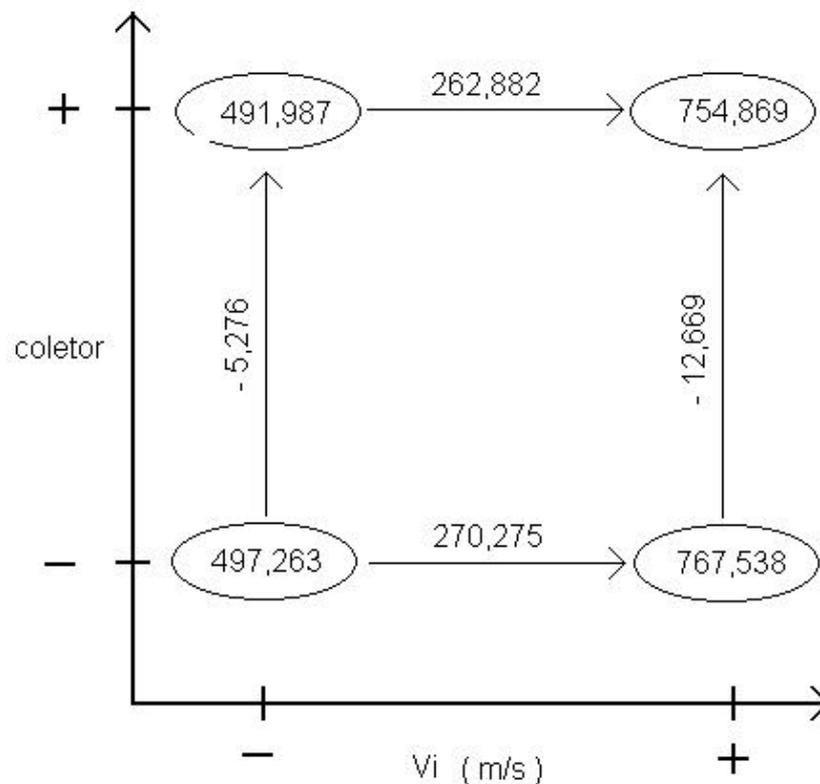


Figura 4.12 – Diagrama para interpretação dos resultados da Tabela 4.10.

Examinando a Figura 4.12 pode-se concluir que:

- ❖ o aumento da velocidade provoca um aumento, em média, de 266,578 Pa para a queda de pressão.
- ❖ ao adicionar o coletor no ciclone, ocorre a redução, em média, de 8,972 Pa para a queda de pressão.

4.6 - Influência da concentração de sólidos e velocidade de alimentação sobre a queda de pressão do ciclone Lapple

Para estudar a influência da concentração de sólidos presentes na alimentação sobre a queda de pressão do ciclone Lapple, realizou-se um planejamento de experimentos a dois fatores, realizado-se oito ensaios experimentais. As variáveis de pesquisa foram:

- Velocidade de alimentação : V_i (m/s)
- Concentração na corrente de alimentação : C (kg/m³)

Tabela 4.12 – Níveis dos fatores

Variável	Nível	
	-	+
V_i (m/s)	12,77 ± 0,0416	14,82 ± 0,0115
C (kg/m ³)	0,0025 ± 0,000088	0,0180 ± 0,0015

A concentração de sólidos presentes na corrente de alimentação foi calculada segundo a equação (183) apresentada no sub-item 3.5.1.

A Tabela 4.13 apresenta os resultados obtidos decorrentes do planejamento experimental.

Tabela 4.13 – Resultados obtidos de queda de pressão em função da concentração de alimentação.

V_i (m/s)	C (kg/m ³)	DP (Pa)		DP _{médio} (Pa)
-	-	468,3002	474,445	471,3776
+	-	625,9499	618,7404	622,3452
-	+	441,0487	436,4544	438,7515
+	+	560,1460	556,2586	558,2023

Para esse estudo, somente será considerado significativo um efeito cujo valor absoluto exceder $(2,776 \cdot 3,9679) = 11,0149$.

Os valores dos efeitos foram calculados segundo a metodologia apresentada no Apêndice D e são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial do ciclone Lapple.

	Estimativa ± erro padrão
Média global	522,6691 ± 1,9839
Vi	135,2092 ± 3,9679
C	-48,3845 ± 3,9679
Vi x C	-15,7584 ± 3,9679

Os resultados da Tabela 4.13 são dispostos no diagrama apresentado na Figura 4.13.

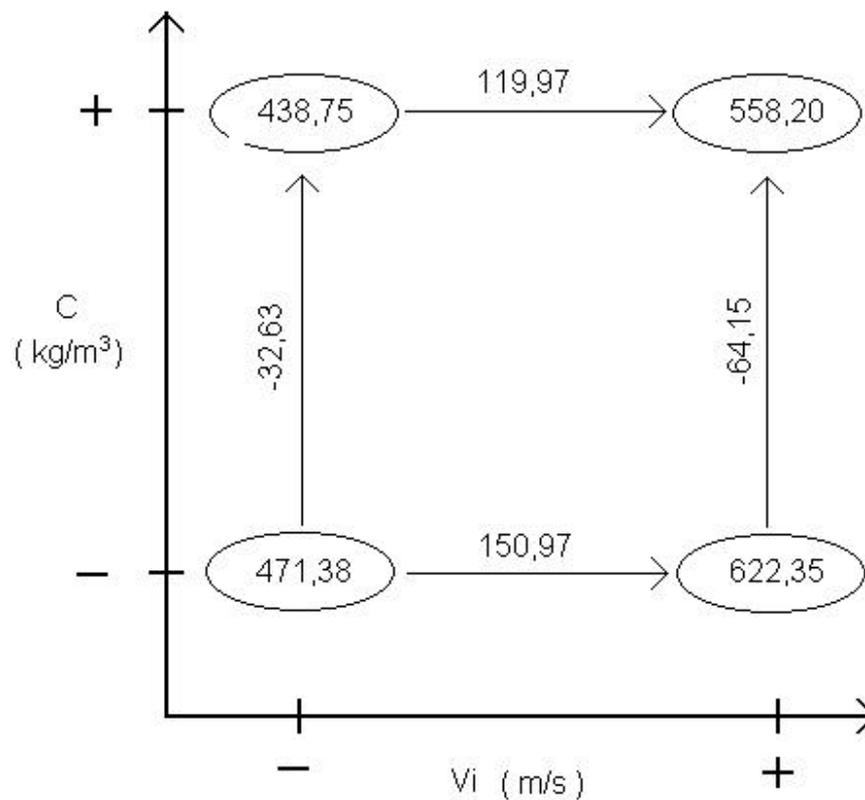


Figura 4.13 – Diagrama para interpretação dos resultados da Tabela 4.13.

Analisando-se a Tabela 4.14, conclui-se a existência de um efeito de interação significativo. Dessa forma, os efeitos principais devem ser interpretados conjuntamente. Examinando a Figura 4.13 pode-se concluir que:

❖ o aumento da velocidade aumenta a queda de pressão, mas esse efeito é menos pronunciado quando o ciclone está operando com a concentração de sólidos no nível superior.

❖ o aumento da concentração de sólidos na alimentação diminui a queda de pressão, e esse efeito é mais pronunciado a velocidade de 14,82 m/s do que a 12,77 m/s.

Uma vez que ficou evidente que a concentração de sólidos causa uma diminuição da queda de pressão, foram realizados mais 22 testes experimentais cobrindo uma faixa maior de concentração e outros valores de velocidade de alimentação. Esses resultados são apresentados, separadamente, para três diferentes velocidades nas figuras 4.14, 4.15 e 4.16. E todos os resultados são apresentados conjuntamente na Figura 4.17.

No Apêndice F, encontram-se as tabelas com os valores experimentais da queda de pressão no ciclone Lapple em função da concentração de pó para cada velocidade.

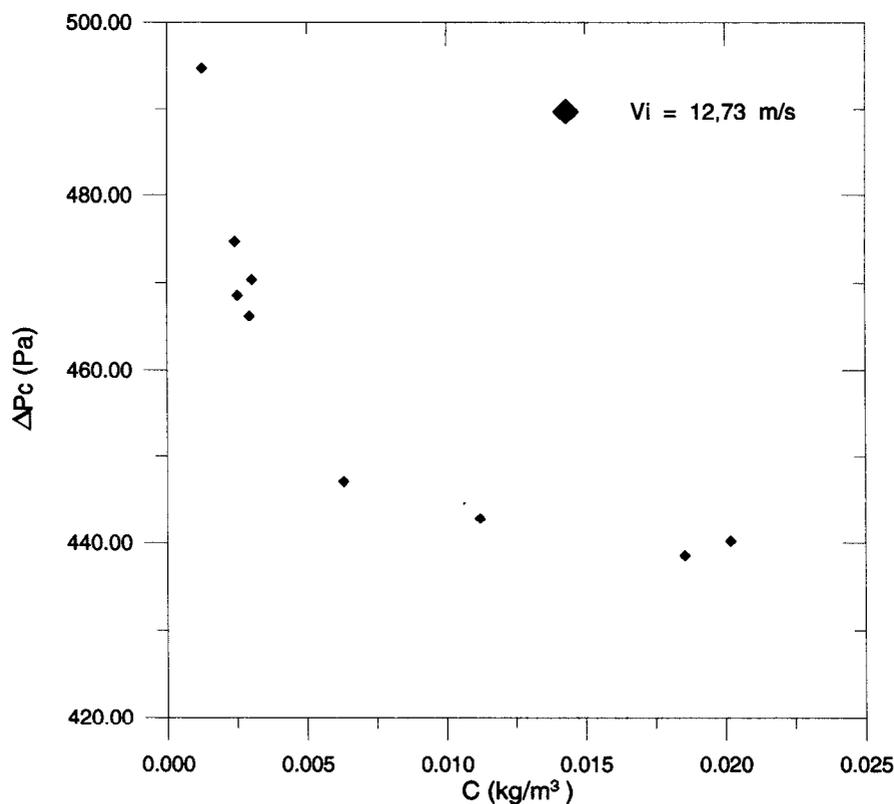


Figura 4.14 – Efeito da concentração na queda de pressão para $V_i = 12,73$ m/s.

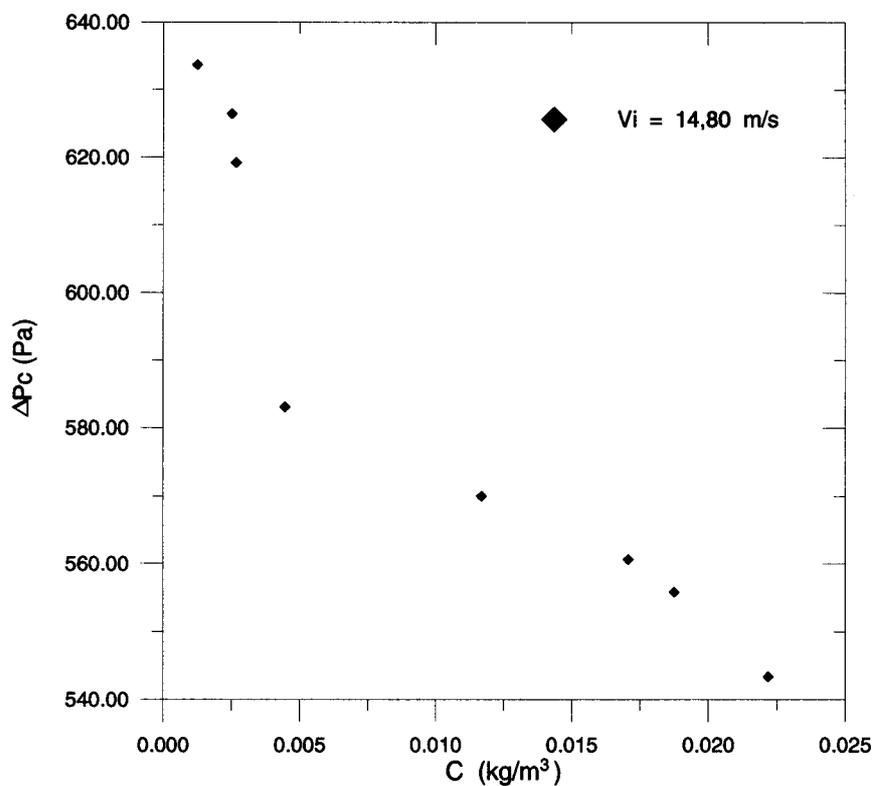


Figura 4.15 – Efeito da concentração na queda de pressão para $V_i = 14,80$ m/s.

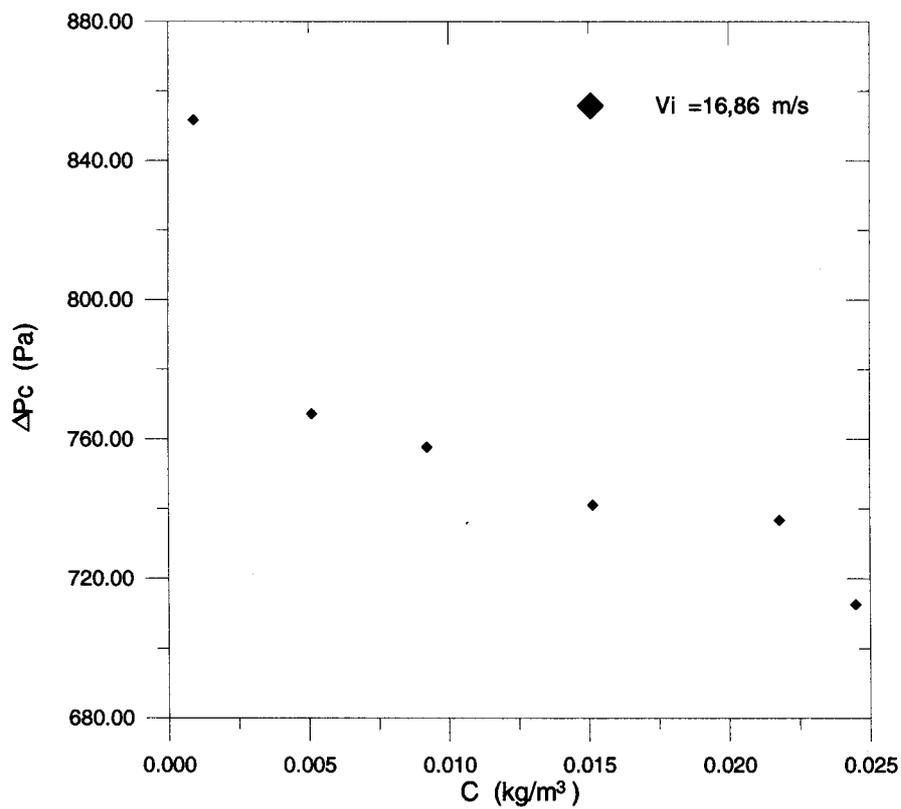


Figura 4.16 – Efeito da concentração na queda de pressão para $V_i = 16,86$ m/s.

