

HOMERO DELBONI JUNIOR

Eng. de Minas, Escola Politécnica da USP, 1983

AJUSTE DE MODELOS EMPÍRICOS DE OPERAÇÃO DE CICLONES

Dissertação apresentada à  
Escola Politécnica da USP  
para a obtenção do título  
de Mestre em Engenharia  
Mineral

Orientador: Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves  
Depto. Eng. de Minas da EPUSP

São Paulo, 1989

179P

F11-1015

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ii
ÍNDICE DE TABELAS .....	v
RESUMO / ABSTRACT .....	viii
SÍMBOLOS E UNIDADES .....	x
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 Classificação, Conceitos, Definições e Curvas de Partição .....	5
2.2 Parametrizações de Curvas de Partição .....	11
2.2.1 Modelos da Função "By-Pass" .....	12
2.2.2 Modelos da Função "Classificação" .....	14
2.2.3 Tamanho Característico de uma Classe de Partículas .....	16
2.2.4 Estimação de Parâmetros .....	18
2.3 Ciclones .....	19
2.3.1 Relações Geométricas e Suas Influências na Operação .....	25
2.4 Modelos Matemáticos Empíricos de Operação de Ciclones .....	26
2.4.1 Aplicações de Modelos de Ciclones .....	26
2.4.2 O Modelo de Lynch e Rao .....	28
2.4.3 O Modelo de Plitt .....	30
2.5 Outros Modelos .....	32
2.5.1 Modelos para o Cálculo do Diâmetro Mediano de Partição .....	33
2.5.1.1 Hipótese da Órbita de Equilíbrio ..	33
2.5.1.2 Hipótese do Tempo de Retenção ....	35
2.5.1.3 Teoria do Balanço Populacional ...	36
2.5.1.4 Correlações Empíricas .....	37

2.5.2	Modelos para o Cálculo da Partição de Fluxos	42
2.5.3	Modelos para o Cálculo da Eficiência da Classificação	44
2.5.4	Modelos para o Cálculo de Vazão e Pressão	45
3.	AJUSTE DE MODELOS	50
3.1	Comportamento dos Modelos de Curvas de Partição Frente a Minérios Heterogêneos	56
3.2	Técnicas de Ajuste de Curvas de Partição	59
3.2.1	Modelos Estatísticos de Curvas de Partição	65
3.2.2	Modelos Heurísticos de Curvas de Partição	65
3.3	Ajuste das Equações Descritivas do Processo	69
3.4	Conclusões	70
4.	TÉCNICA DE AJUSTE PROPOSTA	72
4.1	Objetivo	72
4.2	Descrição	72
4.3	Discussão	75
4.4	Considerações Técnico-Econômicas	79
5.	ARQUITETURA DO PROGRAMA COMPUTACIONAL	81
5.1	Descrição do Sistema	81
5.2	Aplicações do Sistema	89
6.	VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO AJUSTE PROPOSTO	91
6.1	Introdução	91
6.2	Descrição do Processo da Serrana	91
6.3	Amostragens	99
6.4	Formação do Banco de Dados	101
6.5	Tratamento dos Dados Experimentais	114
6.6	Simulações	124
6.7	Tratamento dos Resultados das Simulações	137
6.8	Conclusões da Parte Experimental	154
7.	CONCLUSÕES GERAIS DO TRABALHO	158
8.	BIBLIOGRAFIA	159

## AGRADECIMENTOS

O autor expressa seus maiores e mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas que tenham colaborado direta ou indiretamente na execução deste trabalho. Particularmente às seguintes pessoas ou instituições:

- Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves, orientador e incentivador maior, pelas críticas objetivas e opiniões sensatas determinantes da realização deste trabalho.

- Prof. Dr. Eduardo Camilher Damasceno, pelo apoio proporcionado e estímulo constante.

- Prof. Dr. Wildor Theodoro Hennies, pelo entusiasmo e colaboração fundamentais ao longo de todo o trabalho.

- Serrana S.A. de Mineração, na pessoa do Prof. Ricardo Neves de Oliveira e demais integrantes do corpo técnico do Setor Apatita, cujo empenho e troca de impressões em muito contribuíram para o enriquecimento das idéias contidas neste trabalho.

- Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP, ao seu corpo discente e docente, agradeço a minha formação, apoio e principalmente a oportunidade de fazer parte de sua equipe.

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Forma característica de uma curva de partição típica de um classificador. (Segundo KELLY & SPOTISWOOD (6))	9
Figura 2.2	Curvas de partição real e corrigida. (Segundo PLITT (7))	9
Figura 2.3	Exemplos de curvas padrão de partição. (Segundo TARR (4))	10
Figura 2.4	Operação de classificação. (Segundo PLITT, TURAK & FLINTOFF (10))	11
Figura 2.5	Curva de Partição obtida segundo o modelo proposto por Plitt para uma série de dados experimentais. No quadro pode-se notar os valores dos parâmetros $d_{50cor}$ e $m$ da equação 10. (Segundo PLITT, TURAK & FLINTOFF (10))	16
Figura 2.6	Principais parâmetros geométricos de um ciclone. (Segundo BRADLEY (19))	21
Figura 2.7	Determinação das componentes vertical, centrífuga, tangencial e arraste da força que age sobre as partículas sólidas em alguns pontos internos de um ciclone. (Segundo LILGE (20))	23
Figura 2.8	Distribuição das três componentes da velocidade em diversos pontos internos de um ciclone, sendo (a) vertical, (b) radial e (c) horizontal. (Segundo KELSALL (11))	24
Figura 2.9	Forças que atuam sobre uma partícula sólida no interior de um ciclone. (Segundo PLITT (1))	34
Figura 2.10	Diâmetro mediano de separação básico versus diâmetro do ciclone. (Segundo ARTERBURN (22))	39
Figura 2.11	Fator de correção C1 da equação 35 versus concentração de sólidos em volume. (Segundo ARTERBURN (22))	40
Figura 2.12	Fator de correção C2 da equação 36 versus pressão de alimentação. (Segundo ARTERBURN (22))	41
Figura 2.13	Fator de correção C3 da equação 37 versus peso específico dos sólidos. (Segundo ARTERBURN (22))	42
Figura 2.14	Capacidade básica do ciclone versus pressão de alimentação. (Segundo ARTERBURN (22))	49
Figura 3.1	Curvas de partição de diferentes classes de densidades para carvão. (Segundo PLITT, TURAK & FLINTOFF (10))	57
Figura 3.2	Variação do parâmetro $d_{50}$ versus peso específico dos sólidos. (Segundo PLITT, TURAK & FLINTOFF (10))	58

(6) Os números entre parênteses referem-se à Bibliografia.

Figura 3.3 Operação de classificação com ciclones, em duas fases. (Segundo PLITT, TURAK & FLINTOFF (10))	60
Figura 3.4 Curva de partição de um sistema de sólidos divididos em duas classes de densidades. (Segundo PLITT, TURAK & FLINTOFF (10))	62
Figura 3.5 Origem de curvas de partição peculiares: (a) distribuição granulométrica da fração leve, (b) curva de partição do minério. (Segundo PLITT, TURAK & FLINTOFF (10))	64
Figura 3.6 Principais desvios de curvas padrão de partição: (a) curto-circuito negativo, (b) curva ultrapassa a reta $c=1$ e (d) curva atinge lentamente a assíntota $c=1$ . (Segundo TRAWINSKI (3))	67
Figura 5.1 Diagrama de blocos do sistema completo proposto de ajuste e simulação	82
Figura 6.1 Fluxograma de processo e balanço de massa e água do circuito de moagem da Usina 320 (cinco linhas em paralelo). Serrana	95
Figura 6.2 Fluxograma do circuito de destamagem, Usina 320 Serrana	98
Figura 6.3 Planilha de amostragem do circuito de classificação da Usina 320 da Serrana, datada de 02/10/87	104
Figura 6.4 Configuração final da entrada de dados de distribuições granulométricas, para o arquivo SERR01M1	106
Figura 6.5 Gráfico contendo os valores plotados de partição corrigida e a reta obtida por regressão linear com os pontos; equação de Rosin-Rammler, arquivo SERR01M1	107
Figura 6.6 Gráfico contendo os valores plotados de partição corrigida e o produto da parametrização pelo método discretizante, arquivo SERR01M1	109
Figura 6.7 Configuração final da entrada de dados de geometria do ciclone e de operação para o arquivo SERR01M1	110
Figura 6.8 Gráfico da curva padrão de partição calculada com os dados do arquivo SERR01M1	111
Figura 6.9 Gráfico comparativo de curvas de partição médias. Curva do arquivo SERMEDIO (método discretizante) e curva da equação de Rosin-Rammler, com $m$ médio de todos os arquivos (2,25)	118
Figura 6.10 Gráfico comparativo de curvas de partição médias. Curva do arquivo SERDOLOM (método discretizante) e curva da equação de Rosin-Rammler, com $m$ médio de todos os arquivos com minério dolomítico (2,15)	120
Figura 6.11 Gráfico comparativo de curvas de partição médias. Curva do arquivo SERCALCT (método discretizante) e curva da equação de Rosin-Rammler, com $m$ médio de todos os arquivos com minério calcítico (2,40)	122

