

E: ... COPIAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Fábio Luís Fassani
... E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 03 / 03 / 97.

Leonardo Goldstein Jr

ORIENTADOR

Prof. LEONARDO GOLDSTEIN JUNIOR
Matric. 04205-5
FEM - UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Subsídios ao Estudo do Efeito da
Concentração de Sólidos na Perda de Pressão
e no Rendimento de Coleta de Ciclones

Autor: **Fábio Luís Fassani**

Orientador: **Leonardo Goldstein Jr.**

01/97

F264s

34231/BC

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Subsídios ao Estudo do Efeito da Concentração de Sólidos na Perda de Pressão e no Rendimento de Coleta de Ciclones

Autor: Fábio Luís Fassani

Orientador: Leonardo Goldstein Jr.

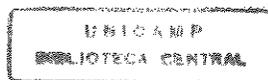
Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Térmica e Fluidos

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

Campinas, 1997

S.P. - Brasil



0813417

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	
V.	Ex
T.º DE B.	34.231
PREÇO	395,98
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	11/06/98
N.º CPD	

CM-00112599-9

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

F264s Fassani, Fábio Luís
Subsídios ao estudo do efeito da concentração de sólidos na perda de pressão e no rendimento de coleta de ciclones / Fábio Luís Fassani.--Campinas, SP: [s.n.], 1997.

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

1. Ciclones. 2. escoamento bifásico. 3. Pressão. I. Goldstein Jr., Leonardo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Subsídios ao Estudo do Efeito da
Concentração de Sólidos na Perda de Pressão
e no Rendimento de Coleta de Ciclones**

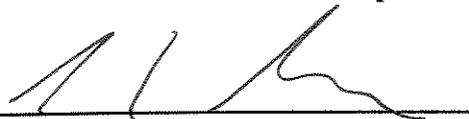
Autor: Fábio Luís Fassani

Orientador: Leonardo Goldstein Jr.



Prof. Dr. Leonardo Goldstein Jr.

Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Fernando Eduardo Milioli

Universidade de São Paulo



Prof. Dra. Silvia Azucena Nebra de Perez

Universidade Estadual de Campinas

Campinas, 3 de março de 1997

Aos meus pais,
Laura e Rubens Fassani

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Leonardo Goldstein Jr., por sua inestimável orientação em todas as etapas do trabalho, por tudo que me ensinou e pela satisfação de conviver com uma pessoa tão nobre.

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

À Superintendência da Industrialização do Xisto -SIX- da Petrobras, onde foram realizados os testes experimentais.

Aos estagiários da SIX, Lilian Ernst, Alexandre, Marcelo e Rivonei, pelo auxílio na realização dos testes.

Ao Prof. Dr. Oswaldo Baptista Duarte Filho, da Universidade Federal de São Carlos, por permitir a utilização do analisador de tamanho de partículas.

A Wilton Furquim, pelas figuras deste texto, e ao pessoal do Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos.

A todos os professores e colegas da pós graduação.

A Paulo Roberto Tardin Jr. e Francis Henrique Ramos França, meus colegas de trabalho, pela amizade e companheirismo.

Aos meus pais, Laura e Rubens Fassani, e aos meus irmãos, Daniela e Édison, que todos os dias me mostram o valor de uma família.

Ao bom Deus, por tudo.

Índice

Dedicatória	ii
Agradecimentos	iii
Índice	iv
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
Nomenclatura	viii
Resumo	x
Abstract	xi
Capítulo 1	
Introdução	1
1.1 Localização do Problema	1
1.2 Estado da Arte	3
1.2.1 Perda de Pressão	4
1.2.2 Rendimento de Coleta	10
1.3 Objetivos deste trabalho	12
Capítulo 2	
Descrição do Dispositivo de Testes e do Procedimento Experimental	14
2.1 Descrição do Dispositivo de Testes	14
2.2 Procedimento Experimental	23
2.3 Programa de Testes Realizado	25
2.3.1 Testes sem a Utilização da Válvula <i>Flap</i>	25
2.3.2 Testes com a Utilização da Válvula <i>Flap</i>	28
2.4 Dificuldades Experimentais	32
2.5 Processamento dos Dados Experimentais	33
2.5.1 Descargas de Ar	34
2.5.2 Velocidade do Ar na Entrada do Ciclone	35

2.5.3	Descarga de Sólidos	35
2.5.4	Concentração de Sólidos na Entrada do Ciclone	36
2.5.5	Perdas de Pressão	36
2.5.6	Redução da Perda de Pressão	36
2.5.7	Rendimento de Coleta	37
Capítulo 3	Apresentação e Análise dos Resultados	38
3.1	Perda de Pressão	38
3.1.1	Escoamento sem Partículas	40
3.1.2	Escoamento com Partículas	41
3.1.3	Razão de Perda de Pressão	42
3.1.4	Previsão de Perda de Pressão	43
3.2	Rendimento de Coleta	44
3.2.1	Rendimento de Coleta - Testes sem a Válvula <i>Flap</i>	47
3.2.2	Rendimento de Coleta - Operação do Ciclone com a Válvula <i>Flap</i>	49
3.2.3	Previsão do Rendimento de Coleta	53
Capítulo 4	Conclusões e Recomendações	61
	Bibliografia	64
	Apêndice A	68
	Apêndice B	78
	Apêndice C	82

Lista de Figuras

Figura	Título	Página
1.1	Representação esquemática de um ciclone	2
2.1	Vista geral da montagem	14
2.2	Fluxograma do dispositivo experimental	15
2.3	Representação esquemática e dimensões do ciclone utilizado	16
2.4	Representação esquemática do silo de armazenamento e alimentação de sólidos	17
2.5	Vista posterior da montagem	18
2.6	Placa de orifício para controle da alimentação de sólidos	19
2.7	Representação esquemática da válvula <i>flap</i>	19
2.8	Placa de orifício	20
2.9	Distribuição granulométrica do FCC alimentado	22
3.1	Variação da perda de pressão com a velocidade	40
3.2	Variação da perda de pressão com a concentração de sólidos na entrada do ciclone	41
3.3	Razão de perda de pressão	43
3.4	Rendimento de coleta em função da concentração	47
3.5	Efeito do contrapeso e da concentração sobre o rendimento de coleta. $V = 7 \text{ m/s}$	49
3.6	Efeito do contrapeso e da concentração sobre o rendimento de coleta. $V = 18 \text{ m/s}$	50
3.7	Efeito do contrapeso e da concentração sobre o rendimento de coleta. $V = 27 \text{ m/s}$	51
3.8	Efeito da velocidade e da concentração - Contrapeso de $0,199 \text{ kg}$	52
3.9	Efeito da velocidade e da concentração - Contrapeso de $0,282 \text{ kg}$	52
3.10	Rendimento de coleta e estimativa de Zenz (1975)	56
3.11	Rendimento de coleta e estimativa de Zenz (1975)	56
3.12	Previsão de rendimento de coleta	59
C.1	Curva normalizada de rendimento de coleta por tamanho de partícula	85
C.2	Rendimento global de coleta em função da concentração	86

Lista de Tabelas

Tabela	Título	Página
1.1	Dimensões relativas das famílias de ciclone. Referência: Diâmetro D	2
1.2	Efeito dos principais parâmetros que atuam sobre a perda de pressão em ciclones	4
2.1	Variáveis para o cálculo da descarga de fluido. Testes sem a utilização da válvula <i>flap</i>	26
2.2	Medidas de pressão e diferenciais de pressão do ciclone e do coletor. Testes sem a utilização da válvula <i>flap</i>	27
2.3	Medidas dos inventários de sólidos alimentados, coletados e perdidos pelo ciclone. Testes sem a utilização da válvula <i>flap</i>	28
2.4	Variáveis para o cálculo da descarga de fluido. Testes com a utilização da válvula <i>flap</i>	29
2.5	Medidas de pressão e diferenciais de pressão do ciclone e do coletor. Testes com a utilização da válvula <i>flap</i>	30
2.6	Medidas dos inventários de sólidos alimentados, coletados e perdidos pelo ciclone. Testes com a utilização da válvula <i>flap</i>	31
3.1	Variáveis para análise da perda de pressão	39
3.2	Rendimento de coleta. Ciclone sem válvula <i>flap</i>	45
3.3	Rendimento de coleta. Ciclone com válvula <i>flap</i>	46
3.4	Número de espirais e diâmetro de corte teórico	54
3.5	Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações - $V = 7 \text{ m/s}$	54
3.6	Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações - $V = 18 \text{ m/s}$	54
3.7	Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações - $V = 27 \text{ m/s}$	54
3.8	Concentração e rendimento de referência para a Eq.(3.7)	58

Nomenclatura

A	altura total do ciclone
A_d	área do orifício da placa de orifício
B	altura do cone
C	altura do cilindro
c	concentração de sólidos na entrada do ciclone
C_D	coeficiente de descarga
D	diâmetro do ciclone
d	diâmetro de partícula
d_c	diâmetro de corte
d_m	diâmetro médio aritmético
d_o	diâmetro do orifício da placa
d_p	diâmetro médio de Sauter
d_t	diâmetro da tubulação
E	diâmetro da base do cone
F	comprimento de duto de saída de gás
g	aceleração da gravidade
K	altura da entrada tangencial
k	coeficiente da Eq.(2.2)
L	largura da entrada tangencial
M	diâmetro do duto de saída de gás
M_t	inventário total de sólidos alimentado
M_c	inventário de sólidos coletado pelo ciclone
M_o	inventário de sólidos não coletados pelo ciclone e retido pelo filtro
\dot{m}_{ar}	descarga de ar
\dot{m}_{rev}	descarga de ar reversa pela perna do ciclone
\dot{m}_s	descarga de sólidos
N_s	número de voltas espirais

P_{atm}	pressão atmosférica
PDI	indicadores de diferencial de pressão
PI	indicadores de pressão
p_1	pressão a montante da placa de orifício
p_2	pressão a jusante da placa de orifício
Q	vazão de gás
R_{dt}	número de Reynolds baseado no diâmetro da tubulação
r	relação entre p_2 e p_1
T	temperatura
t	tempo de duração do teste
T_{amb}	temperatura ambiente
V	velocidade do escoamento na entrada do ciclone
Vol	volume do ciclone

Letras gregas

β	relação entre os diâmetros do orifício e da tubulação
η	rendimento de coleta
μ	viscosidade do gás
ϕ	esfericidade
ρ	densidade do gás
ρ_a	densidade da água
ρ_{abs}	densidade absoluta das partículas
ρ_b	densidade 'bulk' das partículas
ρ_p	densidade aparente das partículas
Δp	perda de pressão do ciclone
Δp_c	perda de pressão do ciclone operando com partículas
γ	razão entre calores específicos
ξ	constante na Eq.(1.1)
λ	expoente da Eq.(1.5)

Resumo

FASSANI, Fábio Luís. *Subsídios ao Estudo do Efeito da Concentração de Sólidos na Perda de Pressão e no Rendimento de Coleta de Ciclones*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997, 86 p., Tese (Mestrado)

Nesta dissertação de mestrado, é estudado o efeito da concentração de sólidos na perda de pressão e no rendimento de coleta de ciclones. Para tanto, utiliza-se um dispositivo experimental constituído basicamente por um ciclone de 0,154 m de diâmetro, por um sistema de armazenamento e alimentação de partículas sólidas com ejetor, por um coletor de partículas coletadas pelo ciclone, por um filtro de mangas, e por dispositivos de medida de pressão, temperatura e vazão. São 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 atinge 20 kg de FCC/ kg de ar, valor bastante superior aos descritos pela literatura disponível. Considera-se também o efeito de uma válvula flap instalada na perna do ciclone. Os resultados mostram que a perda de pressão do escoamento com partículas é cerca de 47 por cento da perda de pressão do escoamento apenas de ar, na faixa de concentração estudada. Existe a tendência de aumento do rendimento de coleta com aumento da concentração de sólidos, até concentrações em torno de 12 kg de FCC/ kg de ar. Acima dessa concentração o rendimento passa a diminuir. Nas condições avaliadas, o rendimento de coleta foi maior na velocidade de 18 m/s do que na velocidade de 27 m/s. Os resultados indicam que deve existir um contrapeso ideal na válvula flap para otimizar o rendimento de coleta, em cada condição de concentração. Os métodos de previsão atualmente disponíveis não foram desenvolvidos para abranger as altas concentrações utilizadas neste trabalho, e não se mostraram adequados para estimar o rendimento de coleta.

Palavras-chave: Ciclone, Rendimento de Coleta, Perda de Pressão, Separação Gás-Partículas, Concentração de Sólidos.

Abstract

FASSANI, Fábio Luís. *A Contribution to the Study of the Solids Loading Effect on the Pressure Drop and Collection Efficiency of a Cyclone Separator.*
Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997, 86 p., Tese (Mestrado)

In this thesis, the effect of solids loading on the cyclone pressure drop and overall collection efficiency was studied. The experimental setup was made up of a 0.154 m diameter cyclone, a solids storage and feeding system with an injector, a cyclone hopper, a bag filter, and pressure, temperature and flow measuring instruments. The solid particles used were FCC particles. Solids loading up to 20 kg of FCC/ kg of air were used, with air inlet velocities between 5 and 28 m/s. The effect of a flap valve in the cyclone leg was also considered. The results showed that the cyclone pressure drop of the solids laden air flow was 47 per cent of the clean air flow, in the range of concentrations employed. There was a trend of increasing collection efficiency with increasing solids loading up to 12 kg of FCC/ kg of air. Above this loading, the collection efficiency decreased. At the conditions evaluated, the collection efficiency was higher at an inlet velocity of 18 m/s than it was at 27 m/s. The results indicated that it should exist an ideal flap valve counterweight that maximizes the collection efficiency in each loading condition. The available methods for estimating collection efficiency were not originally developed to cover the high solids loading used in the present work, and were not able to predict the results in the range covered here.

Keywords: Cyclone Separator, Collection Efficiency, Pressure Drop, Gas-Solid Separation, Particle-Laden Gas.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Localização do Problema

Ciclones ou separadores ciclônicos são equipamentos utilizados para separar partículas sólidas em escoamentos de suspensões fluido-partículas. Quando o fluido utilizado é um gás, o equipamento é chamado ciclone a gás, ou apenas ciclone, e quando o fluido é um líquido é chamado de hidrociclone ou hidroclone. O ciclone também é utilizado como reator químico e como trocador de calor, mas nesta dissertação será considerada apenas sua aplicação como separador gás-sólidos. Referências bibliográficas atestam o emprego de ciclones desde o século XIX. Atualmente seu uso é amplamente difundido em indústrias químicas, alimentícias, farmacêuticas, de cimento e mineração entre outras. Em refinarias de petróleo onde o processo de craqueamento catalítico é utilizado, os ciclones são equipamentos importantes para assegurar a continuidade operacional, retendo o catalisador no processo e impedindo sua emissão para atmosfera, com perda do material e efeito poluente.

O esquema de um ciclone típico é apresentado na Figura 1.1. Ele é constituído por uma seção cilíndrica de diâmetro D , uma entrada, usualmente tangencial, através da qual a suspensão gás-sólidos entra no ciclone, uma seção cônica que liga o corpo cilíndrico ao coletor de sólidos e um tubo para descarga do gás limpo, conhecido como “*vortex finder*”, localizado na região superior do equipamento.

A dimensão principal de um ciclone é o diâmetro do cilindro, D , sendo as demais dimensões dadas em proporção ao diâmetro. Na Figura 1.1 a altura total do ciclone é representada pela letra A , a altura do cilindro por C , a altura do cone por B , a altura e a largura da entrada tangencial por K e L , respectivamente, o diâmetro do tubo de saída de gás por M , o comprimento do tubo de saída de gás no interior do ciclone por F e o diâmetro da base do cone por E .

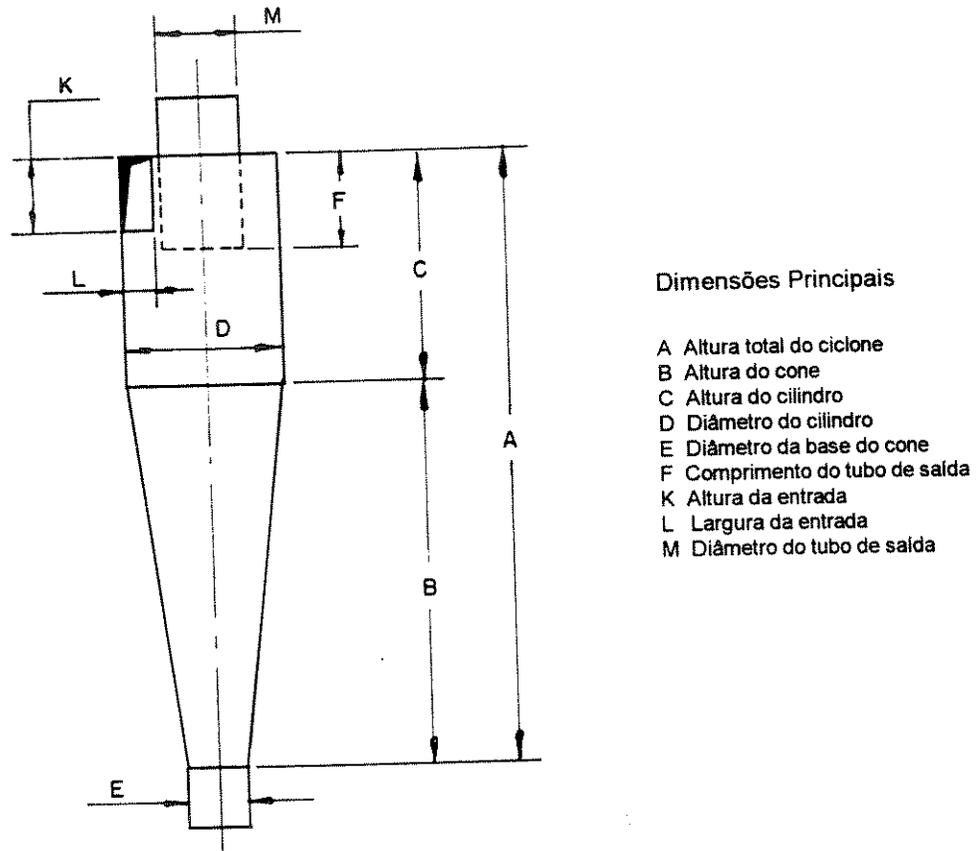


Fig.1.1 Representação esquemática de um ciclone.

Um *design* ou família de ciclones é estabelecido quando um conjunto de dimensões é fixado em relação ao diâmetro principal. Existem vários *designs* de ciclone na literatura, sendo os mais citados os de Stairmand (1951) e de Lapple (1951). A Tabela 1.1 apresenta as dimensões destes ciclones dadas em relação ao diâmetro principal.

Tabela 1.1 Dimensões relativas das famílias de ciclone. Referência: Diâmetro D.

Tipo de Ciclone	DIMENSÃO							
	A	B	C	E	F	K	L	M
Stairmand*	4,000	2,500	1,500	0,375	0,500	0,500	0,200	0,500
Stairmand**	4,000	2,500	0,575	0,875	0,375	0,750	0,375	0,750
Lapple	4,000	2,000	2,000	0,250	0,625	0,500	0,250	0,500

* Ciclone de alto rendimento

** Ciclone de alta vazão

Esses ciclones foram desenvolvidos através de experimentos, visando otimizar o desempenho, isto é, obter alto rendimento de coleta, baixa perda de pressão e alta vazão. No entanto, segundo Dirgo e Leith (1985), não existe fundamentação teórica que garanta a superioridade de um dado *design* para atender essas características. A vantagem de se utilizar estes ciclones de *design* tradicional está no fato de seu desempenho ser conhecido, tendo sido estudado por vários autores.

O escoamento em um ciclone é caracterizado por um forte vórtice interno, ao longo das paredes do ciclone, criado pela entrada tangencial e direcionado para baixo, que faz com que as partículas presentes no escoamento se depositem em uma camada junto à parede e desçam para o coletor. O vórtice externo reverte seu sentido axial próximo à base do ciclone e cria o vórtice interno, que se move para cima e conduz o gás para o tubo de saída.

As principais características do desempenho dos ciclones são seu rendimento de coleta e sua perda de pressão. O rendimento de coleta é definido como a massa de sólidos coletada dividida pela massa de sólidos introduzida no ciclone. A perda de pressão é a diferença entre as pressões estática da entrada e da saída do ciclone. O rendimento de coleta e a perda de pressão são influenciados por vários fatores, como a geometria do ciclone, as propriedades físicas do gás e das partículas, a velocidade do escoamento e a concentração de sólidos na entrada do ciclone.

O desempenho dos ciclones usualmente é melhor conhecido para condições de baixa concentração de sólidos, abaixo de $1 \text{ kg de sólidos/kg de gás}$; mas, em algumas aplicações, a concentração pode ser bastante elevada, maior que $10 \text{ kg de sólidos/kg de gás}$. O conhecimento dos efeitos da concentração sobre o rendimento de coleta e a perda de pressão é necessário para projetar e operar adequadamente os ciclones.

1.2 Estado da Arte

O presente estado da arte aborda o desempenho dos ciclones em termos da perda de pressão e do rendimento de coleta, considerando o efeito da concentração de sólidos no escoamento.

1.2.1 Perda de Pressão

Vários fatores influenciam a perda de pressão em ciclones: quanto maior a vazão de gases, maior a perda de pressão; o aumento da área da seção transversal do tubo de saída de gases ocasiona redução na perda de pressão, enquanto o aumento da área da seção de entrada acarreta aumento da perda de pressão. A Tabela 1.2 apresenta um panorama geral do efeito dos principais fatores na perda de pressão entre a entrada e a saída do ciclone.

Tabela 1.2 Efeito dos principais parâmetros que atuam sobre a perda de pressão em ciclones.

Fator	Efeito
Aumento da velocidade de entrada	Aumento da perda de pressão proporcional ao quadrado da velocidade de entrada
Aumento da altura da entrada, K	Aumento da perda de pressão
Aumento da largura da entrada, L	Aumento da perda de pressão
Aumento do diâmetro do tubo de saída, M	Diminuição da perda de pressão proporcional ao quadrado do diâmetro do tubo de saída
Variação do comprimento do tubo de saída no interior do ciclone	Pouca influência sobre a perda de pressão
Variação no diâmetro do ciclone	Pouca influência sobre a perda de pressão

A perda de pressão do ciclone operando sem partículas usualmente é expressa por:

$$\Delta P = \xi \frac{\rho V^2}{2} \quad (1.1)$$

em que ρ é a densidade do gás, V é velocidade na entrada do ciclone e ξ é um fator constante para cada *design* de ciclone. Na literatura, existem muitas expressões para determinar ξ a partir da geometria do equipamento. Segundo Leith (1984), apesar da complexidade de algumas expressões, nenhuma delas é capaz de fornecer uma estimativa confiável da perda de pressão para todos os tipos de ciclone operando em condições variadas. Uma das primeiras expressões para avaliar ξ foi desenvolvida por Shepherd e Lapple (1940), dada por:

$$\xi = 16 \frac{KL}{M^2} \quad (1.2)$$

que fornece valores de ΔP em N/m^2 .

Leith (1984) analisou as várias proposições existentes e observou que embora a Eq. (1.2) não inclua todas as dimensões do ciclone, ela fornece estimativas da perda de pressão tão boas quanto as produzidas pelas demais correlações disponíveis.

Shepherd e Lapple (1939) realizaram os testes pioneiros abordando o efeito da concentração de sólidos sobre a perda de pressão em um ciclone. Foi utilizado um ciclone de proporções ligeiramente diferentes das proporções do ciclone tipo Lapple apresentadas na Tabela 1.1, onde a maior diferença foi a utilização de $F = 1,6D$. O diâmetro interno do ciclone foi de 0,29 m. Foi observado que a perda de pressão diminuiu conforme a concentração de sólidos aumentou. Para concentrações de sólidos entre $3,755 \times 10^{-3}$ e $5,633 \times 10^{-3}$ kg de sólidos/kg de gás, a perda de pressão foi 7 por cento menor que a perda de pressão para o escoamento apenas de gás. Para concentrações entre 0,037 e 0,056 kg de sólidos/kg de gás, a perda de pressão foi 16 por cento menor. O fenômeno foi atribuído à inércia das partículas, que, ao caírem, em movimento perpendicular ao escoamento de gás, tenderiam a equalizar a quantidade de movimento do gás em camadas adjacentes.

Kiegel (1968) também observou que a presença de partículas no escoamento causa a redução da perda de pressão em relação ao escoamento sem partículas. A perda de pressão foi mínima para concentrações entre 0,816 e 1,633 kg de sólidos/kg de gás, e passou a aumentar em concentrações acima desse valor.

No trabalho de Yuu, Jotaki, Tomita e Yoshida (1978), foi observado que a presença de partículas na corrente de ar reduziu a perda de pressão em até 30%, mesmo em concentrações extremamente baixas de sólidos, tais como $1,633 \times 10^{-4}$ kg de sólidos/kg de gás. Na faixa de $1,224 \times 10^{-3}$ a 0,041 kg de sólidos/kg de gás, a razão de perda de pressão, isto é, a razão entre a perda de pressão do escoamento com partículas e a perda de pressão do escoamento de gás

limpo, com a mesma velocidade de entrada, foi independente da concentração e manteve-se aproximadamente constante, mas diminuiu quando a concentração aumentou acima de $0,041 \text{ kg de sólidos/kg de gás}$.

A observação do padrão de escoamento em um ciclone transparente indicou que a largura da faixa percorrida pelas partículas junto à parede do ciclone, permaneceu constante para concentrações até $0,041 \text{ kg de sólidos/kg de gás}$, embora sua espessura tenha aumentado na direção radial. Para concentrações em torno de $0,041 \text{ kg de sólidos/kg de gás}$, as partículas espalharam-se repentinamente, cobrindo toda a parede do ciclone. A maior faixa da parede do ciclone ocupada por partículas aumentaria o atrito nas paredes e reduziria a velocidade tangencial do gás, o que poderia ser a causa da redução da perda de pressão com o aumento da carga de sólidos. Como descrito acima, a área ocupada pelas partículas foi praticamente constante para concentrações até $0,041 \text{ kg de sólidos/kg de gás}$. Acima deste valor, devido ao aumento súbito da área ocupada pelas partículas, a perda de pressão diminuiu novamente. Esta transição foi influenciada pelas propriedades físicas das partículas, pois a redução da perda de pressão variou com os diferentes tipos de partículas.

A presença de partículas no escoamento diminuiu a velocidade tangencial do gás; foi demonstrado que esta também pode ser reduzida, na ausência de partículas no gás, pelo revestimento das superfícies internas do ciclone com um líquido pegajoso e subsequente deposição de partículas sobre essa camada. Yuu et al. concluíram que a camada de partículas na parede, e não as partículas no gás, causou a redução da perda de pressão.

Uma abordagem diferente das anteriormente citadas para estudar o efeito da concentração no escoamento em ciclones foi utilizada por Littlejohn e Smith (1978). Ao invés de observarem a redução da perda de pressão causada pela presença de partículas, eles estudaram a variação da vazão de gás, mantendo constante a perda de pressão nos dois casos, isto é, escoamento sem partículas e escoamento com partículas. Nessas condições, foi observado que a vazão de gás aumentou quando os sólidos foram introduzidos no escoamento. Entretanto, a vazão de gás continuou elevada quando a descarga de sólidos foi eliminada e só retornou ao valor original após uma breve interrupção do escoamento, e no caso de coletor profundo sob o ciclone, e aproximadamente vazio. Foi utilizado um ciclone transparente e o

fenômeno foi atribuído a uma pequena quantidade de sólidos que permaneceu suspensa no vórtice. Essa observação é diferente da de Yuu et al., segundo a qual as partículas depositadas na parede são a causa da redução da perda de pressão através do ciclone.

O efeito da concentração de sólidos na entrada do ciclone sobre a perda de pressão também foi considerado por Pagliuso (1987). Ele utilizou um ciclone de 0,19 m de diâmetro operando em um leito fluidizado circulante, com partículas de diâmetro médio de 240 μm . Foi observado um aumento da perda de pressão ao se aumentar a concentração de sólidos de 0,980 a 4,082 kg de sólidos/kg de gás. As altas concentrações e a operação do ciclone no leito fluidizado circulante podem ter contribuído para a obtenção dessa tendência inversa à dos demais trabalhos citados até aqui.

Beeckmans e Morin (1987) utilizaram um ciclone de 0,30 m de diâmetro para estudar a perda de pressão. As demais dimensões não foram fornecidas. Foi confirmada a observação de Littlejohn e Smith, ou seja, a redução da perda de pressão continuou a existir após a interrupção da descarga de sólidos. O som proveniente do ciclone indicou a presença de partículas em seu interior, sendo estas a causa da redução da resistência ao escoamento. Foi observado que o ciclone é capaz de manter um inventário de sólidos circulando em seu interior por períodos significativos de tempo após a interrupção da alimentação de sólidos. Esse inventário de sólidos diminui com o tempo, escoando parcialmente para o coletor, com uma constante de decaimento relativamente pequena, e parcialmente para a saída de gás em um intervalo de tempo muito maior. Foi também observado que existe um valor máximo para o inventário retido pelo ciclone. Qualquer material em excesso na alimentação desce imediatamente para o coletor. O inventário máximo depende do tamanho e da forma das partículas.