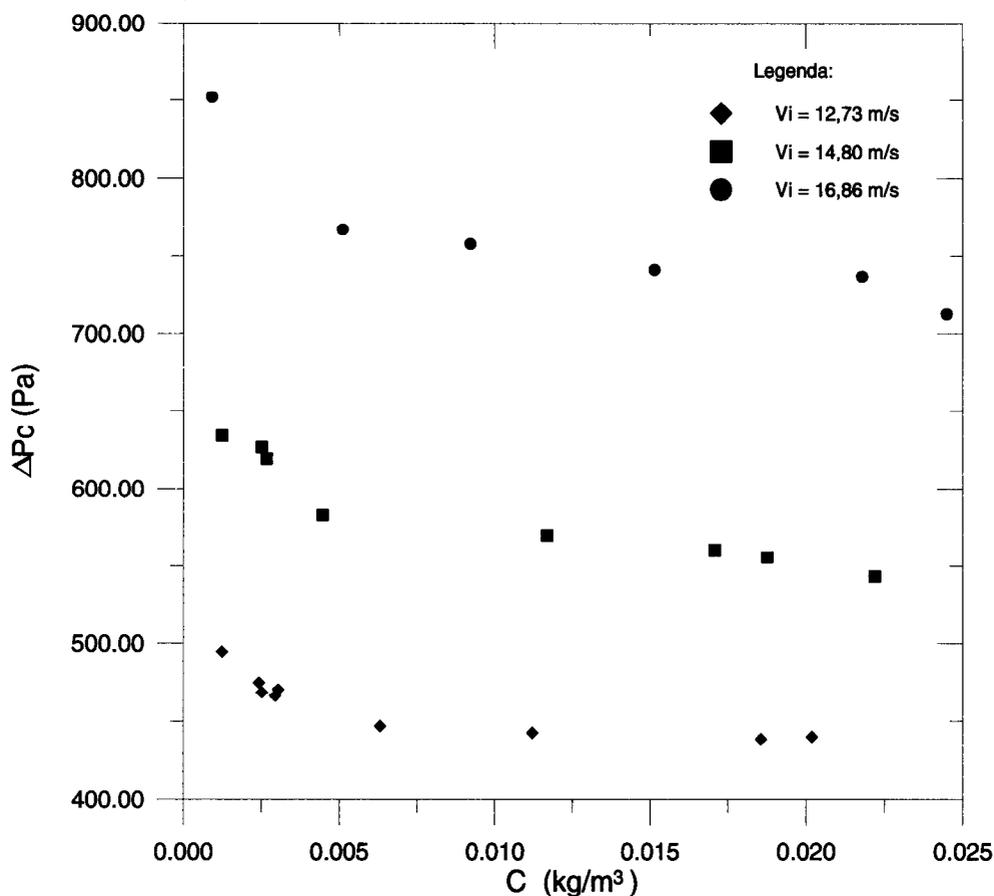


Figura 4.17 – Influência da concentração de alimentação na queda de pressão

De acordo com a Figura 4.17, conclui-se que a queda de pressão diminui com o aumento da concentração de pó para todas as velocidades estudadas. Percebe-se ainda que, existe uma redução na queda de pressão mesmo para baixas concentrações de pó.

Os resultados experimentais de queda de pressão foram normalizados, ajustando-se assim os pontos obtidos às equações (160) e (161) do sub-item 2.5.1, avaliando dessa forma qual o modelo que representa a queda de pressão para o ciclone Lapple quando alimentado com finos de xisto. Os resultados são apresentados na Figura 4.18.

O método usado para determinar os parâmetros das equações de SCHEID (1992), e de HOFFMANN *et al.* (1992), bem como as tabelas com os dados desse gráfico são apresentados no Apêndice G.

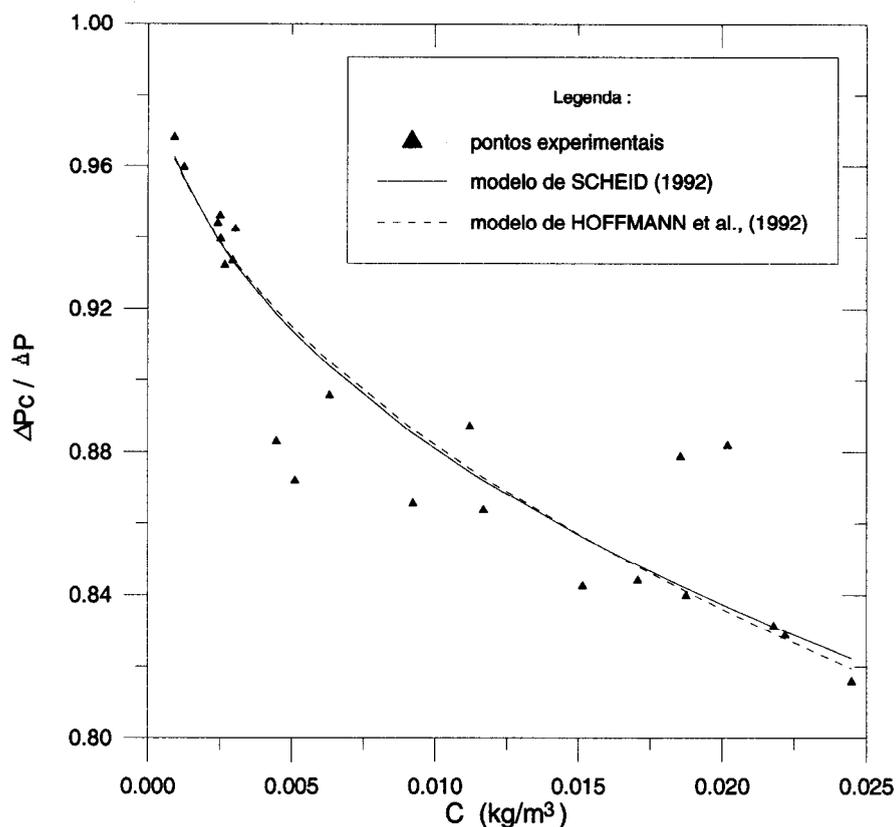


Figura 4.18 – Comparação entre os pontos experimentais normalizados e as curvas de ajuste dos modelos de SCHEID (1992) e de HOFFMANN *et al.* (1992) para o ciclone Lapple.

Observa-se pela Figura 4.18 que os pontos experimentais estão um pouco dispersos e que as curvas de ajuste são apenas satisfatórias para este caso.

4.7 - Influência da concentração de sólidos e velocidade de alimentação sobre a queda de pressão do ciclone Stairmand.

Executando o mesmo procedimento despendido para o ciclone Lapple, avaliou-se também para o ciclone Stairmand a influência da concentração de alimentação e velocidade de alimentação na sua queda de pressão. Foram realizadas então 8 corridas experimentais num planejamento fatorial. A Tabela 4.15 apresenta os níveis dos fatores.

A concentração de sólidos presentes na corrente de alimentação foi calculada segundo a equação (183) apresentada no sub-item 3.5.1.

A Tabela 4.16 apresenta os resultados obtidos decorrentes do planejamento experimental.

Tabela 4.15 – Níveis dos fatores

Variável	Nível	
	-	+
Vi (m/s)	12,7503 ± 0,0643	14,8862 ± 0,0475
C (kg/m³)	0,00218 ± 0,00017	0,01768 ± 0,00058

Tabela 4.16 – Resultados obtidos de queda de pressão em função da concentração de alimentação.

Vi (m/s)	C (kg/m ³)	DP (Pa)		DP _{médio} (Pa)
-	-	354,296	364,852	359,5741
+	-	528,779	549,096	538,937
-	+	322,533	324,672	323,603
+	+	496,459	501,443	498,951

Para esse estudo, somente será considerado significativo um efeito cujo valor absoluto exceder $(2,776 \cdot 8,3188) = 23,0931$.

A Tabela 4.17 apresenta os efeitos calculados segundo o procedimentos descrito no Apêndice H.

Tabela 4.17 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial do ciclone Stairmand.

	Estimativa ± erro padrão
Média global	430,266 ± 4,1594
Vi	177,335 ± 8,3168
C	-37,978 ± 8,3168
Vi . C	-2,007 ± 8,3168

Os resultados da Tabela 4.16 são dispostos no diagrama apresentado na Figura 4.19.

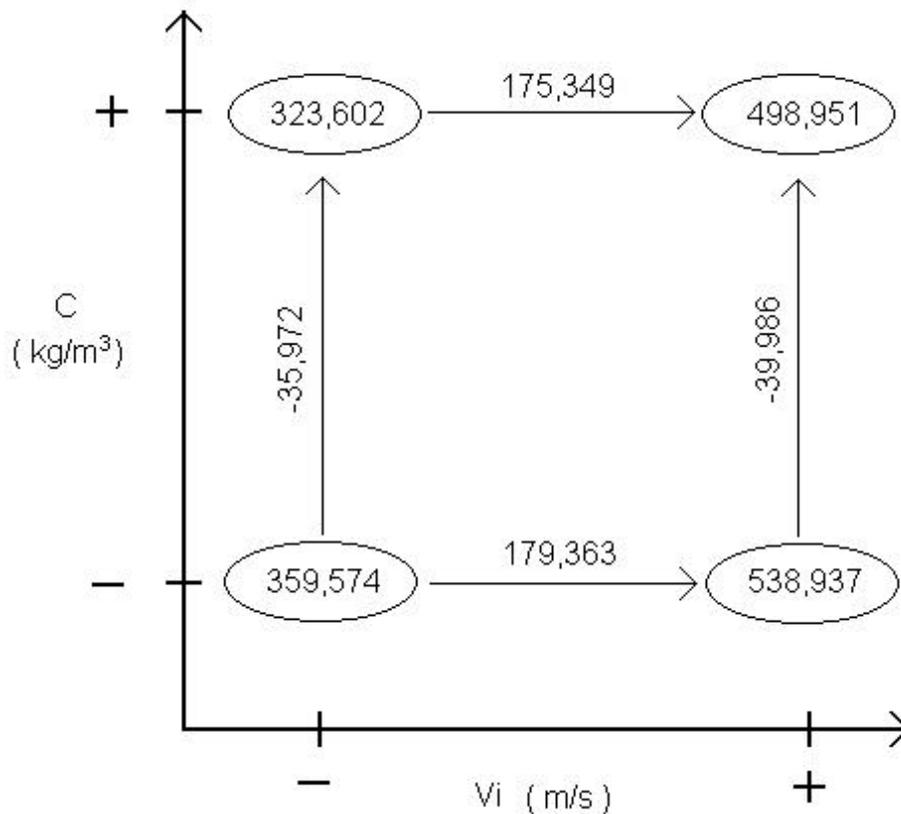


Figura 4.19 – Diagrama para interpretação dos resultados da Tabela 4.16.

Como o efeito de interação é desprezível, pois é menor do que o erro padrão, significa que não há interação entre as variáveis. Logo, a queda de pressão aumenta com o aumento da velocidade independentemente da concentração e a queda de pressão diminui com o aumento da concentração independentemente da velocidade de alimentação. A análise da Figura 4.19 leva às seguintes conclusões:

- ❖ a queda de pressão aumenta, em média, 177,6 Pa quando se usa a velocidade superior.
- ❖ a queda de pressão diminui, em média, 37,871 Pa quando a concentração de alimentação está no nível superior.

Nas figuras 4.20, 4.21 e 4.22 são apresentados os resultados da investigação experimental da influência da concentração de alimentação a duas diferentes velocidades de alimentação para comprovar os resultados encontrados no planejamento experimental. Na Figura 4.23, os resultados são apresentados conjuntamente para avaliar o efeito da velocidade e concentração sobre a queda de pressão do ciclone Stairmand. As tabelas contendo os valores experimentais das figuras 4.20, 4.21 e 4.22 encontram-se no Apêndice I.

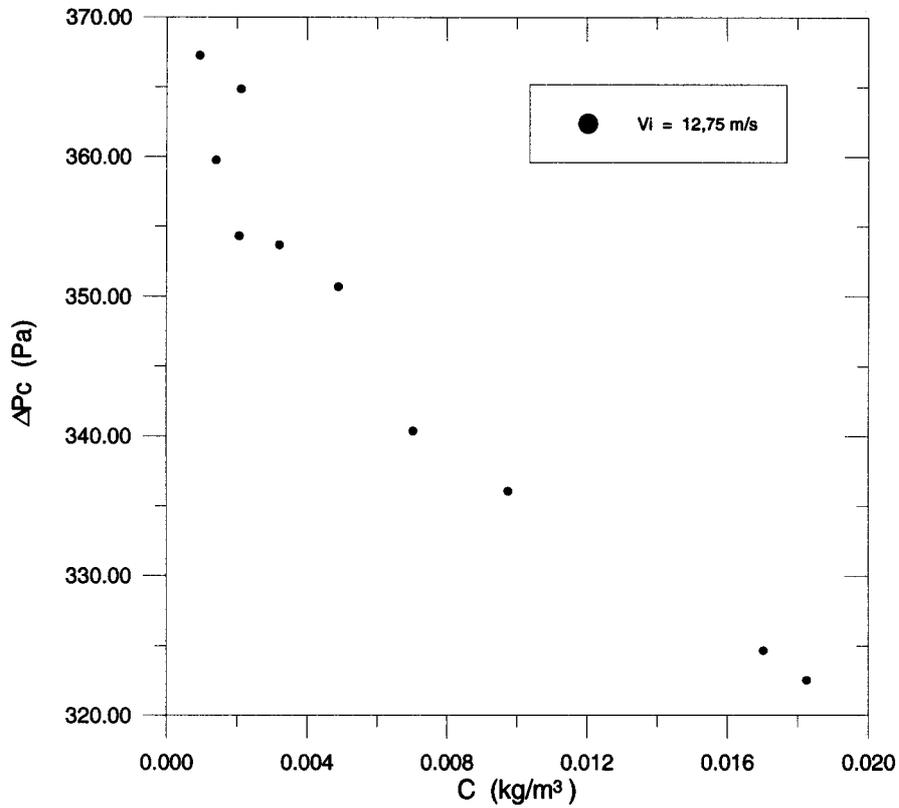


Figura 4.20 – Efeito da concentração de alimentação sobre a queda de pressão do ciclone Stairmand a 12,75 m/s.