Figura 6.12 Simulação realizada com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante, arquivo SERMEDIO, com os dados da amostragem 19, linha de moagem 3 .....	138
Figura 6.13 Simulação realizada com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante, arquivo SERCALCT, com os dados da amostragem 19, linha de moagem 3 .....	139
Figura 6.14 Simulação realizada com o modelo de Plitt, segundo a equação de Rosin-Rammler, com as constantes médias, com os dados da amostragem 19, linha de moagem 3 .....	140
Figura 6.15 Simulação realizada com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante, arquivo SERMEDIO, com os dados da amostragem 20, linha de moagem 3 .....	141
Figura 6.16 Simulação realizada com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante, arquivo SERDOLOM, com os dados da amostragem 20, linha de moagem 3 .....	142
Figura 6.17 Simulação realizada com o modelo de Plitt, segundo a equação de Rosin-Rammler, com as constantes médias, com os dados da amostragem 20, linha de moagem 3 .....	143
Figura 6.18 Testes de aderência entre valores experimentais de partição corrigida e valores de partição obtidos segundo diferentes parametrizações da curva padrão de partição. Amostragens 19 e 20 .....	145
Figura 6.19 Testes de aderência entre valores experimentais de partição corrigida e valores de partição obtidos segundo diferentes parametrizações da curva padrão de partição. Amostragem 19 .....	146
Figura 6.20 Testes de aderência entre valores experimentais de partição corrigida e valores de partição obtidos segundo diferentes parametrizações da curva padrão de partição. Amostragem 20 .....	147
Figura 6.21 Testes de aderência entre os valores de partições: arquivos médios de minério calcítico e dolomítico (SERCALCT e SERDOLOM) versus arquivo médio SERMEDIO .....	148
Figura 6.22 Balanços de massas experimental e produto das simulações com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante (arquivos SERMEDIO e SERCALCT) e a equação de Rosin-Rammler .....	151
Figura 6.23 Balanços de massas experimental e produto das simulações com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante (arquivos SERMEDIO e SERDOLOM) e a equação de Rosin-Rammler .....	152

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Correlações teóricas e empíricas para cálculo do parâmetro d50 em ciclones. (Segundo BRADLEY (19))	38
Tabela 2.2 Correlações teóricas e empíricas para cálculo da queda de pressão em ciclones. (Segundo BRADLEY (19))	47
Tabela 6.1 Composição mineralógica média do minério de Jacupiranga	92
Tabela 6.2 Distribuição granulométrica típica da alimentação, Usina 320 Serrana	94
Tabela 6.3 Distribuição granulométrica do produto da etapa de moagem, Usina 320 da Serrana	96
Tabela 6.4.(a) Balanço de massas e metalúrgico, Usina 320 da Serrana	100
Tabela 6.4.(b) Recuperações em massa e de P2O5, Usina 320 da Serrana	100
Tabela 6.5 Identificação dos arquivos gerados	103
Tabela 6.6 Valores de partição tomados em pontos discretos do eixo das abscissas das curvas padrão de partição, referentes aos diversos arquivos individualmente gerados	113
Tabela 6.7 Valores das constantes das equações do modelo de Plitt (K1-d50, K2-S, K3-m, K4-Q), de arquivos individuais e médios. Valores dos parâmetros d50 e m individuais e médios, extraídos das curvas padrão de partição individuais, parametrizadas pela equação de Rosin-Rammler	115
Tabela 6.8 Valores de partições obtidos em seis curvas padrão de partição médias, geradas segundo parametrização de Rosin-Rammler e do método discretizante	117
Tabela 6.9 Comparação de resultados de métodos de cálculos de partições, referentes ao arquivo SERMEDIO (método discretizante) e a equação de Rosin-Rammler, com m médio de todos os arquivos	119
Tabela 6.10 Comparação de resultados de métodos de cálculos de partições, referentes ao arquivo SERDOLDM (método discretizante) e a equação de Rosin-Rammler, com m médio de todos os arquivos com minério dolomítico	121
Tabela 6.11 Comparação de resultados de métodos de cálculos de partições, referentes ao arquivo SERCALCT (método discretizante) e a equação de Rosin-Rammler, com m médio de todos os arquivos com minério calcítico	123
Tabela 6.12 Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 19, linha 1 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERCALCT parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler	126

Tabela 6.13. Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 19, linha 2 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERCALCT parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler .....	127
Tabela 6.14 Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 19, linha 3 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERCALCT parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler .....	128
Tabela 6.15 Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 19, linha 4 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERCALCT parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler .....	129
Tabela 6.16 Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 19, linha 5 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERCALCT parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler .....	130
Tabela 6.17 Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 20, linha 1 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERDOLOM parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler .....	131
Tabela 6.18 Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 20, linha 2 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERDOLOM parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler .....	132
Tabela 6.19 Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 20, linha 3 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERDOLOM parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler .....	133
Tabela 6.20 Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 20, linha 4 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERDOLOM parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler .....	134
Tabela 6.21 Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 20, linha 5 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERDOLOM parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler .....	135
Tabela 6.22 Resumo das somatórias dos quadrados dos desvios e das variâncias apresentadas pelos valores de partição gerados a partir de simulações, frente aos dados experimentais .....	150

Tabela 6.23.(a) Distribuições granulométricas do "underflow" de simulações com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante (arquivos médios SERMEDIO e SERCALCT) e a equação de Rosin-Rammler. Folha de amostragem 19, linha de moagem 3 ..... 155

Tabela 6.23.(b) Distribuições granulométricas do "overflow" de simulações com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante (arquivos médios SERMEDIO e SERCALCT) e a equação de Rosin-Rammler. Folha de amostragem 19, linha de moagem 3 ..... 155

Tabela 6.24.(a) Distribuições granulométricas do "underflow" de simulações com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante (arquivos médios SERMEDIO e SERCALCT) e a equação de Rosin-Rammler. Folha de amostragem 20, linha de moagem 3 ..... 156

Tabela 6.24.(b) Distribuições granulométricas do "overflow" de simulações com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante (arquivos médios SERMEDIO e SERCALCT) e a equação de Rosin-Rammler. Folha de amostragem 20, linha de moagem 3 ..... 156

## RESUMO

Este trabalho descreve um método de parametrização de curvas padrão de partição visando seu emprego em modelos matemáticos de operação de ciclones.

Inicialmente são feitas considerações sobre o estado atual do conhecimento do processo de classificação via ciclones, seguidas pela apresentação dos modelos matemáticos mais difundidos para descrevê-lo e das principais técnicas empregadas para ajustá-lo.

Na seqüência é apresentada a arquitetura de um sistema computarizado especificamente criado para execução de tarefas relacionadas ao método proposto, que engloba sete módulos integrados compostos por vários programas cada um, envolvendo rotinas de manipulação de dados, geração de arquivos, cálculos de regressão, simulações, apresentação de gráficos, emissão de relatórios, etc.

A parte final deste trabalho consiste em uma aplicação experimental do sistema criado, através do tratamento de dados coletados na usina industrial de processamento de minério de fosfato da Serrana S.A. de Mineração. Após os extensos trabalhos de elaboração do banco de dados, formado a partir de setenta e uma amostragens completas no circuito de moagem e classificação, foram construídas curvas padrão de partição médias seguindo a metodologia de parametrização proposta pelo Autor assim como a originalmente formulada por Plitt. Mediante comparações entre dezenas de simulações da operação em estudo empregando-se as curvas geradas, conclui-se que ao contrário da técnica de parametrização de Plitt, a técnica proposta mostrou índices de aderência adequados em relação aos dados experimentais. A sua utilização torna portanto mais abrangente o campo de aplicações de modelos matemáticos de operação de ciclones.

## ABSTRACT

This work describes a methodology for parametrization of standard partition curves which is useful in hydrocyclones operation mathematical models.

The state of art of hydrocyclones classification process is first presented and then the most common models for their description is reviewed such as the main adjusting techniques.

Following this we present the architecture of a computational system specifically made for executing jobs related to the proposed methodology, which includes seven integrated modules. Each module is itself composed of several programs, each one containing routines for data manipulation, file generation, regression analysis, graphical presentation, simulation tests and final reports presentation.

In the last part of the work the system is tested using data from a phosphate ore processing plant run by Serrana S. A. de Mineração. Seventy one completely sampling data were taken from the comminution and classification circuit in order to obtain the initial data bank. Average standard partition curves were constructed using the author's proposed methodology and also using Plitt's original approach.

After comparing several simulation tests it was indicated that the new methodology presented suitable adherence indexes, which didn't occur with Plitt's original model.

The main conclusion drawn is that the new methodology widens up the field of application of hydrocyclones mathematical models.

## SÍMBOLOS E UNIDADES

- a = constante, adimensional.
- Ai = área da secção transversal do orifício de entrada, em polegadas quadradas.
- ci = função classificação, ou a fração da classe i de tamanhos na alimentação do ciclone que se encaminha ao "underflow" por ação de classificação, %.
- coo = valor da partição que corresponde à assíntota da curva padrão de partição, %.
- co = valor da partição quando a curva padrão de partição intercepta o eixo das ordenadas, %.
- Cv = concentração de sólidos em volume, %.
- Cw = concentração de sólidos em peso, %.
- C1 = fator de correção do diâmetro mediano de separação, que leva em consideração a concentração de sólidos na polpa, adimensional.
- C2 = fator de correção do diâmetro mediano de separação, que leva em consideração a pressão de alimentação, adimensional.
- C3 = fator de correção do diâmetro mediano de separação, que leva em consideração a densidade de sólidos, adimensional.
- C4 = diâmetro mediano de separação para partículas com densidade de 2,0 g/cm<sup>3</sup>, em  $\mu\text{m}$ .
- d = tamanho característico de uma partícula, em  $\mu\text{m}$ .
- d\* = tamanho de partícula abaixo do qual as partições das frações de minerais leves e pesados são nulas, em  $\mu\text{m}$ .
- di = tamanho característico de uma classe i de tamanhos de partículas, em  $\mu\text{m}$ .