Kang, Kwon e Kim (1989) também observaram a redução da perda de pressão com o aumento da concentração de sólidos. Os sólidos utilizados foram carvão e esferas de vidro e foi observado visualmente que, para as esferas de vidro, de maior densidade e menor tendência a aglomerar que as demais partículas empregadas, a faixa espiralada de partículas coletadas na parede do ciclone foi mais larga e as partículas recobriram toda a superfície do ciclone. Segundo os autores, esse fato poderia causar uma redução da componente tangencial da

velocidade do gás devido ao aumento do atrito nas paredes, com conseqüente diminuição da perda de pressão, o que estaria de acordo com a hipótese de Yuu et al..

Uma comparação entre os perfis de velocidade no interior do ciclone obtidos com e sem partículas no escoamento foi realizada por Silva, Godoy e Nebra (1989). As partículas utilizadas foram esferas de vidro, escoando em um ciclone com 0,315 m de diâmetro, velocidades entre 6 e 11 m/s e concentrações de 0,03 a 0,4 kg de sólidos/ kg de ar. Foi observado que a presença de partículas, mesmo em concentrações pequenas, alterou significativamente o perfil de velocidades do ciclone, principalmente em sua seção cilíndrica, onde a componente tangencial de velocidade do gás se torna menor e com um perfil radial praticamente horizontal.

Um ciclone de 0,204 m de diâmetro interno foi utilizado por Baskakov, Dolgov e Goldobin (1990) para o estudo da perda de pressão, utilizando partículas de alumina com diâmetro médio de 40 μm . Foi observado que a perda de pressão relativa apresentou um mínimo para concentrações em torno de 0,204 kg de sólidos/kg de gás. Após esse mínimo a perda de pressão passou a aumentar com o aumento da concentração.

Concentrações de 0 a 0,04 kg de sólidos/kg de gás e velocidades de 10, 15 e 20 m/s foram empregadas por Hoffmann, Arends e Sie (1991). O aumento da concentração de sólidos ocasionou redução da perda de pressão, mesmo em pequenas concentrações. Esse efeito foi mais pronunciado para velocidades de entrada de 20 m/s, o que mostraria que o efeito da concentração dependeria da velocidade do escoamento.

A redução da perda de pressão com o aumento da concentração de partículas sólidas no gás também foi observada por Comas, Comas, Chetrit e Casal (1991). Foi utilizado um ciclone de 0,192 m de diâmetro e velocidades de entrada de 12 a 20 m/s. O sólido empregado foi areia com densidade igual a 2720 kg/m³ e diâmetros entre 177 e 750 μm . A faixa de concentração situou-se entre 0,041 e 0,490 kg de sólidos/kg de gás. Para essas condições, os dados foram correlacionados pela expressão:

$$\Delta P_c = \frac{\Delta P}{1 + ac^b} \quad (1.3)$$

em que

ΔP_c é a perda de pressão para o escoamento com partículas;

ΔP é a perda de pressão para o escoamento sem partículas;

a é uma constante igual a 0,023;

b é uma constante igual a 0,69, e

c é a concentração de sólidos na entrada do ciclone em g/m^3 .

Scheid e Massarani (1992) realizaram testes em um ciclone do tipo Stairmand, com 0,20 m de diâmetro, três diferentes tipos de partículas e concentrações de $8,163 \times 10^{-3}$ a 0,041 kg de sólidos/kg de gás. O mesmo fenômeno foi observado e os dados foram relacionados por uma expressão semelhante à expressão (1.3), com a igual a 0,0248 e b igual a 0,831.

A tendência de redução de perda de pressão com o aumento da concentração de sólidos também foi observada por Hoffmann, van Santen, Allen e Clift (1992). Foram utilizados quatro ciclones de configurações geométricas diferentes entre si, todos com 0,45 m de diâmetro. A velocidade na entrada dos ciclones foi mantida constante em 15 m/s e a concentração variou na faixa de 0,004 a 0,106 kg de sólidos/kg de gás. Os dados foram correlacionados pela expressão:

$$\Delta P_c = (1 - 1,26C^{0,6})\Delta P \quad (1.4)$$

onde C é a concentração de sólidos na entrada do ciclone em kg/m^3 .

A influência da concentração de sólidos na entrada do ciclone foi estudada ainda por Tardin Jr. e Goldstein Jr. (1994). O ciclone possuía 0,19 m de diâmetro e foi operado em um leito fluidizado circulante. Foram utilizadas partículas de areia com diâmetros entre 356 e 897 μm e concentrações de sólidos na entrada do ciclone entre 0,490 e 6,531 kg de sólidos/kg de gás. A perda de pressão no ciclone apresentou-se proporcional à concentração de sólidos na faixa de concentrações considerada, o que está de acordo com as observações de Pagliuso (1987), que também utilizou um leito fluidizado circulante. A perda de pressão foi maior para partículas de diâmetro médio maior.

1.2.2 Rendimento de Coleta

O rendimento de coleta de um ciclone depende de sua configuração geométrica, das propriedades físicas do gás e das partículas e das condições operacionais. No presente estado da arte a ênfase está no efeito da concentração de sólidos sobre o rendimento de coleta.

No trabalho de ter Linden (1949) o efeito da concentração sobre o rendimento de coleta foi observado como sendo pequeno. Com o aumento da concentração ocorreria um ligeiro aumento do rendimento de coleta. O fenômeno foi explicado admitindo que as partículas grosseiras arrastariam as mais finas para as paredes do ciclone, onde seriam coletadas.

Stern, Caplan e Bush (1955) relataram o aumento do rendimento de coleta com o aumento da concentração, na faixa de $1,868 \times 10^{-3}$ a $0,1868 \text{ kg de sólidos/kg de gás}$. Foi proposta uma correlação para ajustar os dados experimentais e estimar o rendimento de coleta em função da concentração, na forma:

$$\frac{1 - \eta_a}{1 - \eta_b} = \left(\frac{c_b}{c_a} \right)^\lambda \quad (1.5)$$

em que η_a e η_b são os rendimentos de coleta nas concentrações c_a e c_b e λ é um expoente de valor médio igual a 0,2.

Os gráficos apresentados por Mori, Sukanuma e Tanaka (1968) indicam o aumento do rendimento de coleta com o aumento da concentração de sólidos, para diversos tamanhos de partículas, velocidades de 15 e 20 m/s e concentrações entre 0 e $0,082 \text{ kg de sólidos/kg de gás}$.

Zenz (1975) e Tawari e Zenz (1984) mostraram que o aumento da concentração de sólidos na entrada do ciclone de $1,868 \times 10^{-3}$ a $1,868 \text{ kg de sólidos/kg de gás}$ acarretou um aumento do rendimento de coleta, sendo o efeito mais pronunciado para a coleta de partículas pequenas. Foi estabelecido um procedimento para estimar o rendimento de coleta nessa faixa de concentrações a partir do conhecimento do rendimento em baixas concentrações.

Os efeitos da concentração de sólidos e da temperatura de operação sobre o rendimento de coleta foram abordados por Patterson e Munz (1989). Eles utilizaram um ciclone de 0,102 m de diâmetro operando com ar aquecido a temperaturas entre 300 e 2000 K. A faixa de velocidades utilizadas situou-se entre 3 e 42 m/s e a concentração de sólidos entre 0 e 0,192 kg de sólidos/kg de gás. Foi observado que ao se manterem temperaturas e concentrações fixas houve aumento do rendimento de coleta com o aumento da velocidade de entrada do gás. Fixando a velocidade e a concentração, o rendimento de coleta variou inversamente com a temperatura. O aumento da concentração de sólidos na entrada do ciclone ocasionou o aumento do rendimento de coleta e essa tendência foi mais forte em altas temperaturas.

Trabalhos experimentais em ciclones de 0,20 m de diâmetro, velocidades de entrada de 10, 15 e 20 m/s e concentrações de sólidos variando de 0 a 0,04 kg de sólidos/kg de gás foram conduzidos por Hoffmann, Arends e Sie (1991). Na faixa de concentrações utilizadas, sempre houve aumento do rendimento de coleta com o aumento da concentração. Observaram também que o efeito da concentração sobre o rendimento de coleta varia com a velocidade do gás na entrada do ciclone, sendo mais pronunciado para velocidades menores.

O efeito da concentração também foi estudado por Hoffmann, van Santen, Allen e Clift (1992). Foram utilizados ciclones de 0,45 m diâmetro, velocidade de 15 m/s e concentrações de sólidos entre 0,004 e 0,106 kg de sólidos/kg de gás. O rendimento de coleta aumentou com o aumento da concentração de sólidos na faixa considerada.

O rendimento de coleta de um ciclone tipo Lapple foi avaliado por Scheid e Massarani (1992). Foi utilizada uma sangria de gás no coletor do ciclone e concentrações de sólidos entre $8,163 \times 10^{-4}$ e 0,041 kg de sólidos/kg de gás. Eles concluíram que o rendimento global de coleta não sofre influência da concentração de sólidos na alimentação dentro das condições operacionais estudadas e que o rendimento de coleta aumenta com o incremento da fração de sangria.

Tuzla e Chen (1992) avaliaram o rendimento de coleta de um ciclone de 0,40 m de diâmetro operando em um leito fluidizado circulante. Foram utilizadas concentrações entre 1,143 e 4,571 kg de sólidos/kg de gás. Seus resultados indicaram que o rendimento de coleta do ciclone foi degradado com o aumento da concentração de sólidos, e que a redução do rendimento de coleta foi maior para as partículas menores.

No trabalho de Tardin Jr. e Goldstein Jr. (1994), realizado em um ciclone operando em um leito fluidizado circulante, foi observado que em concentrações até 0,816 kg de sólidos/kg de gás o rendimento de coleta do ciclone não mostrou variação. Para concentrações entre 1,633 e 6,531 kg de sólidos/kg de gás o rendimento de coleta aumentou ligeiramente nos testes realizados com partículas de diâmetro médio inicial de 484 e 897 μm . Nos testes realizados com partículas de diâmetro médio de 356 μm , o rendimento de coleta manteve-se praticamente constante.

Existem, ainda, na literatura, modelos de previsão de rendimento de coleta em função do diâmetro das partículas, que não consideram o efeito da concentração. Discussões sobre esses modelos foram apresentadas por Clift, Ghadiri e Hoffman (1991) e Souza, Mori e Vieira (1995). A expressão desenvolvida por Leith e Licht (1972) e revisada por Clift et al., dada por:

$$\eta = 1 - \exp\left[\frac{-\rho_p}{9\mu} \left(\frac{dV}{D/2}\right)^2 \frac{Vol}{Q}\right] \quad (1.6)$$

em que ρ_p é a densidade das partículas, μ é a viscosidade do gás, D é o diâmetro do ciclone, Q é a vazão de gás, V é a velocidade do gás na entrada do ciclone, Vol é o volume do ciclone e d é o diâmetro da partícula, é representativa deste tipo de modelo.

1.3 Objetivos deste Trabalho

Nesta dissertação, foi estudada a extensão do efeito de altas concentrações de sólidos na entrada do ciclone sobre seu rendimento de coleta e sua perda de pressão,

Foram utilizadas partículas de FCC (Fluid Catalyst Cracking), um catalisador do processo de craqueamento de petróleo que possui distribuição granulométrica extensa, entre 1 e 200 μm , e velocidades de entrada do gás entre 5 e 28 m/s . A concentração de sólidos chegou até 20 kg de FCC/ kg de ar, valor bastante superior aos descritos pela literatura disponível e importante para os processos que envolvem leitos fluidizados circulantes e em refinarias de petróleo. Em alguns testes, foi analisado o efeito da utilização de uma válvula *flap* na perna do ciclone.

Capítulo 2

Descrição do Dispositivo de Testes e do Procedimento Experimental

Neste capítulo é feita a descrição do dispositivo de testes, apresentando-se um fluxograma do mesmo, fotografias e desenhos dos vários componentes do sistema, assim como a identificação de suas funções. Também é apresentado o procedimento experimental.

2.1 Descrição do Dispositivo de Testes

O dispositivo foi montado nas dependências da SIX - Superintendência da Industrialização do Xisto da Petrobras S.A., em São Mateus do Sul, Paraná. Uma vista geral da montagem é apresentada na Fig. 2.1.

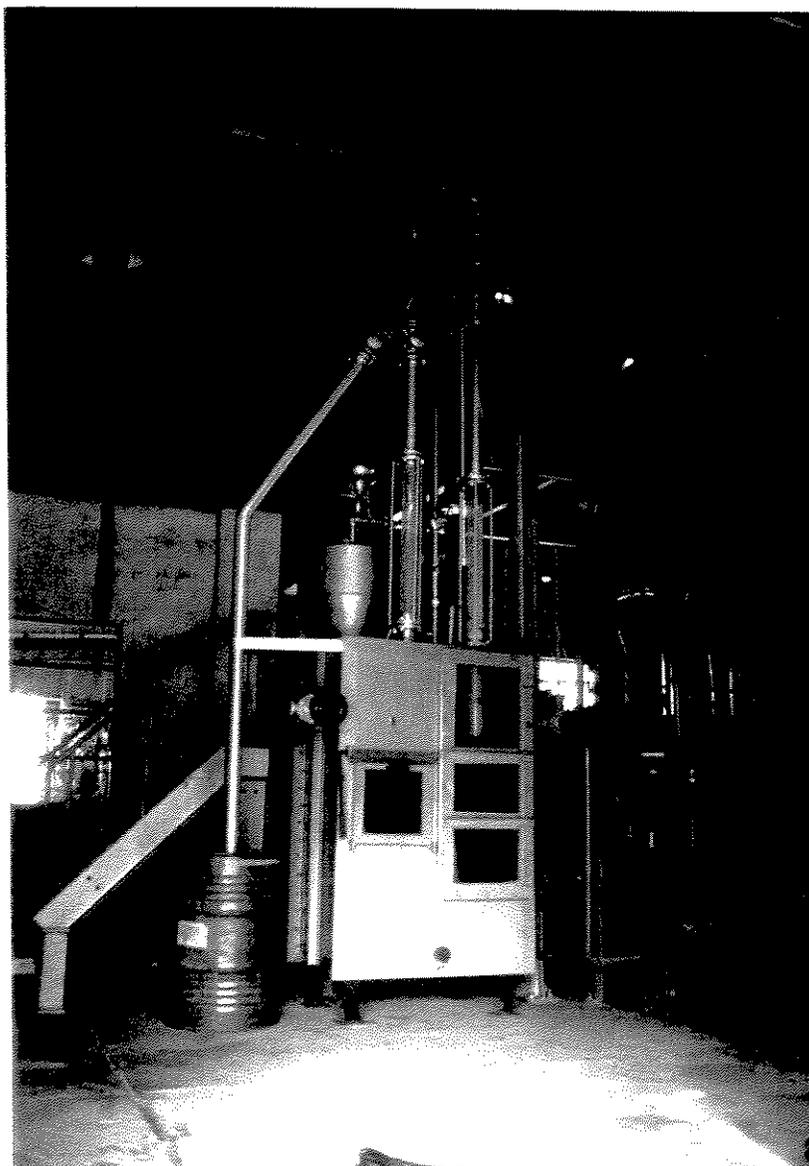


Fig. 2.1 Vista geral da montagem.

Para a realização dos testes, foram feitas algumas alterações em relação à montagem apresentada na fotografia, com a eliminação do segundo ciclone e a instalação de um filtro na saída do primeiro ciclone, como pode ser visto no fluxograma geral do dispositivo experimental, Fig. 2.2.

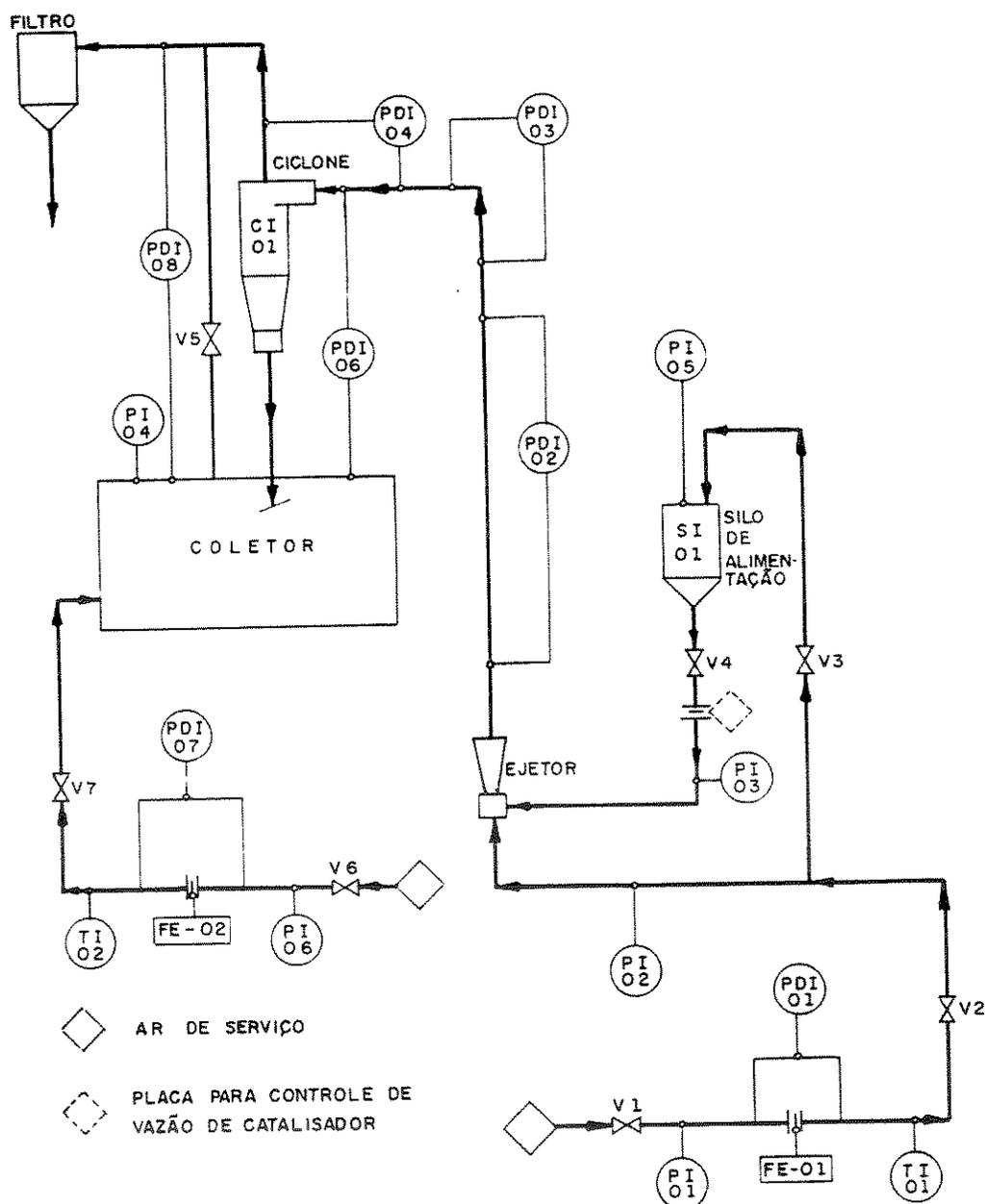


Fig. 2.2 Fluxograma do dispositivo experimental.

O sistema é constituído pelo ciclone CI-01, por um silo de armazenamento e alimentação de partículas sólidas SI-01, por um coletor de partículas capturadas pelo ciclone, por um filtro para reter as partículas não coletadas pelo ciclone, por um ejetor, pela tubulação que une esses equipamentos e por dispositivos de medida de pressão PI-01 a PI-06, diferenciais de pressão PDI-01 a PDI-08, temperatura TI-01 e TI-02, e vazão FE-01 e FE-02.

A representação esquemática do ciclone é mostrada na Fig. 2.3. Ele é constituído por uma seção cilíndrica de 0,15405 m de diâmetro e uma seção cônica. Possui entrada tangencial de seção retangular e um duto circular para saída do gás. As dimensões do ciclone constam da Fig. 2.3 e pode ser observado que suas proporções em relação ao diâmetro do cilindro não se enquadram dentro de nenhum *design* convencional de ciclone, como por exemplo, os ciclones de tipo Lapple e tipo Stairmand, citados na Tabela 1.1.

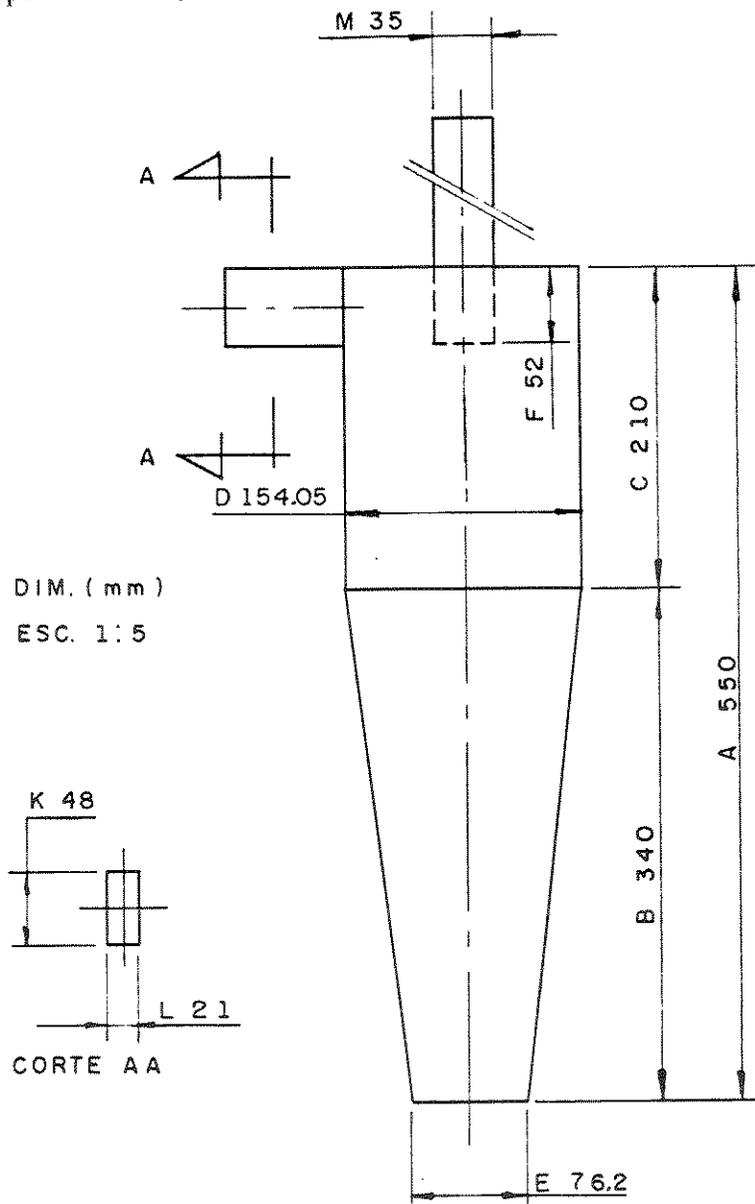


Fig. 2.3 Representação esquemática e dimensões do ciclone utilizado

O silo de armazenamento e alimentação de sólidos foi construído com chapas de aço carbono e é apresentado na Fig. 2.4. Ele possui uma seção cilíndrica e uma base cônica. Seu volume é de aproximadamente $0,250 \text{ m}^3$. No topo do silo existe uma abertura para alimentação de sólidos, fechada por uma válvula macho e uma válvula de gaveta que permite que o silo seja pressurizado. A base do silo é fechada por uma válvula macho.

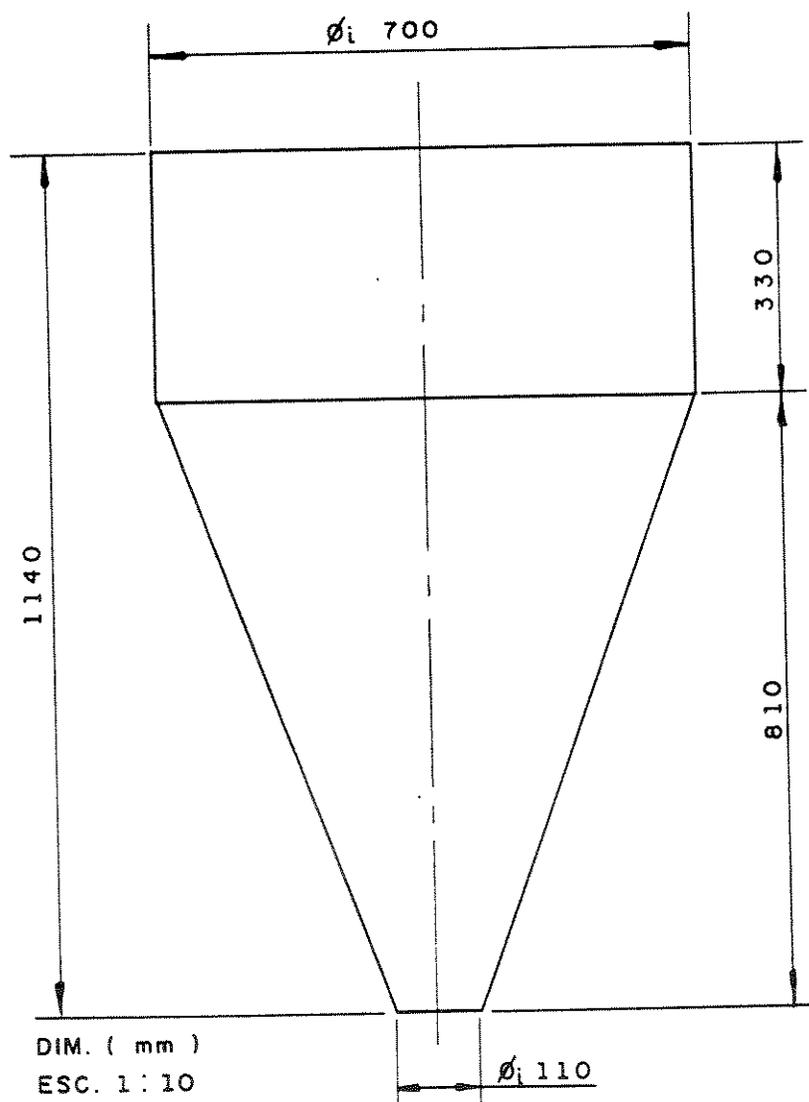


Fig. 2.4 Representação esquemática do silo de armazenamento e alimentação de sólidos

O ejetor propicia a mistura das partículas com o ar, introduzindo-as no escoamento. É constituído por um bocal convergente e um difusor. Uma válvula agulha localizada no interior do ejetor regula a intensidade do vácuo criado por ele no ponto de introdução de sólidos. A

posição da válvula altera a velocidade de passagem de ar pelo ejetor e, conseqüentemente, altera sua pressão de sucção .

O acoplamento entre o silo, o ejetor e o duto de alimentação de ar pode ser visto na Fig. 2.5, que apresenta uma vista da parte posterior do dispositivo experimental.



Fig. 2.5 Vista posterior da montagem.

O coletor é basicamente uma caixa de $0,100 \times 0,077 \times 1,620$ m onde são recolhidas as partículas coletadas pelo ciclone. Ele possui janelas de acrílico para inspeção. A base do coletor possui uma saída dotada de um tampão rosqueado por onde são retiradas as partículas coletadas.

A alimentação de sólidos foi realizada por gravidade, com o auxílio do vácuo criado pelo ejetor. O controle da descarga de sólidos foi feito através de uma placa de orifício instalada na união entre o silo SI-01 e o ejetor. Foram utilizadas placas com orifícios de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 mm de diâmetro. O desenho da placa pode ser visto na Fig. 2.6.

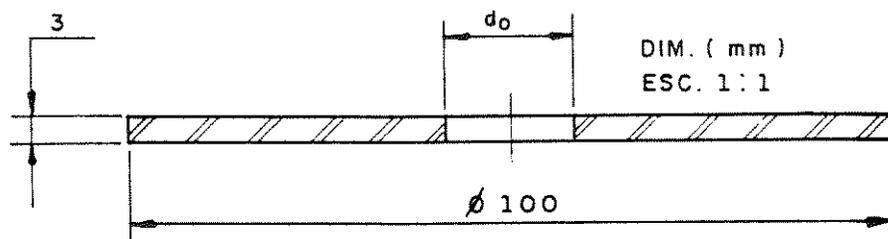


Fig. 2.6 Placa de orifício para controle da alimentação de sólidos.