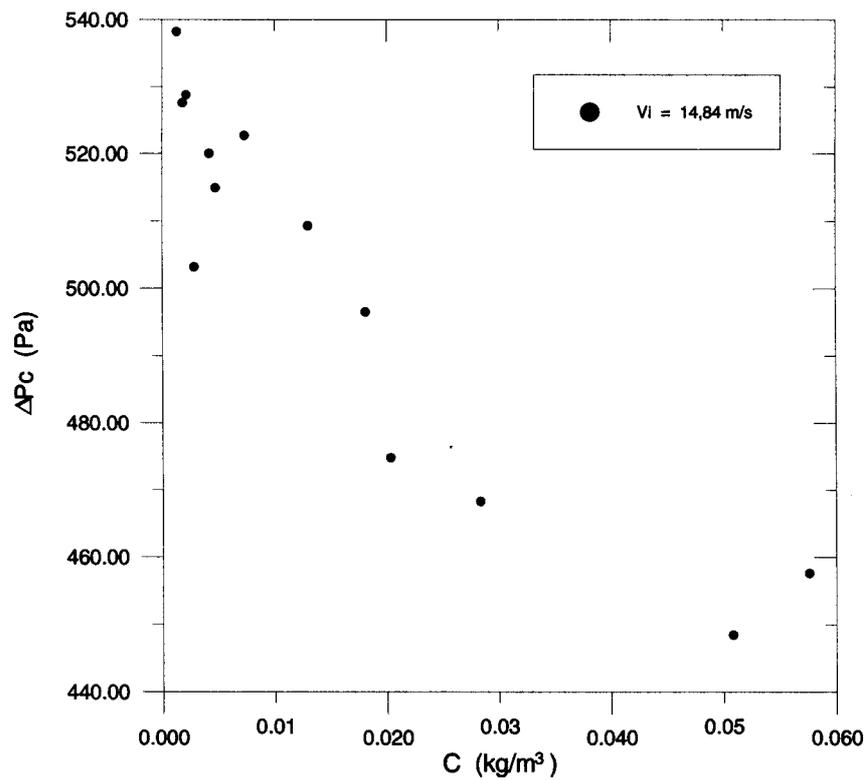


Figura 4.21 – Efeito da concentração de alimentação sobre a queda de pressão do ciclone Stairmand a 14,84 m/s.

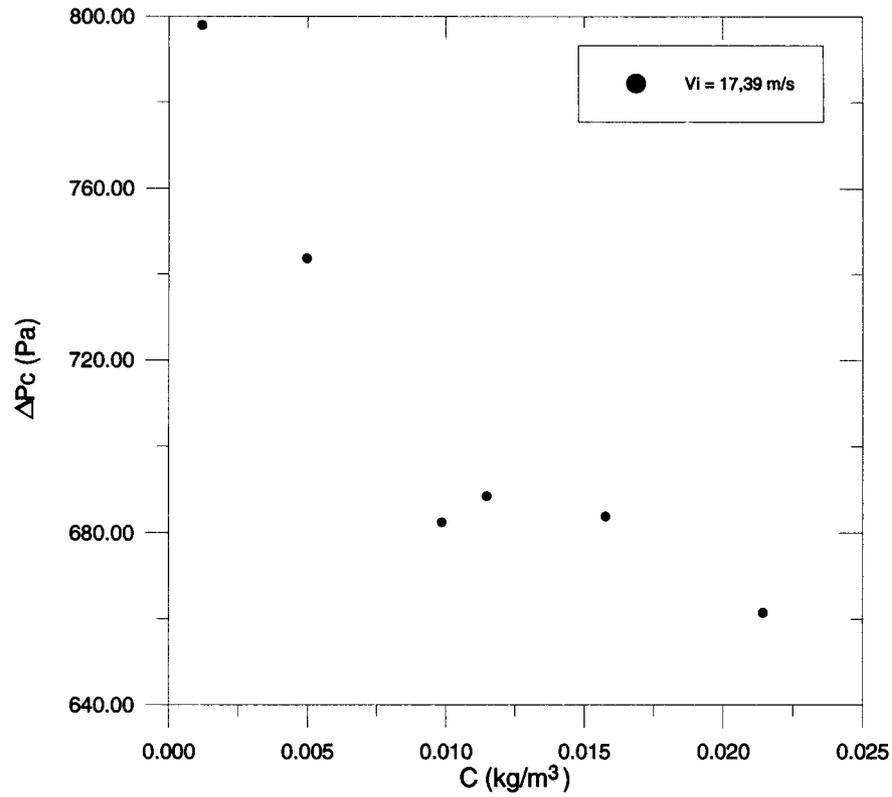


Figura 4.22 – Efeito da concentração de alimentação sobre a queda de pressão do ciclone Stairmand a 17,39 m/s.

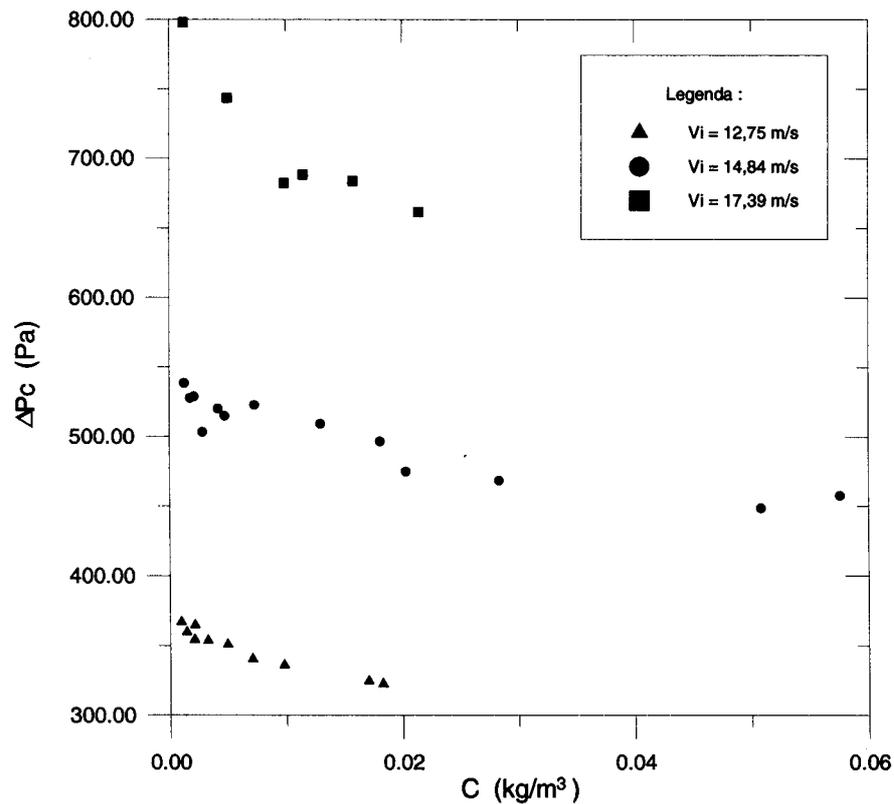


Figura 4.23 – Efeito da concentração de alimentação sobre a queda de pressão do ciclone Stairmand a diferentes velocidades.

Observa-se pela Figura 4.24 que os pontos experimentais estão, como na Figura 4.18, dispersos e que as curvas dos modelos de ajuste são apenas satisfatórias, já que ambos os modelos apresentam um coeficiente de correlação menor do que 0,74. As tabelas e as equações com os dados da Figura 4.24 são apresentados no Apêndice J.

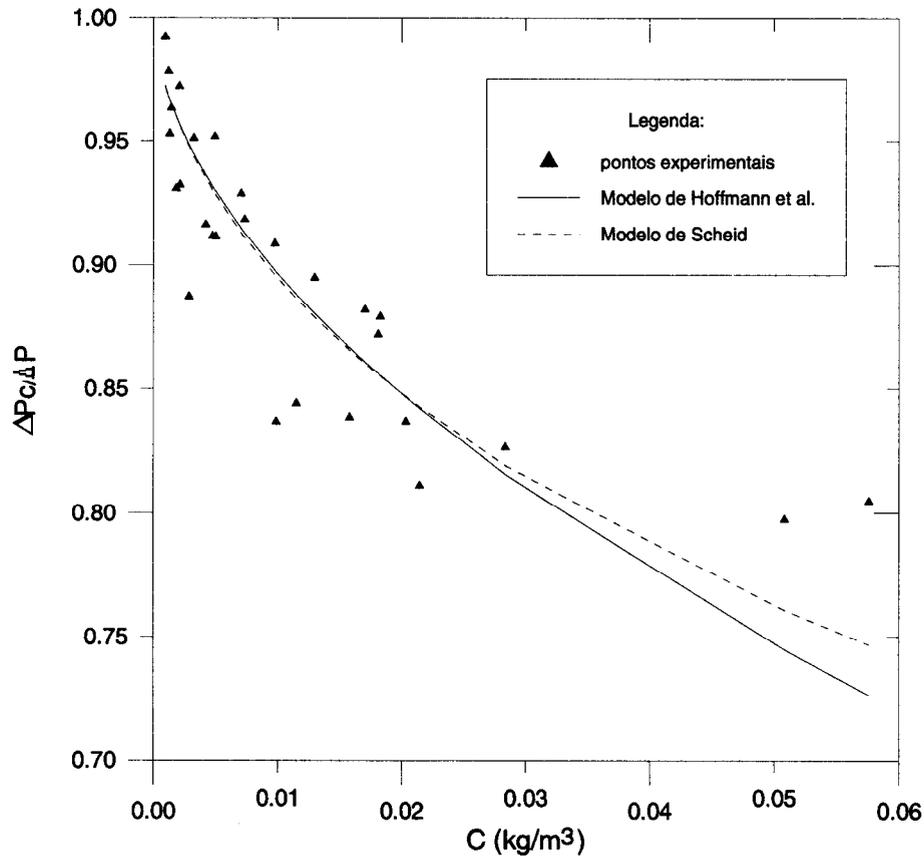


Figura 4.24 – Comparação entre os pontos experimentais normalizados e as curvas de ajuste dos modelos de SCHEID (1992) e de HOFFMANN *et al.* (1992) para o ciclone Stairmand.

4.8 - Influência da concentração de sólidos e velocidade de alimentação sobre a eficiência mássica do ciclone Lapple.

Além da queda de pressão dos ciclones, a outra variável importante para os ciclones é a eficiência mássica de coleta. Para o ciclone Lapple sendo alimentado com partículas de xisto, investigou-se qual a influência sobre a eficiência mássica quando eram variadas a concentração de alimentação e a velocidade de alimentação. Inicialmente, foi feito um planejamento de experimentos, num total de 8 experimentos para avaliar qual a influência dessas duas variáveis sobre a eficiência mássica de coleta.

Os níveis das variáveis são apresentados na Tabela 4.18 e os resultados obtidos dos 8 experimentos são apresentados na Tabela 4.19.

Tabela 4.18 – Níveis dos fatores

Variável	Nível	
	-	+
Vi (m/s)	12,7622 ± 0,0330	14,8258 ± 0,0164
C (kg/m³)	0,00252 ± 0,00009	0,0180 ± 0,0015

Tabela 4.19 – Resultados do planejamento de experimentos para a eficiência mássica de coleta do ciclone Lapple.

Vi (m/s)	C (kg/m ³)	h (%)		h _{médio} (%)
-	-	95,6896	95,0150	95,3523
+	-	94,9587	95,0329	94,9958
-	+	95,6550	95,5912	95,6231
+	+	95,736	95,924	95,8300

Na Tabela 4.20 são apresentados os valores dos efeitos principais e de interação, bem como o desvio padrão associado com esse planejamento de experimentos.

Tabela 4.20 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial do ciclone Lapple.

	Estimativa ± erro padrão
Média global	95,4503 ± 0,1250
Vi	-0,0748 ± 0,2500
C	0,5225 ± 0,2500
Vi . C	0,2817 ± 0,2500

Somente será considerado estatisticamente significativo o efeito que tiver um valor superior a: $(2,776 \cdot 0,2500) = 0,6940$.

Analisando a Tabela 4.20, pode-se concluir que nem a concentração de alimentação, nem a velocidade de alimentação tem influência significativa sobre a eficiência de coleta do ciclone Lapple.