- do = tamanho de partícula abaixo do qual o "entrainment" não é significativo, em  $\mu\text{m}$ .
- d25 = tamanho de partícula para qual a partição é igual a 0,25, em  $\mu\text{m}$ .
- d75 = tamanho de partícula para qual a partição é igual a 0,75, em  $\mu\text{m}$ .
- d50exp = tamanho de partícula para qual a partição obtida experimentalmente é igual a 0,50, em  $\mu\text{m}$ .
- d50cor = tamanho de partícula para qual a partição corrigida é igual a 0,50, em  $\mu\text{m}$ .
- Di = diâmetro do orifício de entrada do ciclone (ou o diâmetro do círculo de igual área), em polegadas.
- Dc = diâmetro da secção cilíndrica do ciclone, em polegadas.
- Du = diâmetro do apex, em polegadas.
- Do = diâmetro do vortex, em polegadas.
- E = energia consumida pelo ciclone, em J.
- fi = frequência da classe de tamanhos i na alimentação do ciclone, %.
- F = vazão de sólidos na alimentação do ciclone, em t/h.
- Ft = componente tangencial da força atuante em uma partícula no interior do ciclone, em N.
- Fr = componente radial da força atuante em uma partícula no interior do ciclone, em N.
- Fv = componente vertical da força atuante em uma partícula no interior do ciclone, em N.
- Fd = força de arraste, em N.
- h = altura livre do vortex, em polegadas.
- H = queda de pressão no ciclone, em polegadas de polpa.
- I = imperfeição, adimensional.

- k = expoente relativo ao efeito da densidade de sólidos sobre o diâmetro mediano de separação, adimensional.
- Lu = comprimento do vortex, em polegadas.
- m = coeficiente de eficiência de separação, adimensional.
- n = constante menor que 1,0.
- no = número de arquivos individuais.
- P = pressão de alimentação do ciclone, em psi.
- pi = função partição, ou a fração da classe i de tamanhos na alimentação que se encaminha ao "underflow", %.
- $\bar{p}_i$  = função partição média, %.
- pl = função partição para a fração leve, %.
- ph = função partição para a fração pesada, %.
- Q = vazão volumétrica de polpa na alimentação do ciclone, em pés<sup>3</sup>/min.
- Quf = vazão volumétrica do "underflow", em pés<sup>3</sup>/min.
- Qof = vazão volumétrica do "overflow", em pés<sup>3</sup>/min.
- r = raio da trajetória, em m.
- ri = função "by-pass", ou a fração da classe i de tamanhos na alimentação que se encaminha ao "underflow" por curto circuito, %.
- Rf = recuperação de água, ou a fração de água contida na alimentação que se encaminha ao "underflow", %.
- Rs = recuperação de sólidos em massa, ou a fração mássica de sólidos contida na alimentação que se encaminha ao "underflow", %.
- Rv = recuperação de sólidos em volume, ou a fração volumétrica de sólidos contida na alimentação que se encaminha ao "underflow".
- si = limite inferior de uma classe de tamanho de partículas, em  $\mu\text{m}$ .

- $s_{i+1}$  = limite superior de uma classe de tamanho de partículas, em  $\mu\text{m}$ .
- $S$  = razão da vazão volumétrica do "underflow" sobre a vazão volumétrica do "overflow", adimensional.
- $u_i$  = frequência da classe de tamanhos  $i$  no "underflow" do ciclone, %.
- $U$  = vazão de sólidos no "underflow" do ciclone, em t/h.
- $v_t$  = componente tangencial da velocidade da água no interior do ciclone, em m/s.
- $v_r$  = componente radial da velocidade da água no interior do ciclone, em m/s.
- $v_o$  = componente tangencial da velocidade da água na entrada do ciclone, em m/s.
- $v_i$  = velocidade da polpa na entrada do ciclone, em m/s.
- $x_s$  = valor da abscissa do ponto em que a curva padrão de partição intercepta a reta que determina partição igual a 100%, adimensional.
- $x_p$  = valor da abscissa do ponto em que a curva padrão de partição intercepta a reta que determina partição nula, adimensional.
- $x_i$  = quociente da divisão do diâmetro da partícula pelo diâmetro mediano de separação corrigido, adimensional
- $x$  = expoente de magnitude desconhecida, adimensional.
- $\sigma$  = fator relativo a  $c$ , adimensional
- $\alpha$  = coeficiente de eficiência de separação, adimensional.
- $\mu$  = viscosidade do fluido em suspensão, em centipoise.
- $\rho_s$  = densidade do sólido, em g/cm<sup>3</sup>.
- $\rho_f$  = densidade do fluido, em g/cm<sup>3</sup>.
- $\rho_p$  = densidade da polpa, em g/cm<sup>3</sup>.
- $\psi$  = fração mássica de partículas leves, %.

# = malha da escala Tyler.

## 1. INTRODUÇÃO

Historicamente, foi em meados da década de 60 que surgiram os primeiros modelos matemáticos aplicados com sucesso na análise e/ou otimização de operações unitárias de processamento de minérios. A difusão do uso de computadores, nesse cenário, foi um fator decisivo para que houvesse uma busca cada vez maior de equações representativas de performance.

A operação de classificação recebeu, particularmente, muitas atenções de pesquisadores preocupados em sua descrição quantitativa, já que a análise granulométrica de uma população de partículas em tempo real, pode ser uma eficiente ferramenta de controle nas diversas etapas de um determinado processo.

Os modelos matemáticos apresentados podem ser divididos em duas classes distintas: fenomenológicos e empíricos.

Os fenomenológicos caracterizam-se pela descrição do processo em termos de taxas médias de mudanças das variáveis sob controle. Conceitos como balanço populacional e mássico, aplicados a níveis microscópicos, são a base de modelos criados nessa linha.

Modelos empíricos são assim chamados pois partem de dados operacionais levantados experimentalmente em escala de bancada, piloto ou mesmo industrial. Uma vez reunidos, os dados geram correlações (geralmente através do emprego de técnicas de regressão) que fazem associar parâmetros de performance do processo a variáveis operacionais. Por este motivo, a aplicação de modelos de natureza empírica, quer em controles otimizantes, quer na previsão de resultados, exige necessariamente uma etapa inicial de adequação das equações à operação específica que se deseje estudar.

Os trabalhos publicados por PLITT (1) e LYNCH & RAD (2) são bons exemplos da maneira como dados coletados a partir de extensos trabalhos experimentais geraram correlações empíricas entre parâmetros básicos de avaliação de performance em seus modelos e variáveis de operação, seja referentes à geometria do equipamento, seja relativas ao processo. Essas correlações constituem-se nos modelos matemáticos gerais mais utilizados de operação de ciclones, envolvendo análise, simulação digital, engenharia de projetos e como base de estimação de distribuições granulométricas em operações integradas de controle de processo em usinas de tratamento de minérios.

Embora estes modelos tenham alcançado grande sucesso, as tentativas de desenvolvimento de equações abrangentes a amplas faixas de valores das variáveis de processo, tipos de equipamentos, ou mesmo características físicas de minérios, revelaram-se ineficazes.

Como conseqüência, tais modelos são bastante restritos às condições sob as quais foram desenvolvidos, o que limita sobremaneira o seu potencial de aplicação. Isto deve ser creditado ao fato de não se levar em conta, nesta linha de abordagem, a natureza do fenômeno, mas somente os efeitos de alterações nas variáveis sob controle.

Visando viabilizar a aplicação de modelos empíricos existentes a situações significativamente distintas daquelas para quais foram desenvolvidos, ou ainda aumentar o grau de precisão de resultados obtidos em aplicações consagradas, este trabalho propõe uma técnica de ajuste que tem por objetivo uma maior adequação de tais modelos em ambientes específicos mediante a melhor reprodutibilidade das características físicas intrínsecas dos minérios que participam do processo.

As equações linearizantes de parametrização de curvas padrão de partição, utilizadas como ponto de partida em modelos matemáticos empíricos de operação de ciclones, apesar da relativa facilidade que proporcionam na obtenção de índices de performance do processo, mostram-se inadequadas para representar operações com minérios heterogêneos, sob o ponto de vista das características físicas de seus minerais constituintes.

A partir desta constatação, corroborada por diversos autores, é proposta, uma técnica de parametrização de curvas padrão de partição, que permite preservar os efeitos das peculiaridades do tipo de minério objeto de estudos, e conseqüentemente melhor calibrar o modelo matemático.

Evita-se assim a obrigatoriedade imposta por Plitt, de que a equação de Rosin-Rammler seja a expressão algébrica de qualquer curva de partição, qualquer que seja o tipo de minério.

Amplia-se ainda mais o espectro de possíveis aplicações desta técnica particular ao observar-se que outros autores de modelos empíricos de operação de ciclones, têm como ponto de partida a parametrização de curvas de partição segundo determinados modelos de equacionamento conhecido ou mesmo curvas típicas ("cozinhamento" de curvas).

Inicialmente serão abordados conceitos gerais relativos ao processo de classificação, situando a importância dos ciclones no atual estágio evolutivo do tratamento de minérios. A seguir são descritos e analisados criticamente os modelos matemáticos de operação de ciclones e os ajustes propostos por diversos autores.

Na seqüência é apresentado o ajuste proposto por nós e a arquitetura de um sistema computerizado completo, que engloba as fases de tratamento de dados, cálculo da curva padrão de partição, parametrização desta segundo a técnica proposta e

segundo uma outra técnica proveniente de um modelo consagrado, além de poder compor curvas padrão de partição médias de uma série de ensaios.

O sistema conta ainda com uma parte destinada à simulação de performance de processos de classificação.

Ao final é apresentada a parte experimental, cuja intenção é reunir elementos para análise comparativa das vantagens conseguidas referentes à adoção do método proposto em relação à aplicação de um modelo tal como originalmente formulado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Classificação. Conceitos, Definições e Curvas de Partição.

O termo classificação, quando utilizado no âmbito do tratamento de minérios, designa a operação unitária que objetiva a separação de populações de partículas minerais em classes de tamanho. Esta separação ocorre, em equipamentos especializados, mediante o efeito de sedimentação diferencial que as partículas apresentam em um meio fluido, geralmente a água.