Em alguns testes foi utilizada uma válvula *flap* na perna do ciclone. Um contrapeso escolhido foi colocado no braço da válvula de modo que ela se abria apenas quando havia uma quantidade de sólidos acumulada na perna do ciclone suficiente para vencer o momento gerado pelo contrapeso. A válvula pode ser vista no esquema da Fig. 2.7.

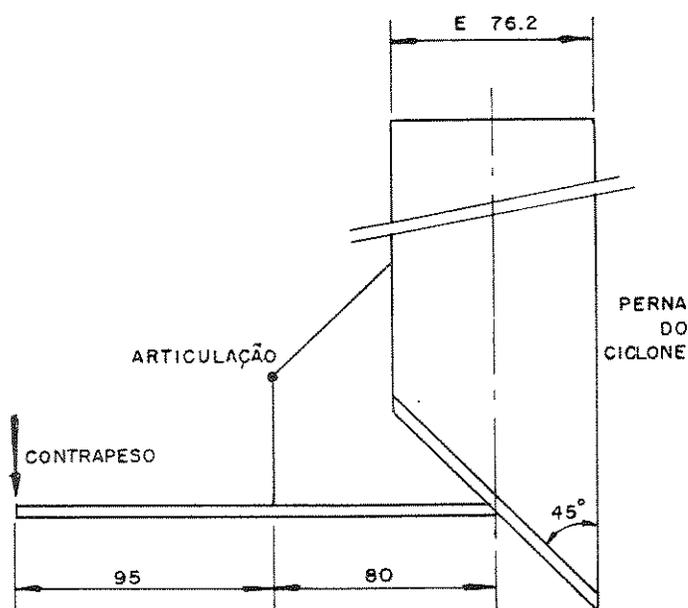


Fig. 2.7 Representação esquemática da válvula *flap*

Na saída da tubulação do ciclone foi instalado um filtro de mangas para reter as partículas não capturadas pelo ciclone.

A vazão de ar foi medida pelo diferencial de pressão em uma placa de orifício de 52 mm instalada em uma flange da tubulação de entrada de ar. As tomadas de pressão estão situadas na tubulação, a $2,5 d_t$ a montante e $8 d_t$ a jusante da placa de orifício, onde d_t é o diâmetro da tubulação. O desenho da placa de orifício encontra-se na Fig. 2.8.

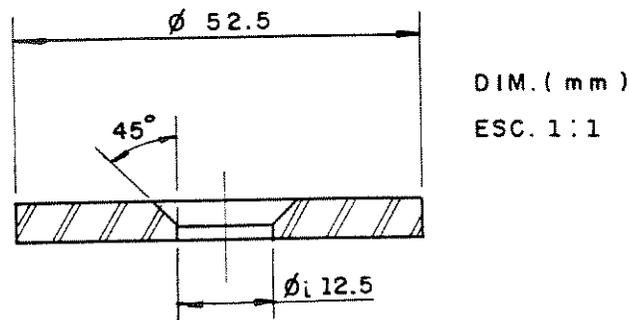


Fig. 2.8 Placa de orifício

As pressões foram medidas com manômetros tipo Bourdon, com as características seguintes:

Manômetro	Fabricante	Escala	Menor divisão
PI-01	Terbrasma	0 - 16 bar	0,2 bar
PI-02	Willy	0 - 10 kgf/cm ²	0,1 kgf/cm ²
PI-05	Willy	0 - 4 kgf/cm ²	0,05 kgf/cm ²

Os diferenciais de pressão foram medidos por manômetros de coluna em U preenchidos com água colorida ou mercúrio.

A temperatura do ar na entrada do sistema foi medida por um termômetro fabricado pela Terbrasma, com escala de 0 a 100°C e menor divisão de 1°C.

O tempo dos experimentos foi medido com um cronômetro digital da marca Casio, modelo HS-20, com precisão de $\pm 0,01$ s.

As medidas de massa foram feitas com uma balança digital da marca Toledo, modelo 3300, com capacidade de 5,000 kg e precisão de ± 1 g.

Distribuição Granulométrica

Foram utilizadas duas etapas para determinar a distribuição granulométrica do FCC. A primeira foi o peneiramento da amostra e a segunda a análise em um sistema com tecnologia a laser de medida de tamanho de partículas.

O peneiramento foi realizado em um conjunto de peneiras com as aberturas de 590, 420, 297, 210, 177 e 149 μm .

As massas retidas nas peneiras foram medidas com uma balança eletrônica da Ohaus, modelo GA 200, com capacidade de 200,0000 g e precisão de $\pm 0,0001$ g.

As partículas menores que 149 μm foram conduzidas ao analisador a laser, da marca Galai Production Ltd., modelo CIS-1.

A distribuição granulométrica foi obtida pela composição das análises do peneiramento e do sistema a laser. O Apêndice A descreve com mais detalhes esse procedimento e apresenta a distribuição granulométrica dos testes realizados.

Características do sólido utilizado

Foram utilizadas partículas de FCC em todos os testes. Elas apresentam as seguintes características:

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

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

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

Diâmetro médio aritmético: $d_m = 56,21 \mu m$

Diâmetro médio de Sauter: $d_p = 35,95 \mu m$

Esfericidade: $\phi = 0,8$

A Figura 2.9 traz a distribuição granulométrica do FCC alimentado.

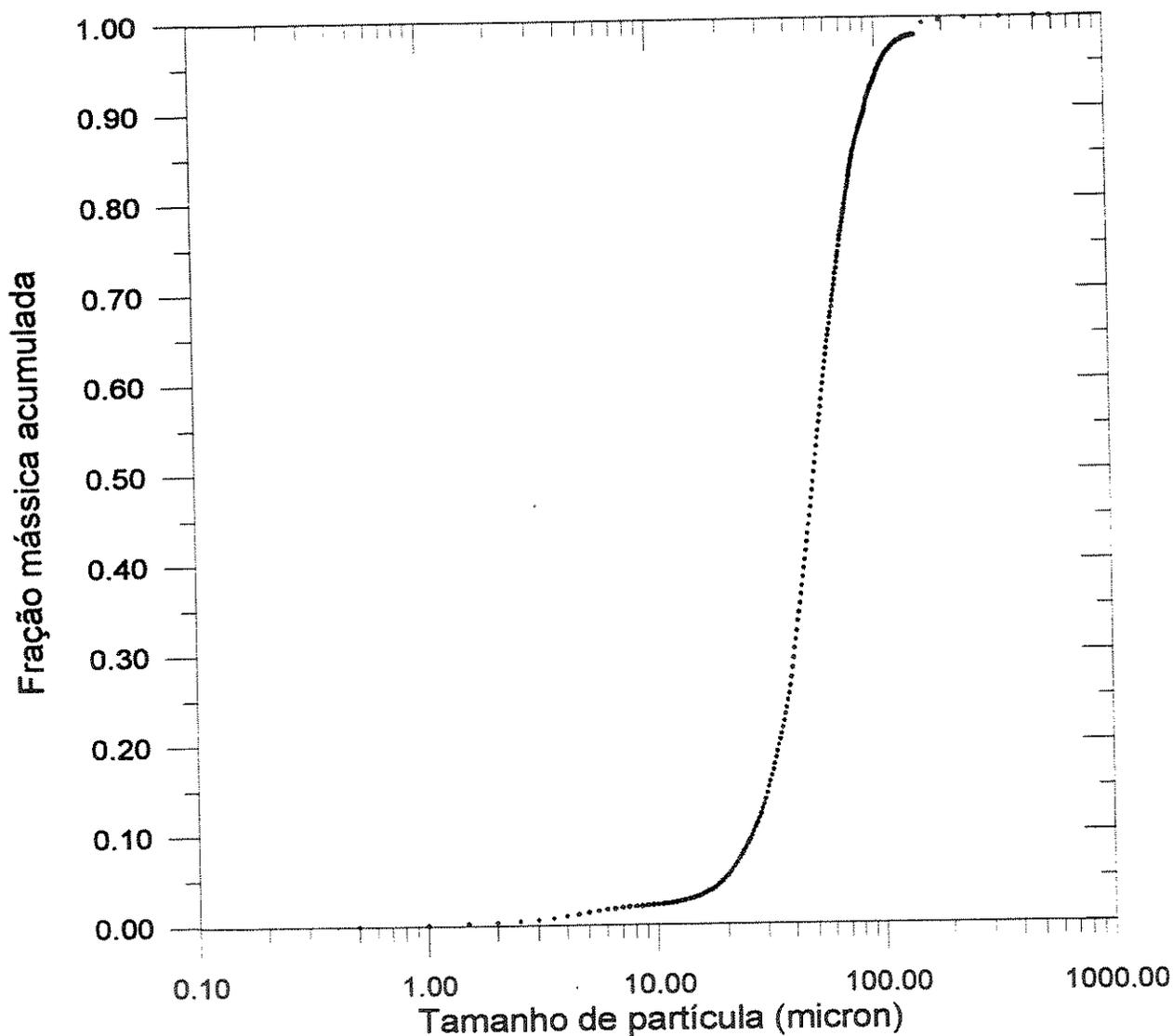


Fig. 2.9 Distribuição granulométrica do FCC alimentado.

Condições Ambientais

As condições ambientais médias em São Mateus do Sul, durante o período de realização dos testes foram:

Pressão atmosférica: $P_{atm} = 924,6 \text{ mbar}$

Temperatura ambiente: $T_{amb} = 19^{\circ}\text{C}$

Umidade relativa: $U.R. = 75\%$

2.2 Procedimento Experimental

O procedimento experimental consistiu na preparação do inventário de sólidos, ajuste das condições operacionais, execução do teste em si e retirada dos sólidos do coletor e do filtro.

Para preparar o inventário de partículas, elas foram inicialmente peneiradas com uma peneira de 1 *mm*, para eliminar impurezas que pudessem bloquear a passagem dos sólidos pela placa dosadora, e colocadas em um tambor, onde a mistura de partículas foi homogeneizada pela rolagem do tambor. Uma amostra do inventário era separada para análise granulométrica. A seguir, o inventário era pesado numa balança e carregado no silo SI-01.

O filtro era pesado antes de ser acoplado ao sistema, para permitir a determinação da massa de partículas nele retida. O contrapeso era colocado na válvula *flap* nos testes em que se estudou sua influência no rendimento de coleta.

O ar era proveniente da central de ar comprimido da SIX e chegava à unidade com pressão de 6,0 *bar abs.* e temperatura ambiente, na faixa de 13 a 25,5 °C, sendo a pressão no sistema e a vazão de ar controladas pela válvula V-2 e pela válvula agulha do ejetor. Após este ajuste, a unidade permanecia operando por duas horas para purgar a umidade eventualmente existente no sistema. Nesta fase, as válvulas V-3 e V-4 do silo permaneciam fechadas. Em seguida o silo era pressurizado ao mesmo nível de pressão existente na linha após a válvula V-2.

Nessas condições eram efetuadas as medidas de temperatura e pressão nos pontos de interesse.

O teste propriamente dito começava com a abertura da válvula V-4 situada na base do silo SI-01, iniciando a alimentação de sólidos. Simultaneamente à abertura desta válvula, um cronômetro era acionado para medir o tempo de duração do teste. O teste concluía quando todo o inventário de sólidos, inicialmente colocado no silo, terminava de escoar. Durante os testes eram realizadas as seguintes medidas:

<i>PI-01</i>	Pressão na entrada do sistema;
<i>PI-02</i>	Pressão a montante do ejetor;
<i>PI-03</i>	Pressão na linha entre o silo SI-01 e o ejetor;
<i>PI-04</i>	Pressão no coletor;
<i>PI-05</i>	Pressão no silo SI-01;
<i>PI-06</i>	Pressão na linha de ar do coletor;
<i>PI-07</i>	Pressão na entrada do ciclone;
<i>PDI-01</i>	Diferencial de pressão na placa de orifício FE-01;
<i>PDI-02</i>	Diferencial de pressão da base ao topo do duto de subida;
<i>PDI-03</i>	Diferencial de pressão entre saída do duto de subida e linha horizontal que conduz ao ciclone;
<i>PDI-04</i>	Diferencial de pressão entre a entrada e a saída do ciclone;
<i>PDI-06</i>	Diferencial de pressão entre entrada do ciclone e coletor;
<i>PDI-07</i>	Diferencial de pressão da placa de orifício FE-02;
<i>TI-01</i>	Temperatura do ar na entrada do sistema;
<i>M_t</i>	Inventário total de sólidos alimentado;

M_c	Inventário de sólidos coletado pelo ciclone;
M_o	Inventário de sólidos não coletado pelo ciclone e retido pelo filtro, e
t	Tempo de duração do teste.

Terminado o teste, permitia-se que o ar continuasse escoando por cerca de uma hora, para retirar partículas eventualmente aderidas à tubulação do sistema.

As partículas eram, então, retiradas do coletor e sua massa medida, separando-se amostras de cerca de 0,1 kg para análise granulométrica.

O filtro era pesado novamente para a determinação da massa por ele retida. Uma amostra também era separada para análise granulométrica.

2.3 Programa de Testes Realizado

Foram realizados 23 testes sem a utilização da válvula flap e 33 com sua utilização, com várias descargas de fluido e de sólidos.

2.3.1 Testes sem a utilização da válvula flap

Os dados experimentais obtidos nos testes realizados sem a utilização da válvula flap são apresentados nas Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3. As medidas realizadas sem a introdução das partículas de FCC no escoamento são chamadas de medidas sem partículas e as realizadas após a introdução das partículas de medidas com partículas. Na Tabela 2.1 encontram-se as variáveis necessárias para o cálculo da descarga de fluido. A Tabela 2.2 traz as medidas de pressão e os diferenciais de pressão entre ciclone, coletor e filtro. Os inventários de sólidos e o tempo de duração dos testes constam da Tabela 2.3.

Tabela 2.1 Variáveis para o cálculo da descarga de fluido. Testes sem a utilização da válvula flap

<i>No. do teste</i>	<i>Contrapeso [kg]</i>	<i>TI-01 [°C]</i>	<i>PI-01 [bar abs.]</i>	<i>PI-02 [bar abs.]</i>	<i>PDI-01 [mmHg]</i>	<i>PDI-07 [mmca]</i>
1	0,000	22,5	6,8	6,8	82	0
4	0,000	23,0	6,8	6,8	82	0
7	0,000	15,0	7,1	7,1	35	0
10	0,000	18,0	7,1	7,1	32	0
13	0,000	19,0	7,0	7,0	5	0
16	0,000	19,0	7,0	7,0	45	0
160	0,000	16,0	6,5	6,5	50	0
21	0,000	24,5	7,1	7,1	30	0
23	0,000	23,5	6,9	6,9	80	0
24	0,000	19,5	7,3	7,3	78	0
26	0,000	18,5	6,9	6,9	80	0
27	0,000	22,5	7,1	7,1	30	0
28	0,000	22,5	6,8	6,8	32	0
29	0,000	16,5	6,9	6,9	78	0
31	0,000	18,0	6,7	6,7	32	0
32	0,000	13,0	7,2	7,2	80	0
34	0,000	15,5	7,0	7,0	82	0
35	0,000	14,5	7,2	7,2	32	0
42	0,000	25,5	7,2	7,2	31	0
44	0,000	25,5	7,2	7,2	78	0
45	0,000	20,5	7,3	7,3	78	0
50	0,000	16,5	7,7	7,7	28	0
53	0,000	16,5	6,3	6,3	34	0

Tabela 2.2 Medidas de pressão e diferenciais de pressão do ciclone e coletor. Testes sem a utilização da válvula flap

No. do teste	Contrapeso (kg)	PI-07 (bar man)	PDI-04 (mmca)		PI-04 (mmHg)	
			s/part.	c/part.	s/part.	c/part.
1	0,000	0,05	185	82	16	16
4	0,000	0,10	200	110	20	20
7	0,000	0,05	105	45	11	20
10	0,000	0,05	104	40	11	15
13	0,000	0,01	21	10	7	15
16	0,000	0,01	7	4	8	8
160	0,000	0,01	7	3	3	7
21	0,000	0,05	102	38	8	23
23	0,000	0,05	196	95	16	38
24	0,000	0,05	182	80	13	40
26	0,000	0,05	192	90	16	34
27	0,000	0,05	96	40	10	20
28	0,000	0,05	84	40	11	20
29	0,000	0,05	182	95	15	36
31	0,000	0,05	86	38	8	24
32	0,000	0,05	195	105	16	32
34	0,000	0,05	189	100	22	40
35	0,000	0,05	110	42	10	25
42	0,000	0,05	105	50	11	40
44	0,000	0,05	200	90	12	16
45	0,000	0,05	195	92	16	20
50	0,000	0,05	96	40	5	30
53	0,000	0,05	97	40	6	20

Tabela 2.3 Medidas dos inventários de sólidos alimentados, coletados e perdidos pelo ciclone. Testes sem a utilização da válvula flap

No. do teste	Contrapeso (kg)	Mt (kg)	Mc (kg)	Mf (kg)	t (s)
1	0,000	20,000	19,866	0,134	91
4	0,000	40,000	39,733	0,267	75
7	0,000	20,000	19,929	0,071	98
10	0,000	40,000	39,825	0,175	98
13	0,000	20,000	19,805	0,195	120
16	0,000	20,000	19,890	0,110	206
160	0,000	20,000	19,890	0,110	202
21	0,000	20,000	19,775	0,225	466
23	0,000	40,000	39,473	0,527	673
24	0,000	20,000	19,750	0,250	342
26	0,000	20,000	19,826	0,174	127
27	0,000	20,000	19,870	0,130	380
28	0,000	20,000	19,932	0,068	92
29	0,000	20,000	19,907	0,093	60
31	0,000	24,000	23,832	0,168	349
32	0,000	20,000	19,835	0,165	185
34	0,000	20,000	19,920	0,080	51
35	0,000	20,000	19,896	0,104	69
42	0,000	20,000	19,792	0,208	1075
44	0,000	20,000	19,699	0,301	711
45	0,000	20,000	19,682	0,318	715
50	0,000	20,000	19,870	0,130	203
53	0,000	20,000	19,906	0,094	62

2.3.2 Testes com a utilização da válvula flap

Os dados experimentais obtidos nos testes realizados com a utilização da válvula flap são apresentados nas Tabelas 2.4, 2.5 e 2.6. Na Tabela 2.4 encontram-se as variáveis necessárias para o cálculo das descargas de fluido. A Tabela 2.5 traz as medidas de pressão e diferenciais de pressão entre ciclone, coletor e filtro. Os inventários de sólidos e o tempo de duração dos testes constam da Tabela 2.6.

Tabela 2.4 Variáveis para o cálculo das descargas de fluido. Testes com a utilização da válvula flap

No. do teste	Contrapeso (kg)	TI-01 (°C)	PI-01 (bar abs.)	PI-02 (bar abs.)	PDI-01 (mmHg)	PDI-07 (mmca)
2	0,199	20,0	6,8246	6,8246	82	95
3	0,203	22,0	6,9246	6,9246	82	90
5	0,199	16,0	7,1246	7,1246	75	90
6	0,282	15,0	7,1246	7,1246	80	80
8	0,199	15,0	7,0246	7,0246	32	30
9	0,282	17,0	7,1246	7,1246	32	30
11	0,199	14,0	6,8246	6,8246	30	30
12	0,282	15,0	6,8242	6,8242	32	31
14	0,199	20,0	7,0246	7,0246	8	14
18	0,199	23,0	7,1246	7,1246	50	10
20	0,199	20,0	7,0246	7,0246	50	12
22	0,199	19,5	7,3246	7,3246	30	10
25	0,199	22,5	7,3246	7,3246	78	10
30	0,199	17,0	6,9246	6,9246	80	10
33	0,282	15,0	7,2246	7,2246	80	10
36	0,282	21,5	7,0246	7,0246	30	10
37	0,336	22,5	6,9246	6,9246	30	10
38	0,203	16,0	7,2246	7,2246	31	20
39	0,336	23,5	7,3246	7,3246	30	20
40	0,336	23,5	7,3246	7,3246	30	21
41	0,286	20,0	7,3246	7,3246	30	20
47	0,336	16,0	7,3246	7,3246	36	0
48	0,282	15,0	7,9246	7,9246	31	0
49	0,203	15,5	7,5246	7,5246	28	12
51	0,336	16,5	7,9246	7,9246	28	10
54	0,203	18,0	6,7246	6,7246	32	14
55	0,150	23,0	7,1246	7,1246	32	30
56	0,250	19,0	6,5246	6,5246	35	30
57	0,352	21,0	5,9246	5,9246	35	34
59	0,402	18,5	6,8246	6,8246	32	35
60	0,250	18,0	7,2246	7,2246	76	35
61	0,352	17,0	7,7246	7,7246	72	38
62	0,404	17,5	7,1246	7,1246	76	38

Tabela 2.5 Medidas de pressão e diferenciais de pressão do ciclone e coletor . Testes com a utilização da válvula flap

No. do teste	Contrapeso (kg)	PI-07 (bar man)	PDI-04		PI-04	
			s/part. (mmca)	c/part.	s/part. (mmHg)	c/part.
2	0,199	0,10	290	105	45	65
3	0,203	0,10	280	105	28	50
5	0,199	0,10	275	150	48	85
6	0,282	0,10	280	140	30	50
8	0,199	0,05	105	40	13	45
9	0,282	0,05	110	45	12	30
11	0,199	0,05	90	40	12	35
12	0,282	0,05	100	50	15	32
14	0,199	0,01	28	14	8	15
18	0,199	0,01	8	25	5	22
20	0,199	0,01	11	35	8	25
22	0,199	0,05	110	44	11	23
25	0,199	0,05	209	93	17	40
30	0,199	0,05	205	100	16	45
33	0,282	0,05	205	100	18	40
36	0,282	0,05	98	38	13	20
37	0,336	0,05	105	180	10	20
38	0,203	0,05	105	45	10	25
39	0,336	0,05	102	45	14	28
40	0,336	0,05	95	35	12	32
41	0,286	0,05	105	44	11	15
47	0,336	0,05	123	43	8	30
48	0,282	0,05	94	42	7	30
49	0,203	0,05	90	36	10	36
51	0,336	0,05	90	38	8	24
54	0,203	0,05	110	44	8	30
55	0,150	0,05	67	30	4	30
56	0,250	0,05	72	35	2	25
57	0,352	0,05	62	34	4	16
59	0,402	0,05	70	38	2	22
60	0,250	0,05	165	74	10	30
61	0,352	0,05	152	68	10	42
62	0,404	0,05	160	70	10	50

Tabela 2.6 Medidas de inventários de sólidos alimentados, coletados e perdidos pelo ciclone.
Testes com a utilização da válvula flap

<i>No. do teste</i>	<i>Contrapeso (kg)</i>	<i>Mt (kg)</i>	<i>Mc (kg)</i>	<i>Mf (kg)</i>	<i>t (s)</i>
2	0,199	20,000	19,813	0,187	74
3	0,203	20,000	19,524	0,476	74
5	0,199	40,000	39,725	0,275	68
6	0,282	40,000	39,944	0,056	65
8	0,199	20,000	19,952	0,048	103
9	0,282	20,000	19,915	0,085	106
11	0,199	40,000	39,827	0,173	94
12	0,282	40,000	39,855	0,145	78
14	0,199	20,000	19,973	0,027	105
18	0,199	20,000	19,961	0,039	188
20	0,199	20,000	19,946	0,054	123
22	0,199	20,000	19,811	0,189	474
25	0,199	20,000	19,763	0,237	402
30	0,199	20,000	19,869	0,131	60
33	0,282	20,000	19,901	0,099	185
36	0,282	20,000	19,856	0,144	79
37	0,336	20,000	19,873	0,127	75
38	0,203	20,000	19,830	0,170	103
39	0,336	20,000	19,865	0,135	99
40	0,336	20,000	19,746	0,254	191
41	0,286	20,000	19,794	0,206	203
47	0,336	20,000	19,787	0,213	80
48	0,282	20,000	19,704	0,296	326
49	0,203	20,000	19,897	0,103	343
51	0,336	20,000	19,835	0,165	205
54	0,203	20,000	19,837	0,163	59
55	0,15	20,000	19,890	0,110	133
56	0,25	20,000	19,832	0,168	115
57	0,352	20,000	19,857	0,143	114
59	0,402	40,000	39,833	0,167	282
60	0,25	40,000	39,679	0,321	177
61	0,352	40,000	39,729	0,271	182
62	0,404	40,000	39,809	0,191	164

2.4 Dificuldades Experimentais

Durante a execução dos testes preliminares ocorreram vários problemas:

- Vazamentos de ar nas flanges da tubulação e na janela de inspeção do coletor;
- Sufocamento do ciclone;
- Bloqueio da alimentação das partículas;
- Adesão das partículas às superfícies de acrílico, e
- Inadequação do filtro inicialmente utilizado.

Os vazamentos de ar nas flanges da tubulação foram resolvidos com o aperto de seus parafusos. Para eliminar os vazamentos nas janelas de inspeção foram coladas bandas de borracha em seu contorno e revestimento com massa para calafetar nos pontos críticos.

O sufocamento do ciclone ocorria em altas concentrações e baixas velocidades, o que levou à adoção de velocidades acima de 10 *m/s* na maioria dos testes. O uso de contrapesos maiores que 0,5 *kg* no braço da válvula *flap* também causava o mesmo problema, o que conduziu à utilização de contrapesos menores que esse.

O bloqueio da alimentação das partículas aconteceu devido à presença de elementos estranhos no inventário de sólidos, o que foi resolvido com a preparação do inventário através de peneiramento, em uma peneira de 1 *mm*, antes de sua colocação no silo de alimentação.

O problema da adesão das partículas às superfícies de acrílico do coletor e da perna do ciclone ocorreu devido à umidade acumulada na linha de ar e foi resolvido pelo escoamento de ar através do sistema durante o período de duas horas antes da execução dos testes. Após a execução propriamente dita, o escoamento de ar era continuado por cerca de 30 minutos, para arrastar as partículas que eventualmente ainda estivessem aderidas às superfícies do sistema.

O filtro inicialmente utilizado rompia-se com facilidade e foi substituído por um filtro de mangas. Foi observado que o novo filtro não foi capaz de capturar todas as partículas não coletadas pelo ciclone e foi deslocado para fora do galpão fechado em que estava montado o sistema experimental. Deve ser observado, portanto, que as amostras recolhidas no filtro representam apenas parcialmente as partículas não coletadas pelo ciclone, pois as partículas menores escaparam do tecido do filtro. Por esse motivo, no cálculo do rendimento de coleta, optou-se pela utilização dos inventários coletados pelo ciclone e os alimentados. A massa de partículas não retidas pelo filtro representava, em média, cerca de 50 por cento do material não coletado pelo ciclone.

2.5 Processamento dos Dados Experimentais

A partir dos dados experimentais apresentados no item anterior, foram calculados os valores das variáveis de interesse:

- Descarga de ar \dot{m}_a ;
- Descarga de ar reversa pela perna do ciclone \dot{m}_{rev} ;
- Velocidade do ar na entrada do ciclone V ;
- Descarga de sólidos \dot{m}_s ;
- Concentração de sólidos na entrada do ciclone c ;
- Perdas de pressão, ΔP e ΔP_c ;
- Redução da perda de pressão, $\Delta P / \Delta P_c$, e
- Rendimento de coleta η .

2.5.1 Descargas de ar

As descargas de ar \dot{m}_{ar} e \dot{m}_{rev} foram calculadas a partir dos dados das tabelas 2.1 e 2.4, e das dimensões das placas de orifício. O cálculo foi realizado utilizando o procedimento da ASME para cálculo de descarga em placas de orifício, descrito por Benedict (1984), através da equação:

$$\dot{m}_{ar} = C_D A_d \left[\frac{2\gamma p_1 \rho_1 (r^{2/\gamma} - r^{(\gamma+1)/\gamma})}{(\gamma - 1)(1 - r^{2/\gamma} \beta^4)} \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

em que:

A_d é a área do orifício da placa;

p_1 é a pressão a montante da placa;

p_2 é a pressão a jusante da placa;

γ é a razão entre os calores específicos a pressão constante e a volume constante;

r é a razão entre p_2 e p_1 ;

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

C_D é o coeficiente de descarga calculado por:

$$C_D = (1 - \beta^4)^{1/2} k \quad (2.2)$$

A determinação de k envolve a avaliação das expressões que seguem:

$$A = d_o \left(905 - 5000\beta + 9000\beta^2 - 4200\beta^3 + \frac{875}{d_i} \right) \quad (2.3)$$

$$k_e = 0,5925 + \frac{0,0182}{d_t} + \left(0,44 - \frac{0,06}{d_t}\right)\beta^2 + \left(0,935 + \frac{0,225}{d_t}\right)\beta^5 + 1,35\beta^{14} + \left(\frac{1,43}{d_t^{1/2}}\right)(0,25 - \beta)^{5/2} \quad (2.4)$$

$$k_o = \frac{10^6 k_e d_o}{10^6 d_o + 15A} \quad (2.5)$$

$$k = k_o \left(1 + \frac{\beta A}{R_{dt}}\right) \quad (2.6)$$

onde R_{dt} é o número de Reynolds baseado no diâmetro da tubulação.