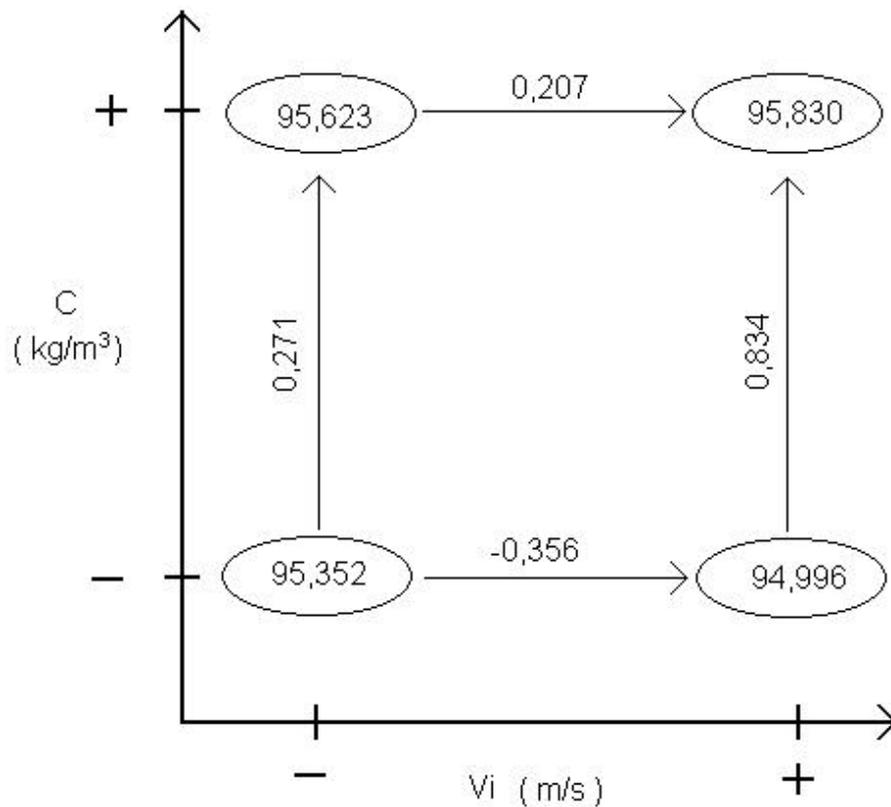


Figura 4.25 – Interpretação geométrica dos efeitos sobre a eficiência mássica do ciclone Lapple.

A análise da Figura 4.25 conduz à seguinte conclusão:

- ❖ a eficiência de coleta mássica do ciclone não é influenciada pelo aumento de velocidade e nem pelo aumento de concentração de alimentação.

O esperado, segundo a revisão bibliográfica, era que a eficiência mássica de coleta aumentasse com o aumento da velocidade de alimentação. O xisto, parece não obedecer a essa tendência.

Outro ponto de contradição é quanto ao aumento da eficiência mássica de coleta com a concentração. Apenas SCHEID (1992), apresenta resultados de eficiência mássica que não são influenciados pela concentração.

Para confirmar os resultados do planejamento experimental, foram realizados 18 corridas experimentais alterando-se a velocidade e a concentração de alimentação.

As tabelas contendo esses resultados encontram-se no Apêndice J. A Figura 4.26 ilustra o comportamento do ciclone Lapple quanto a eficiência mássica de coleta.

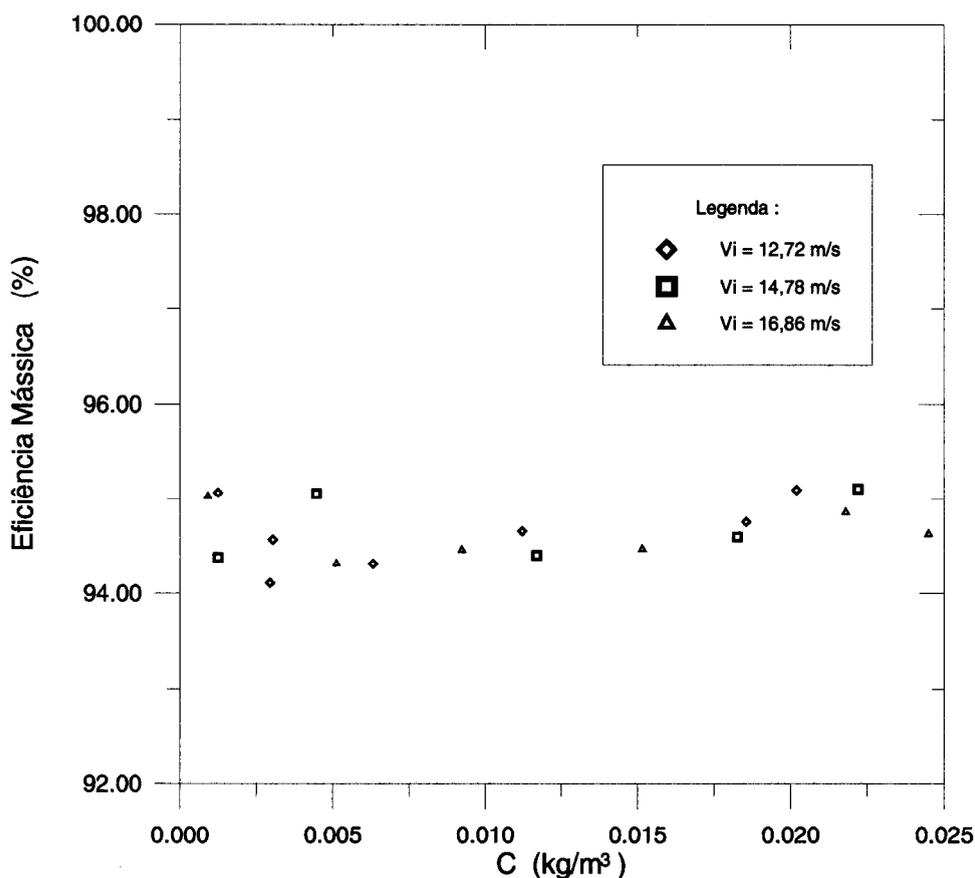


Figura 4.26 – Influência da concentração e velocidade de alimentação na eficiência mássica de coleta do ciclone Lapple.

Como pode ser visto na Figura 4.26, de fato, quando o ciclone Lapple é alimentado com finos de xisto, parece não haver influência significativa nem da concentração e nem da velocidade de alimentação sobre a eficiência mássica de coleta.

4.9 - Influência da concentração de sólidos e velocidade de alimentação sobre a eficiência mássica do ciclone Stairmand.

Repetindo a metodologia empregada nos outros itens, estendeu-se o estudo da influência da concentração e velocidade de alimentação sobre a eficiência mássica de coleta também para o ciclone do tipo Stairmand. Da mesma forma, realizou-se um planejamento de experimentos, a fim de avaliar qual o comportamento para este ciclone.

Esse planejamento necessitou de 8 ensaios experimentais, os níveis das variáveis pesquisadas são apresentadas na Tabela 4.21 e os resultados obtidos do planejamento são apresentados na Tabela 4.22.

Tabela 4.21 – Níveis dos fatores

Variável	Nível	
	-	+
Vi (m/s)	12,7503 ± 0,0643	14,8862 ± 0,0475
C (kg/m³)	0,00218 ± 0,00017	0,01768 ± 0,00058

Tabela 4.22 – Resultados do planejamento de experimentos para a eficiência mássica de coleta do ciclone Stairmand.

Vi (m/s)	C (kg/m ³)	h (%)		h _{médio} (%)
-	-	96,7088	96,7785	96,7437
+	-	96,2774	96,2606	96,2690
-	+	95,3938	96,4153	95,9046
+	+	95,5796	97,0000	96,2898

Na Tabela 4.23 apresentam-se os resultados dos efeitos principais e de interação.

Tabela 4.23 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial do ciclone Stairmand.

	Estimativa ± erro padrão
Média global	96,3018 ± 0,5319
Vi	-0,0447 ± 1,0639
C	-0,4092 ± 1,0639
Vi . C	0,4292 ± 1,0639

Calculando-se o desvio padrão desse experimento, somente será considerado estatisticamente significativo um efeito cujo valor absoluto exceder $(2,776 \cdot 0,61908) = 1,71858$

Analisando a Tabela 4.23, conclui-se que nenhum dos efeitos estudados tem influência significativa sobre a eficiência de coleta do ciclone Stairmand quando alimentado com finos de xisto.

A Figura 4.27 apresenta os valores da eficiência de coleta no vértices do quadrado que representa os níveis estudados das variáveis.

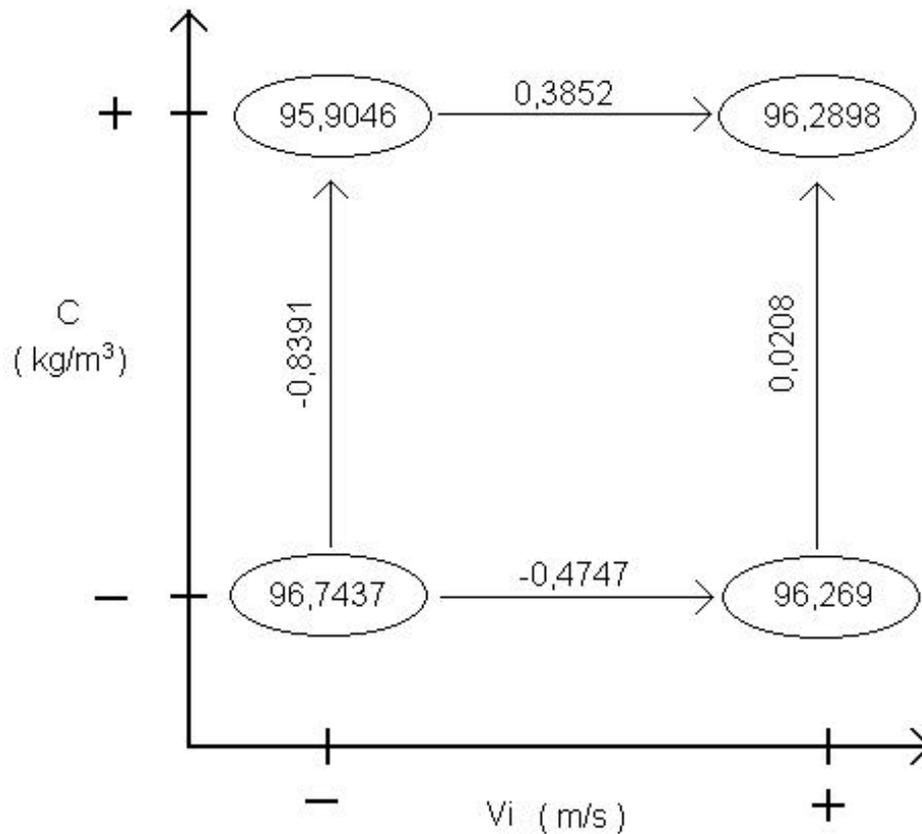


Figura 4.27 – Interpretação geométrica dos efeitos sobre a eficiência mássica de coleta do ciclone Stairmand.

A conclusão obtida ao analisar a Figura 4.27, leva a considerar que não existe uma influência significativa nem da concentração, nem da velocidade de alimentação sobre a eficiência de coleta do ciclone Stairmand. Entretanto, como no caso do ciclone Lapple, fez-se também uma investigação sobre uma faixa maior de concentração de alimentação à diferentes velocidades de alimentação.

As tabelas contendo esses valores experimentalmente obtidos encontram-se no Apêndice L. A Figura 4.28 apresenta a influência da velocidade e concentração de alimentação na eficiência mássica de coleta do ciclone Stairmand.

Os resultados apresentados na Figura 4.28 confirmam que não existe influência significativa da concentração e da velocidade de alimentação sobre a eficiência mássica de coleta para o ciclone Stairmand quando o material particulado alimentado consiste de xisto.

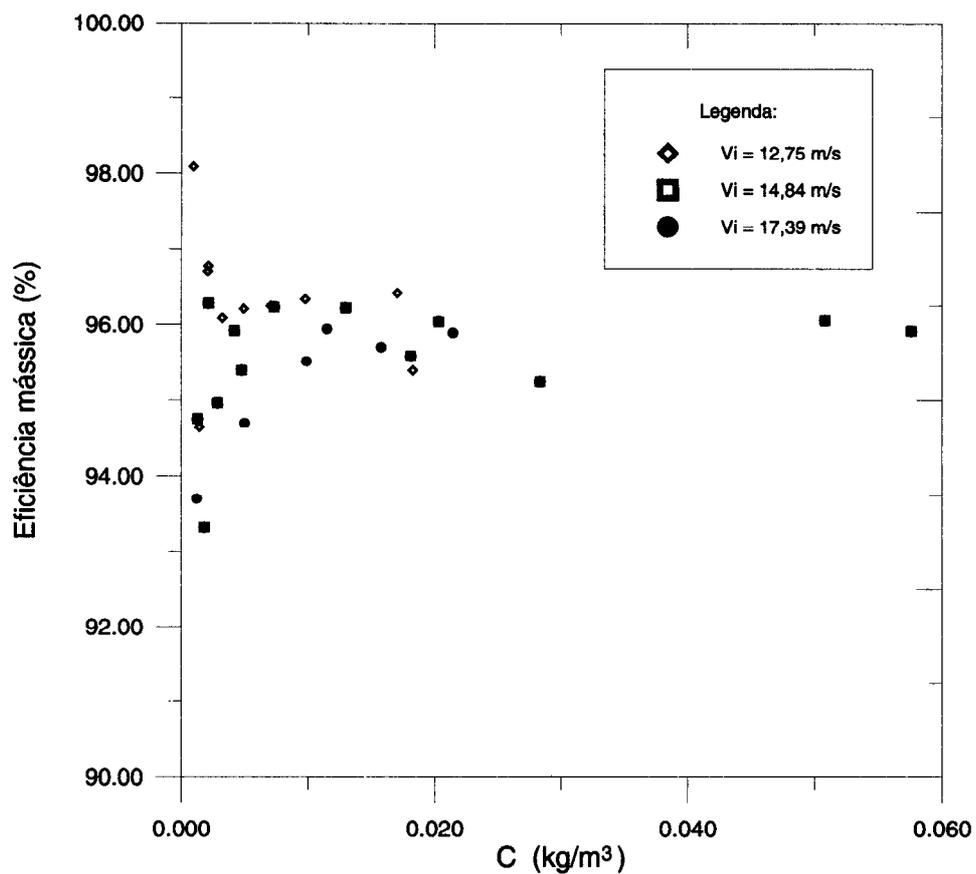


Figura 4.28 – Influência da concentração e velocidade de alimentação na eficiência mássica de coleta do ciclone Stairmand.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 – Conclusões

- ❖ Quando o gás escoar sem particulados, a queda de pressão do ciclone Lapple é maior do que a de Stairmand se comparados à mesma velocidade.
- ❖ Para ambos os ciclones com o gás escoando sem particulados, os modelos de queda de pressão de CASAL e MARTÍNEZ-BENET, (1983), e CREMASCO e NEBRA, (1992), foram os que apresentaram os valores mais próximos aos obtidos experimentalmente. As diferenças podem estar ligadas com o ponto de tomada de pressão do ciclone e à presença de um filtro coletor de partículas na saída do gás limpo do ciclone
- ❖ O coletor de partículas provoca uma diminuição na queda de pressão, para ambos os ciclones que é proporcional à velocidade de alimentação, confirmando as suposições teóricas de MEYER, (1998). Isso pode ser devido a atenuação do escoamento dentro do ciclone, por ser uma fronteira rígida a mais durante o escoamento do gás.
- ❖ A queda de pressão para os ciclones Lapple e Stairmand diminui com o aumento da concentração de alimentação, mesmo sob diferentes velocidades de alimentação de gás. Entretanto, a diminuição da queda de pressão não é igual para ambos. Quando comparados a uma mesma velocidade e a uma mesma faixa de concentração, o ciclone Lapple apresentou uma maior diminuição na queda de pressão em relação ao ciclone Stairmand.
- ❖ A eficiência mássica de coleta, para os ciclones Lapple e Stairmand, não foi influenciada pela concentração de alimentação na faixa estudada. Isso comprovou os resultados apresentados por SCHEID, (1992). Pode-se concluir

que o aumento da concentração de alimentação não significa que deva ocorrer um aumento da eficiência mássica.