Como consequência a classificação pode ser aplicada, sem se limitar, às seguintes situações:

(a) Separação de uma população de partículas minerais, com dada distribuição granulométrica, em frações relativamente finas e grossas;

(b) Separação de populações de partículas minerais que apresentem ampla distribuição granulométrica, em frações discretas;

(c) Limitação na distribuição de partículas para alimentação de etapas posteriores de concentração, e

(d) Controle de circuitos de moagem.

A escolha do equipamento a ser empregado em cada aplicação é determinada por parâmetros operacionais deste, frente às características físicas das partículas que se deseja classificar. Muito embora o tamanho seja a principal, outras características físicas das partículas minerais, tais como forma e densidade, têm influência significativa em processos desta natureza.

Assim sendo, minérios formados por minerais com grande amplitude de variação em tais características tecnológicas, geralmente apresentam comportamentos anômalos em relação a minérios

homogêneos.

A maneira clássica de representação de resultados de operações de classificação é através da curva de partição, ou curva de Tromp. Trata-se de um diagrama onde são lançados em ordenadas, os valores de partição (fração da alimentação encaminhada ao fluxo de saída de partículas grossas, denominada "underflow") e em abscissas os diâmetros médios das diversas classes granulométricas consideradas. A curva de partição representa portanto, a distribuição de probabilidades de partículas alcançarem o "underflow", em uma dada operação.

Visando manipular algebricamente curvas de partição, é prática comum a utilização de pelo menos dois parâmetros, os mais empregados são:

- a abscissa do ponto da curva cuja ordenada é igual a 50%, recebe a denominação de diâmetro mediano de partição ou d50. Decorre da definição acima que a fração de partículas da alimentação cujo diâmetro é igual a d50, têm iguais probabilidades de se encaminhar a qualquer um dos dois produtos.

- um segundo parâmetro, relacionado com a eficiência do processo de separação. Geralmente é associado à inclinação da curva de partição, tal como o proposto por TRAWINSKI (3), que o denominou de imperfeição, definido por:

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2 \cdot d_{50}} \dots\dots\dots 1$$

Ou seja, o parâmetro I representa o coeficiente angular da reta que une os pontos cuja partição é de 25% e 75%. Quanto maior o valor de I, mais eficiente é o processo. Vários são os autores que propuseram parametrizações mais precisas de curvas de partição, visando sua representação através de uma função

matemática em aplicações específicas.

Como o objetivo final da classificação é a separação por tamanhos, tornou-se prática comum a referência a um ponto particular da operação que pudesse quantificar com precisão em que tamanho de partícula se dá a separação. Este parâmetro é o diâmetro de corte.

Um exame na literatura básica sobre processos de classificação, revela que o termo diâmetro de corte ou tamanho de separação é empregado para medir grandezas físicas diferentes de acordo com as várias definições propostas. Esse fato vem gerando confusão entre os engenheiros de processos, já que é através deste termo que a maioria dos processos de classificação são quantificados.

Segundo TARR (4) o termo "tamanho de separação" foi empregado inicialmente por profissionais ligados ao processamento de minérios e fabricação de equipamentos, como sendo numericamente igual ao tamanho de partícula cuja fração retida na análise granulométrica do "overflow" situava-se entre 1% e 3%. Esta definição ainda hoje é utilizada em muitos setores do tratamento de minérios.

Ainda segundo TARR (4), devido à tendência de partículas de baixa densidade encaminharem-se ao "overflow", a definição acima deixou de ser empregada, exceto em situações onde os dados fossem normalizados. O autor afirma ainda que a maneira mais confiável e menos susceptível a erros de se definir o diâmetro de corte consiste em medir-se o tamanho cuja fração retida na análise granulométrica do "overflow", esteja entre 10% e 20%.

Nos últimos quinze anos houve uma tendência de uso da terminologia  $d_{50}$ , porém este parâmetro não deve ser confundido com o diâmetro de corte, já que ambos representam conceitos bastante

distintos.

Observa-se, em praticamente qualquer sistema de classificação, que a curva de partição não passa pela origem do gráfico. São inúmeros os autores que investigaram as causas de tal fenômeno, procurando associá-lo a mecanismos inerentes ao processo. Porém há um consenso, baseado no conceito inicialmente proposto por FAHLSTROM (5), quanto à definição de duas classes de partículas presentes no "underflow" de um processo de classificação, responsáveis por este comportamento da curva de partição, ou seja: uma fração resultante do produto da ação das forças que efetivamente promovem o processo de classificação e uma segunda fração que não sofreu ação destas forças, denominada de "curto-circuito" ou "bypass".

Generalizando-se os conceitos acima apresentados, pode-se afirmar que em um processo de classificação ocorrem dois fenômenos distintos:

(a) Uma certa fração dos sólidos presentes na alimentação do classificador fica sujeita ao processo de classificação, e sua separação depende exclusivamente do conjunto de características físicas das partículas minerais, no que influenciem na resultante das forças que sobre elas atuam;

(b) A fração remanescente não sofre ação das forças efetivas do processo de classificação e sua separação depende de outros mecanismos.

A Figura 2.1 apresenta, segundo KELLY & SPOTTISWOOD (6) uma curva de partição típica de um processo genérico de classificação. É interessante observar nesta figura a representação gráfica de partículas minerais correspondentes a parcela "bypass" da curva.

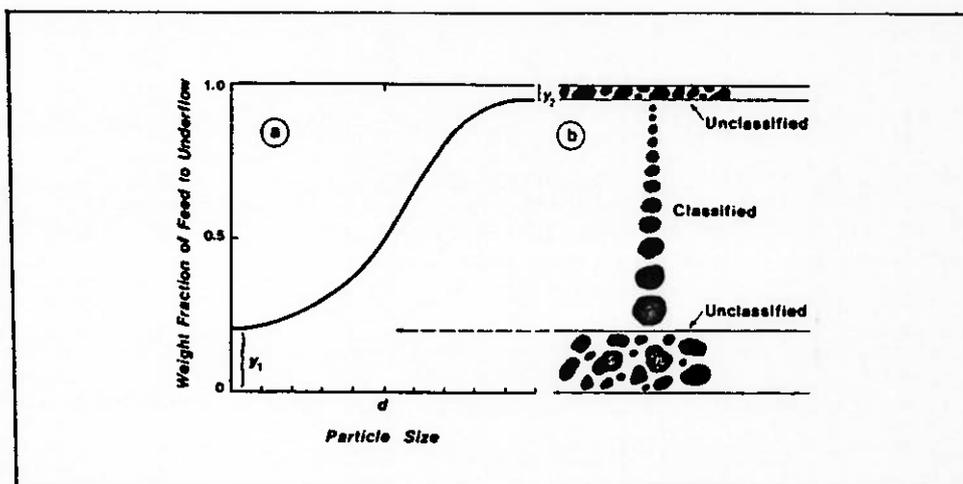


Figura 2.1 Forma característica de uma curva de partição típica de um classificador. (Segundo KELLY & SPOTISWOOD (6)).

Dado que a parcela "by-pass" pode apresentar grandes variações em sua magnitude em função de condições específicas da operação, é comum o emprego de técnicas que objetivam excluir estas frações dos valores de partição calculados a partir de dados experimentais, obtendo-se os assim chamados valores de partição corrigida, que gerarão a curva de partição corrigida, conforme mostra a Figura 2.2, que descreve apenas o fenômeno real de classificação, excluindo o "by-pass".

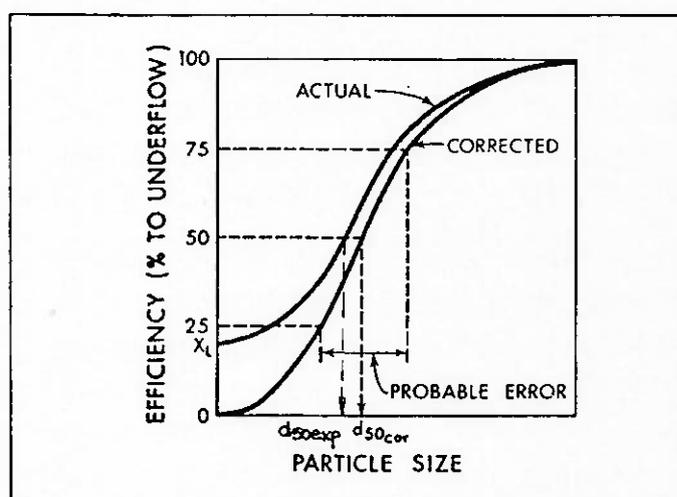


Figura 2.2 Curvas de partição real e corrigida. (Segundo PLITT (7)).

Observam-se nesta figura os valores do parâmetro  $d_{50}$  para a curva de partição experimental e a curva de partição corrigida,  $d_{50exp}$  e  $d_{50cor}$  respectivamente. A curva assinalada como experimental mostra os valores de classificação granulométrica e cálculos de balanço de massas tais como obtidos em condições experimentais.

As tentativas de pesquisadores como Plitt e Lynch & Rao em generalizar os modelos matemáticos de operação de ciclones, via obtenção de parâmetros para tal fim, identificaram a técnica proposta por YOSHIOKA & HOTTA (8) em 1955 como a mais conveniente. Esta técnica consiste na obtenção da chamada curva padrão de partição (nomenclatura adotada por ANDERY, CHAVES & PÓVOA (9)), mediante a divisão dos valores de tamanho, contidos no eixo das abscissas da curva de partição, pelo parâmetro  $d_{50cor}$ , obtendo-se assim o adimensional  $d_i/d_{50cor}$ . A Figura 2.3 mostra um exemplo de curva padrão de partição assim obtida.