O cálculo é iterativo, pois a determinação de k depende da descarga de ar.

2.5.2 Velocidade do ar na entrada do ciclone

A velocidade do ar na entrada do ciclone foi obtida pela divisão da descarga de ar pelo produto da área da seção transversal da entrada do ciclone e a densidade do ar, i.e.,

$$V = \frac{\dot{m}_{ar}}{\rho KL} \quad (2.7)$$

2.5.3 Descarga de sólidos

A descarga de sólidos foi obtida pela divisão entre o inventário de sólidos alimentado e o tempo de duração do teste, ou seja,

$$\dot{m}_s = \frac{M_t}{t} \quad (2.8)$$

2.5.4 Concentração de sólidos na entrada do ciclone

A concentração de sólidos na entrada do ciclone foi calculada através da divisão da descarga de sólidos pela descarga de ar, admitindo que o escoamento das partículas tenha ocorrido em regime permanente.

$$c = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_{ar}} \quad (2.9)$$

2.5.5 Perdas de pressão

Para efeito de notação, *PDI-04* foi chamada de ΔP e adotou-se o sub-índice “c” para designar a perda de pressão referente ao escoamento com partículas, não se usando sub-índice para as corridas apenas do ar, sem a presença de partículas. *PDI-04* e *PDI-04_c* foram medidas em *mmca*. ΔP e ΔP_c foram convertidas para *mbar* pelas expressões:

$$\Delta P = 10^{-5} \rho_a g PDI - 04 \quad (2.10)$$

$$\Delta P_c = 10^{-5} \rho_a g PDI - 04_c \quad (2.11)$$

em que ρ_a é a densidade da água e g é a aceleração da gravidade.

2.5.6 Redução da perda de pressão

A redução da perda de pressão foi obtida pela relação entre a perda de pressão do escoamento com partículas e a perda de pressão do escoamento sem partículas:

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P} \quad (2.12)$$

2.5.7 Rendimento de coleta

O rendimento global de coleta foi obtido pela divisão do inventário de sólidos coletado pelo ciclone pelo inventário alimentado.

$$\eta = \frac{M_t}{M_c} \quad (2.13)$$

Capítulo 3

Apresentação e Análise dos Resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos testes realizados nas condições operacionais descritas no capítulo 2, referentes ao efeito da concentração de sólidos na entrada do ciclone sobre sua perda de pressão e seu desempenho. Os efeitos da velocidade e, adicionalmente, da utilização de uma válvula *flap* com contrapeso também são considerados. O item 3.1 trata da perda de pressão enquanto os itens 3.2, 3.3 e 3.4 se referem ao rendimento de coleta.

3.1 Perda de Pressão

Em todos os testes, a perda de pressão entre a entrada e a saída do ciclone, PDI-04, foi medida antes, ΔP , e após a introdução de partículas de FCC no escoamento de ar, ΔP_c .

A perda de pressão objeto deste estudo é a que ocorre no ciclone operando sem a válvula *flap*.

Nos testes com a válvula *flap*, foi introduzido ar no coletor, com o objetivo de simular condições existentes no interior de um regenerador de catalisador, criando um escoamento reverso de ar através da perna do ciclone. Quando fechada, a válvula evita o escoamento, que é indesejado, mas, simultaneamente, impede que as partículas coletadas pelo ciclone entrem no coletor. As partículas acumulam-se na perna do ciclone até atingirem um peso suficiente para vencer o contrapeso da válvula *flap*. Como o processo de abertura e fechamento da válvula *flap* é dinâmico, ele causa um transiente nos perfis de pressão no ciclone, o que resulta na variação da perda de pressão ao longo do tempo.

A Tabela 3.1 traz os parâmetros necessários para a análise da perda de pressão, obtidos a partir dos dados da Tabela 2.2. Observe-se que a unidade adotada mudou de *mmca* para *mbar*. A velocidade é obtida como descrito em 2.5.2 e a concentração de sólidos na entrada do

ciclone como descrito em 2.5.4. A razão de perda de pressão é obtida da relação entre os valores obtidos com e sem a presença de partículas no escoamento.

Os valores estão agrupados em três faixas de velocidade, cujos valores médios são 6,36, 17,95 e 27,78 *m/s* e, em cada faixa de velocidade, em ordem crescente de concentração. Por conveniência, as faixas são designadas por faixa de 7, 18 e 27 *m/s*.

Tabela 3.1 Variáveis para análise da perda de pressão

<i>No. do Teste</i>	<i>V (m/s)</i>	<i>c (kg/kg)</i>	ΔP <i>(mbar)</i>	ΔP_c <i>(mbar)</i>	$\Delta P_c / \Delta P$
160	5,96	14,760	0,69	0,29	0,42
16	5,90	14,777	0,69	0,39	0,57
13	7,23	20,654	2,06	0,98	0,48
42	18,08	0,926	10,28	4,90	0,48
21	17,64	2,183	9,99	3,72	0,37
27	17,60	2,668	9,40	3,92	0,42
31	17,56	3,449	8,42	3,72	0,44
50	17,52	4,914	9,40	3,92	0,42
7	18,72	9,462	10,28	4,41	0,43
28	17,83	10,904	8,22	3,92	0,48
46	19,09	11,744	8,42	4,31	0,51
35	18,00	13,942	10,77	4,11	0,38
53	17,46	16,148	9,50	3,92	0,41
10	18,00	19,887	10,18	3,92	0,39
45	28,01	0,867	19,09	9,01	0,47
44	28,03	0,885	19,58	8,81	0,45
24	28,04	1,810	17,82	7,83	0,44
23	27,71	1,881	19,19	9,30	0,48
32	27,80	3,290	19,09	10,28	0,54
26	27,50	4,943	18,80	8,81	0,47
1	27,86	6,910	18,11	8,03	0,44
29	27,11	10,558	17,82	9,30	0,52
34	27,91	12,010	18,50	9,79	0,53
4	27,80	16,782	19,58	10,77	0,55

3.1.1 Escoamento sem Partículas

A Figura 3.1 mostra a variação da perda de pressão do escoamento sem a presença de partículas em função da velocidade. Observa-se o aumento da perda de pressão com o aumento da velocidade. Embora tenham sido estudadas apenas três faixas de velocidades, os dados podem ser ajustados por uma equação aproximadamente parabólica, com coeficiente de correlação igual a 0,97, conforme (1.1):

$$\Delta P = 0,0454 \frac{\rho V^{1,98}}{2} \quad [mbar] \quad (3.1)$$

onde $\xi = 0,0454$.

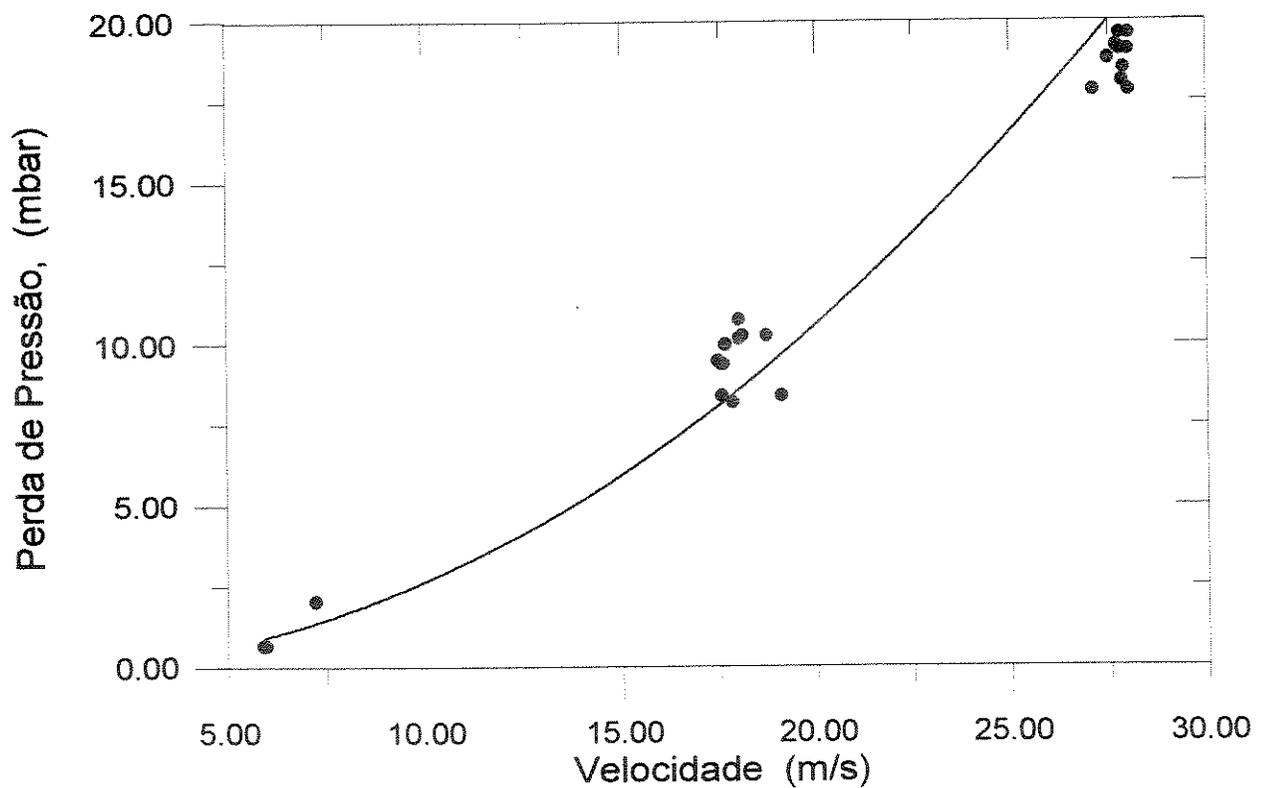


Fig. 3.1 Variação da perda de pressão com a velocidade.

Os valores médios de ΔP para as faixas de velocidades de 7, 18 e 27 m/s foram de 1,15, 9,53 e 18,76 mbar, respectivamente. A estimativa feita através da equação (1.2), desenvolvida por Shepherd e Lapple (1940), que fornece $\xi = 0,1316$ e prevê ΔP 's de 3,26, 25,97 e 62,21 mbar, respectivamente, com erros relativos da ordem de 180 a 230 por cento em relação aos valores medidos, está fora da faixa das incertezas experimentais de ΔP , menores que 35 por cento, conforme discutido no apêndice B, não sendo, portanto, adequada para avaliar a perda de pressão em ciclones como o utilizado neste trabalho.

3.1.2 Escoamento com Partículas

A Figura 3.2 mostra a variação da perda de pressão em função da concentração de sólidos na entrada do ciclone, mantendo constante a velocidade do escoamento na entrada.

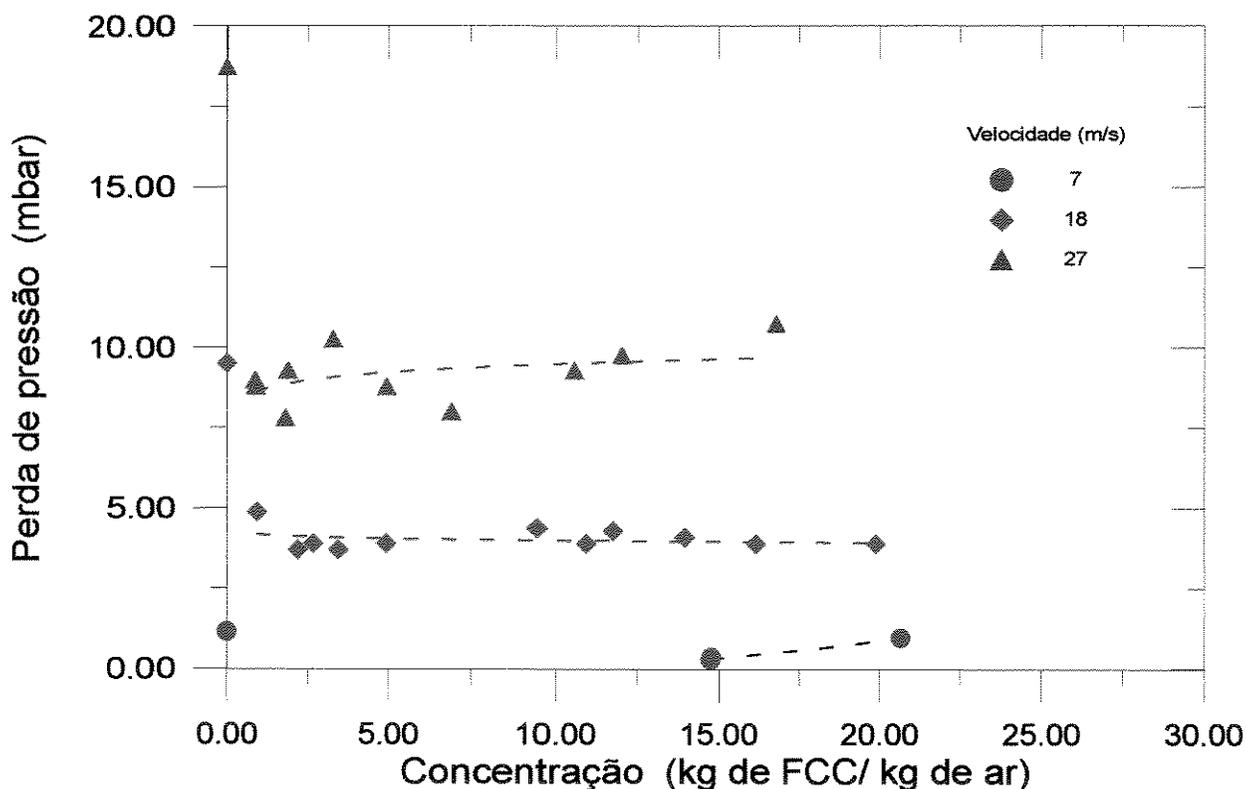


Fig. 3.2 Variação da perda de pressão com a concentração de sólidos na entrada do ciclone.

Da mesma forma que no caso do escoamento sem partículas, observa-se que, quanto maior a velocidade, maior é a perda de pressão, independente da concentração de sólidos.

A comparação dos valores obtidos para ΔP_c e ΔP mostram que a introdução de partículas no escoamento causa a redução da perda de pressão do ciclone em relação ao escoamento sem partículas. Esse fato foi observado por Shepherd e Lapple (1939), Kiegel (1968), Yuu et al. (1978), Littlejohn e Smith (1978), Beeckmans e Morin (1987), Silva, Godoy e Nebra (1989), Kang, Kwon e Kim (1989), Baskakov, Dolgov e Goldobin (1990), Hoffmann, Arends e Sie (1991), Comas et al. (1991), Scheid e Massarani (1992), e Hoffmann et al. (1992), mas para concentrações menores que as utilizadas no presente trabalho. A presença de partículas no escoamento causaria tanto a diminuição da velocidade tangencial do gás devido ao aumento do atrito nas paredes, quanto a suavização dos perfis de velocidade do gás. Esses dois fatores seriam responsáveis pela diminuição da perda de pressão observada.

Observa-se uma variação pequena dos valores da perda de pressão com a concentração, podendo-se admitir que a perda de pressão praticamente não varia com a concentração para as três faixas de velocidade estudadas.

3.1.3 Razão de Perda de Pressão

A relação entre a perda de pressão do escoamento com partículas e sem partículas é apresentada na Fig. 3.3.

Em todos os testes houve redução da perda de pressão com a introdução de partículas no escoamento, com uma razão de perda de pressão entre 0,38 e 0,57, e um valor médio de 0,47.

A redução de perda de pressão foi maior para a faixa de velocidade de 18 *m/s* do que para a faixa de 27 *m/s*. Na faixa de 7 *m/s*, para a qual há um número limitado de testes, os resultados estão numa faixa intermediária.

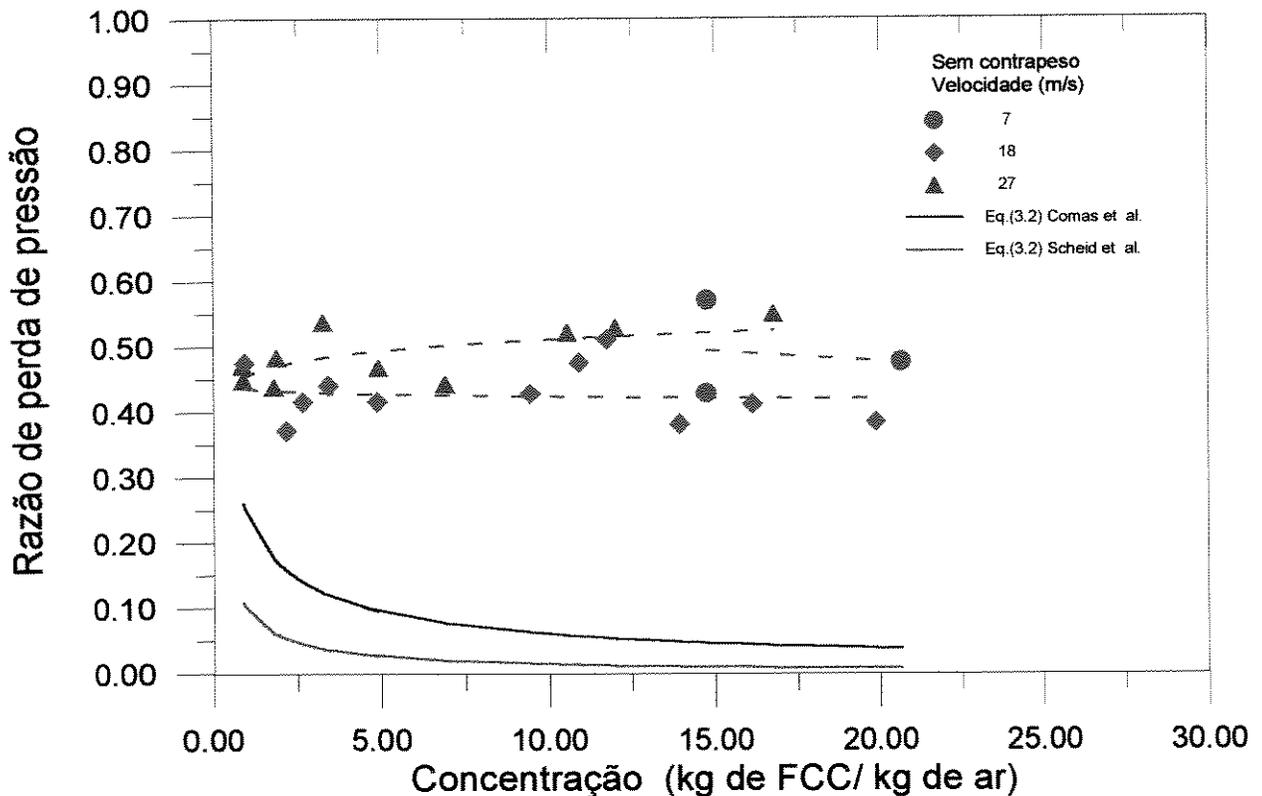


Fig. 3.3 Razão de perda de pressão.

A razão de perda de pressão praticamente não varia com a concentração, observando-se uma tendência suave de aumento da razão com a concentração para a velocidade de 27 *m/s*.

3.1.4 Previsão de Perda de Pressão

O resultado sugere que a perda de pressão pode ser estimada, como uma primeira aproximação, para a faixa de concentração estudada, como cerca de 47 por cento do valor calculado para o escoamento sem partículas.

A estimativa da perda de pressão pela correlação (1.3):

$$\Delta P_c = \frac{\Delta P}{1 + ac^b} \quad (3.2)$$

com os fatores de Comas et al. (1991) e de Scheid e Massarani (1992), mostrou erros relativos da ordem de 58 e 83 por cento, respectivamente, em relação aos resultados experimentais do presente trabalho, como pode ser visto na Fig. 3.3.

A correlação (1.4), de Hoffmann et al. (1992),

$$\Delta P_c = (1 - 1,26c^{0,6})\Delta P \quad (3.3)$$

fornece valores negativos de perda de pressão na faixa dos testes realizados. Desta forma, as Eqs. (3.2) e (3.3) não são adequadas para estimativa da perda de pressão com concentrações elevadas, o que era de se esperar pois foram desenvolvidas para baixas concentrações, não cobrindo a faixa aqui estudada.

3.2 Rendimento de Coleta

O rendimento de coleta, como já foi visto, é definido como a fração das partículas que entram no ciclone e são por ele coletadas. Ele é obtido a partir dos dados experimentais apresentados nas Tabelas 2.3 e 2.6, através do procedimento descrito em 2.5.7. Os valores obtidos estão apresentados nas Tabela 3.2 e 3.3, sem e com a operação com a válvula *flap*, respectivamente. Os resultados foram agrupados em três faixas de velocidades, em ordem crescente de concentração dentro de cada faixa, da mesma forma que a Tabela 3.1. A incerteza na determinação de η é da ordem de 0,02 por cento, conforme discutido no apêndice B. A coluna $\dot{m}_{rev} / \dot{m}_{ar}$ da Tabela 3.3, fornece a proporção de descarga de ar reverso, mantida de 6 a 12 por cento.

Tabela 3.2 Rendimento de coleta. Ciclone sem válvula *flap*

No. do teste	V (m/s)	c (kg/kg)	η
160	5,96	14,760	0,9945
16	5,90	14,777	0,9945
13	7,23	20,654	0,9903
42	18,08	0,926	0,9896
21	17,64	2,183	0,9888
27	17,60	2,668	0,9935
31	17,56	3,449	0,9930
50	17,52	4,914	0,9935
7	18,72	9,462	0,9965
28	17,83	10,904	0,9966
35	18,00	13,942	0,9948
53	17,46	16,148	0,9953
10	18,00	19,887	0,9956
45	28,01	0,867	0,9841
44	28,03	0,885	0,9850
24	28,04	1,810	0,9875
23	27,71	1,881	0,9868
32	27,80	3,290	0,9918
26	27,50	4,943	0,9913
1	27,86	6,910	0,9933
29	27,11	10,558	0,9954
34	27,91	12,010	0,9960
4	27,80	16,782	0,9933

Tabela 3.3 Rendimento de coleta.Ciclone com válvula *flap*

No. do teste	V (m/s)	c (kg/kg)	$\dot{m}_{rev} / \dot{m}_{ar}$	w (kg)	η
18	6,31	15,357	0,1337	0,199	0,9981
14	9,14	18,707	0,1071	0,199	0,9987
20	6,23	23,521	0,1462	0,199	0,9973
22	17,46	2,128	0,0476	0,199	0,9906
48	18,63	2,865	0,0000	0,282	0,9852
49	17,29	2,942	0,0532	0,203	0,9949
51	17,77	4,804	0,0486	0,336	0,9918
41	17,74	4,905	0,0661	0,286	0,9897
40	17,88	5,244	0,0678	0,336	0,9873
59	17,76	7,068	0,0845	0,402	0,9958
55	18,30	7,388	0,0783	0,150	0,9945
56	18,16	8,484	0,0634	0,250	0,9916
57	17,40	9,012	0,0798	0,352	0,9929
9	17,95	9,178	0,0783	0,282	0,9958
8	17,78	9,480	0,0784	0,199	0,9976
38	17,78	9,513	0,0651	0,203	0,9915
39	17,86	10,117	0,0661	0,336	0,9933
47	19,21	11,291	0,0000	0,336	0,9894
36	17,44	12,903	0,0470	0,282	0,9928
37	17,32	13,712	0,0470	0,336	0,9937
54	17,47	17,002	0,0537	0,203	0,9919
11	16,99	21,729	0,0809	0,199	0,9957
12	17,54	25,402	0,0796	0,282	0,9964
25	28,03	1,547	0,0292	0,199	0,9882
33	27,84	3,302	0,0288	0,282	0,9951
61	27,73	6,861	0,0588	0,352	0,9932
60	27,51	7,116	0,0550	0,250	0,9920
62	27,32	7,727	0,0573	0,404	0,9952
3	27,51	8,428	0,0847	0,203	0,9762
2	27,16	8,462	0,0870	0,199	0,9907
30	27,35	10,435	0,0289	0,199	0,9935
5	26,45	18,711	0,0885	0,199	0,9931
6	27,23	18,927	0,0808	0,282	0,9986

3.2.1 Rendimento de Coleta - Testes sem a Válvula *Flap*

A Figura 3.4 apresenta o gráfico do rendimento de coleta em função da concentração. As três curvas referem-se às três faixas de velocidades utilizadas.

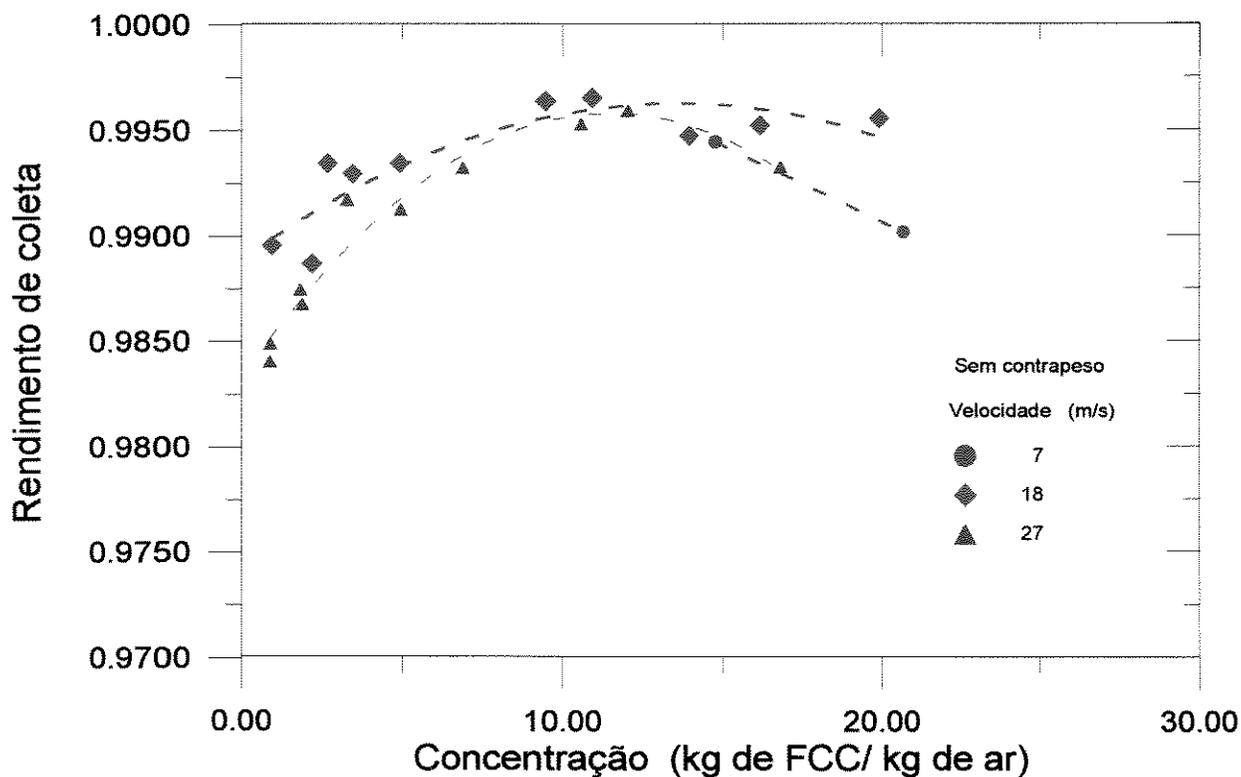


Fig. 3.4 Rendimento de coleta em função da concentração.

Nas faixas de velocidade de 18 e 27 m/s existe a tendência de aumento do rendimento de coleta com o aumento da concentração, até concentrações em torno de 12 kg de FCC/kg de ar. Acima dessa concentração, apesar do número restrito de dados experimentais, os resultados mostram a tendência de redução do rendimento de coleta com o aumento da concentração.

O aumento do rendimento de coleta com o aumento da concentração também foi observado por outros autores, citados no estado da arte, em concentrações menores que as

aqui estudadas, até $6,5 \text{ kg de sólidos/ kg de gás}$ [Stern, Caplan e Bush (1955), Zenz (1975), Tawari e Zenz (1984), Patterson e Munz (1989), Hoffman, Arends e Sie (1991), Hoffmann, van Santen e Clift (1992), Tardin Jr. e Goldstein Jr. (1994)]. O fenômeno foi atribuído ao efeito de varredura das partículas finas pelas partículas grosseiras, que as arrastariam para as paredes do ciclone dentro de seus interstícios. Outra possível explicação seria que a concentração favoreceria a formação de aglomerados que seriam mais facilmente coletados.

Na faixa de $1,4$ a $5,6 \text{ kg de sólidos/ kg de gás}$, e três testes realizados, Tuzla e Chen (1992) observaram uma diminuição do rendimento de coleta com o aumento da concentração, sendo a velocidade na entrada do ciclone de $3,6 \text{ m/s}$. No presente trabalho, a tendência de diminuição é observada apenas em concentrações acima de $12 \text{ kg de FCC / kg de ar}$.