- ❖ Para a faixa de trabalho não foi detectada, em ambos os ciclones, a influência da velocidade de alimentação sobre a eficiência mássica quando os ciclones são alimentados com finos de xisto.

5.2 – Sugestões

- ❖ Usar um coletor de acrílico de dimensões diferentes, para avaliar qual a influência do volume do coletor na queda de pressão dos ciclones. Podem ser usados também coletores de materiais diferentes, pois se as paredes exercerem influência, diferentes fatores de atrito contribuirão para mudar o valor da queda de pressão.
- ❖ Fazer novas tomadas de queda de pressão em outros pontos na entrada e na saída do ciclone, além daqueles já existentes no sistema experimental construído, para avaliar a importância do local de medida, já que a posição de medida pode influenciar nos resultados de queda de pressão.
- ❖ Trabalhar com concentrações mais elevadas de xisto na alimentação, para verificar se a queda de pressão continua decaindo ou atinge um patamar.
- ❖ Os modelos de predição de eficiência granulométrica de coleta trabalham com partículas esféricas, porém, as partículas de xisto usadas nas corridas experimentais apresentavam uma forma diferente da esférica. A esfericidade pode ser calculada para as partículas de xisto e essas características adaptadas aos modelos de predição.
- ❖ Trabalhar com um intervalo maior de concentrações de xisto na alimentação e com outras velocidades de alimentação para verificar se a eficiência mássica de coleta continua sem sofrer influência dessas duas variáveis.

CAPÍTULO 6

BIBLIOGRAFIA

- ALEXANDER, R.M., 1949, "Fundamentals of cyclone separators and operation", *Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, n. 152-153, pp. 203-228
- ARAUJO, I., MASSARANI, G., 1987, "Análise do Desempenho do Ciclone a Gás Stairmand". In: XV ENEMP, v. I, pp. 272-278, Uberlândia, Outubro
- BATEL, W., 1976, *Dust Extraction Technology*, England, Technicopy Limited
- BEECKMANS, J.M., KIM, C.J., 1977, "Analysis of the efficiency of reverse flow cyclones", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 55, n. 7, pp. 640-643.
- CASAL, J., MARTÍNEZ-BENET, J.M., 1983, "A better way to calculate cyclone pressure drop", *Chemical Engineering*, v.90, n.2, pp. 99-100.
- CLIFT, R., GHADIRI, M., HOFFMANN, A.C., 1991, "A Critique of Two Models for Cyclone Performance", *AIChE Journal*, v. 37, n.2, pp. 285-289.
- CONSTANTINESCU, S., 1984, "Sizing Gas Cyclones", *Chemical Engineering*, v.91, n.4, pp. 97-98.
- CREMASCO, M.A., NEBRA, S.A., (1992), "Proposta de uma Correlação Para Predição da Queda de Pressão em Ciclones". In: 9^o Congresso Brasileiro de Engenharia Química, pp.139-146, Salvador, Bahia, Setembro.
- CREMASCO, M. A., 1994, *Estudo Sobre o Escoamento Ar-Partículas em um Reator Ciclônico*, Tese de D.Sc., UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- DIETZ, P. W., 1981, "Collection Efficiency of Cyclone Separators", *A.I.Ch.E. Journal*, v. 27, n.6, pp. 888-892.

- DIRGO, J., LEITH, D., 1985, "Performance of theoretically optimised cyclones", *Filtration and Separation*, March/April, pp. 119-125.
- DIRGO, J., LEITH, D., 1986, "Design of Cyclone Separators", In: *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, v. 4, chapter 41, pp.1281-1306, Gulf Publishing Company
- DOERSCHLAG, C., MICZEK, G., 1984, "How to Choose a Cyclone Dust Collector", *Chemical Engineering*, v. 84, n. 4, pp. 64-72.
- ENLIANG, L., YINGMIN, W., 1989, "A New Collection Theory of Cyclone Separators", *A.I.Ch.E Journal*, v. 35, n.4, pp. 666-669
- ERNEST, M., HOKE, R.C., SLIMINSKI, V.J., McCAIN, D.J., PARKER, R., DREHMEL, D.C., 1981, "Evaluation of a Cyclone Dust Collector For High-Temperature, High-Pressure Particulate Control", *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, v.21, n.1, pp.158-161.
- FASSANI, F.L., 1997, *Subsídios ao Estudo do Efeito da Concentração de Sólidos na Perda de Pressão e no Rendimento de Coleta*, Dissertação de M.Sc., FEM/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- HOFFMANN, A.C., AREND, H., SIE, H., 1991, "An Experimental Investigation Elucidating the Nature of the Effect of Solids Loading on Cyclone Performance", *Filtration and Separation*, May/June, pp. 188-193.
- HOFFMANN, A.C., SANTEN, A., ALLEN, R.W.K., CLIFT, R., 1992, "Effects of Geometry and Solid Loading on the Performance of Gas Cyclones", *Powder Technology*, v. 70, pp. 83-91.
- HOFFMANN, A.C., JONGE, R., ARENDS, H., HANRATS, C., 1995, "Evidende of 'Natural vortex length' and its effect on the efficiency af gas cyclones", *Filtration and Separation*, September, pp. 799-804.
- HOFFMANN, A.C., GROOT, M., HOSPERS, A., 1996, "The Effect of the Dust Collection System on the Flowpattern and Separation Efficiency of a Gas Cyclone", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 74, pp. 464-470.

- LAPPLE, C.E., 1951, "Processes use many collector types, *Chemical Engineering*, pp. 144-151.
- LAWLESS, P.A. (1978), "Analysis of Cascade Impactor Data for Calculating Particle Penetration", Environment Protection Agency, NTIS, EPA 600/7-78-189.
- LEITH, D., LICHT, W., 1972, "The collection efficiency for cyclone type particle collectors – A new theoretical approach", *A.I.Ch.E Symposium Series*, v. 68, n.126, pp. 196-206.
- LI, Z., ZISHENG, Z., KUOTSUNG, Y., 1988, "Study of Structures Parameters of Cyclone", *Chem. Eng. Res. Des.*, v.66, pp.114-120.
- LICHT, W., 1988, *Air Pollution Control Engineering – Basic Calculations for Particulate Collection*. 2nd ed., New York, Marcel Dekker, Inc.
- MASSARANI, G., 1986, "Alguns Aspectos da Separação Sólido-Fluido". In: Freire, J. T., Gubulin, J. C. (ed), *Tópicos Especiais de Sistemas Particulados*, vol. 2, capítulo 1, São Carlos, UFSCar.
- MAROULIS, Z.B., KREMALIS, C., 1995, "Development of an Effective Cyclone Simulator Under Excel", *Filtration and Separation*, November/December v.32, n.10, pp.969-976
- MASIN, J.G., KOCH, W.H., 1986, "Cyclone Efficiency and Pressure Drop Correlations in Oil Shale Retorts", *Environmental Progress*, v.5, n.2, pp. 116-122.
- MEYER, H.F., 1998, *Modelagem Fenomenológica e Simulação Bidimensional de Ciclones por Técnicas da Fluidodinâmica Computacional*, Tese de D.Sc., UNICAMP, Campinas, SP, Brasil
- MOTHES, H., LÖFFLER, F., 1985, "Motion and Deposition in Cyclones", *German Chemical Engineering*, v. 8, pp. 223-233.
- MOTHES, H., LÖFFLER, F., 1988, "Prediction of Particle Removal in Cyclone Separators", *International Chemical Engineering*, v. 28, n.2, pp. 231-240.

- NETO, B.B., SCARMINIO, I.S., BRUNS, R.E., 1995, Planejamento e Otimização de Experimentos, Editora da UNICAMP, CAMPINAS, SP
- PATTERSON, P. A., MUNZ, R. J., 1996, "Cyclone Collection Efficiencies at Very High Temperatures", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 67, pp.321.
- PERES, A.P., CREMASCO, M.A., 1989, "Proposta de uma Correlação para o Coeficiente de Transferência de Calor Gás/partícula em um Ciclone", In: XXIV ENEMP, v. II, pp. 512-517.
- SHERPHERD, C.B., LAPPLE, C.E., 1939, "Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors", *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 31, n.8, pp. 972-984.
- SCHEID, C. M., 1992, *Estudo da Influência da Concentração de Sólidos e de Sangrias no Desempenho de Ciclones a Gás*, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SILVA, M.A., NEBRA, S.A., 1991, "Modelagem da Secagem em Ciclone", In: XIX ENEMP, pp. 459-470, Outubro
- STAIRMAND, C.J., 1951, "The Design and Performance of Cyclone Separators", *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, v.29, pp. 356-383.
- SZEKELY, J., CARR, R., 1966, "Heat Transfer in a Cyclone", *Chemical Engineering*, v.21, n.12, pp.1119-1132.
- YUU, S., JOTAKI, T., TOMITA, Y., YOSHIDA, K., 1978, "The Reduction Of Pressure Drop Due to Dust Loading in a Conventional Cyclone", *Chemical Engineering Science*, v. 33, pp. 1573-1580

CAPÍTULO 7

APÊNDICES

APÊNDICE A

O Apêndice A contém a dedução para a equação de um tubo de Pitot e o método de integração numérica de Simpson.

Para resultados consistentes, o tubo de Pitot deve ser antecedido por 50 vezes ou mais diâmetros de tubo reto sem instrumentos. Se o fluxo é perturbado por um joelho, válvula ou outros acessórios no fluxo acima da localização do tubo de Pitot, o perfil pode sofrer um deslocamento com a taxa de escoamento. A equação que permite calcular a velocidade num ponto do escoamento do gás é descrita pela equação (A.1).

$$v = \left(\frac{2 \cdot g \cdot (P_1 - P_2)}{\gamma_{ar}} \right)^{1/2} \quad (A.1)$$

Sendo P1 e P2 a diferença entre a pressão dinâmica e a estática que podem ser substituídas por uma equação manométrica chegando à equação (A.2).

$$v = \left(2 \cdot g \cdot h \cdot \left(\frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_{ar}} - 1 \right) \right)^{1/2} \quad (A.2)$$

onde r_{ar} é a densidade do ar no interior do tubo nas condições do escoamento, g é a aceleração da gravidade que corresponde a $9,8 \text{ m/s}^2$, $r_{\text{água}}$ é a densidade da água no interior do manômetro inclinado e h a diferença de altura do líquido manométrico devido à diferença de pressão. Com o auxílio da equação (A.2) determina-se a velocidade em vários pontos, encontrando-se um perfil de velocidades ao longo do diâmetro do tubo.

Na equação (A.2), a densidade do ar é no interior do tubo. Para estimar a densidade no interior do tubo de acordo com a variação de pressão e a temperatura do gás, pode-se contar com a ajuda de uma equação de estado. Como a pressão é próxima da atmosférica e a temperatura é baixa, a equação de estado a ser utilizada será a equação (A.3):

$$P \cdot \bar{V} = Z \cdot R \cdot T \quad (A.3)$$

como o valor de **Z** (fator de compressibilidade) sendo tomado como sendo, aproximadamente, 1. Modificando a equação (A.3) tem-se:

$$\rho = \frac{P}{R.T} \quad (\text{A.4})$$

com **P** em atm, **T** em Kelvin, **R** igual a 82,05 (atm.cm³)/(mol.K) e o peso molecular do ar igual a, aproximadamente, 29 g/mol.

Para encontrar qual é a velocidade média do gás escoando no interior do tubo, faz-se uma integração numérica. Para realizar esta integração, escolheu-se a Regra de Simpson, que é aplicável a um número de intervalos uniformemente espaçados no eixo x.