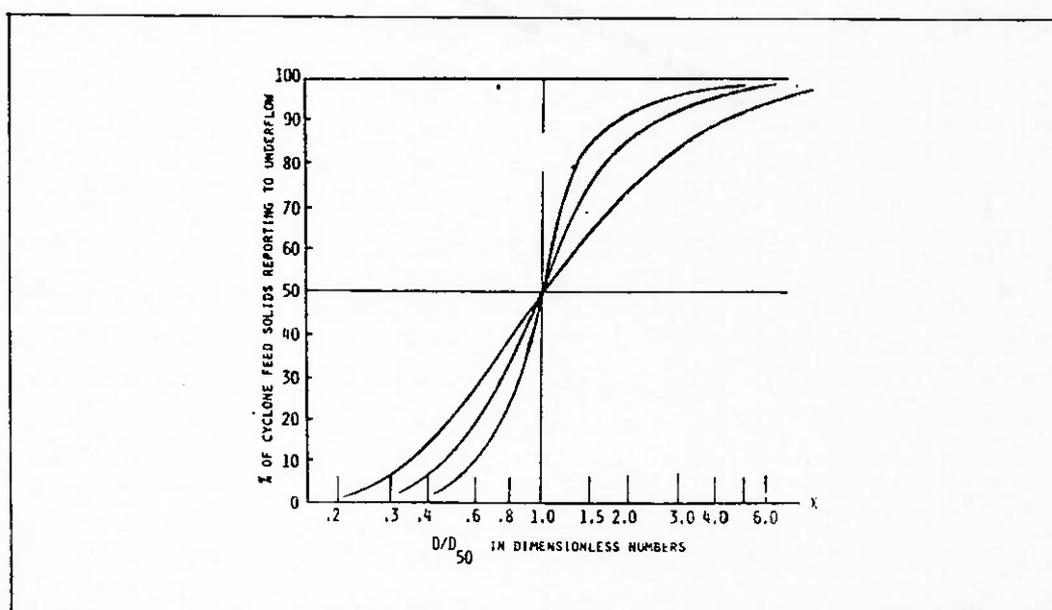


Figura 2.3 Exemplos de curvas padrão de partição. (Segundo TARR (4)).

Esta curva apresenta a peculiaridade, segundo Lynch, de independe das variáveis geométricas do ciclone no qual se realiza a operação, sendo portanto função exclusiva das características do minério frente ao processo.

## 2.2 Parametrizações de Curvas de Partição.

Decorre do conceito estabelecido por Fahlstrom, anteriormente apresentado, a definição de duas funções em operações reais de ciclones: função "classificação" ( $c$ ) e função "by-pass" ( $r$ ).

A Figura 2.4 mostra uma análise feita por PLITT, TURAK & FLINTOFF (10) de duas situações distintas entre as funções apresentadas, ou seja:

- (a) "by-pass" de sólidos da alimentação para o "underflow",
- (b) "by-pass" de partículas que deveriam ter sido encaminhadas para o "overflow" mas foram para o "underflow".

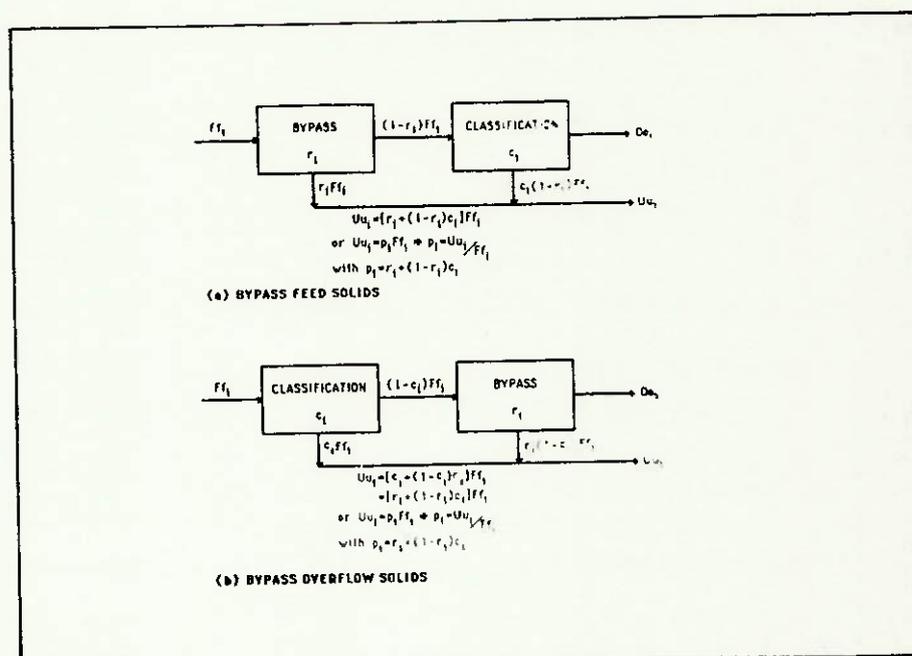


Figura 2.4 Operação de classificação. (Segundo PLITT, TURAK & FLINTOFF (10)).

Da análise das equações de balanço material, apresentadas em cada uma das duas partes da Figura 2.4, fica claro que não existem diferenças entre os resultados apresentados, já que a equação apresentada abaixo é comum às duas alternativas.

$$\frac{U \cdot u_i}{F \cdot f_i} = p_i = r_i + (1-r_i) \cdot c_i \quad \dots\dots\dots 2$$

A grandeza  $p_i$  definida acima é chamada partição, ou a fração da alimentação de sólidos da classe de tamanhos  $i$  que é conduzida ao "underflow" do classificador.

Cabe observar que o uso da equação 2, indica ser necessário quantificar as funções "by-pass" e "classificação" para a descrição completa do processo.

A quantificação de tais funções, em modelos empíricos, é também de natureza empírica, já que é a partir de dados experimentais, que são formuladas as equações matemáticas representativas do processo.

### 2.2.1 Modelos da Função "By-Pass".

A função "by-pass" merece uma análise mais profunda, uma vez que está associada a praticamente todas as operações industriais de classificação, sendo portanto fundamental sua quantificação para a construção de modelos do processo.

KELSALL (11) sugeriu que a fração que não sofre ação de classificação é diretamente proporcional a fração da água alimentada que é encaminhada para o "underflow" do ciclone, ou seja:

$$r_i = R_f \quad \dots\dots\dots 3$$

Esta é sem dúvida a aproximação mais utilizada para a quantificação da função "by-pass", certamente corroborada pelo fato que a partição de água é de fácil mensurabilidade, e porque as partículas finas se distribuem na água de forma a constituir uma polpa homogênea, de modo que a sua partição é aproximadamente a mesma da água.

AUSTIN & KLIMPEL (12) publicaram um trabalho onde argumentam que a polpa adensada nas cercanias das paredes do ciclone age como um filtro às partículas que nela penetram carregadas pela água. Portanto não é surpresa que sempre haja uma fração de classe  $i$  de tamanhos que é conduzida ao "underflow", não havendo porém, razão lógica para que tais frações em quaisquer circunstâncias sejam iguais à partição de água.

Em termos matemáticos estes pesquisadores assumiram que:

$$x_i = a \dots\dots\dots 4$$

A teoria apesar de ser consistente do ponto de vista experimental, ainda não conta com dados estatísticos suficientes para poder ser utilizada. No âmbito da modelagem de processos, a aplicação de tal teoria traria consigo a necessidade de correlacionar a constante  $a$  às variáveis de operação.

FINCH (13) e FINCH, LAPLANTE & VILLAR (14) sugerem também um novo modelo para a função "by-pass", que procura solucionar o fato de que curvas de partição apresentam esporadicamente comportamentos anômalos do tipo "perfil anzol", até então atribuídos a erros experimentais e/ou aglomeração de finos às partículas grosseiras. Por analogia a modelos de processos de concentração por flotação, FINCH (13) postula que o "by-pass" é uma função decrescente com o aumento do tamanho das partículas. Afirma ainda que

para partículas muito finas o "by-pass" aproxima-se bastante do valor de  $R_f$ .

Apesar de não contar com dados experimentais suficientes para comprovação prática, o autor sugeriu um modelo linear para o fenômeno conforme as equações abaixo:

$$r_i = R_f \cdot (1 - d_i/d_o) \quad , \text{ se } d_i < d_o \quad \dots\dots\dots 5$$

$$r_i = 0 \quad , \text{ se } d_o \leq d_i \quad \dots\dots\dots 6$$

Concluindo, parece claro que o fenômeno é mal conhecido, e apesar de esforços terem sido feitos no sentido de contestar o modelo apresentado por Kelsall, as tentativas nesse sentido carecem ainda de comprovação. Enquanto não se obtêm resultados conclusivos de tais estudos a equação 3 continua sendo utilizada e mostra-se coerente no tratamento de dados relativos a minérios homogêneos. Entretanto, no caso de minérios heterogêneos, onde o efeito das densidades altera sobremaneira os valores de "by-pass", é necessário o melhoramento da modelagem deste fenômeno e os modelos disponíveis não podem ser usados indiscriminadamente.

### 2.2.2 Modelos da Função "Classificação".

O objetivo da definição da função "by-pass" no ítem anterior, é a determinação, em cada uma das classes granulométricas, da fração que efetivamente sofre a ação do processo de classificação, definindo a partição corrigida. Para cálculo da partição corrigida, é necessário então, subtrair-se do valor da partição observada a parcela referente ao valor da função "by-pass".

A Figura 2.2 anteriormente apresentada mostra um exemplo de

curva de partição experimental e a correspondente curva de partição corrigida, segundo a aplicação do modelo de Kelsall para o "by-pass".