Usualmente é esperado que o rendimento de coleta seja maior para velocidades maiores. O que é observado na Fig. 3.4, no entanto, é que nas concentrações estudadas, o rendimento de coleta foi maior na velocidade de 18 m/s do que na velocidade de 27 m/s . Fenômeno semelhante, no entanto, também foi observado por Hoffmann, Arends e Sie (1991), para velocidades de 10 , 15 e 20 m/s , embora em concentrações menores, até $0,04 \text{ kg de sólidos/ kg de gás}$. Eles observaram um aumento do rendimento de coleta com o aumento da concentração, sendo a melhora mais pronunciada para a menor das três velocidades utilizadas, o que ocasionou o cruzamento das curvas de rendimento de coleta. A concentração em que o cruzamento ocorreu dependeu da geometria dos ciclones utilizados, mas, para concentrações acima de $0,03 \text{ kg de sólidos/ kg de gás}$, o rendimento foi maior na velocidade de 10 m/s . O ponto de inversão descrito por Hoffmann et al. não pode ser notado no presente trabalho, pois as concentrações utilizadas são significativamente maiores que as deles. A inversão possivelmente teria ocorrido em concentrações menores, caso elas tivessem sido utilizadas.

À medida que aumenta a concentração, os rendimentos de coleta nas velocidades de 18 e 27 m/s se aproximam, tendendo a um ponto de máximo comum para concentrações em torno de $12 \text{ kg FCC/ kg de ar}$. Após esse máximo, os rendimentos passam a se diferenciar novamente, tornando-se menores para a maior velocidade. Apenas a tendência de diminuição do rendimento de coleta com o aumento da concentração foi observado na faixa de 7 m/s , devido à faixa de concentrações altas utilizadas nestes testes.

3.2.2 Rendimento de Coleta - Operação do Ciclone com a Válvula *Flap*

O rendimento de coleta em função da concentração na faixa de velocidades de 7 m/s para o ciclone operando com e sem a válvula *flap*, é apresentado na Fig. 3.5. Foram realizados poucos testes nessa velocidade, devido às dificuldades experimentais descritas no capítulo 2. Os resultados não são diretamente comparáveis e devem ser analisados com cautela, pois no segundo caso houve uma corrente reversa ascendente de ar através da perna do ciclone. Embora os resultados não sejam conclusivos, a utilização da válvula *flap*, causou, em geral, a elevação do rendimento de coleta, menor com o aumento da concentração de sólidos.

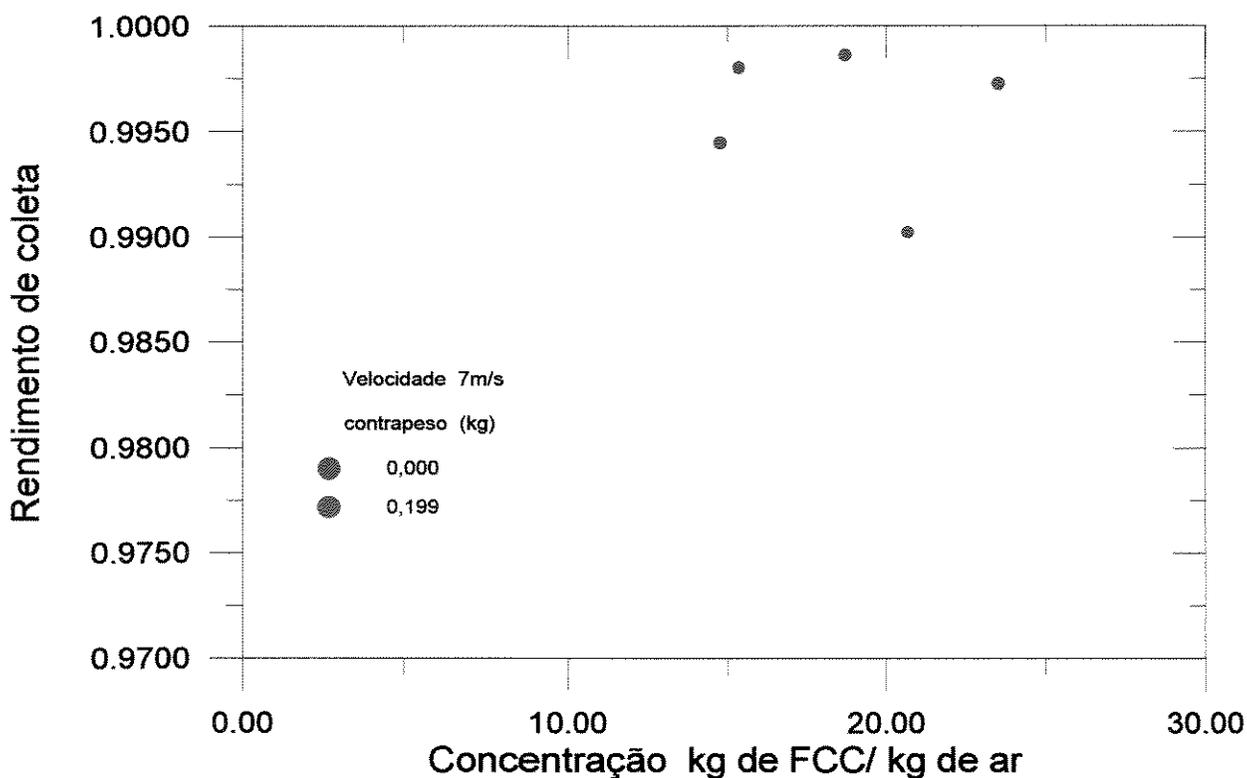


Fig. 3.5 Efeito do contrapeso e da concentração sobre o rendimento de coleta. $V = 7\text{ m/s}$.

Diferentes contrapesos - de $0,150$ a $0,402\text{ kg}$ - atuando sobre a válvula *flap*, foram empregados nos testes realizados na faixa de velocidades de 18 m/s , como pode ser visto na

Fig. 3.6. Em média, os rendimentos obtidos com o contrapeso de 0,199 kg são os maiores até concentrações de 11 kg de FCC/ kg de ar. Acima desta concentração existe a tendência do rendimento obtido com 0,282 kg de contrapeso ser mais alto. Na faixa de concentrações em que o contrapeso de 0,336 kg foi utilizado, o rendimento de coleta é menor que o obtido com os demais contrapesos. Isso indica, apesar da relativa dispersão dos dados, que deve existir um contrapeso ótimo para cada condição de concentração. Observa-se, também, conforme o contrapeso, que, nesta velocidade, o emprego da válvula *flap* pode, ou melhor, parece, causar rendimentos inferiores ao caso em que não é utilizada.

A variação do rendimento com a concentração é do tipo verificado para operação sem a válvula.

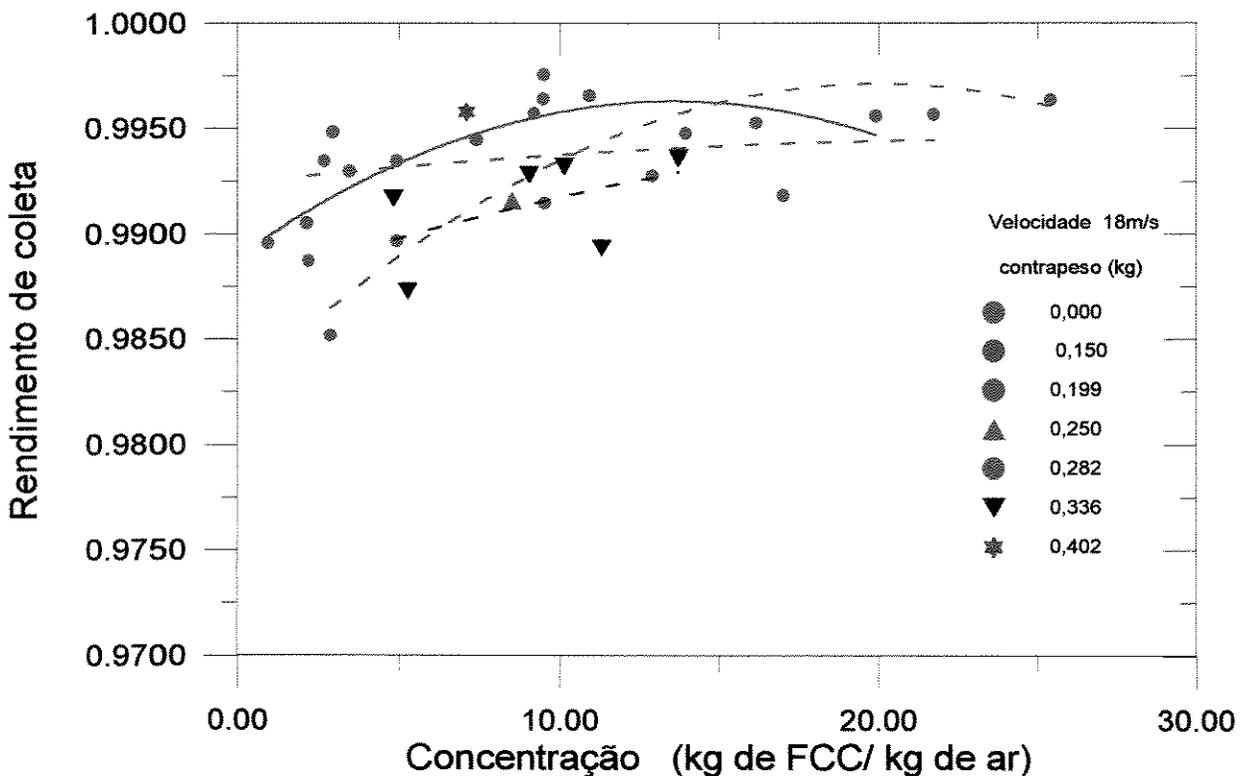


Fig. 3.6 Efeito do contrapeso e da concentração sobre o rendimento de coleta. $V = 18 \text{ m/s}$.

O mesmo comentário vale para o rendimento de coleta dos testes realizados com vários contrapesos na faixa de 27 m/s, e apresentado na Fig. 3.7. Os maiores rendimentos foram obtidos com o contrapeso de 0,282 kg e os menores com o contrapeso de 0,199 kg. Os demais contrapesos ocasionaram rendimentos intermediários.

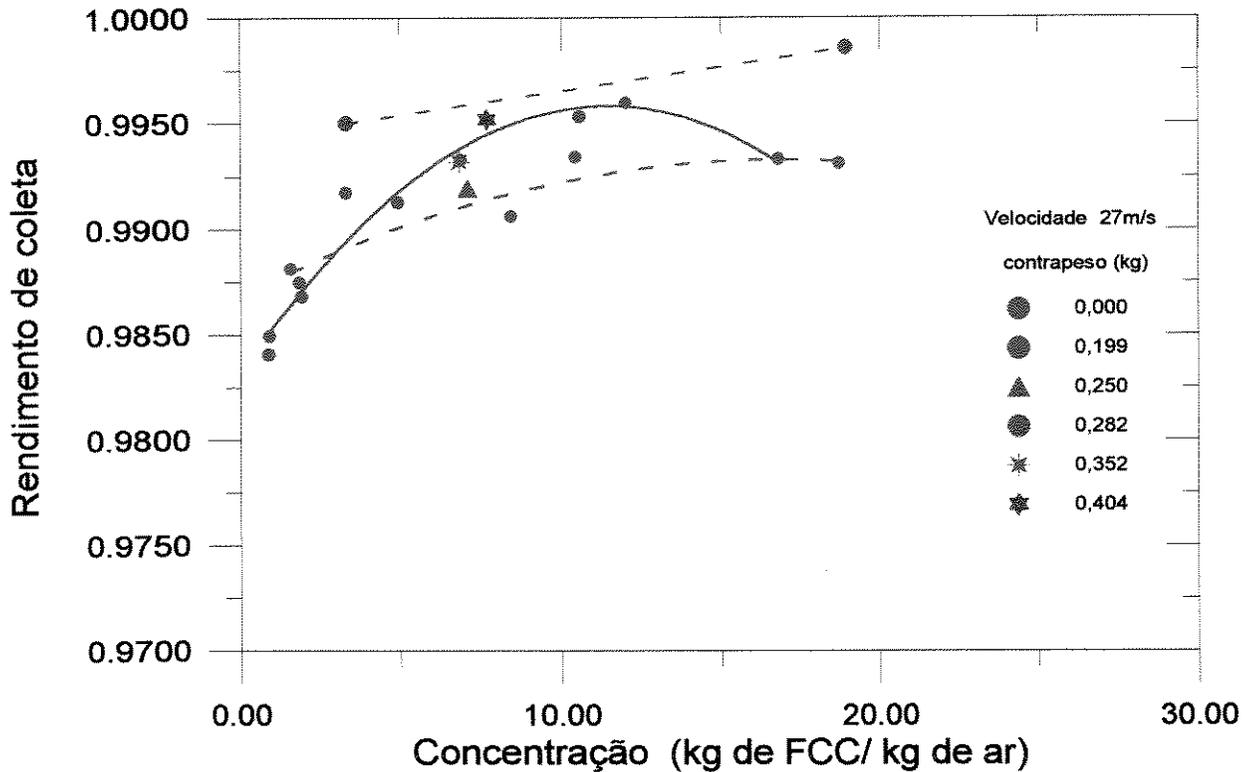


Fig. 3.7 Efeito do contrapeso e da concentração sobre o rendimento de coleta. $V = 27 \text{ m/s}$.

Nas Figs. 3.8 e 3.9 buscou-se analisar o efeito que diferentes velocidades tem sobre o rendimento de coleta, para um dado contrapeso.

Como pode ser visto na Fig. 3.8, referente ao contrapeso de 0,199 kg, quanto maior a velocidade, menor o rendimento de coleta em todas as concentrações testadas. A Figura 3.9, por sua vez, indica uma tendência inversa com a utilização do contrapeso de 0,282 kg, ou seja, quanto maior a velocidade, maior o rendimento de coleta. É possível inferir que, da mesma forma que no caso da concentração, pode ter ocorrido uma inversão do efeito da velocidade sobre o rendimento de coleta com a variação do contrapeso.

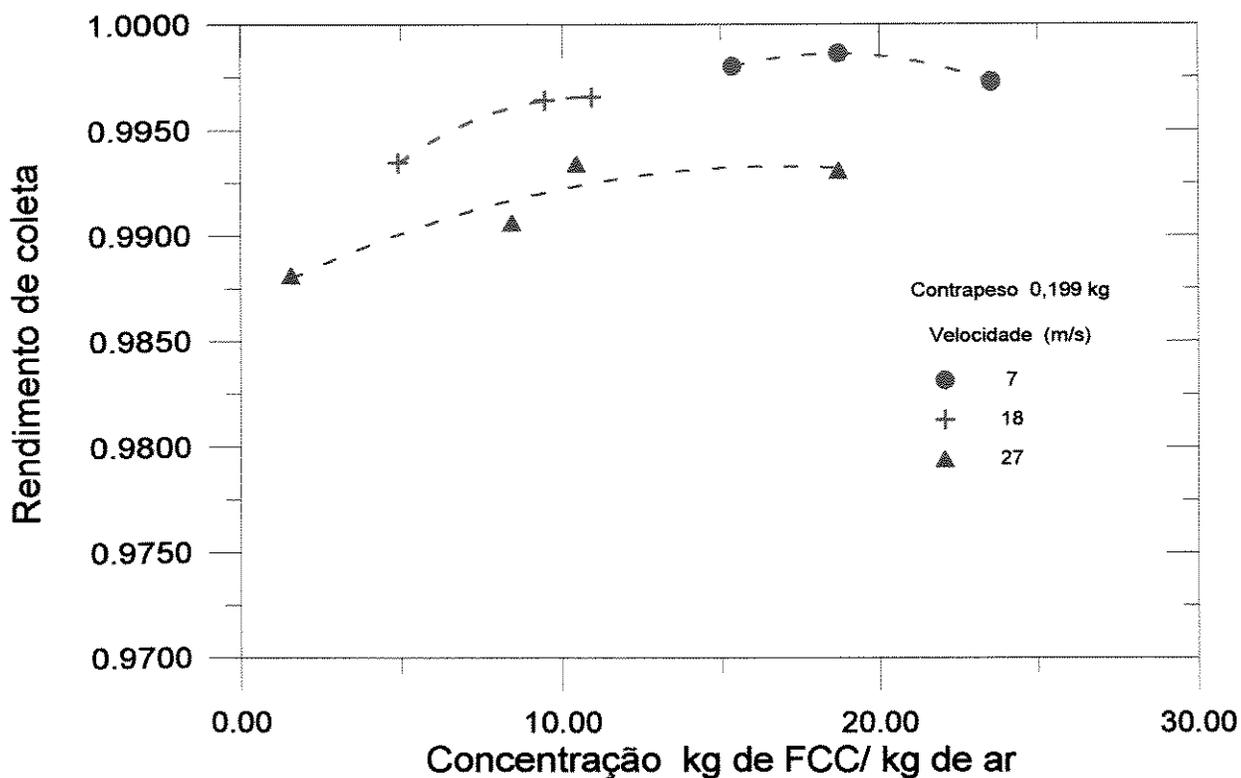


Fig. 3.8 Efeito da velocidade e da concentração - Contrapeso de 0,199 kg.

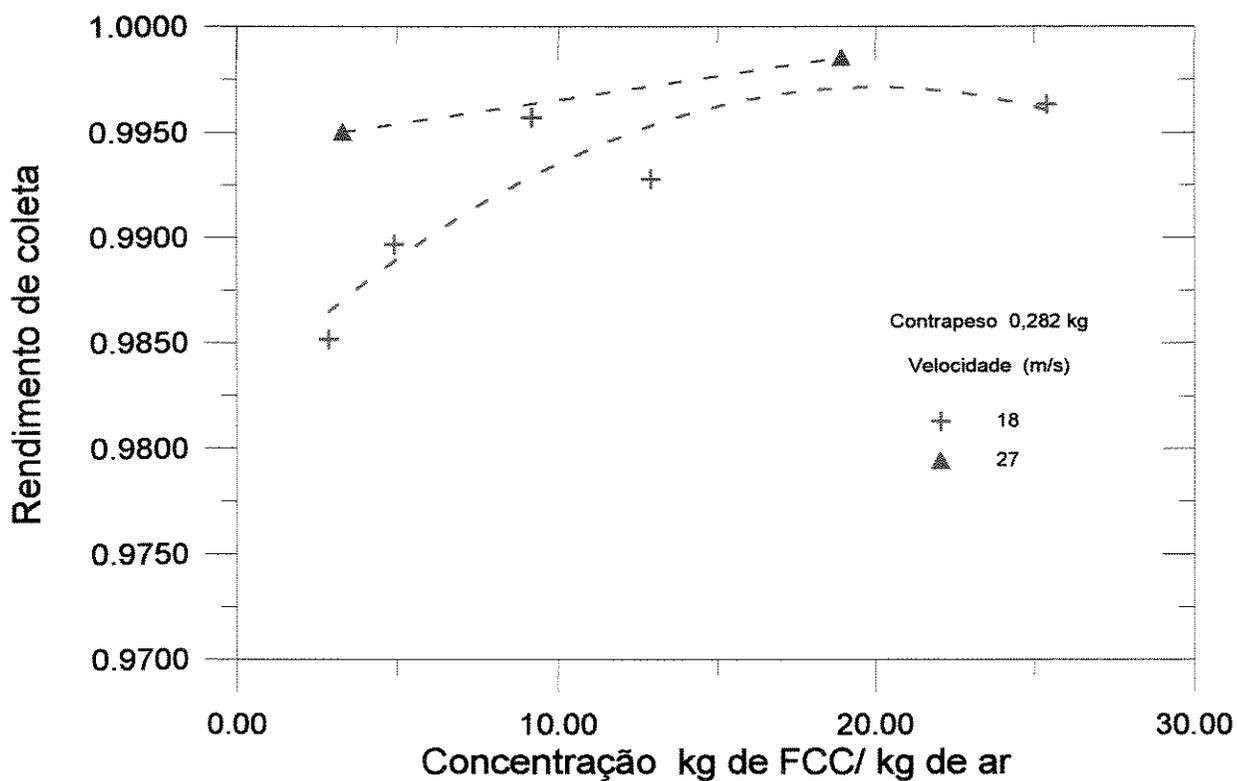


Fig. 3.9 Efeito da velocidade e da concentração - Contrapeso de 0,282 kg.

3.2.3 Previsão do Rendimento de Coleta

O trabalho de Zenz (1975) é a referência para estimar o rendimento de coleta de ciclones operando em concentrações até 1,868 *kg de sólidos/ kg de gás*. O presente trabalho estende a informação disponível abrangendo faixa de concentrações maiores, até 25 *kg de sólidos/ kg de gás*. Para avaliar a aplicação da metodologia proposta por Zenz com os resultados obtidos neste trabalho, ela foi utilizada para a estimativa do rendimento de coleta, para as condições experimentais e o ciclone utilizados nos testes. A metodologia é detalhada no apêndice C.

O procedimento proposto requer inicialmente o cálculo do número de voltas espirais N_s percorridas em média pelo gás no interior do ciclone, a partir da equação seguinte:

$$N_s = V(0,1079 - 0,00077V + 1,924 \times 10^{-6}V^2) \quad (3.4)$$

e, em seguida, do diâmetro de corte teórico d_c , isto é, do diâmetro da partícula que supostamente é coletado com rendimento de 50% , utilizando a expressão:

$$d_c = \sqrt{\frac{9\mu L}{\pi N_s V (\rho_p - \rho)}} \quad (3.5)$$

para cada faixa de velocidade.

O resultado dos cálculos encontra-se na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Número de espirais e diâmetro de corte teórico

V (m/s)	N_s	d_c (μm)
7	2,1	7,47
18	4,08	3,34
27	4,85	2,50

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

A Tabela 3.5 apresenta estes rendimentos de coleta calculados para cada faixa granulométrica, obtidos a partir da Fig. C.1, que traz o rendimento de coleta em função do diâmetro médio de cada faixa, d , dividido pelo diâmetro de corte. A fração coletada de cada tamanho de partícula, dada pelo produto do rendimento de coleta da faixa pela sua fração mássica e , finalmente, o rendimento de coleta global η_o para baixas concentrações, obtido pela somatória das frações coletadas em cada faixa também são apresentados nessa tabela. Os valores da Tabela 3.5 são referentes à faixa de velocidade de 7 m/s.

Tabela 3.5 Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações - $V = 7$ m/s.

Fração Mássica	d (μm)	d/d_c	Rendimento de Coleta	Fração Coletada
0,02	4,25	0,57	0,2800	0,0056
0,03	13,75	1,84	0,7000	0,0210
0,05	22,50	3,01	0,8100	0,0405
0,10	30,00	4,02	0,8600	0,0860
0,10	37,25	4,99	0,9000	0,0900
0,10	42,75	5,73	0,9200	0,0920
0,10	46,60	6,23	0,9400	0,0940
0,10	52,00	6,97	0,9510	0,0951
0,10	60,00	8,04	0,9710	0,0971
0,10	68,25	9,14	0,9880	0,0988
0,10	81,25	10,88	1,0000	0,1000
0,05	98,00	13,13	1,0000	0,0500
0,03	125,50	16,81	1,0000	0,0300
0,02	370,00	49,56	1,0000	0,0200
			$\eta_o \rightarrow$	0,9201

O mesmo procedimento foi aplicado às faixas de 18 e 27 m/s, resultando η_o igual a 0,9837 e 0,9903, respectivamente, como pode ser visto nas Tabelas 3.6 e 3.7.

Tabela 3.6 Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações - $V = 18$ m/s.

Fração Mássica	d (μm)	d/d_c	Rendimento de Coleta	Fração Coletada
0,02	4,25	1,27	0,5800	0,0116
0,03	13,75	4,12	0,8700	0,0261
0,05	22,50	6,74	0,9450	0,0473
0,10	30,00	8,98	0,9870	0,0987
0,10	37,25	11,15	1,0000	0,1000
0,10	42,75	12,80	1,0000	0,1000
0,10	46,60	13,92	1,0000	0,1000
0,10	52,00	15,57	1,0000	0,1000
0,10	60,00	17,96	1,0000	0,1000
0,10	68,25	20,43	1,0000	0,1000
0,10	81,25	24,33	1,0000	0,1000
0,05	98,00	29,34	1,0000	0,0500
0,03	125,50	37,57	1,0000	0,0300
0,02	370,00	110,78	1,0000	0,0200
			$\eta_o \rightarrow$	0,9837

Tabela 3.7 Cálculo do rendimento de coleta em baixas concentrações - $V = 27$ m/s.

Fração Mássica	d (μm)	d/d_c	Rendimento de Coleta	Fração Coletada
0,02	4,25	1,70	0,6800	0,0136
0,03	13,75	5,50	0,9111	0,0273
0,05	22,50	9,00	0,9870	0,0494
0,10	30,00	12,00	1,0000	0,1000
0,10	37,25	14,89	1,0000	0,1000
0,10	42,75	17,09	1,0000	0,1000
0,10	46,60	18,59	1,0000	0,1000
0,10	52,00	20,79	1,0000	0,1000
0,10	60,00	23,99	1,0000	0,1000
0,10	68,25	27,29	1,0000	0,1000
0,10	81,25	32,48	1,0000	0,1000
0,05	98,00	39,18	1,0000	0,0500
0,03	125,50	50,17	1,0000	0,0300
0,02	370,00	147,92	1,0000	0,0200
			$\eta_o \rightarrow$	0,9903

Os valores de η_0 foram utilizados para obter os valores de η , o rendimento global na concentração desejada, a partir da Fig. C.2, que traz as curvas de rendimento de coleta em função da concentração, tendo η_0 como parâmetro, válidas para concentrações variando de $1,868 \times 10^{-3}$ a $1,868 \text{ kg de FCC/ kg de ar}$. Esses rendimentos foram plotados juntamente com os dados experimentais do ciclone testado, operando sem a válvula *flap*, na Fig. 3.10, onde se adotou as mesmas escalas adotadas por Zenz, que dão maior destaque para a faixa de concentrações por ele analisada, e na Fig. 3.11, cujas escalas privilegiam a faixa de concentrações maiores, objeto do presente trabalho.

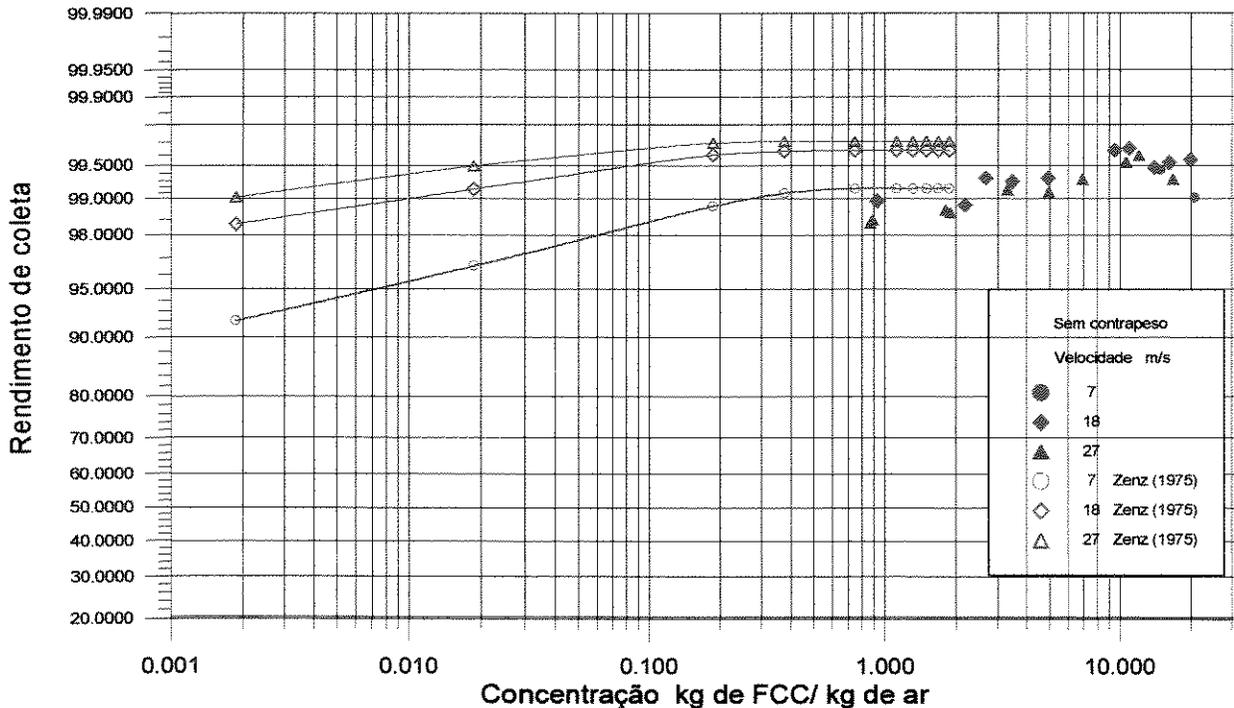


Fig. 3.10 Rendimento de coleta do ciclone e estimativa de Zenz (1975).