A regra de Simpson pode ser escrita da seguinte maneira:

$$I = \int_a^b f(x)dx = \frac{h}{3} \left[f(x_0) + f(x_{2n}) + 2 \cdot \sum_{i=2}^{2n-2} f(x_0 + i.h) + 4 \cdot \sum_{j=1}^{2n-1} f(x_0 + j.h) \right] \quad (\text{A.5})$$

onde o total de pontos experimentais de todas as corridas são iguais a 17, logo:

$2n + 1 = 17$, ou seja, $n = 8$, deste modo:

$$h = \frac{b-a}{2n} = 0.5 \quad (\text{A.6})$$

onde esse valor de h representa o próprio intervalo de medida no interior do tubo. A velocidade média, $\langle v \rangle$, é então obtida da seguinte maneira:

$$\langle v \rangle = \frac{I}{(b-a)} \quad (\text{A.7})$$

APÊNDICE B

Tabela B.1 – Resultados experimentais de queda de pressão em função da velocidade de alimentação para o ciclone Lapple

Vi (m/s)	DP (Pa)	Γ_{ar} (kg/m³)
12,89	512,06	1,120358
14,54	624,34	1,108626
15,46	723,07	1,109792
16,33	824,85	1,128132
17,26	928,03	1,114467
18,06	1026,92	1,116569

O desvio foi calculado segundo a equação (B.1):

$$\text{DESVIO (\%)} = \frac{\Delta P_{\text{calculado}} - \Delta P_{\text{experimental}}}{\Delta P_{\text{experimental}}} \times 100 \quad (\text{B.1})$$

Tabela B.2 – Comparação entre a DP experimental e a DP calculada pelo modelo de SHEPHERD e LAPPLE

Vi (m/s)	DP_{EXPERIMENTAL} (Pa)	DP_{SHEPHERD e LAPPLE} (Pa)	DESVIO (%)
12,89	512,06	710,5556039	38,76338
14,54	624,34	895,192373	43,38166
15,46	723,07	1012,273631	39,99751
16,33	824,85	1148,267135	39,2099
17,26	928,03	1268,280011	36,66313
18,06	1026,92	1389,98444	35,35435

Tabela B.3 – Comparação entre a DP experimental e a DP calculada pelo modelo de CASAL e MARTÍNEZ-BENNET

Vi (m/s)	DP_{EXPERIMENTAL} (Pa)	DP_{CASAL e MARTINEZ} (Pa)	DESVIO (%)
12,89	512,06	549,36	7,28
14,54	624,34	692,11	10,85
15,46	723,07	782,63	8,24
16,33	824,85	887,77	7,63
17,26	928,03	980,56	5,66
18,06	1026,92	1074,65	4,65

Tabela B.4 – Comparação entre a DP experimental e a DP calculada pelo modelo de STAIRMAND

Vi (m/s)	DP_{EXPERIMENTAL} (Pa)	DP_{STAIRMAND} (Pa)	DESVIO (%)
12,89	512,06	531,54	3,80
14,54	624,34	669,66	7,26
15,46	723,07	757,25	4,73
16,33	824,85	858,98	4,14
17,26	928,03	948,76	2,23
18,06	1026,92	1039,80	1,25

Tabela B.5 – Comparação entre a DP experimental e a DP calculada pelo modelo de FIRST

Vi (m/s)	DP_{EXPERIMENTAL} (Pa)	DP_{FIRST} (Pa)	DESVIO (%)
12,89	512,06	670,66	30,97
14,54	624,34	844,93	35,33
15,46	723,07	955,44	32,14
16,33	824,85	1083,80	31,39
17,26	928,03	1197,08	28,99
18,06	1026,92	1311,95	27,76

Tabela B.6 – Comparação entre a DP experimental e a DP calculada pelo modelo de MAROULIS E CREMALIS

Vi (m/s)	DP_{EXPERIMENTAL} (Pa)	DP_{MAROULIS} (Pa)	DESVIO (%)
12,89	512,06	279,35	45,45
14,54	624,34	351,93	43,63
15,46	723,07	397,96	44,96
16,33	824,85	451,43	45,27
17,26	928,03	498,61	46,27
18,06	1026,92	546,45	46,79

Tabela B.7 – Comparação entre a DP experimental e a DP calculada pelo modelo de CONSTANTINESCUS

Vi (m/s)	DP_{EXPERIMENTAL} (Pa)	DP_{CONSTANTINESCUS} (Pa)	DESVIO (%)
12,89	512,06	196,97	61,53
14,54	624,34	248,15	60,25
15,46	723,07	280,60	61,19
16,33	824,85	318,30	61,41
17,26	928,03	351,57	62,12
18,06	1026,92	385,30	62,48

Tabela B.8 – Comparação entre a DP experimental e a DP calculada pelo modelo de BARTH

Vi (m/s)	DP_{EXPERIMENTAL} (Pa)	DP_{BARTH} (Pa)	DESVIO (%)
12,89	512,06	658,20	28,54
14,54	624,34	829,23	32,82
15,46	723,07	937,68	29,68
16,33	824,85	1063,65	28,95
17,26	928,03	1174,82	26,59
18,06	1026,92	1287,56	25,38

Tabela B.9 – Comparação entre a DP experimental e a DP calculada pelo modelo de CREMASCO e NEBRA.

Vi (m/s)	DP_{EXPERIMENTAL} (Pa)	DP_{CREMASCO} (Pa)	DESVIO (%)
12,89	512,06	517,07	0,98
14,54	624,34	651,03	4,27
15,46	723,07	736,80	1,90
16,33	824,85	835,64	1,31
17,26	928,03	922,22	0,63
18,06	1026,92	1011,60	1,49

APÊNDICE C

Tabela C.1 – Resultados experimentais de queda de pressão em função da velocidade de alimentação para o ciclone Stairmand

Vi (m/s)	DP_{EXPERIMENTAL} (Pa)	Γ_{ar} (kg/m³)
14,94	592,02	1,127409
15,34	614,14	1,110932
16,21	678,78	1,112007
17,69	818,49	1,114190
17,95	829,09	1,131429
19,06	950,85	1,118878
20,27	1039,60	1,118475
20,85	1128,35	1,122101
22,75	1228,47	1,121047

O desvio foi calculado segundo a equação (B.1).

Tabela C.2 – Comparação entre a DP experimental e a DP calculada pelo modelo de SHEPHERD e LAPPLE

Vi (m/s)	DP_{EXPERIMENTAL} (Pa)	DP_{SHEPHERD e LAPPLE} (Pa)	DESVIO (%)
14,94	592,02	759,79	28,34
15,34	614,14	788,68	28,42
16,21	678,78	881,22	29,82
17,69	818,49	1052,51	28,59
17,95	829,09	1099,87	32,66
19,06	950,85	1226,94	29,04
20,27	1039,60	1386,54	33,37
20,85	1128,35	1471,37	30,40

Tabela C.3 – Comparação entre a DP experimental e a DP calculada pelo modelo de CASAL e MARTÍNEZ-BENNET

Vi (m/s)	DP_{EXPERIMENTAL} (Pa)	DP_{CASAL e MARTINEZ} (Pa)	DESVIO (%)
14,94	592,02	621,62	5,00
15,34	614,14	645,26	5,07
16,21	678,78	720,97	6,22
17,69	818,49	861,11	5,21
17,95	829,09	899,86	8,54
19,06	950,85	1003,82	5,57
20,27	1039,60	1134,40	9,12
20,85	1128,35	1203,80	6,69

Tabela C.4 – Comparação entre a DP experimental e a DP calculada pelo modelo de STAIRMAND

Vi (m/s)	DP_{EXPERIMENTAL} (Pa)	DP_{STAIRMAND} (Pa)	DESVIO (%)
14,94	592,02	690,80	16,69
15,34	614,14	717,06	16,76
16,21	678,78	801,20	18,04
17,69	818,49	956,93	16,92
17,95	829,09	999,99	20,61
19,06	950,85	1115,53	17,32
20,27	1039,60	1260,63	21,26
20,85	1128,35	1337,76	18,56

Tabela C.5 – Comparação entre a DP experimental e a DP calculada pelo modelo de FIRST

Vi (m/s)	DP_{EXPERIMENTAL} (Pa)	DP_{FIRST} (Pa)	DESVIO (%)
14,94	592,02	733,10	23,83
15,34	614,14	760,98	23,91
16,21	678,78	850,27	25,26
17,69	818,49	1015,54	24,08
17,95	829,09	1061,24	28,00
19,06	950,85	1183,85	24,50
20,27	1039,60	1337,84	28,69
20,85	1128,35	1419,69	25,82

Tabela C.6– Comparação entre a DP experimental e a DP calculada pelo modelo de MAROULIS E CREMALIS

Vi (m/s)	DP_{EXPERIMENTAL} (Pa)	DP_{MAROULIS} (Pa)	DESVIO (%)
14,94	592,02	585,46	1,11
15,34	614,14	607,72	1,04
16,21	678,78	679,03	0,04
17,69	818,49	811,02	0,91
17,95	829,09	847,51	2,22
19,06	950,85	945,43	0,57
20,27	1039,60	1068,41	2,77
20,85	1128,35	1133,78	0,48

Tabela C.7 – Comparação entre a DP experimental e a DP calculada pelo modelo de CONSTANTINESCUS

Vi (m/s)	DP_{EXPERIMENTAL} (Pa)	DP_{CONSTANTINESCUS} (Pa)	DESVIO (%)
14,94	592,02	140,26	76,31
15,34	614,14	145,60	76,29
16,21	678,78	162,68	76,03
17,69	818,49	194,30	76,26
17,95	829,09	203,05	75,51
19,06	950,85	226,50	76,18
20,27	1039,60	255,97	75,38
20,85	1128,35	271,63	75,93

Tabela C.8 – Comparação entre a DP experimental e a DP calculada pelo modelo de BARTH

Vi (m/s)	DP_{EXPERIMENTAL} (Pa)	DP_{BARTH} (Pa)	DESVIO (%)
14,94	592,02	698,65	18,01
15,34	614,14	725,21	18,09
16,21	678,78	810,30	19,38
17,69	818,49	967,81	18,24
17,95	829,09	1011,35	21,98
19,06	950,85	1128,20	18,65
20,27	1039,60	1274,96	22,64
20,85	1128,35	1352,96	19,91

Tabela C.9 – Comparação entre a DP experimental e a DP calculada pelo modelo de CREMASCO e NEBRA

Vi (m/s)	DP (Pa)	DP_{CREMASCO} (Pa)	DESVIO (%)
14,94	592,02	574,02	3,04
15,34	614,14	595,84	2,98
16,21	678,78	665,76	1,92
17,69	818,49	795,16	2,85
17,95	829,09	830,94	0,22
19,06	950,85	926,94	2,51
20,27	1039,60	1047,52	0,76
20,85	1128,35	1111,61	1,48

APÊNDICE D

No Apêndice D, são apresentados todos os cálculos do estudo da influência do coletor de partículas na queda de pressão do ciclone Lapple.

Tabela D.1 – Níveis dos fatores

Variável	Nível	
	-	+
Vi (m/s)	12,95 ± 0,0224	16,91 ± 0,0123
Coletor	“sem”	“com”

Tabela D.2 – Resultados do planejamento de experimentos para o ciclone Lapple

Vi (m/s)	Coletor	DP (Pa)		DP _{médio} (Pa)
-	-	532,227	534,347	533,287
+	-	928,747	932,988	930,868
-	+	513,143	515,264	514,204
+	+	884,218	886,338	885,278

Os ensaios da tabela acima foram realizados em duplicata, para que fosse possível ter uma maneira de estimar o erro experimental, e então, avaliar a significância estatística dos efeitos. O cálculo da variância, inclui a variância de todos os outros ensaios.

$$s^2 = \frac{\sum d_i^2}{2.N} \quad (D.1)$$

onde d_i é a diferença entre dois valores de um mesmo ensaio, N é o número de ensaios duplicados e s é a variância experimental. Portanto, para a Tabela D.2, o valor de s será:

$$s^2 = \frac{((532,227-534,347)^2 + (928,747-932,988)^2 + (513,143-515,264)^2 + (884,338-885,278)^2)}{2.4}$$

$$s^2 = 3,93419025$$

$$s=1,9834$$

No nível de 95% de confiança, o valor de t correspondente a 4 graus de liberdade é 2,776. Isso quer dizer que só será considerado estatisticamente significativo um efeito cujo valor absoluto exceder $(2,776 \cdot 1,9834) = 5,506139$. Aplicando esse critério à Tabela D.3, vê-se que todos os efeitos são significativos.

Tabela D.3 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial

	Estimativa ± erro padrão
Média global	715,91 ± 0,9917
Vi	384,33 ± 1,9834
Coletor	-32,34 ± 1,9834
Vi x Coletor	-13,25 ± 1,9834

Para calcular os efeitos principais (**Vi** e **Coletor**), pode-se proceder da seguinte maneira: o efeito principal da velocidade de alimentação é, por definição, a média dos efeitos no nível com e sem coletor. Sendo \bar{y}_i a resposta média observada no i -ésimo ensaio, pode-se escrever:

$$V_i = \bar{y}_+ - \bar{y}_-$$

$$V_i = \frac{(930,868 + 885,278)}{2} - \frac{(533,287 + 514,204)}{2}$$

$$V_i = 384,33$$

Esse valor mostra que a queda de pressão do ciclone Lapple aumenta, em média, 384,33 Pa, quando a velocidade passa de 12,95 para 16,91 m/s.

Repetindo o mesmo procedimento para o coletor, chega-se a :

$$\text{Coletor} = -32,34$$

Note que agora o efeito é negativo, ou seja, ao adicionar o coletor ao ciclone, a queda de pressão diminui, em média, 32,34 Pa.

O **efeito de interação** é, por convenção, a metade da diferença entre a velocidade de alimentação e o coletor, logo:

$$\text{VixColetor} = \frac{(885,338 + 533,287)}{2} - \frac{(930,868 + 514,204)}{2}$$

$$\boxed{\text{VixColetor} = -13,25}$$

APÊNDICE E

No Apêndice E, são apresentados todos os cálculos do estudo da influência do coletor de partículas na queda de pressão do ciclone Stairmand.

Tabela E.1 – Níveis dos fatores

Variável	Nível	
	-	+
Vi (m/s)	14,0334 ± 0,001	16,9014 ± 0,0167
Coletor	“sem”	“com”

Tabela E.2 – Resultados do planejamento de experimentos para o ciclone Stairmand

Vi (m/s)	Coletor	DP (Pa)		DP _{médio} (Pa)
-	-	498,319	496,207	497,263
+	-	764,371	770,705	767,538
-	+	491,984	491,989	491,987
+	+	753,813	755,925	754,869

$$s^2 = \frac{((498,319 - 496,207)^2 + (764,371 - 770,705)^2 + (491,984 - 491,989)^2 + (753,813 - 755,925)^2)}{2.4}$$

$$s^2 = 6,1301$$

$$s = 2,4759$$

Será considerado estatisticamente significativo um efeito cujo valor absoluto exceder $(2,776 \cdot 2,4759) = 6,8731$. Aplicando esse critério à Tabela E.3, vê-se que o efeito de interação não é significativo.