A experiência tem mostrado que os complexos mecanismos de classificação podem ser razoavelmente representados através de regressões assimiladas a funções matemáticas, as mais usadas sendo apresentadas abaixo com os respectivos autores:

Soma Exponencial, LINCH & RAD (2)

$$c_i = \frac{e^{\alpha \cdot x_i} - 1}{e^{\alpha \cdot x_i} - e^{-\alpha} - 2} \dots\dots\dots 7$$

Rosin-Rammler, PLITT (1)

$$c_i = 1 - e^{-\ln 2 \cdot x_i^M} \dots\dots\dots 8$$

Logístico, LILGE & PLITT (15)

$$c_i = \frac{1}{1 + (1/x_i)^M} \dots\dots\dots 9$$

Todas as funções acima mostradas são monotônicas, já que os valores da função "classificação"  $c$ , crescem com o aumento dos tamanhos de partículas, representados pelo parâmetro  $d_i$ .

A escolha do tipo de fórmula para representar o fenômeno de classificação depende da adequação às características de cada minério.

Combinando as equações 2 e 3 com a equação 8 para descrever

matematicamente um processo de classificação, obteríamos:

$$p_i = R_f + (1 - R_f) \cdot (1 - e^{-\ln 2 \cdot x_i^m}) \quad \dots\dots\dots 10$$

equação que representa a base do modelo proposto por Plitt.

A Figura 2.5 ilustra a aderência de valores experimentais ao modelo proposto pelas equação 10.

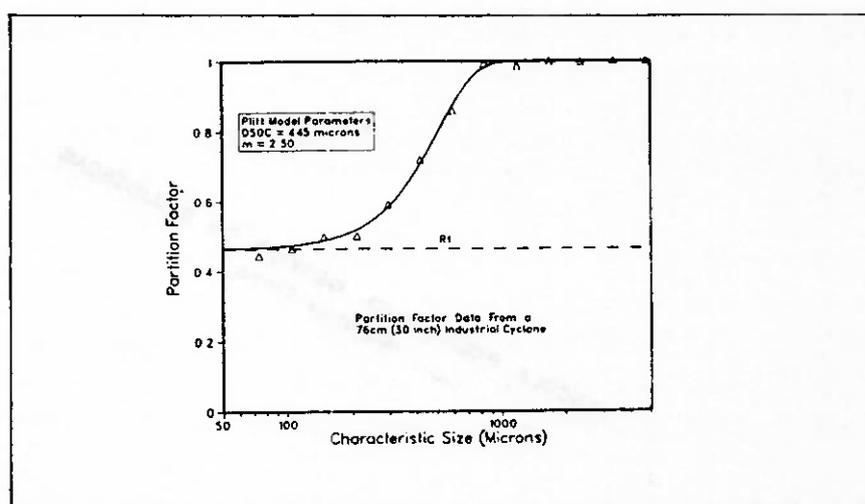


Figura 2.5 Curva de partição obtida segundo o modelo proposto por Plitt para uma série de dados experimentais. No quadro pode-se notar os valores dos parâmetros  $d_{50C}$  e  $m$  da equação 10. (Segundo PLITT, TURAK & FLINTOFF (10)).

### 2.2.3 Tamanho Característico de uma Classe de Partículas.

A propriedade ou "base", utilizada para determinar a quantidade de partículas em um intervalo granulométrico é bastante significativa, já que as partículas sólidas no caso são constituídas por minerais que podem apresentar grandes variações em suas características físicas. As propriedades geralmente utilizadas são: massa (ou volume), área da superfície,

algum comprimento (ou diâmetro) e o número de partículas.

A escolha mais adequada deve levar em consideração os objetivos da determinação e os recursos disponíveis para fazê-la.

Em virtude de ser operacionalmente mais conveniente na sua faixa de aplicação, a medida da massa é bastante usada em partículas compreendidas entre 45 e 5.000  $\mu\text{m}$ . Para dimensões maiores, são comuns as contagens diretas do número de grãos.

O tamanho característico de uma classe de partículas pode ser definido de várias maneiras. A análise granulométrica da alimentação bem como dos produtos de um classificador é feita em peneiras padronizadas, cuja série de aberturas segue sempre a razão  $\sqrt{2}$ .

Provavelmente as três maneiras mais comuns de se representar o tamanho característico de uma classe granulométrica  $d_i$  sejam:

Média Geométrica

$$d_i = \sqrt{s_i \cdot s_{i+1}} \quad \dots\dots\dots 11$$

Média Aritmética

$$d_i = \frac{s_i + s_{i+1}}{2} \quad \dots\dots\dots 12$$

Tamanho Máximo ("Top Size")

$$d_i = s_{i+1} \quad \dots\dots\dots 13$$

Como cada uma das três formas de cálculo apresentadas acima preserva a razão  $\sqrt{2}$  entre os tamanhos característicos das diversas classes granulométricas individuais, todas são equivalentes,

embora os valores obtidos do parâmetro  $d_{50}$ , segundo cada equação, seja diferente. PLITT (7) entende que a equação 11 é a que melhor representa o tamanho característico de uma classe de partículas.

#### 2.2.4 Estimação de Parâmetros.

Uma vez obtidos os dados experimentais através de cuidadosa amostragem e análise, bem como o ajuste dos dados efetuado por alguma técnica de fechamento de balanço de massas, o próximo passo seria o ajuste de um modelo matemático de curva de partição aos valores experimentais de partição.

A equação 2 é uma tentativa de expressão das duas situações apontadas acima, ou:

$$p_{imed} = \frac{U \cdot u_i}{F \cdot f_i} \quad \dots\dots\dots 14$$

$$p_{icalc} = r_i + (1-r_i) \cdot c_i \quad \dots\dots\dots 15$$

Ou seja, os dados experimentais  $U$ ,  $F$ ,  $u_i$  e  $f_i$  são utilizados no cálculo da partição medida, assim como  $r_i$  e  $c_i$  são utilizados no cálculo teórico dos diversos valores  $i$  de partição  $p_i$ . Tais valores devem portanto ser selecionados para que as duas equações acima sejam equivalentes. Este exercício de ajuste é chamado estimação de parâmetros.

Não abordaremos as diversas técnicas consagradas para este tipo de operação, por não fazer parte do escopo deste trabalho.

### 2.3 Ciclones.

Intensamente utilizados desde 1890, pela simplicidade de sua construção além da grande versatilidade operacional que apresentam, os ciclones têm sido empregados nos mais variados ramos da indústria, principalmente como equipamentos promotores de separações líquido-líquido, sólido-líquido ou sólido-sólido.

Em particular, no tratamento de minérios, as separações sólido-sólido cobrem a maior parte do espectro de utilizações. A prática operacional acarretou uma divisão no campo de utilizações de ciclones em duas áreas especializadas, que são:

(a) Separação de acordo com o tamanho dos minerais, ou classificação;

(b) Separação de acordo com a densidade dos minerais, ou "sorting".

O largo emprego de ciclones como elemento de controle sobre distribuições granulométricas de populações de partículas minerais em circuitos de moagem, preparação de polpas mediante a eliminação das lamas nocivas ao processo de flotação, ou mesmo no tratamento de rejeitos de usinas de beneficiamento, revela ser a classificação a aplicação mais difundida.

Em operações de classificação relativas a circuitos fechados de moagem, os ciclones são os equipamentos mais empregados e segundo BERALDO (16) apresentam as seguintes vantagens em relação a outros tipos de classificadores:

- grande capacidade em relação ao seu volume e à área ocupada, fazendo com que estes equipamentos sejam os preferidos em instalações de grande capacidade;

- controle operacional relativamente simples; operação mais ou menos estável;

- menores custos de investimento se comparados a outros tipos de classificadores para a mesma operação;

- alta disponibilidade, uma vez que é comum a presença em instalações industriais de unidades "stand-by" devido ao baixo preço e pequeno volume ocupado.

Ainda segundo BERALDO (16), são as seguintes as desvantagens apresentadas por ciclones:

- não apresentam efeito regulador de modo a absorver oscilações operacionais de curtos períodos, devido ao seu pequeno volume;

- são mais susceptíveis do que os classificadores mecânicos a apresentar grossos no "overflow" devido a sobrecargas de apex em função de oscilações de alimentação;

- exigem sistema de controle mais sofisticado;

- os custos operacionais tendem a ser mais elevados em função da abrasividade do minério.

Apesar de a classificação geralmente objetivar a separação de partículas por tamanho, a densidade, assim como outras características físicas dos minerais tem também influência significativa na operação, melhor identificada como "sorting" do que como "sizing".

Embora seja um equipamento simples do ponto de vista construtivo e operacional, os mecanismos envolvidos na separação de partículas em seu interior são de grande complexidade, não sendo ainda totalmente conhecidos.

Os estudos básicos acerca da quantificação dos fenômenos físicos atuantes na operação de ciclones seguem atualmente as linhas teórica e empírica. Com o advento dos computadores a solução numérica de equações fluidodinâmicas complexas, fez com que surgisse nos últimos anos grande interesse pela modelagem teóri-

ca. BOYSEN & SWITHENBANK (17) bem como PERICLEOUS, RHODES & CUTTING (18) são exemplos de pesquisadores que seguiram esta tendência.

Embora não se possa negar sua potencialidade, deve-se reconhecer que muito tempo vai se passar até que este tipo de abordagem possa ter aplicações práticas na tecnologia de projeto e construção de ciclones.

A Figura 2.6 apresenta uma ilustração de um ciclone típico, onde são mostradas as principais variáveis geométricas, tal como proposto por BRADLEY (19).