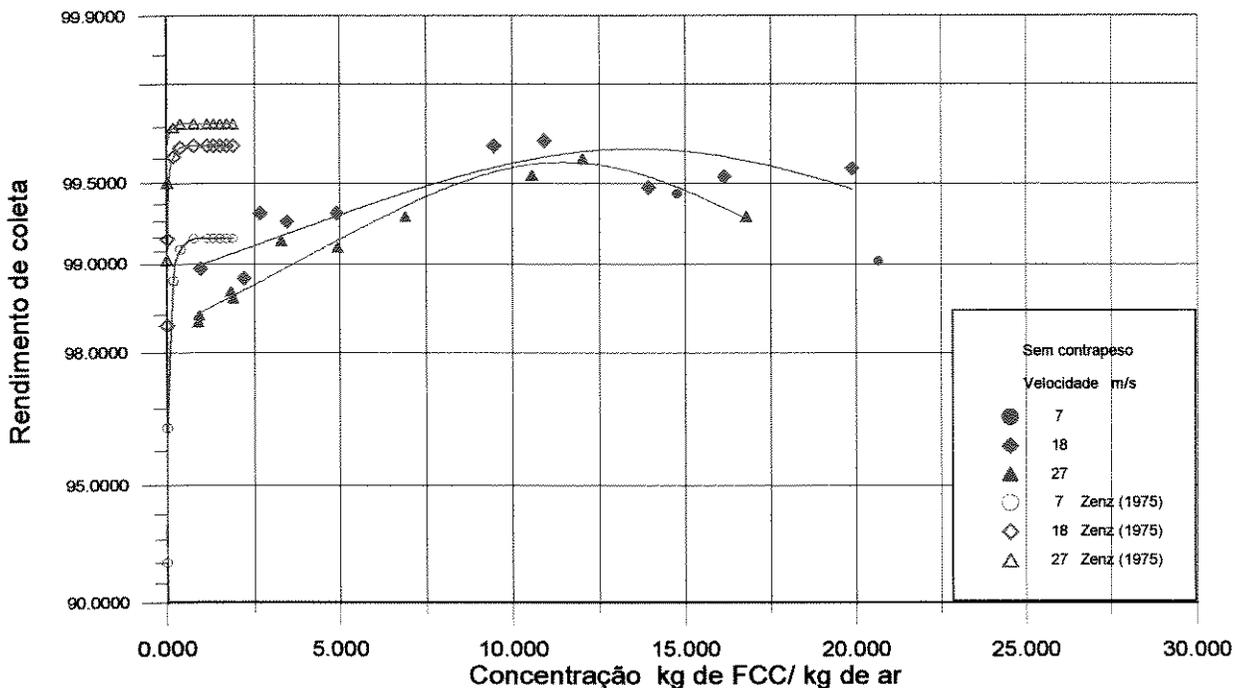


Fig. 3.11 Rendimento de coleta do ciclone e estimativa de Zenz (1975).

Nas Figuras 3.10 e 3.11 pode ser observada uma diferença nos níveis de rendimento de coleta comparados, sendo que os valores experimentais obtidos, na faixa onde há coincidência de concentração, são mais baixos que os valores previstos pela metodologia de Zenz.

Os valores experimentais indicam um aumento do rendimento de coleta com a concentração, ao invés do nivelamento inferido pelas curvas de Zenz. Há um ponto de máximo nas curvas de rendimento de coleta, após o que o rendimento passa a diminuir. Esta diminuição estaria ocorrendo, se acredita, pelo fato de que o crescimento da concentração estaria levando o ciclone para o sufocamento, onde haveria uma queda do rendimento de coleta.

No ponto de máximo rendimento, os dados parecem indicar que o efeito da velocidade deixa de existir.

A ocorrência, em geral, de maiores rendimentos de coleta em velocidades de entrada menores caracteriza uma inversão do efeito esperado da velocidade, que deve ter ocorrido em

concentrações abaixo das estudadas. O trabalho de Zenz não contempla essa inversão, mas ela é referenciada por Hoffmann, Arends e Sie (1992).

Encontra-se, ainda, na literatura, o trabalho de Stern, Caplan e Bush (1955), onde uma equação do tipo:

$$\frac{1 - \eta_{ref}}{1 - \eta} = \left(\frac{c}{c_{ref}} \right)^\gamma \quad (3.6)$$

mostrou-se adequada para ajustar os rendimentos de coleta na faixa de $1,868 \times 10^{-3}$ a $0,1868 \text{ kg de sólidos/ kg de gás}$. O expoente $\gamma = 0,2$ foi indicado como uma média dos expoentes de conjuntos de dados obtidos de diferentes fontes. No presente trabalho, tentou-se o ajuste das curvas de rendimento de coleta para cada faixa de velocidade, utilizando a Eq.(3.6) e diferentes valores de γ . As concentrações e rendimentos de referência necessários para utilizar a Eq.(3.6) foram arbitradas como o valor dos resultados experimentais que coincidiu com a curva do ajuste polinomial que melhor representou os resultados, conforme a Tabela 3.8.

Tabela 3.8 Concentração e rendimento de referência para a Eq.(3.6).

V (m/s)	c_{ref} (kg de FCC/ kg de ar)	η_{ref}
7	14,76	0,9945
18	4,91	0,9935
27	12,01	0,9960

Não houve variações significativas nas curvas com a utilização de $\gamma = 0,1$ a $\gamma = 0,3$. Os ajustes realizados com $\gamma = 0,2$ são apresentados na Fig. 3.12.

Deve ser observado que esse tipo de ajuste indica variações significativas de rendimento de coleta apenas quando há variações de ordem de grandeza das concentrações,

e.g. de 1 para 10, e não contempla a tendência de diminuição do rendimento de coleta acima de uma dada concentração, que foi observada no presente trabalho.

O rendimento global de coleta foi também estimado pela correlação apresentada por Clift, Ghadiri e Hoffman (1991), expressa por:

$$\eta = 1 - \exp\left[\frac{-\rho_p}{9\mu} \left(\frac{dV}{D/2}\right)^2 \frac{Vol}{Q}\right] \quad (3.7)$$

A Eq. (3.7) foi aplicada aos diâmetros de partícula apresentados na Tabela 3.5, resultando no rendimento de coleta de cada diâmetro. Multiplicando os rendimentos pela fração mássica de cada faixa granulométrica e somando os resultados, obteve-se o rendimento global de coleta de cada faixa de velocidade, representados na Fig. 3.12. Uma vez que esse tipo de modelo não considera a variação do rendimento com a concentração, ele resulta em um rendimento de coleta constante, independente da concentração.

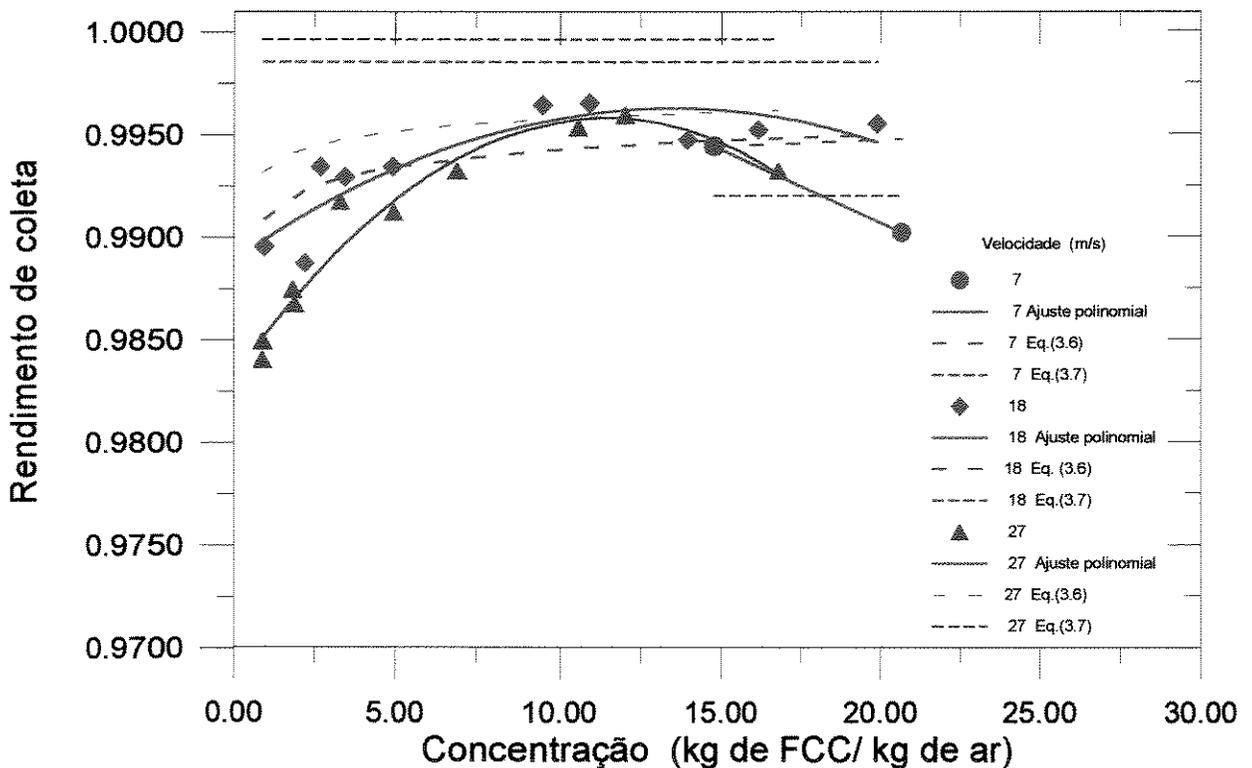


Fig. 3.12 Previsão de rendimento de coleta.

Os métodos de previsão disponíveis não se mostraram adequados para estimar o rendimento de coleta nas altas concentrações utilizadas no presente trabalho. Atualmente, a maneira mais apropriada para sua determinação é ainda através de procedimentos experimentais.

Capítulo 4

Conclusões e Recomendações

Neste trabalho, foi estudado o efeito da concentração de sólidos na perda de pressão e no rendimento de coleta de ciclones. O diâmetro do ciclone utilizado foi de 0,154 m. Foram utilizadas partículas de FCC, um catalisador do processo de craqueamento do petróleo, e velocidades de entrada do gás de 5 a 28 m/s. A concentração de sólidos chegou até 20 kg de FCC/kg de ar, valor bastante superior aos descritos pela literatura disponível. Foi também analisado o efeito da utilização de uma válvula *flap* na perna do ciclone.

O sistema experimental mostrou-se adequado para a obtenção das altas concentrações de sólidos na entrada do ciclone, possibilitando a avaliação de seu desempenho nessas condições.

As seguintes conclusões podem ser inferidas dos resultados apresentados:

Perda de Pressão

- A perda de pressão para o escoamento de ar sem partículas aumentou de forma aproximadamente parabólica com o aumento da velocidade do ar na entrada do ciclone;
- Da mesma forma que no caso do escoamento sem partículas, foi observado que, quanto maior a velocidade, maior é a perda de pressão, independente da concentração de sólidos;
- A introdução de partículas no escoamento causou a redução da perda de pressão do ciclone em relação ao escoamento sem partículas, em toda a faixa de concentração estudada. Foi observada uma variação pequena dos valores da perda de pressão com a concentração, podendo ser admitido que ela praticamente não varia com a concentração para as três faixas de velocidade estudadas. Os resultados sugerem que a perda de pressão pode ser estimada,

como uma primeira aproximação, como cerca de 47 por cento do valor calculado para o escoamento sem partículas;

Rendimento de Coleta

- Nas faixas de velocidades de 18 e 27 *m/s*, existe a tendência de aumento do rendimento de coleta, até concentrações em torno de 12 *kg de FCC/ kg de ar*. Acima dessa concentração, os resultados mostram a tendência de redução do rendimento de coleta com o aumento da concentração. Nas concentrações estudadas, o rendimento de coleta foi maior na velocidade de 18 *m/s* do que na velocidade de 27 *m/s*;
- Ao que tudo indica, há um contrapeso ótimo, a ser utilizado na válvula *flap*, para cada condição de concentração, e
- Os métodos de previsão de rendimento disponíveis atualmente não foram desenvolvidos para abranger as altas concentrações estudadas neste trabalho, e não se mostraram adequados para estimar o rendimento de coleta.

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

- Utilização de concentrações ainda mais altas que as estudadas neste trabalho, para verificar o sufocamento do ciclone e avaliar seu desempenho próximo a essa condição;
- Estudo do efeito de altas concentrações, empregando partículas sólidas de outros materiais e outras distribuições granulométricas;
- Estudo da quebra de partículas em ciclones e sua relação com rendimento de coleta e perda de pressão;
- Estudo dos regimes de escoamento no interior do ciclone;

- Acoplamento de outros tipos de válvula na perna do ciclone, e
- Desenvolvimento de métodos para estimar o rendimento de coleta em altas concentrações.

Referências

- Baskakov, A. P., Dolgov, V. N., e Goldobin, Y. M., 1990, "Aerodynamics and Heat Transfer in Cyclones with Particle-Laden Gas Flow", *Experimental Thermal and Fluid Science*, No. 3, pp. 597-602.
- Beeckmans, J. M., e Morin, B., 1987, "The Effect of Particulate Solids on Pressure Drop Across a Cyclone", *Powder Technology*, Vol.52, pp. 227-232.
- Benedict, R.P., 1984, *Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements*, John Wiley & Sons, New York, 532 p.
- Clift, R., Ghadiri, M., e Hoffmann, A.C., 1991, "A Critique of two Models for Cyclone Performance", *AIChE Journal*, Vol. 37, No. 2, February, pp.285-289.
- Coker, A. K., 1993, "Understand Cyclone Design", *Chemical Engineering Progress*, December, pp. 51-55.
- Comas, M., Comas, J., e Chetrit, C., Casal, J. , 1991, "Cyclone Pressure Drop With and Without an Inlet Vane", *Powder Technology*, 66, pp. 143-148.
- Dietz, P.W., 1981, "Collection Efficiency of Cyclones Separators", *AIChE Journal*, Vol. 27, No. 6, pp. 888-892.
- Dirgo, J., e Leith, D., 1985, "Performance of Theoretically Optimised Cyclones", *Filtration & Separation*, March/April, pp. 119-125.
- Hoffmann, A. C., Arends, H., e Sie, H., 1991, "An Experimental Investigation Elucidating the Nature of the Effect of Solids Loading on Cyclone Performance", *Filtration & Separation*, May/June, pp.188-193.

- Hoffmann, A.C., van Santen, A., Allen, W.K., e Clift, R., 1992, "Effects of Geometry and Solid Loading on the Performance of Gas Cyclones", *Powder Technology*, 70, pp. 83-91.
- Holman, J. P., 1994, *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill, New York, 616p.
- Kang, S. K., Kwon, T. W., e Kin, S. D., 1989, "Hydrodynamic Characteristics of Cyclones Reactors", *Powder Technology*, Vol. 58, pp. 211-220.
- Kiegel, E., 1968, *Aufbereitungs Technik*, Vol.9, pp. 1, citado por Yuu et al.(1978).
- Lapple, C.E., 1951, "Processes Use Many Collector Types", *Chemical Engineering*, May, pp. 144-151.
- Leith, D., 1984, Cyclones, Capítulo 16 do Handbook of Powder Science and Technology, Editores: Fayed, M.E., e Otten, L., Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Leith, D., e Licht, W., 1972, "The Collection Efficiency of Cyclone Type Particle Collectors - A New Theoretical Approach", *AIChE Symp. Ser.*, No. 126, pp. 196-206.
- Littlejohn, R. F., e Smith, R., 1978, "Sampling Gasborne Solids: Some Factors Affecting the Characteristics of Miniature Cyclones", *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, Vol. 192, September, pp. 243-250.
- Mori, Y., Suganuma, A. e Tanaka, S., 1968, "On Collection Efficiency of Gas Cyclone in Coarse Particle Range", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol.1, No.1, pp. 82-86.
- Pagliuso, J.D., 1987, "Comportamento Fluidodinâmico de Xisto Britado e Areia de Quartzzo em Leito Fluidizado Rápido", Dissertação de Mestrado, EESC/USP.
- Patterson, P. A. e Munz, R. J., 1989, "Cyclone Collection Efficiencies at Very High Temperatures", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol.67, April, pp. 321-328.

- Scheid, C. M. e Massarani, G., 1992, "Influência da Concentração de Sólidos e de Sangrias no Desempenho de Ciclones a Gás", XX Encontro Nacional Sobre Meios Porosos(ENEMP),20-22 de outubro, UFSCar, 10p.
- Shepherd,C.B. e Lapple,C.E.,1939,"Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors", *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.31, No.8, pp.972-984.
- Shepherd, C.B., e Lapple, C.E., 1940, "Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors - Cyclone without Inlet Vane", *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 32, No. 9, pp. 1246-1248.
- Silva, M. A., Godoy, A. L., e Nebra, S. A., 1989, "Estudo Experimental da Variação do Campo de Velocidades do Fluido no Ciclone com a Concentração de Sólidos", Anais do X Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro,R.J., dezembro, pp. 351-354.
- Souza, D. C. R., Mori, M., e Vieira, V. N., 1995, "Software Aplicativo para Simulação de Ciclones Através de Métodos Empíricos ou Semi-Empíricos", *Revista Brasileira de Engenharia Química*, Novembro, pp. 27-34.
- Stairmand, C. J., 1951, "The Design and Performance of Cyclone Separators", *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, Vol. 29, pp. 356-373.
- Stern, A. C., Caplan, K. J., e Bush, P. D., 1955, *Cyclone Dust Collectors*, American Petroleum Institute, New York, N.Y., 67 p.
- Tardin Jr., P. R. e Goldstein Jr., L., 1994, "Considerações sobre o Desempenho de um Ciclone Operando em um Leito Fluidizado Circulante a Frio". Anais do III Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste-Belém-PA, Brasil, Junho, pp.179-183.
- Tawari, T. D. e Zenz, F. A., 1984, "Evaluating Cyclone Efficiencies from Stream Compositions", *Chemical Engineering*, April 30, pp. 69-73.

- ter Linden, A. J., 1949, " Investigations into Cyclone Dust Collectors", *Inst. of Mech. Eng. J.*, Vol.150, pp.233-251.
- Tuzla, K. e Chen, J., 1992, "Performance of a Cyclone under High Solid Loading", *AIChE Symposium Series*, Vol.88, No.289, pp. 130-136.
- Yuu, S., Jotaki, T., Tomita, Y. e Yoshida, K., 1978, "The Reduction of Pressure Drop Due to Dust Loading in a Conventional Cyclone", *Chemical Engineering Science*, Vol.33, pp. 1573-1580.
- Zenz, F. A., 1975, *Manual on Disposal of Refinery Wastes: Volume on Atmospheric Emissions*, API Publication 931.

Apêndice A

Distribuição Granulométrica

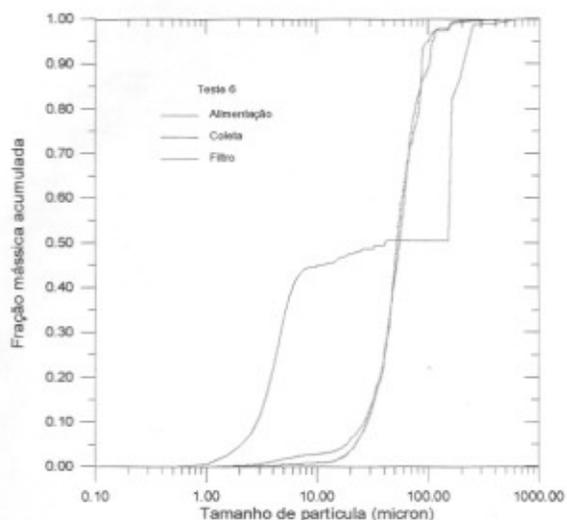
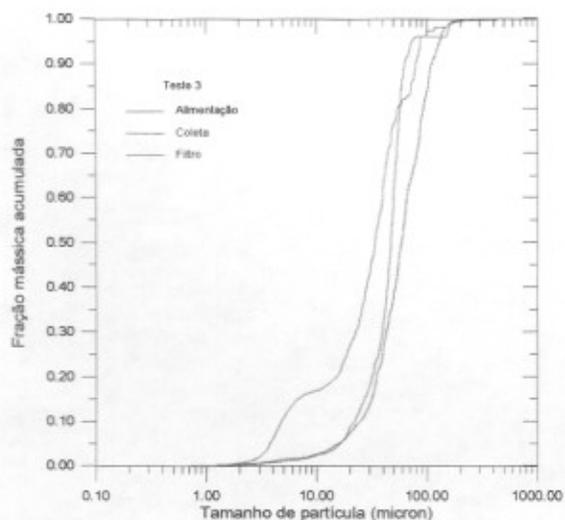
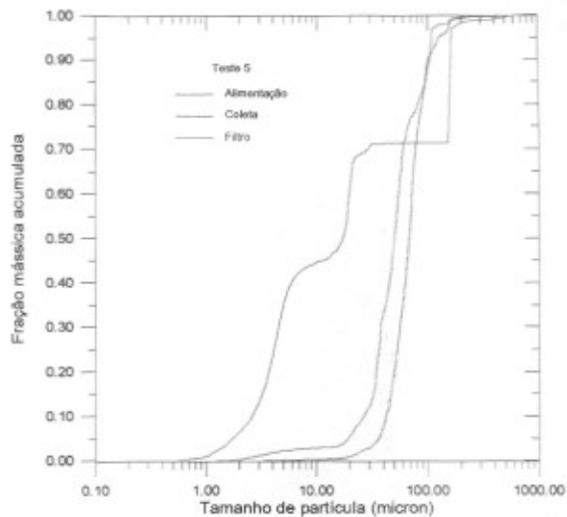
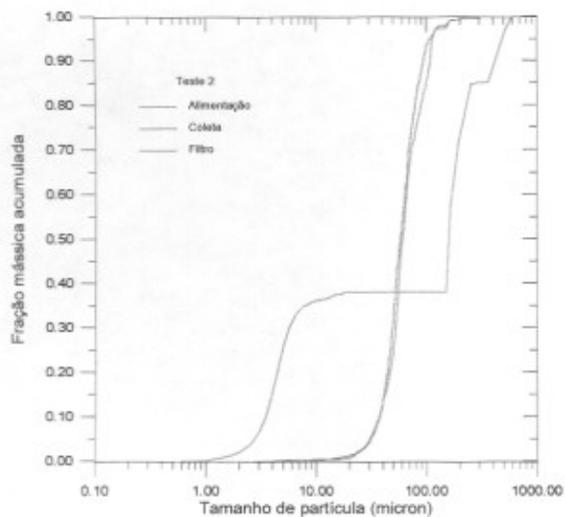
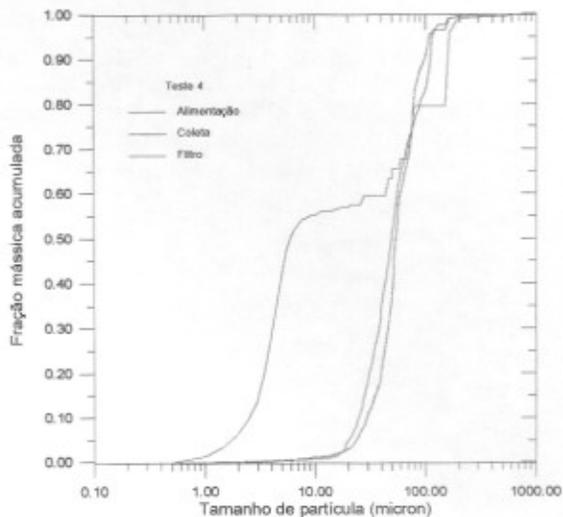
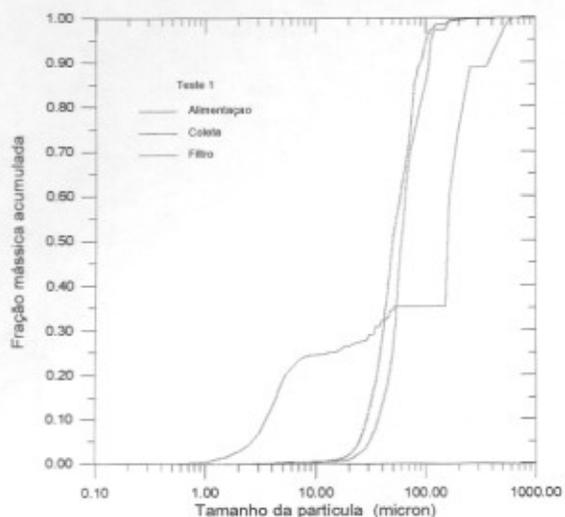
A distribuição granulométrica de cada amostra foi feita pelo peneiramento em um conjunto de peneiras, montado sobre um vibrador da Produtest. A granulometria da parte das amostras que passava pela menor peneira foi determinada em um sistema analisador de tamanho de partículas a laser.

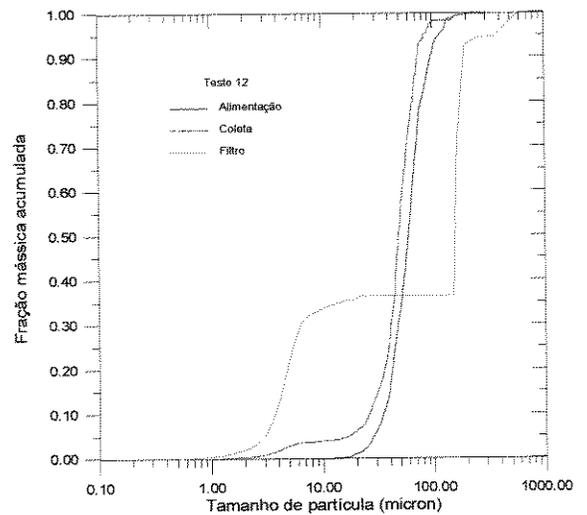
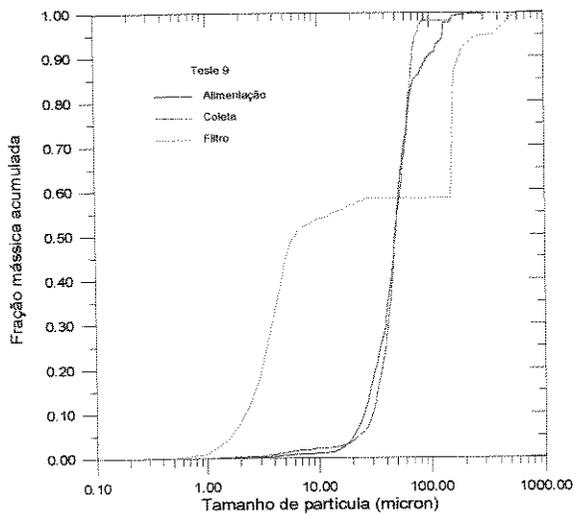
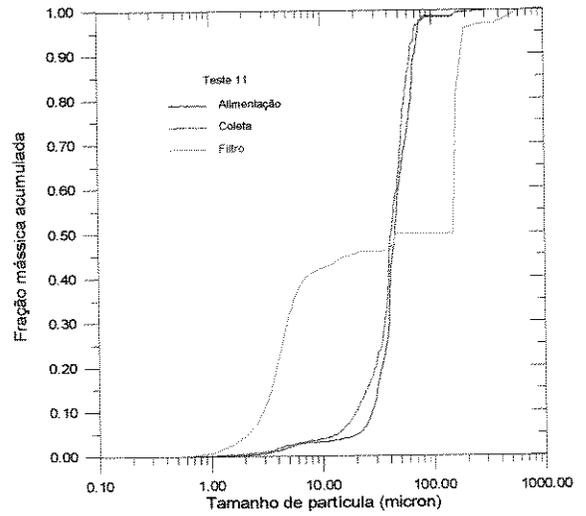
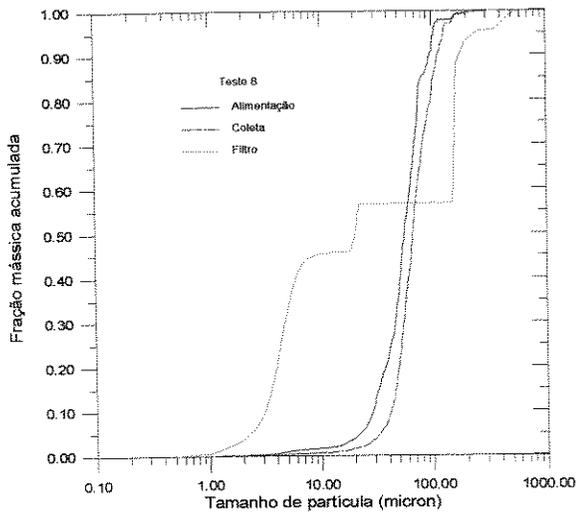
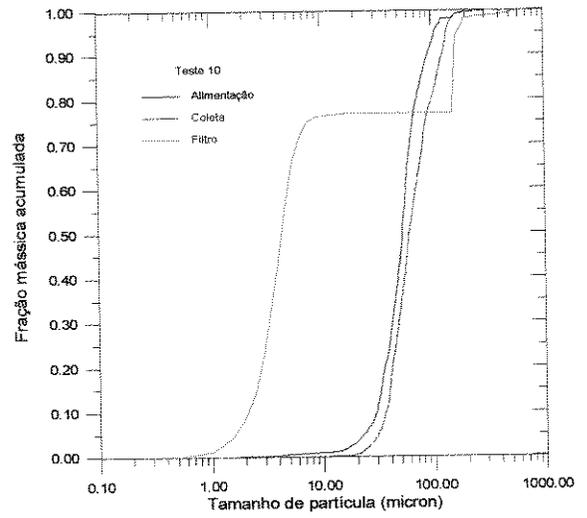
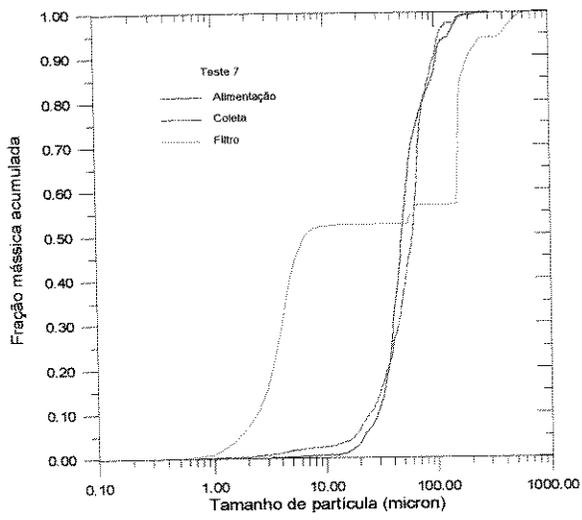
As peneiras utilizadas tinham aberturas de 590, 420, 297, 210, 177 e 149 μm . Foi estabelecido um tempo padrão de 5 minutos para o peneiramento de amostras de 100 g de FCC, pois foi observado que a distribuição granulométrica não se alterava após esse intervalo de tempo. As massas retidas em cada peneira foram medidas com uma balança eletrônica da Ohaus, modelo GA 200, com capacidade de 200 g e precisão de $\pm 0,0001$ g. As partículas que passavam pela menor peneira foram conduzidas para o analisador a laser.