O efeito Vi é calculado de acordo com a equação abaixo:

$$Vi = \bar{y}_+ - \bar{y}_-$$

$$V_i = \frac{(767,538 + 754,869)}{2} - \frac{(497,263 + 491,987)}{2}$$

$$\boxed{V_i = 266,578}$$

Esse valor mostra que a queda de pressão do ciclone Lapple aumenta, em média, 266,578 Pa, quando a velocidade passa de 14,0334 para 16,9014 m/s.

Repetindo o mesmo procedimento para o coletor, chega-se a :

$$\boxed{\text{Coletor} = -8,972}$$

Note que agora o efeito é negativo, ou seja, ao adicionar o coletor ao ciclone, a queda de pressão diminui, em média, 8,972 Pa.

O efeito **VixColetor** é, por convenção, a metade da diferença entre a velocidade de alimentação e o coletor, logo:

$$V_{ixColetor} = \frac{(754,869 + 497,263)}{2} - \frac{(767,538 + 491,987)}{2}$$

$$\boxed{V_{ixColetor} = -3,6965}$$

Tabela E.3 – Efeitos calculados para o planejamento fatorial

	Estimativa ± erro padrão
Média global	627,914 ± 1,2374
Vi	266,578 ± 2,4749
Coletor	-8,972 ± 2,4749
Vi x Coletor	-3,696 ± 2,4749

APÊNDICE F

Neste apêndice, encontram-se as tabelas do estudo da queda de pressão do ciclone Lapple em função da variação da concentração de alimentação e da velocidade de alimentação.

Tabela F.1 – Queda de pressão do Lapple em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação de 12,73 m/s.

CORRIDAS EXPERIMENTAIS	Vi (m/s)	DP (Pa)	DPc (Pa)	C (kg/m³)
CE-46	12,7165	498,7097	-	0
CE-46	12,7165	498,7097	468,5749	0,002518
CE-48	12,7827	502,954	474,8353	0,002425
CE-55	12,7268	499,3695	494,7229	0,001241
CE-56	12,7269	499,3695	466,2199	0,002945
CE-57	12,72337	499,1457	470,3936	0,003035
CE-58	12,72337	499,1457	447,0858	0,006315
CE-59	12,72337	499,1342	442,845	0,011205
CE-60	12,72337	499,1457	438,6102	0,018552
CE-61	12,72427	499,203	440,2145	0,020189

Tabela F.2 – Queda de pressão do Lapple em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação de 14,80 m/s.

CORRIDAS EXPERIMENTAIS	Vi (m/s)	DP (Pa)	DPc (Pa)	C (kg/m³)
CE-49	14,8133	662,1167	-	0
CE-49	14,8133	662,1167	626,4642	0,002503
CE-50	14,8363	664,2388	619,2488	0,002664
CE-51	14,8363	664,2388	560,6345	0,017073
CE-52	14,8109	661,8942	555,8217	0,018751
CE-62	14,7946	660,3928	633,7006	0,001246
CE-63	14,7946	660,3928	583,0682	0,004461
CE-64	14,78996	659,9633	570,001	0,011689
CE-65	14,74379	655,7328	543,3869	0,022193
CE-66	14,7898	659,9483	541,0311	0,018264

Tabela F.3 – Queda de pressão do Lapple em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação de 16,86 m/s.

CORRIDAS EXPERIMENTAIS	Vi (m/s)	DP (Pa)	DPc (Pa)	C (kg/m³)
CE-67	16,86096	879,7476	-	0
CE-67	16,86096	879,7476	851,7645	0,000908
CE-68	16,8609	879,7476	767,1813	0,005109
CE-69	16,8257	875,518	757,7526	0,009223
CE-70	16,86096	879,7476	741,1199	0,015149
CE-71	16,80806	873,4032	712,537	0,02449
CE-72	16,9157	886,3572	736,7998	0,021795

APÊNDICE G

Neste apêndice encontram-se:

- Os dados normalizados da queda de pressão ($\Delta P_c/\Delta P$) do ciclone Lapple;
- a metodologia para obter os parâmetros de ajuste das equações propostas por SCHEID, (1992), e HOFFMANN *et al.*, (1992).

A Tabela G.1 apresenta os dados de queda de pressão normalizados que são plotados na Figura G.1.

Tabela G.1 – Dados normalizados de queda de pressão Para o ciclone Lapple

C (kg/m ³)	DP _c /DP
0,000908	0,968192
0,001246	0,959581
0,002425	0,944093
0,002503	0,946154
0,002518	0,939574
0,002664	0,932268
0,002945	0,933617
0,003035	0,942397
0,004461	0,882911
0,005109	0,872047
0,006315	0,895702
0,009223	0,865491
0,011205	0,887226
0,011689	0,863686
0,015149	0,842423
0,017073	0,844026
0,018552	0,878722
0,018751	0,839744
0,020189	0,881835
0,021795	0,831267
0,022193	0,828671
0,02449	0,815817

Para utilizar os modelos de SCHEID, (1992), e HOFFMANN *et al.*, (1992), é preciso antes colocá-los numa forma fácil de serem interpretados. Para isso, pode-se linearizar ambos os modelos, e verificar se assumem a forma de uma reta quando são comparados com os dados obtidos.

Para o modelo de HOFFMANN *et al.*, (1992), pode-se utilizar do seguinte procedimento:

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P} = 1 - \alpha_H \cdot C^{\beta_H} \quad (160)$$

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P} - 1 = -\alpha_H \cdot C^{\beta_H} \quad (G.1)$$

$$1 - \frac{\Delta P_c}{\Delta P} = \alpha_H \cdot C^{\beta_H} \quad (G.2)$$

aplicando logaritmo natural em ambos os lados da equação (G.2), obtém-se a equação (G.3), a qual é a forma linearizada da equação (160):

$$\ln\left(1 - \frac{\Delta P_c}{\Delta P}\right) = \ln \alpha_H + \beta_H \cdot \ln C \quad (G.3)$$

Onde: ΔP_c é a queda de pressão para o gás com partículas; C é a concentração de sólidos na entrada do ciclone, em kg/m^3 ; ΔP é a queda de pressão para o gás sem partículas e α_H e β_H são constantes.

Assim sendo, um gráfico de $\ln\left(1 - \frac{\Delta P_c}{\Delta P}\right)$ em função de $\ln C$, fornece uma reta, onde o coeficiente angular é igual a β_H e o coeficiente linear igual a $\ln \alpha_H$.

A mesma idéia foi usada para a equação (161) proposta por SCHEID, (1992), chegando-se a seguinte equação linearizada.

$$\ln\left(\frac{\Delta P}{\Delta P_c} - 1\right) = \ln \alpha_s + \beta_s \cdot \ln C \quad (G.4)$$

Onde C é a concentração de sólidos na alimentação α_s e β_s são constantes obtidas do ajuste experimental que valem

A equação (G.4) representa uma reta, com coeficiente angular igual a β_s e coeficiente linear igual a $\ln \alpha_s$.

As figuras G.1 e G.2 apresentam as curvas obtidas ao utilizar as equações (G.3) e (G.4), respectivamente.

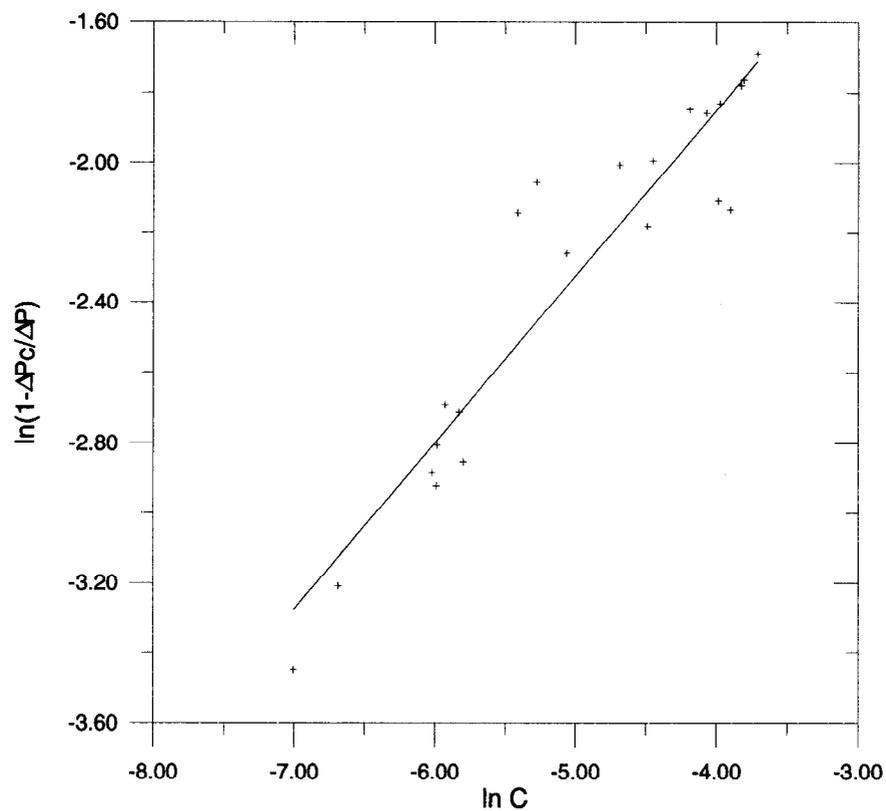


Figura G.1 – Curva de ajuste do modelo de HOFFMANN et al., (1992).

A curva obtida é representada pela equação (G.5),

$$\ln(1-\Delta P_c/\Delta P) = 0,0478527 + 0,474511 \cdot \ln C \quad (\text{G.5})$$

com um coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,888085. Os valores de α_H e β_H correspondem a 1,04902 e 0,474511, respectivamente.

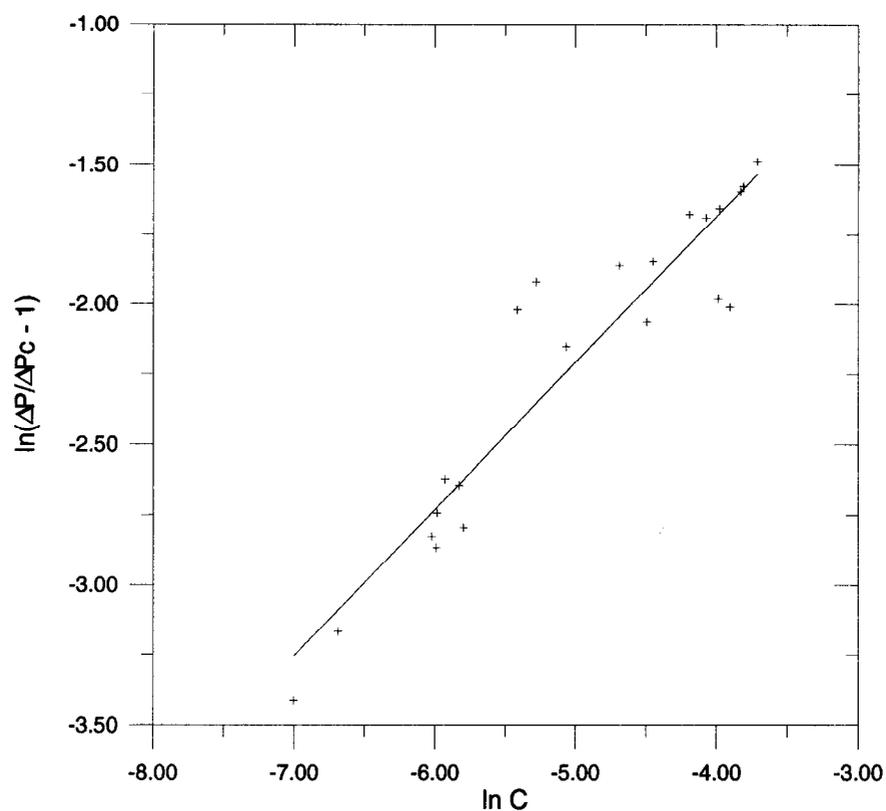


Figura G.2 – Curva de ajuste do modelo de SCHEID, (1992).

A curva obtida é representada pela equação (G.6),

$$\ln(\Delta P/\Delta P_c - 1) = 0,406115 + 0,522702 \cdot \ln C \quad (\text{G.6})$$

com um coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,889754. Os valores de α_s e β_s correspondem a 1,500975 e 0,522702, respectivamente.

APÊNDICE H

Neste apêndice, encontram-se as tabelas do estudo da queda de pressão do ciclone Stairmand em função da variação da concentração de alimentação e da velocidade de alimentação.

Tabela H.1 – Resultados obtidos do planejamento fatorial

Vi (m/s)	C (kg/m³)	DP (Pa)		DP_{médio} (Pa)
-	-	354,296	364,852	359,574
+	-	528,779	549,096	538,937
-	+	322,533	324,672	323,603
+	+	496,459	501,443	498,951

O cálculo da variância é dado por:

$$s^2 = \frac{((364,296 - 364,852)^2 + (528,779 - 549,096)^2 + (322,533 - 324,672)^2 + (496,459 - 501,443)^2)}{2.4}$$

$$s^2 = 69,20315$$

obtem-se o seguinte desvio padrão:

$$s = 8,3188$$

No nível de 95% de confiança, o valor de t correspondente a 4 graus de liberdade é 2,776. Em nosso caso, isso quer dizer que só será considerado estatisticamente significativo um efeito cujo valor absoluto exceder $(2,776 \cdot 8,3188) = 23,0931$

Tabela H.2– Efeitos calculados para o planejamento fatorial do ciclone Stairmand.