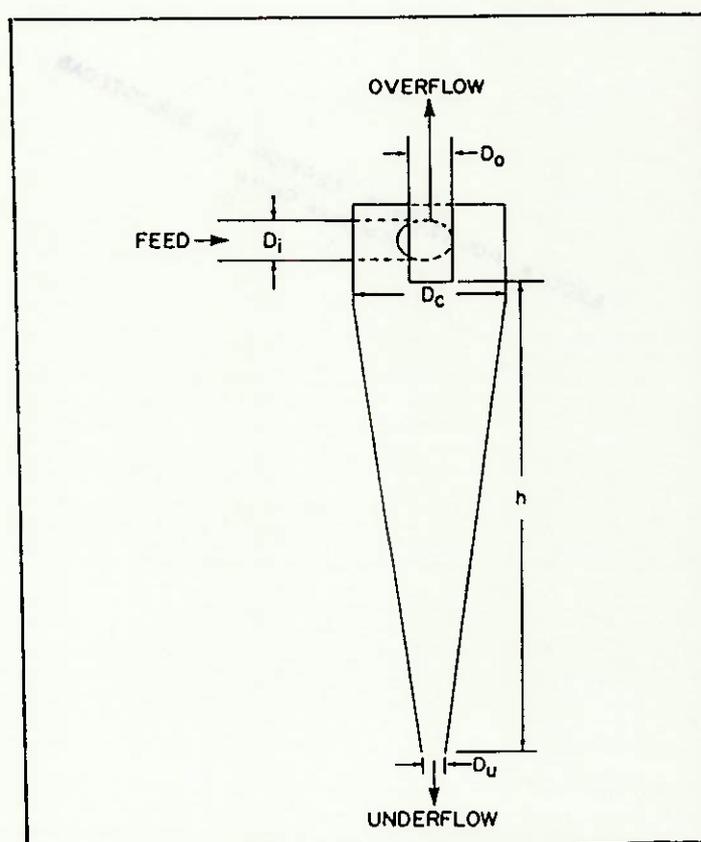


Figura 2.6 Principais parâmetros geométricos de um ciclone. (Segundo BRADLEY (19)).

Como está mostrado na figura, a polpa é introduzida tangencialmente no equipamento através do bocal de alimentação,

onde através do movimento rotacional que a polpa passa a descrever, cria-se uma depressão, cujo efeito é o surgimento de um fluxo de ar ou vórtice ascensional no centro do ciclone.

Esta rotação resulta na imposição de uma aceleração centrífuga à polpa, e conseqüente exposição das partículas sólidas a um campo centrífugo. As características de sedimentação das partículas em tal regime são assumidas como dependentes de sua massa, densidade e forma. Assim, partículas grosseiras chegam até a parede, perdem velocidade e encaminham-se para o bocal do apex, sendo descarregadas como "underflow" do equipamento. As partículas finas, embora estejam sujeitas ao mesmo campo, não conseguem atingir às paredes porque o volume está ocupado pelas partículas grosseiras, sendo então capturadas pelo fluxo ascendente e saem pelo tubo do vortex ("vortex-finder") como "overflow".

As relações geométricas dos vários elementos do ciclone são tais que praticamente toda a água é eliminada do equipamento pelo vortex.

Para um minério homogêneo essa competição de forças tem por consequência a eliminação de água e partículas finas no "overflow" e a eliminação de um produto composto por partículas mais grossas com baixa diluição no "underflow". Por minério homogêneo entende-se uma distribuição contínua de tamanhos de partículas de mesma densidade e formas semelhantes.

Mediante a variação da força efetiva de separação, a classificação pode ser efetuada em vários estágios, gerando produtos intermediários ou classes de partículas.

A Figura 2.7 apresenta segundo LILGE (20) a distribuição de forças que atuam em pontos internos do ciclone.

Conforme se nota na figura, para quantificar o fluxo de polpa no interior do ciclone deve-se decompor a força atuante na partí-

cula sólida em três componentes: tangencial  $F_t$ , radial  $F_r$  e vertical  $F_v$ .

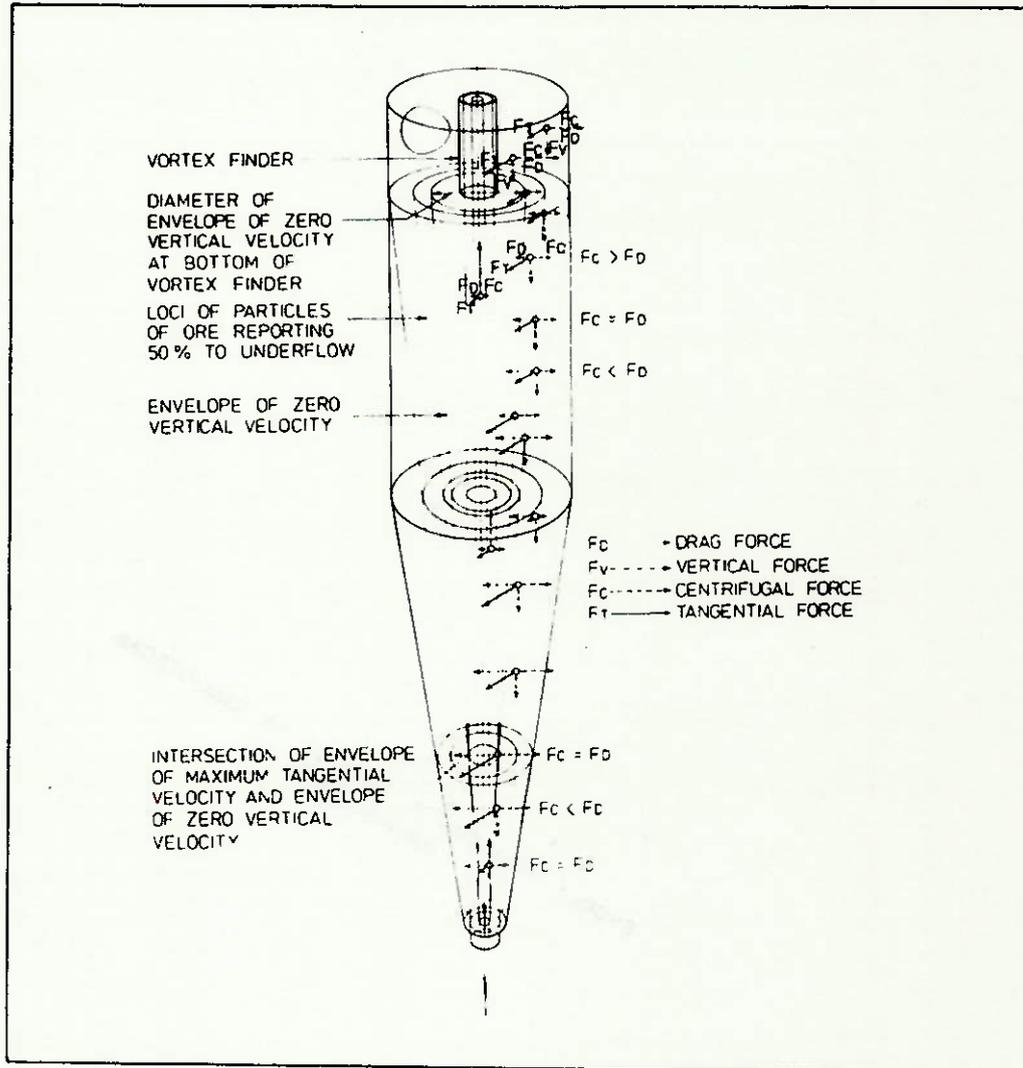


Figura 2.7 Determinação das componentes vertical, centrífuga, tangencial e arraste da força que age sobre as partículas sólidas em alguns pontos internos de um ciclone. (Segundo LILGE (20)).

KELSALL (11) utilizando-se de métodos óticos para análise destas componentes, obteve, conforme mostra a Figura 2.8, perfis das três componentes da velocidade do fluido, em diversos pontos internos de um ciclone, concluindo então que:

- abaixo do ponto inferior do "vortex-finder" as velocidades se distribuem segundo superfícies coaxiais ao ciclone

("envelopes");

- a velocidade tangencial  $v_t$  diminui com o aumento do raio de acordo com a relação  $v_t \cdot r^a = \text{constante}$ , até um limite onde a máxima velocidade é alcançada num ponto onde o raio é menor que o raio interno do ciclone, entretanto a relação modifica-se para  $v_t \cdot r = \text{constante}$  quando o raio diminui;

- a velocidade radial diminui com a diminuição do raio até que seja nula no fluxo ascensional central de polpa;

- um envelope cônico de velocidade vertical nula separa os fluxos ascendente ("overflow") e descendente ("underflow").