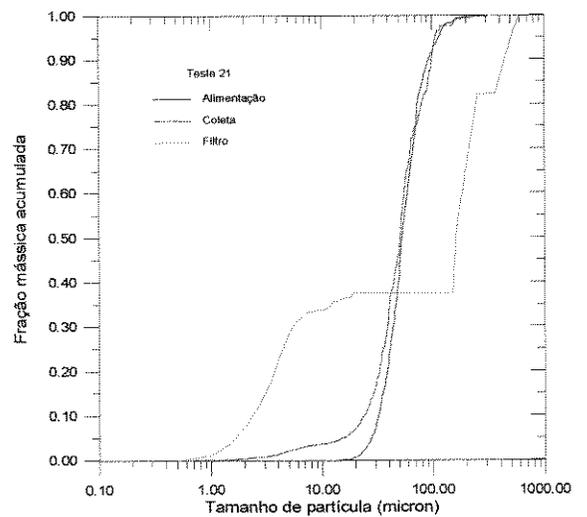
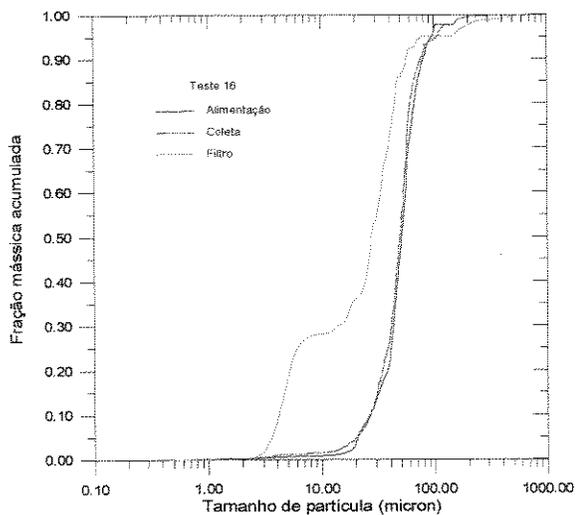
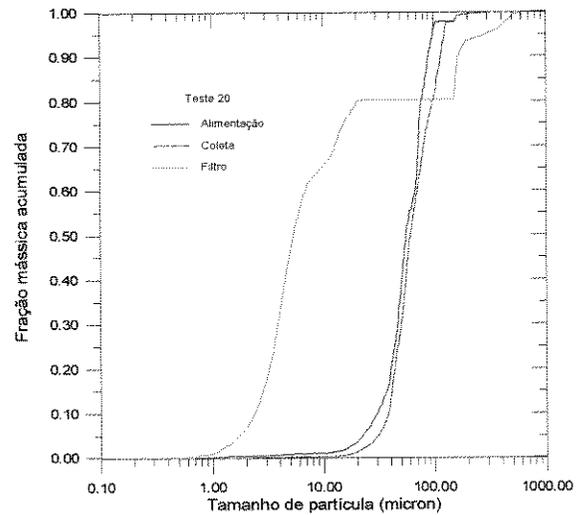
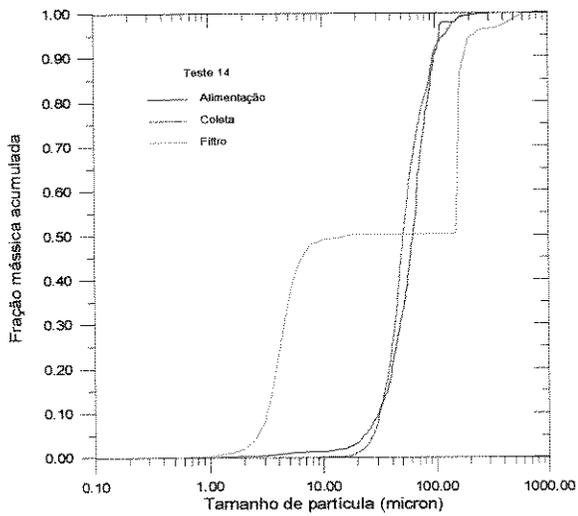
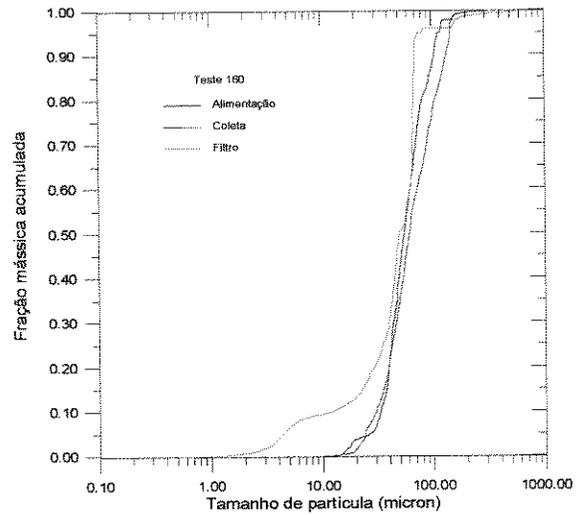
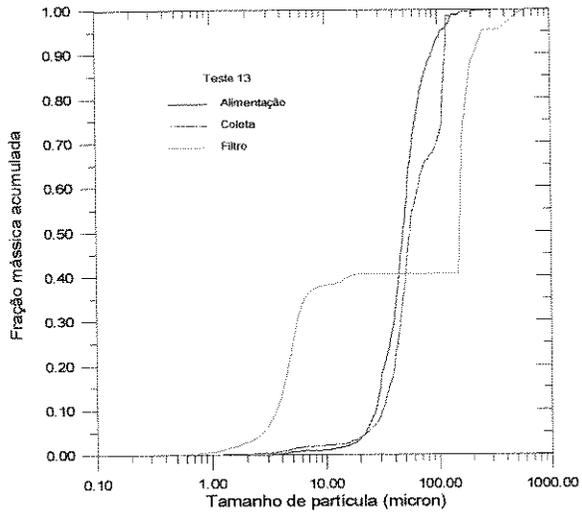
O analisador a laser utilizado foi o sistema Galai CIS-1, produzido pela Galai Production Ltd., que emprega a teoria de tempo de transição, segundo a qual, o tempo que um feixe de laser, movendo-se em uma velocidade constante, leva para interagir com uma partícula produzindo uma sombra em um detetor é diretamente proporcional ao diâmetro da partícula. As interações entre o feixe de raio laser e as partículas podem então ser processadas para determinar o diâmetro dessas.

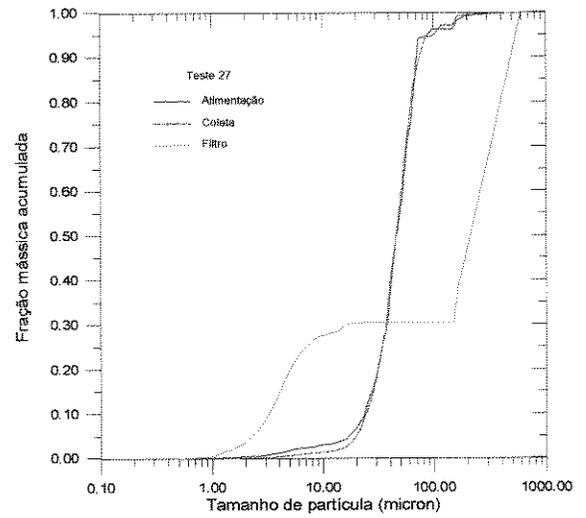
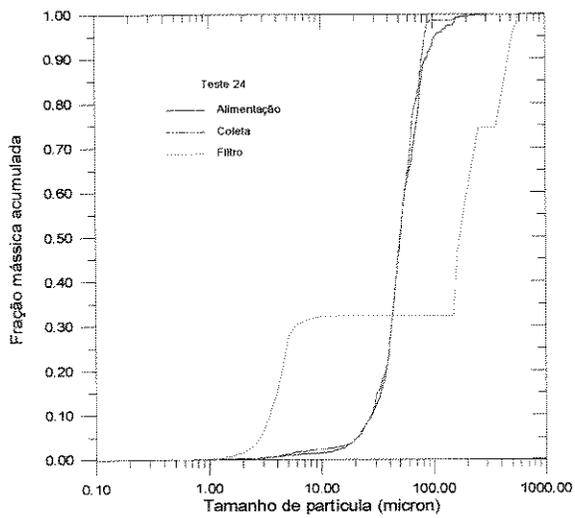
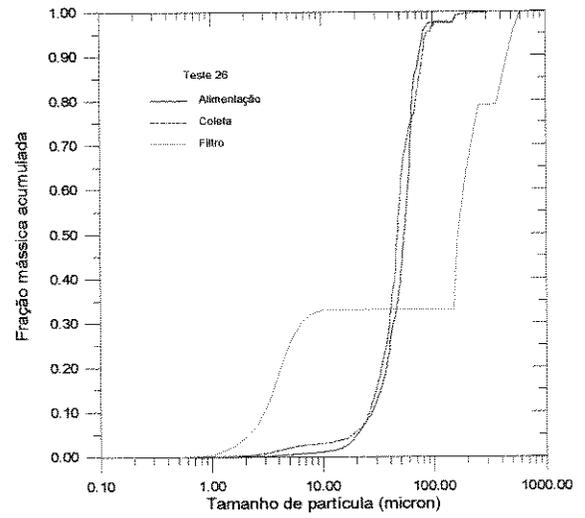
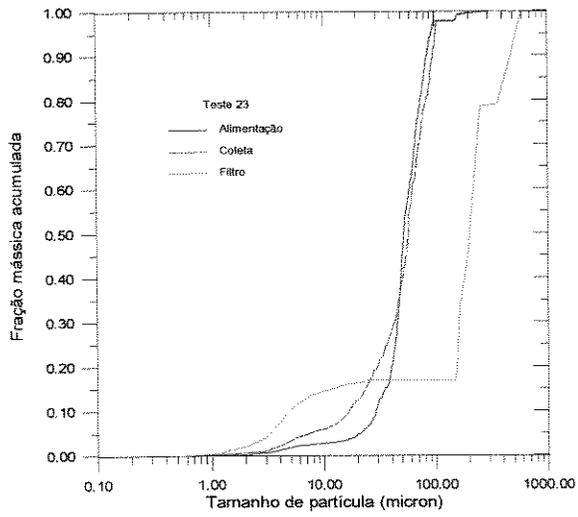
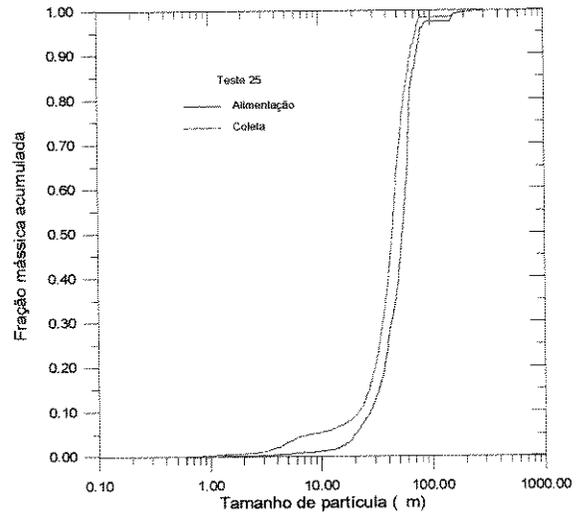
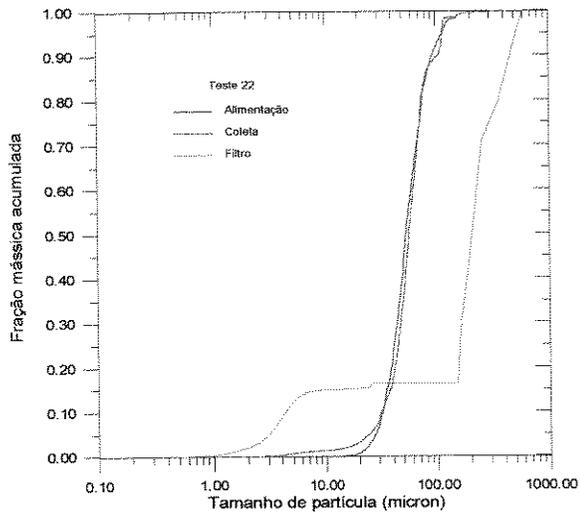
A amostra era depositada sobre uma lâmina de microscópio, utilizando o sistema de dispersão do sistema Galai. O tempo empregado para a deposição da amostra sobre a lâmina foi de cinco minutos. Após a deposição, a lâmina era fixada sob o feixe de laser e a análise efetuada pelo aparelho. O sistema a laser forneceu a distribuição granulométrica de 0,5 a 150 μm , com intervalo de 0,5 μm .

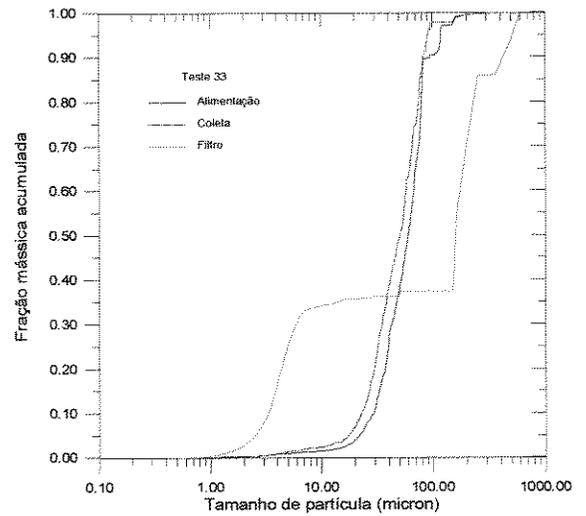
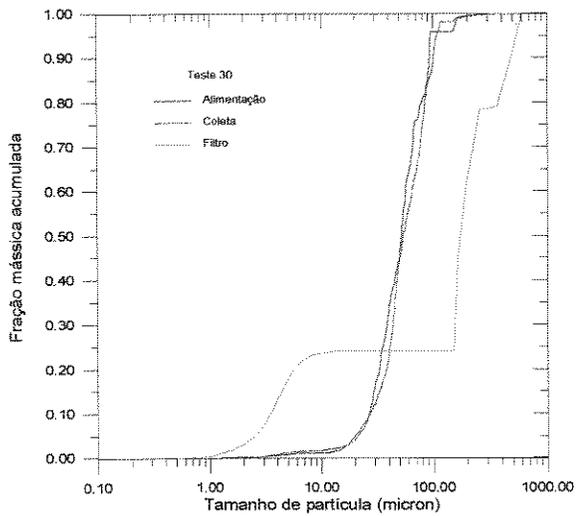
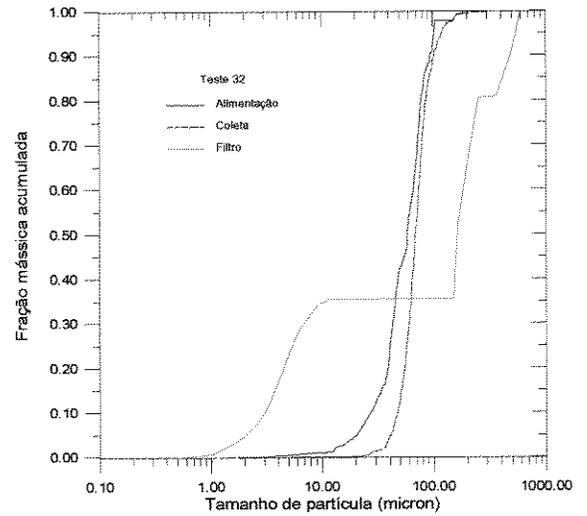
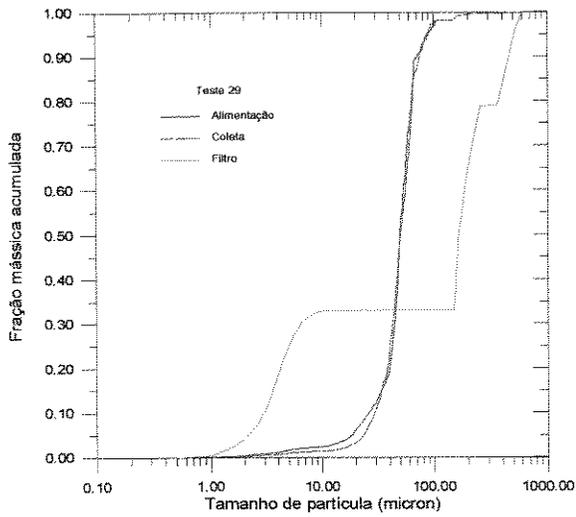
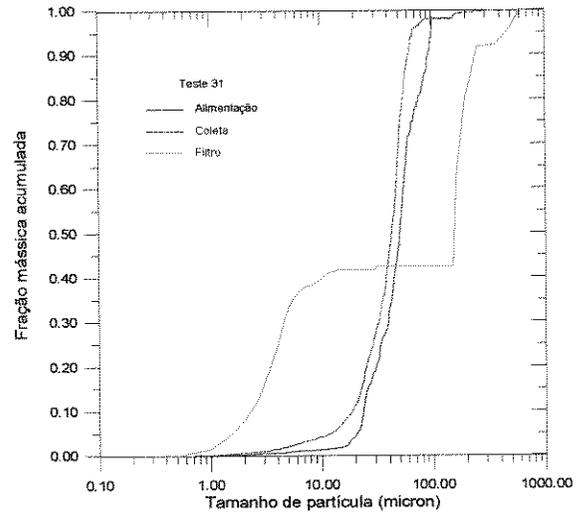
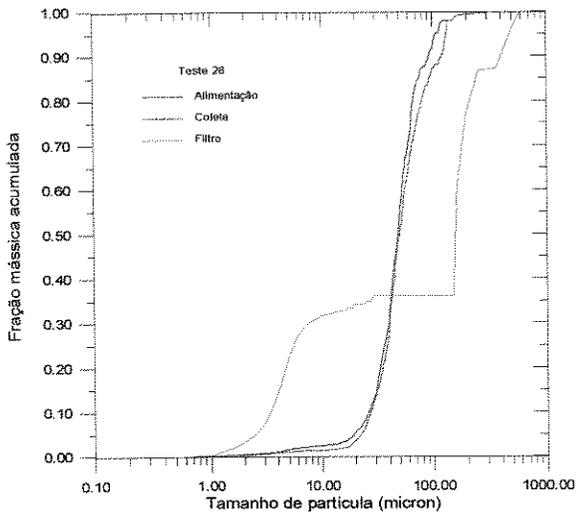
As distribuições granulométricas de cada amostra foram obtidas pela composição das análises do peneiramento e do sistema a laser. Elas são apresentadas nos gráficos das páginas que seguem. Em cada gráfico, são mostradas as distribuições granulométricas da alimentação, das partículas coletadas pelo ciclone e das retidas pelo filtro.

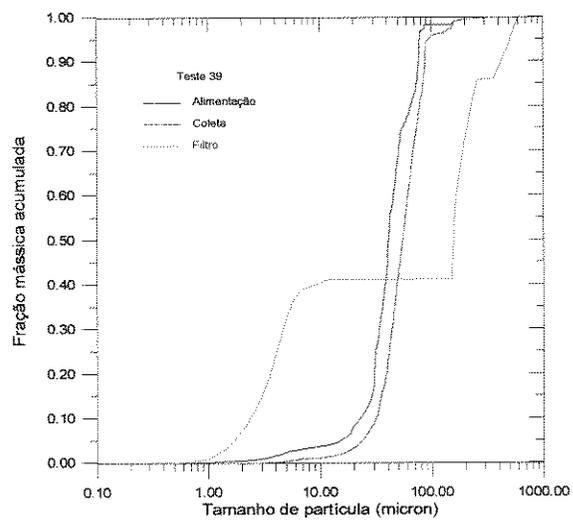
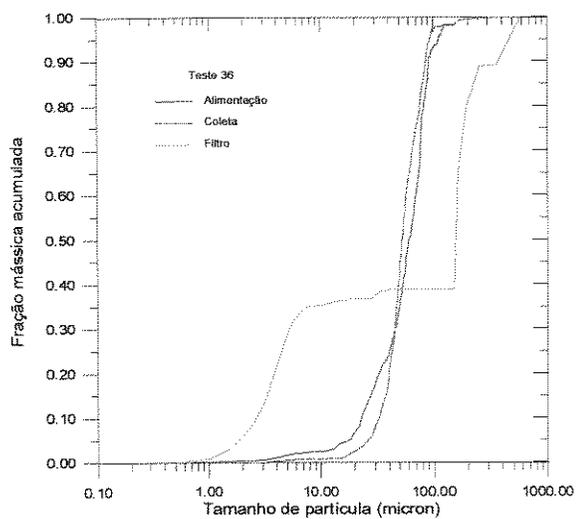
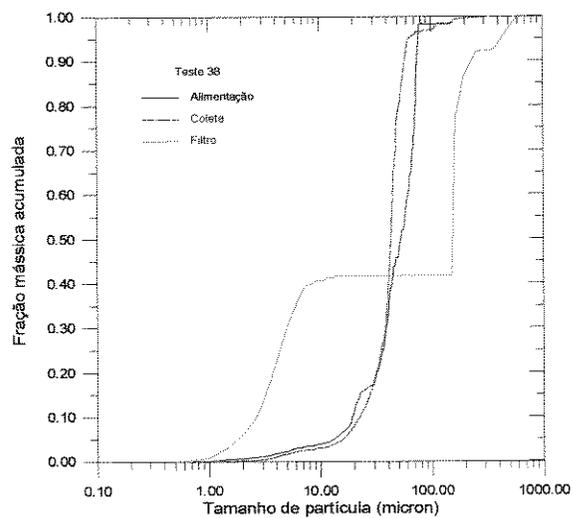
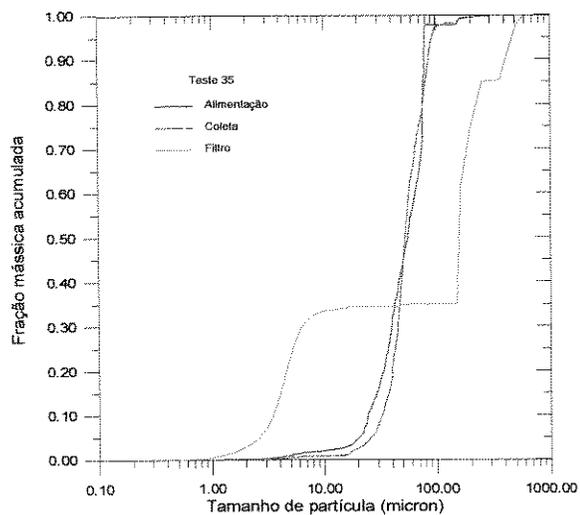
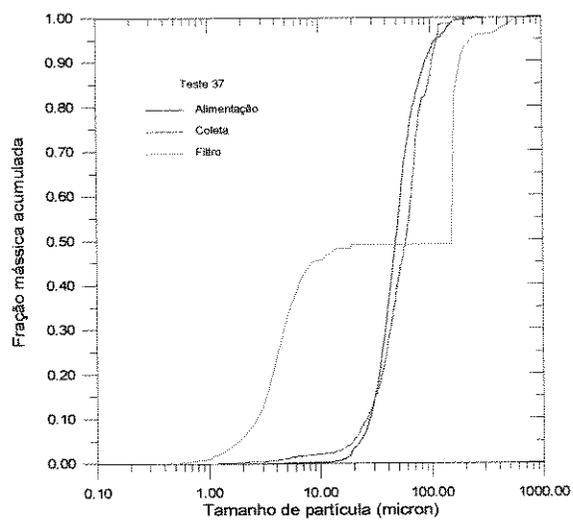
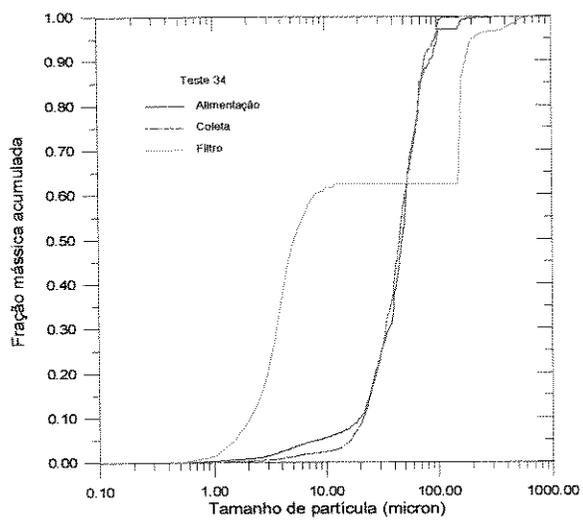