	Estimativa ± erro padrão
Média global	430,266 ± 4,1594
Vi	177,335 ± 8,3168
C	-37,978 ± 8,3168
Vi x Coletor	-2,007 ± 8,3168

O cálculo do efeito principal **Vi** é dado por:

$$V_i = \frac{(538,937 + 498,951)}{2} - \frac{(359,574 + 323,603)}{2}$$

$$V_i = 177,335$$

Esse valor mostra que a queda de pressão do ciclone Stairmand aumenta, em média, 177,335 Pa, quando a velocidade passa de 12,75 para 14,84 m/s.

Repetindo o mesmo procedimento para a concentração, chega-se a :

$$\text{Coletor} = -37,978$$

Note que agora o efeito é negativo, ou seja, ao aumentarmos a concentração de alimentação, a uma mesma velocidade, a queda de pressão diminui, em média, 37,978 Pa.

O **efeito de interação** é, por convenção, a metade da diferença entre a velocidade de alimentação e a concentração, logo:

$$V_{ix\text{Coletor}} = -2,0076$$

APÊNDICE I

Neste apêndice, encontram-se as tabelas do estudo da queda de pressão do ciclone Stairmand em função da variação da concentração de alimentação e da velocidade de alimentação.

Tabela I.1 – Queda de pressão do Stairmand em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 12,75 m/s.

CORRIDAS EXPERIMENTAIS	Vi (m/s)	C (kg/m³)	DP (Pa)	DPc (Pa)
CE-26	12,6961	0,0021	364,3570	354,2964
CE-29	12,7222	0,0183	366,8782	322,5334
CE-30	12,7554	0,0009	370,0837	367,2446
CE-31	12,7907	0,0014	373,4871	359,7661
CE-32	12,7731	0,0032	371,7894	353,6454
CE-33	12,7385	0,0049	368,4491	350,6869
CE-34	12,8429	0,0021	378,5305	364,8517
CE-36	12,7181	0,0070	366,4814	340,3568
CE-37	12,7528	0,0098	369,8310	336,0615
CE-38	12,7352	0,0170	368,1345	324,6724

Tabela I.2 – Queda de pressão do Stairmand em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 14,84 m/s.

CORRIDAS EXPERIMENTAIS	Vi (m/s)	C (kg/m³)	DP (Pa)	DPc (Pa)
CE-13	14,8330	0,0018	566,7604	527,5855
CE-14	14,8109	0,0047	564,7115	514,8903
CE-16	14,8116	0,0013	564,7763	538,2166
CE-17	14,8414	0,0042	567,5397	520,0418
CE-18	14,8408	0,0203	567,4859	474,8109
CE-19	14,8330	0,0283	566,7604	468,2586
CE-20	14,8579	0,0130	569,0711	509,2679
CE-22	14,8582	0,0073	569,0966	522,6886
CE-24	14,8548	0,0576	568,7806	457,6425
CE-25	14,7866	0,0508	562,4508	448,4715
CE-27	14,8380	0,0021	567,2252	528,7794
CE-28	14,8608	0,0181	569,3417	496,4592
CE-35	14,8358	0,0028	567,0186	503,1400

Tabela I.3 – Queda de pressão do ciclone Stairmand em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 17,39 m/s.

CORRIDAS EXPERIMENTAIS	Vi (m/s)	C (kg/m³)	DP (Pa)	DPc (Pa)
CE-75	17,39	0,0012	815,702	798,015
CE-76	17,39	0,00497	815,702	743,551
CE-77	17,39	0,00985	815,702	682,436
CE-78	17,39	0,01577	815,702	683,813
CE-79	17,39	0,02143	815,702	661,464
CE-80	17,39	0,01148	815,702	688,474

APÊNDICE J

Neste apêndice encontram-se:

- Os dados normalizados da queda de pressão ($\Delta P_c/\Delta P$) do ciclone Stairmand;
- a metodologia para obter os parâmetros de ajuste das equações propostas por SCHEID, (1992), e HOFFMANN *et al.*, (1992).

A Tabela J.1 apresenta os dados de queda de pressão normalizados.

Tabela J.1 – Dados normalizados de queda de pressão para o ciclone Stairmand

C (kg/m³)	DP_c/DP
0,00094	0,99233
0,0012	0,97832
0,00128	0,95297
0,00140	0,96326
0,00180	0,93088
0,00206	0,97239
0,00212	0,93222
0,00283	0,88734
0,00322	0,95120
0,00417	0,91631
0,00473	0,91178
0,00497	0,91155
0,00490	0,95179
0,00704	0,92872
0,00730	0,91845
0,00975	0,90869
0,00985	0,83662
0,01148	0,84403
0,01296	0,89491
0,01577	0,83831
0,01703	0,88194
0,01809	0,87199
0,01826	0,87913
0,02030	0,83669
0,02143	0,81091
0,02833	0,82620
0,05084	0,79735
0,05759	0,80460

Para utilizar os modelos de SCHEID, (1992), e HOFFMANN *et al.*, (1992), será usado as mesmas equações e metodologia discutidas no Apêndice G.

As figuras J.1 e J.2 apresentam as curvas obtidas ao utilizar as equações (G.3) e (G.4), respectivamente.

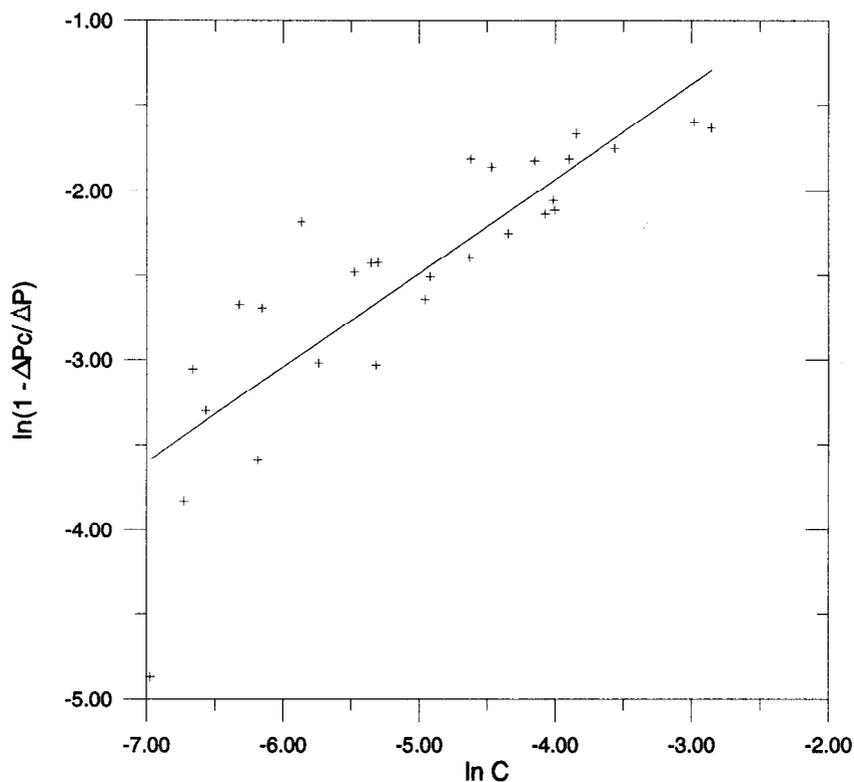


Figura J.1 – Curva de ajuste do modelo de HOFFMANN et al., (1992).

A curva representada na Figura J.1 é a apresentada pela equação (J.1),

$$\ln(1-\Delta P_c/\Delta P) = 0,28812 + 0,55511.\ln C \quad (J.1)$$

com um coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,72277. Os valores de α_H e β_H correspondem a 1,3339 e 0,55511, respectivamente.

A curva representada na Figura J.2 é a apresentada pela equação (J.2),

$$\ln(\Delta P/\Delta P_c - 1) = 0,64337 + 0,60417.\ln C \quad (J.2)$$

com um coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,73941. Os valores de α_s e β_s correspondem a 1,902876 e 0,604168, respectivamente.

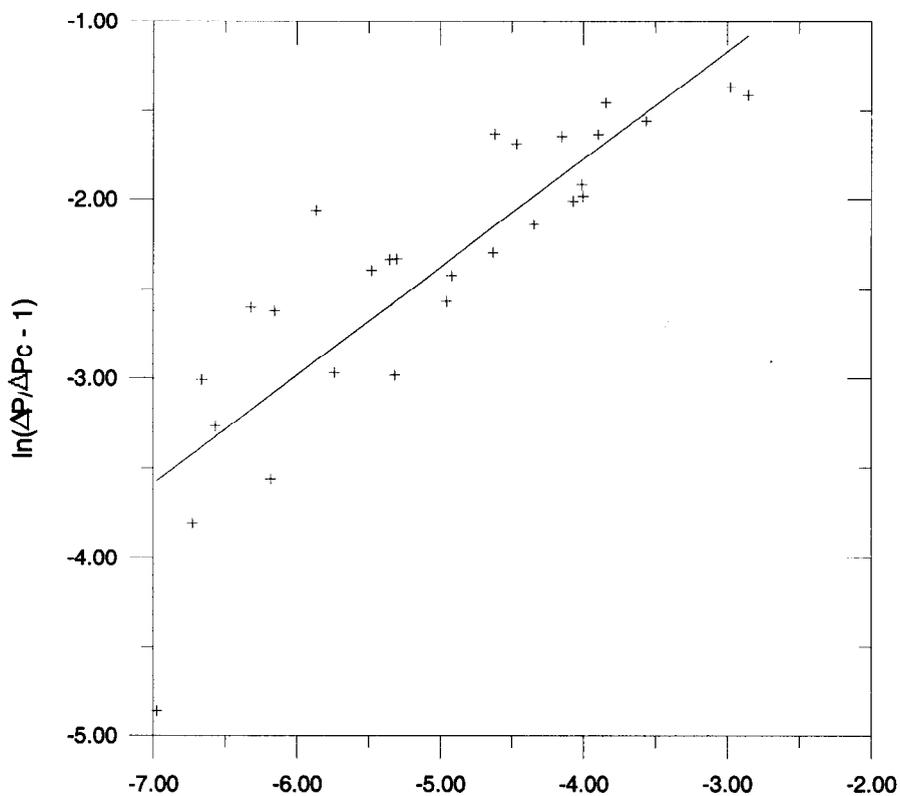


Figura J.2 – Curva de ajuste do modelo de SCHEID, (1992).

APÊNDICE K

Neste apêndice, encontram-se as tabelas do estudo da eficiência mássica de coleta do ciclone Lapple em função da variação da concentração de alimentação e da velocidade de alimentação.

Tabela K.1 – Eficiência mássica de coleta do ciclone Lapple em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 12,72 m/s.

CORRIDAS EXPERIMENTAIS	Vi (m/s)	C (kg/m³)	h (%)
CE-55	12,7268	0,0012	95,07
CE-56	12,7269	0,0029	94,11
CE-57	12,7234	0,0030	94,57
CE-58	12,7234	0,0063	94,31
CE-59	12,7234	0,0112	94,66
CE-60	12,7234	0,0186	94,76
CE-61	12,7243	0,0202	95,10

Tabela K.2 – Eficiência mássica de coleta do ciclone Lapple em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 14,78 m/s.

CORRIDAS EXPERIMENTAIS	Vi (m/s)	C (kg/m³)	h (%)
CE-62	14,7946	0,00125	94,38
CE-63	14,7946	0,00446	95,06
CE-64	14,7900	0,01169	94,40
CE-65	14,7438	0,02219	95,11
CE-66	14,7898	0,01826	94,60

Tabela K.3 – Eficiência mássica de coleta do ciclone Lapple em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 16,86 m/s.

CORRIDAS EXPERIMENTAIS	Vi (m/s)	C (kg/m³)	h (%)
CE-67	16,861	0,00091	95,03
CE-68	16,8609	0,00511	94,31
CE-69	16,8257	0,00922	94,46
CE-70	16,861	0,01515	94,47
CE-71	16,8081	0,02449	94,63
CE-72	16,9157	0,02179	94,86

APÊNDICE L

Neste apêndice, encontram-se as tabelas do estudo da eficiência mássica de coleta do ciclone Stairmand em função da variação da concentração de alimentação e da velocidade de alimentação.

Tabela L.1 – Eficiência mássica de coleta do ciclone Stairmand em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 12,75 m/s.

CORRIDAS EXPERIMENTAIS	Vi (m/s)	C (kg/m³)	h (%)
CE-13	14,8330	0,0018	93,32
CE-14	14,8109	0,0047	95,39
CE-16	14,8116	0,0013	94,75
CE-17	14,8414	0,0042	95,92
CE-18	14,8408	0,0203	96,04
CE-19	14,8330	0,0283	95,24
CE-20	14,8579	0,0130	96,22
CE-22	14,8582	0,0073	96,23
CE-24	14,8548	0,0576	95,92
CE-25	14,7866	0,0508	96,06
CE-27	14,8380	0,0021	96,28
CE-28	14,8608	0,0181	95,58
CE-35	14,8358	0,0028	94,96

Tabela L.2 – Eficiência mássica de coleta do ciclone Stairmand em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 14,84 m/s.

CORRIDAS EXPERIMENTAIS	Vi (m/s)	C (kg/m³)	h (%)
CE-26	12,6961	0,0021	96,71
CE-29	12,7222	0,0183	95,39
CE-30	12,7554	0,0009	98,09
CE-31	12,7907	0,0014	94,64
CE-32	12,7731	0,0032	96,09
CE-33	12,7385	0,0049	96,21
CE-34	12,8429	0,0021	96,78
CE-36	12,7181	0,0070	96,25
CE-37	12,7528	0,0098	96,34
CE-38	12,7352	0,0170	96,42

Tabela L.3 – Eficiência mássica de coleta do ciclone Stairmand em função da concentração de alimentação para a velocidade de alimentação média de 17,39 m/s.

CORRIDAS EXPERIMENTAIS	Vi (m/s)	C (kg/m³)	h (%)
CE-75	17,39	0,0012	93,70
CE-76	17,39	0,00497	94,69
CE-77	17,39	0,00985	95,51
CE-78	17,39	0,01577	95,70
CE-79	17,39	0,02143	95,89
CE-80	17,39	0,01148	95,94