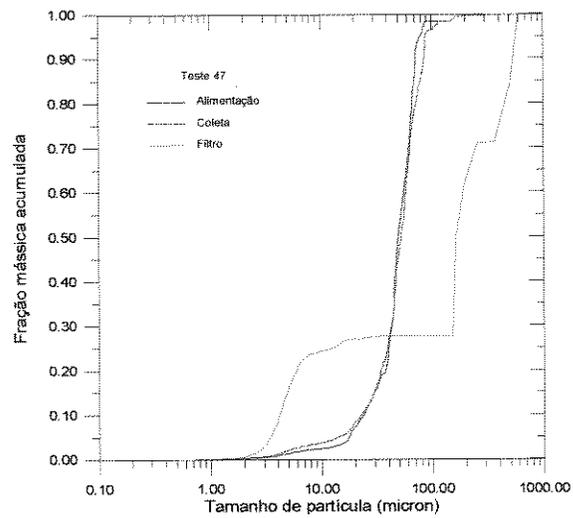
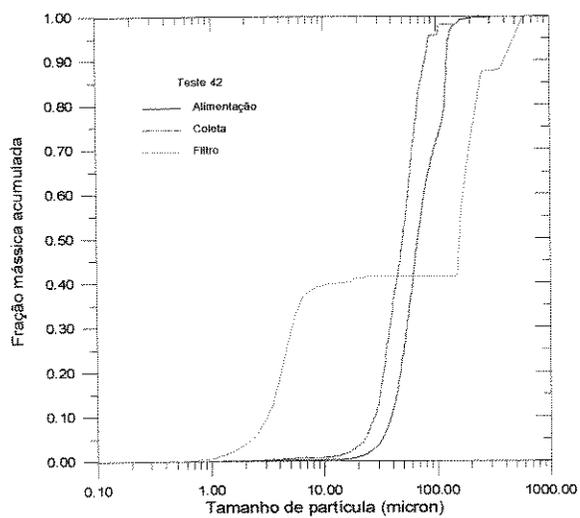
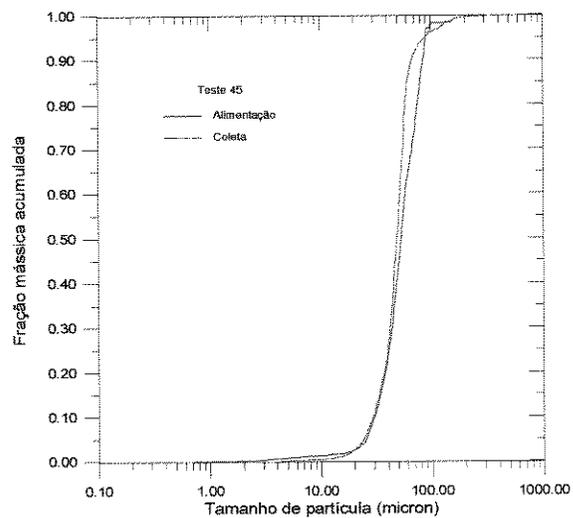
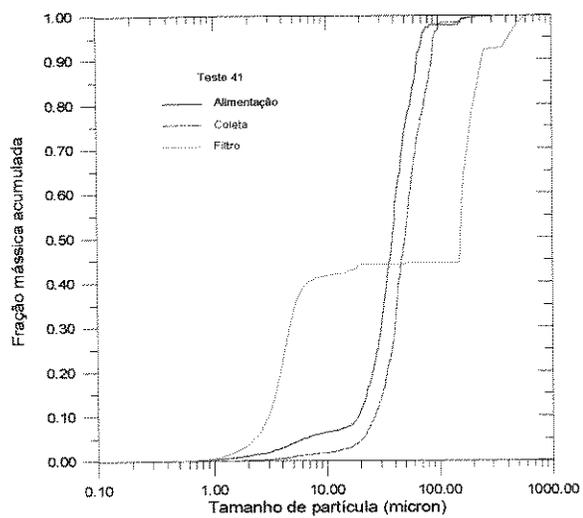
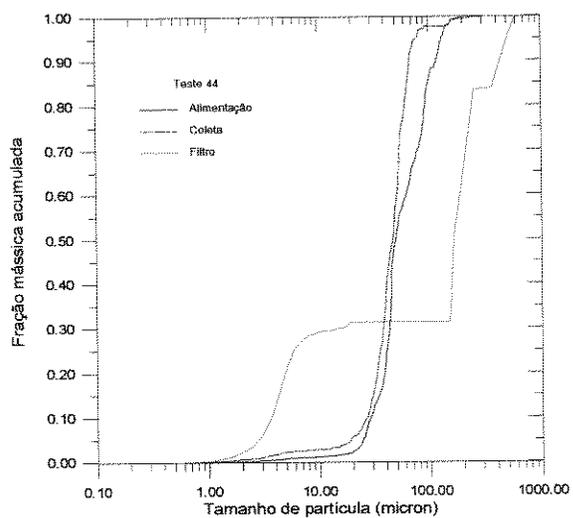
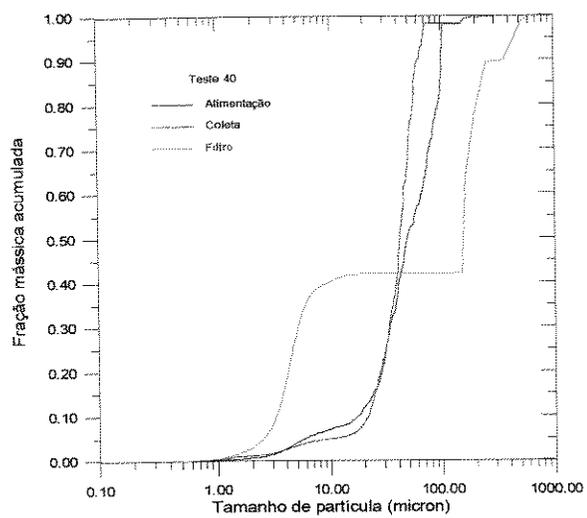


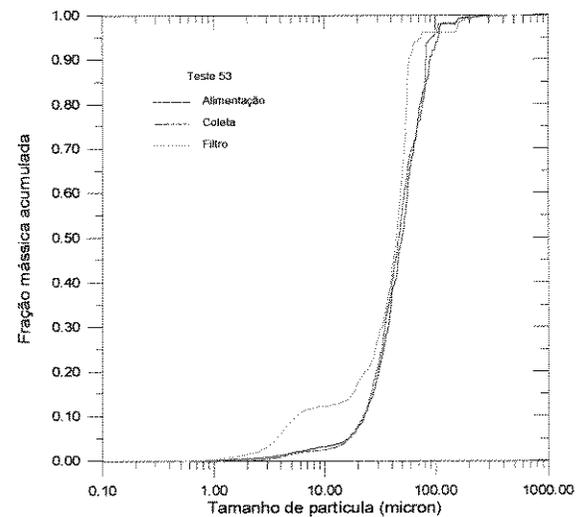
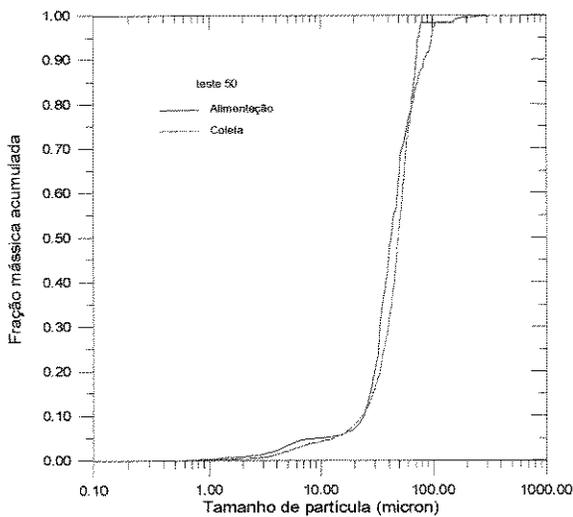
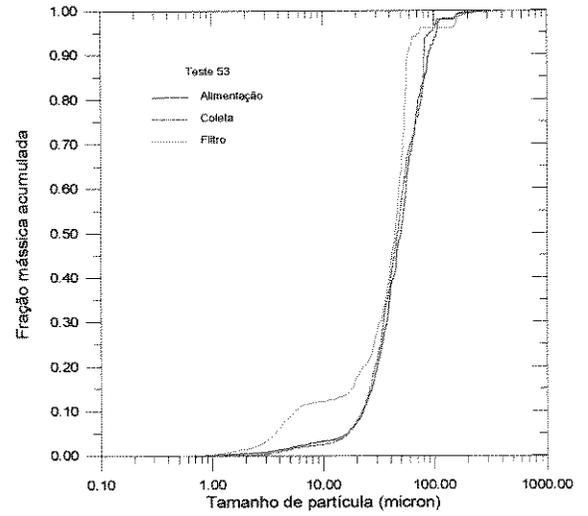
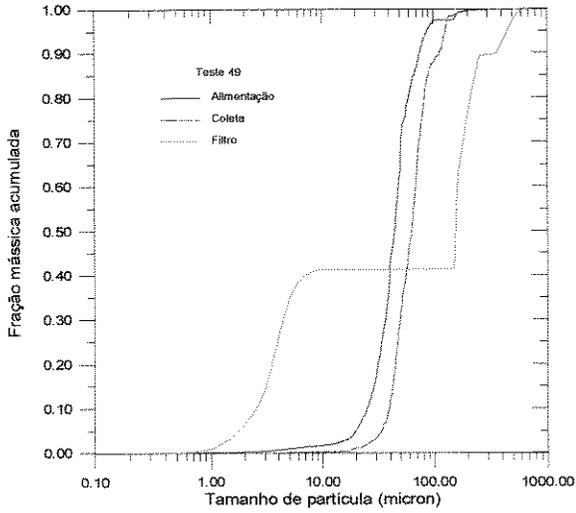
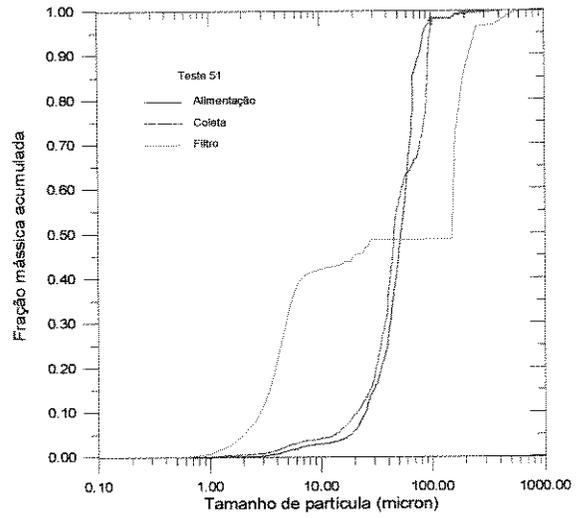
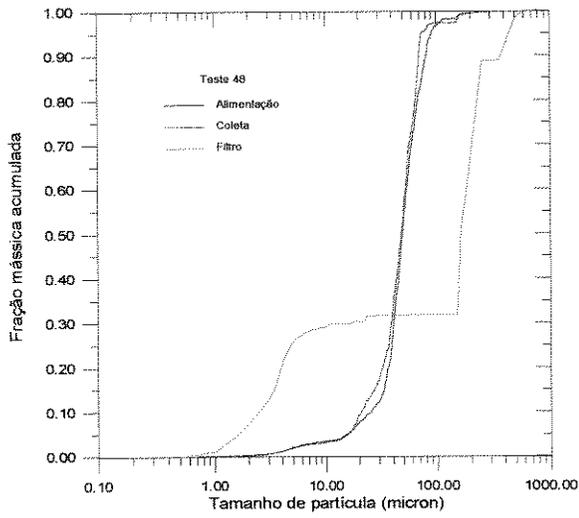


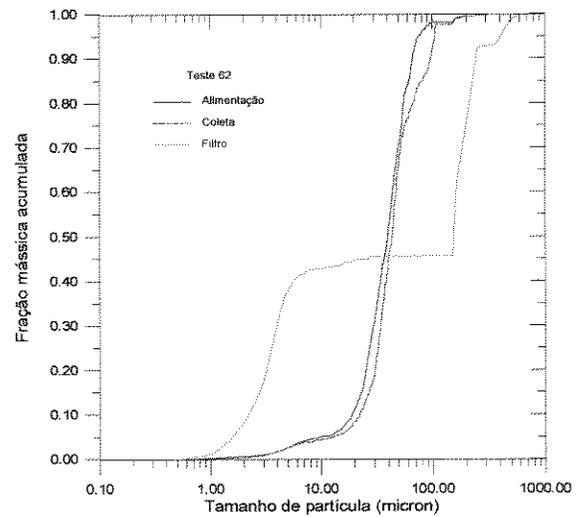
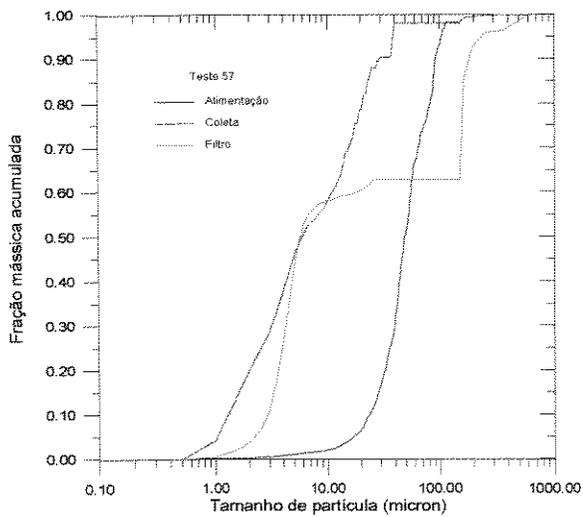
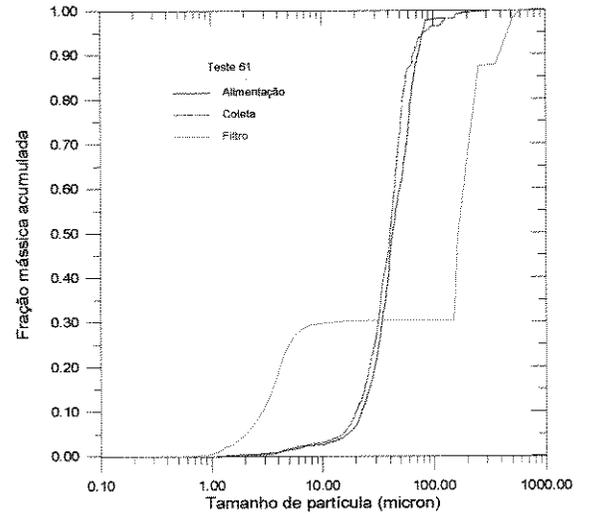
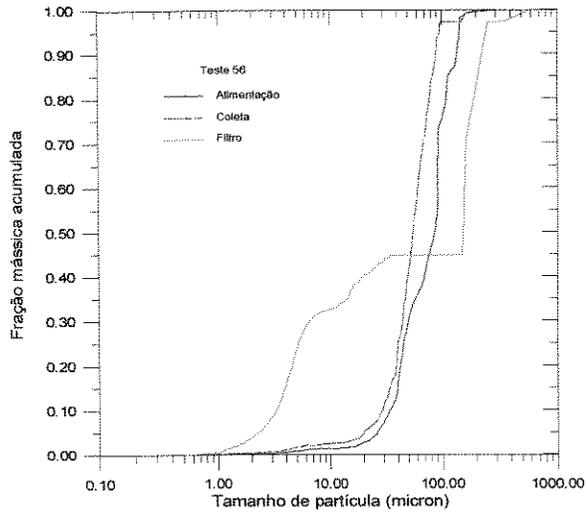
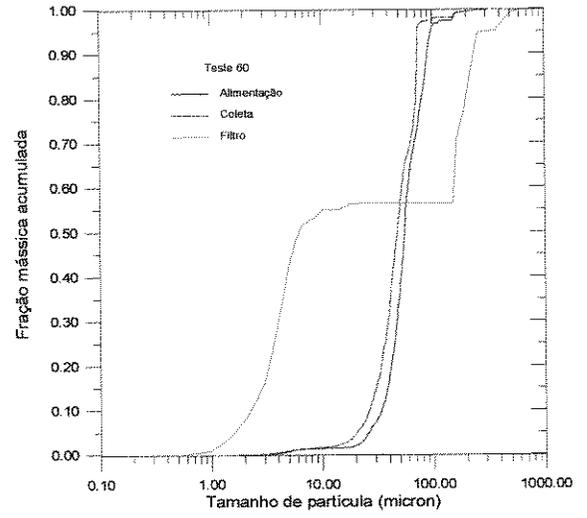
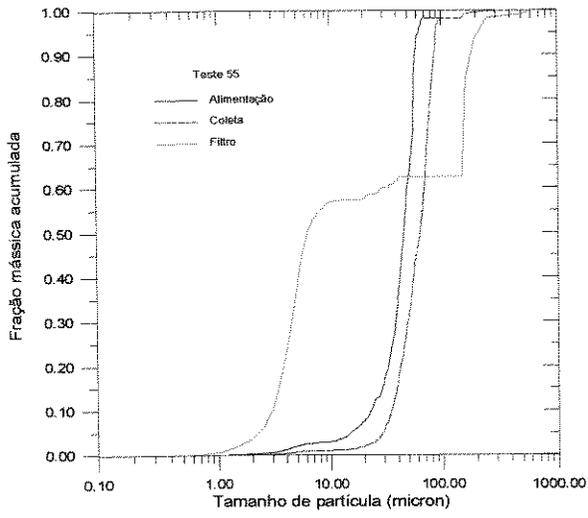












Apêndice B

Análise de erros

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

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

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

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

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

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

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

- Rendimento de Coleta

O rendimento de coleta é definido por:

$$\eta = \frac{M_t}{M_c} \quad (\text{B.3})$$

onde M_t é a massa alimentada no ciclone e M_c é a massa coletada pelo ciclone.

As massas foram medidas de 4 em 4 *kg*, com precisão de ± 1 g. Foram realizados testes com massa total alimentada de 20 ou 40 *kg*, tornando necessárias 5 ou 10 pesagens, respectivamente. Utilizando a Eq.(B.2), as incertezas w_m na determinação das massas foram estimadas como 2,24 g ou 0,01 por cento para massa total de 20 *kg* e como 3,16 g ou 0,01 por cento para massa total de 40 *kg*.

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

$$w_\eta = \left[\left(-\frac{M_c}{M_t^2} w_m \right)^2 + \left(\frac{1}{M_t} w_m \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{B.4})$$

A maior incerteza ocorreu com a utilização de M_t igual a 20 *kg*, no ponto de máximo rendimento. Nesse caso, $w_\eta = 0,0002$ ou 0,02 por cento.

- Perda de Pressão

A perda de pressão foi medida em *mmca* e convertida para *mbar* pela Eq. (2.10):

$$\Delta P = 10^{-5} \rho_a g PDI - 04 \quad (\text{B.5})$$

A incerteza na determinação de *PDI-04* foi de 1 *mmca*. A variação da densidade da água pode ser considerada desprezível na faixa de temperatura utilizada, bem como a aceleração da gravidade.

Pela Eq.(B.5), 1 *mmca* equivalem a 0,0978 *mbar*. A incerteza na determinação de ΔP foi então estimada em 0,1 *mbar*. As incertezas máximas ocorreram nos testes realizados na faixa de velocidades de 7 *m/s* onde foram observadas as menores perdas de pressão, e não foram maiores que 35 por cento.

- Concentração de Sólidos na Entrada do Ciclone

A concentração de sólidos na entrada o ciclone foi definida na Eq.(2.8):

$$c = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_{ar}} \quad (\text{B.6})$$

A incerteza w_c na determinação de c é dada por:

$$w_c = \left[\left(\frac{1}{\dot{m}_{ar}} w_{\dot{m}_s} \right)^2 + \left(\frac{-\dot{m}_s}{\dot{m}_{ar}^2} w_{\dot{m}_{ar}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{B.7})$$

A descarga de ar foi avaliada pela Eq.(2.1). Estima-se que a incerteza $w_{\dot{m}_{ar}}$ em sua determinação seja da ordem de 2 por cento.

A descarga de sólidos foi avaliada pela Eq.(2.8):

$$\dot{m}_s = \frac{M_t}{t} \quad (\text{B.8})$$

A incerteza na determinação de M_t já foi avaliada em 0,01 por cento. O tempo foi medido com precisão de ± 1 s. Aplicando a Eq.(C.2), foi determinada a incerteza $w_{\dot{m}_s}$ máxima igual a 1,15 por cento em \dot{m}_s .

Observa-se na Eq.(B.7), que a maior incerteza ocorre para a menor descarga de ar e maior descarga de sólidos, ou seja, na concentração máxima. A avaliação da Eq.(B.7) no teste de maior concentração forneceu w_c igual a 0,059 kg de FCC/ kg de ar. Com esse valor, a incerteza relativa máxima foi estimada em 6,8 por cento.

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

Apêndice C

Procedimento de Zenz

Este apêndice descreve o procedimento desenvolvido por Zenz (1975) que considera o efeito da concentração de sólidos para determinar o rendimento de coleta de ciclones. Basicamente, o procedimento envolve a determinação do diâmetro de corte, do número de espirais percorridas pelo gás, do rendimento de coleta em baixas concentrações e finalmente da avaliação do rendimento de coleta em altas concentrações.

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

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

onde N_s é o número de espirais percorridas pelo gás.

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

$$\rho_p \frac{\pi}{6} d^3 g - \rho \frac{\pi}{6} d^3 g - 3\pi\mu Vd = ma \quad (C.2)$$

onde o primeiro e segundo termos do lado esquerdo da Eq. (C.2) representam o peso e o empuxo atuando sobre a partícula, respectivamente, e o terceiro termo é a força de arraste

sobre a partícula que, por hipótese, segue a lei de Stokes. A velocidade terminal é alcançada quando a aceleração da partícula é nula, ou seja, o termo do lado direito da Eq.(C.2) é nulo. Assim, a manipulação algébrica da Eq.(C.2) resulta na velocidade terminal em um campo gravitacional, V_g :

$$V_g = \frac{gd^2(\rho_p - \rho)}{18\mu} \quad (C.3)$$

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

$$\alpha = \frac{V^2}{D/2} \quad (C.4)$$

A substituição de g da Eq.(C.3) por α , resulta na velocidade terminal em um campo centrífugo:

$$V_t = \frac{(\rho_p - \rho)V^2 d^2}{9\mu D} \quad (C.5)$$

O tempo necessário para a partícula percorrer a distância L , através da faixa espiral, é obtido pela divisão de L por V_t , ou seja,

$$t = \frac{9\mu LD}{(\rho_p - \rho)V^2 d^2} \quad (C.6)$$

A Eq.(C.6) estabelece que quanto menor o diâmetro da partícula, maior o tempo necessário para percorrer a distância L . O menor tamanho de partícula que pode ser coletado, ou diâmetro de corte d_c , é obtido igualando t da Eq.(C.6) ao tempo de residência do gás no ciclone, t_{res} , Eq.(C.1). Assim,

$$d_c = \sqrt{\frac{9\mu L}{\pi N_s V(\rho_p - \rho)}} \quad (C.7)$$

Na prática, partículas maiores que o tamanho dado pela Eq.(C.7) podem não ser coletadas e partículas menores podem ser coletadas. Além disso, o rendimento de coleta é influenciado pela concentração de sólidos na entrada do ciclone e torna-se difícil ajustar resultados experimentais com a Eq.(C.7). As hipóteses feitas por Zenz para superar essa dificuldade foram:

- O diâmetro da partícula calculado pela Eq.(C.7) é arbitrariamente tomado como o tamanho coletado com rendimento de 50% ;
- A Eq.(C.7) é aplicável apenas em concentrações muito baixas de sólidos, da ordem de $1\text{ gr}/\text{pe}^3$ ou menos;
- Uma curva normalizada de rendimento de coleta por tamanho de partícula deve ser obtida, ou seja, uma única curva de d/d_c versus rendimento de coleta;
- O número de espirais N_s em baixas concentrações é função apenas da velocidade do gás e das proporções geométricas do ciclone;
- O efeito da concentração depende da magnitude do rendimento de coleta em baixas concentrações, e
- A velocidade do vórtice ascendente não é suficiente para rearrastar as partículas coletadas.

Baseado em ciclones de até $3,66\text{ m}$ (12 pés) de diâmetro e operando com grande variedade de sólidos em concentrações de $1,868 \cdot 10^{-3}$ a $1,868\text{ kg de sólidos/ kg de gás}$, as hipóteses acima conduziram a um conjunto de correlações de trabalho. A Fig. C.1 representa a curva normalizada de rendimento de coleta por tamanho de partícula. O diâmetro d_c é o

tamanho de partícula calculado pela Eq.(C.6) e η_o é o rendimento de coleta no qual partículas de diâmetro d seriam coletadas, em concentração total na entrada do ciclone menores que $1,868 \cdot 10^{-3}$ kg de sólidos/ kg de gás.

A análise resultou nas curvas empíricas da Fig. C.2. A abcissa representa a concentração de todas as partículas na entrada do ciclone.

O valor corrigido do rendimento global de coleta pode ser obtido da Fig. C.2, conhecendo-se o valor do rendimento global de coleta para concentrações baixas de sólidos., obtido da Fig. C.1. O número de voltas N_s em função da velocidade na entrada do ciclone e representa a correlação calculada por método inverso e tentativa e erro e é consistente com as Figs. C.1 e C.2. Ele foi apresentado em forma gráfica por Zenz. Uma expressão para ajustar a curva de N_s foi apresentada por Coker (1993) e é dada por:

$$N_s = V_o (0,1079 - 0,00077V_o + 1,924 \times 10^{-6} V_o^2) \quad (C.8)$$

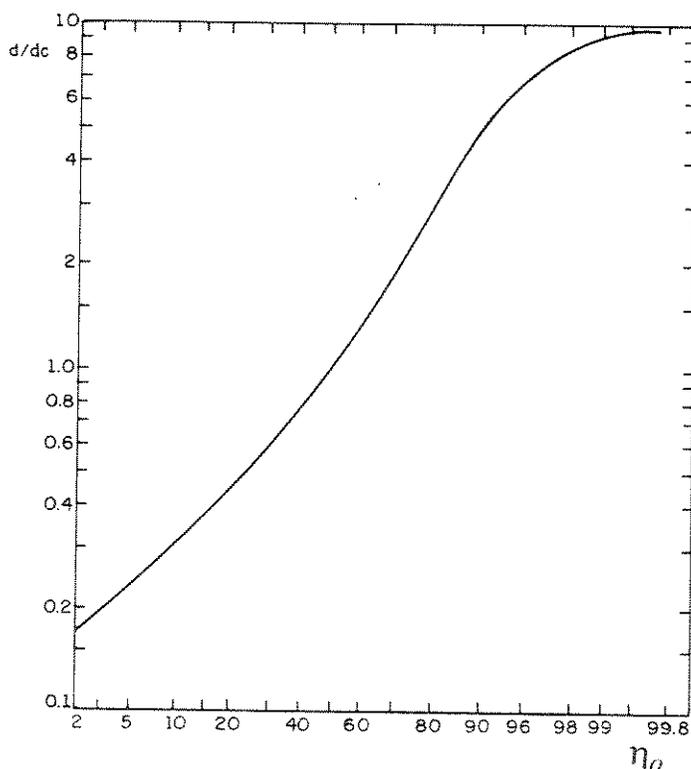


Fig. C.1 Curva normalizada de rendimento de coleta por tamanho de partícula

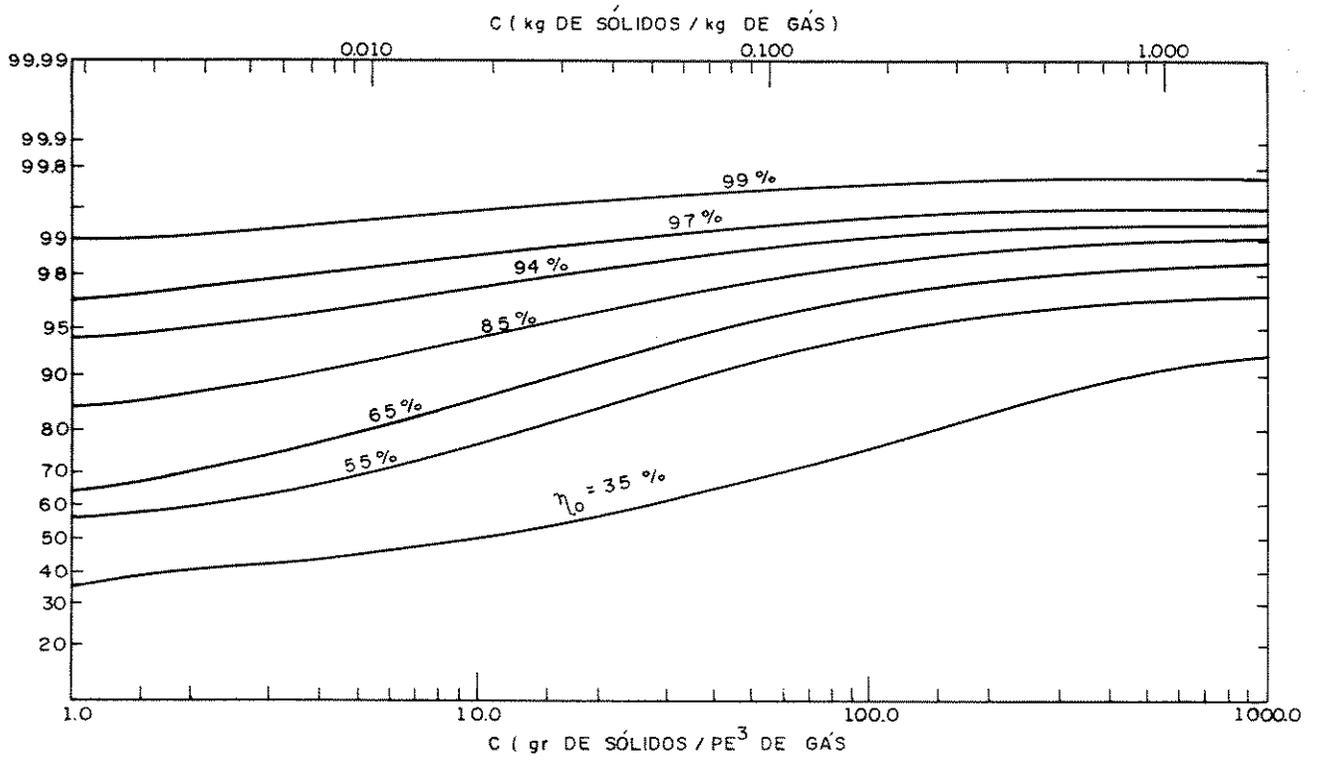


Fig. C.2 Rendimento global de coleta em função da concentração