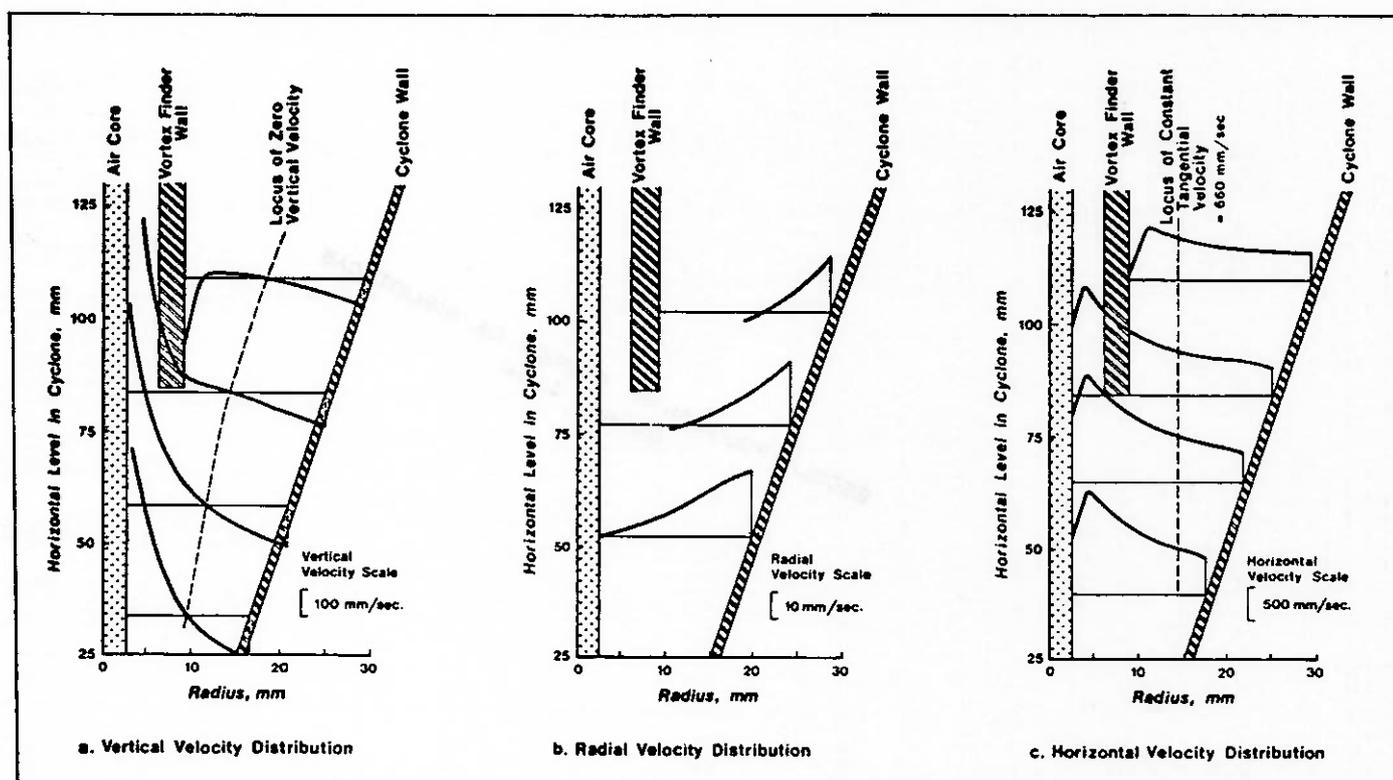


Figura 2.8 Distribuição das três componentes da velocidade em diversos pontos internos de um ciclone, sendo (a) vertical, (b) radial e (c) horizontal. (Segundo KELSALL (11)).

RIETEMA (21) sugeriu que o tempo de residência das partículas no interior do ciclone, desempenha um papel importante na eficiência de separação. O autor prossegue na proposição de um

modelo para cálculo de ciclones que desconsidera a sedimentação retardada como atuante no processo.

### 2.3.1 Relações Geométricas e Suas Influências na Operação.

O ciclone típico, guarda relações próprias entre as seguintes variáveis geométricas:

- (a) diâmetro do ciclone,
- (b) área do bocal de alimentação,
- (c) comprimento do vortex,
- (d) diâmetro do apex,
- (e) altura do corpo,

Segundo ARTERBURN (22) o parâmetro geométrico mais importante de um ciclone é o seu diâmetro, medido internamente à câmara cilíndrica de alimentação. O seguinte é a área da secção vertical do orifício de entrada (quando retangular, com o lado de maior dimensão paralelo ao eixo do ciclone). Normalmente a área de alimentação guarda a seguinte relação com o diâmetro do ciclone:

$$A_i = 0,05 \cdot D_i \quad \dots\dots\dots 16$$

A função do "vortex-finder" ou simplesmente vortex, é a de controle da separação assim como da partição de fluxos. Seu comprimento deve ser suficiente para evitar o curto-circuito da alimentação com o "overflow". A relação entre o comprimento do vortex e o diâmetro do ciclone é normalmente:

$$L_v = 0,35 \cdot D_i \quad \dots\dots\dots 17$$

A secção cilíndrica do ciclone está localizada entre a câmara

de alimentação e a secção cônica. É responsável pelo tempo de retenção dos sólidos no interior do equipamento e normalmente tem altura igual ao diâmetro.

A secção cônica, também é responsável pelo tempo de retenção, apresenta normalmente ângulo de inclinação com a vertical de 10 a 20 graus. No final deste elemento encontra-se o orifício do apex, por onde é descarregado o "underflow". O dimensionamento deste dispositivo deve prever um perfeito escoamento dos sólidos concomitantemente à formação do fluxo ascensional ou vórtice no seu centro. Normalmente situa-se na faixa:

$$0,10 \cdot D_i < D_u < 0,35 \cdot D_i \quad \dots\dots\dots 18$$

## 2.4 Modelos Matemáticos Empíricos de Operação de Ciclones.

### 2.4.1 Aplicações de Modelos de Ciclones.

As aplicações de modelos de ciclones são basicamente quatro, discutidas abaixo.

#### (a) Análise de Processo.

A performance de um determinado processo que envolva ciclones, pode ser quantificada fácil e rapidamente, mediante o emprego de um modelo que possibilite correlacionar variáveis de operação submetidas a sensoreamento a parâmetros que representem a qualidade do processo que se deseje controlar.

A análise de processo geralmente envolve a determinação de dois ou três parâmetros do modelo, a partir de dados experimentais. Esta estimativa permite a interpretação da operação do ciclone em termos das variáveis controladas. Um bom exemplo desta

aplicação é o trabalho de AUSTIN & KLIMPEL (12) sobre modificadores de viscosidade da polpa. O desenvolvimento de correlações como as de PLITT (1) ou LYNCH & RAD (2) são incluídas nesta categoria.

(b) Simulação.

É possível simular a performance de ciclones em várias e distintas condições operacionais em um dado sistema, pelo emprego de um modelo matemático. Pode-se desta maneira prever as condições de operação do equipamento mais adequadas para atender uma ou mais exigências de ordem técnica e/ou econômica do sistema.

O uso de modelos gerais de operação de ciclones em simulação de processos tem recebido considerável atenção nos últimos anos.

Provavelmente os melhores sistemas de simulação da operação de ciclones utilizados hoje na indústria mineral sejam o SPOC elaborados por PLITT & FLINTOFF (23) e o MODSIM desenvolvido por FORD & KING (24). Ambos foram arquitetados a partir do modelo proposto por Plitt.

(c) Projeto.

A arte de projetar ciclones é, em essência, um exercício de simulação de modelos onde, para se atingir os objetivos impostos pelo processo, são realizadas combinações entre variáveis independentes, compatíveis com as especificações comerciais existentes. Os modelos matemáticos permitem fazer correlacionar as principais variáveis independentes envolvidas, como por exemplo a geometria dos orifícios, com índices de desempenho do processo.

(d) Controle de Processo "On-Line".

O controle otimizante de uma operação unitária de processo, tem por objetivo maximizar um índice de desempenho, seja ele técnico ou econômico. De maneira geral as estratégias de controle

consistem em três aspectos principais:

1- Um modelo de processo calibrado a determinada operação, de modo a fazer corresponder um índice de desempenho que se deseje otimizar às variáveis de processo sob controle;

2- Elementos estimadores que produzam informações precisas sobre as variáveis controladas;

3- Um algoritmo otimizante que determine valores das vazões dos insumos manipulados, que resultem na performance máxima do processo.

O controle de processo "on-line" depende portanto da alimentação de informações sobre o sistema, o que é feito via sensores como medidores de tamanho de partículas, medidores de vazão, pressão, etc.; de um modelo matemático que seja capaz de fazer associar índices de performance a este conjunto de dados e enviar instruções a elementos decodificadores que atuarão no sistema de modo que este trabalhe sob a nova condição.

No caso específico da classificação, a maioria das aplicações resume-se a controlar o diâmetro de corte da operação.

#### 2.4.2 O Modelo de Lynch e Rao.

O modelo apresentado por LYNCH & RAO (2) foi baseado em um trabalho experimental levado a efeito pelos autores com ciclones Krebs de 15", 10", 6" e 4" de diâmetro, onde foram estudados os efeitos de variáveis geométricas, tais como diâmetros de vortex e apex, e operacionais, tais como partição, concentração de sólidos e vazões, no que influenciem a curva padrão de partição, partição de água, valor do  $d_{50cor}$  e vazão/pressão dos sistemas estudados. Um total de duzentos e vinte testes foram realizados.

A análise dos dados obtidos propiciou a construção, mediante o

emprego de técnicas de regressão, de equações formadoras de um modelo de operação de ciclones que, segundo os autores, pode ser utilizado em uma gama razoável de aplicações.

É importante ressaltar o fato de que inicialmente, os autores desenvolveram o modelo a partir de testes experimentais com calcário especialmente preparado para este fim. Posteriormente os trabalhos foram estendidos a minérios provenientes de operações reais.

Os autores afirmam que:

(a) Existe uma relação linear entre as vazões de água na alimentação e no "underflow", controlada pelo diâmetro do apex. A equação geral obtida foi a seguinte:

$$Rf = \frac{193,0 \cdot Du}{(1-Cv) \cdot Q} - \frac{271,6}{(1-Cv) \cdot Q} - 1,61 \quad \dots\dots\dots 19$$

(b) Para sistemas que envolvam grandes vazões, e que apresentem uma distribuição constante de tamanhos, é possível prever o valor do parâmetro  $d_{50cor}$ , a partir de ensaios em escala reduzida. A expressão geral obtida foi a que segue:

$$\log d_{50cor} = 0,04 \cdot Do - 0,0576 \cdot Du + 0,0366 \cdot Di + 0,0299 \cdot Cw - 0,0001 \cdot Q \quad \dots\dots\dots 20$$

(c) Apesar dos autores terem desenvolvido equações mais complexas, incluindo outras variáveis de processo importantes, a expressão abaixo é, segundo Lynch e Rao, adequada para representar a vazão de alimentação (capacidade) de ciclones, ou seja:

$$Q = 6,0 \cdot D_o^{0,73} \cdot D_i^{0,86} \cdot P^{0,42} \dots\dots\dots 21$$

Como conclusão do trabalho, Lynch e Rao afirmam que as equações apresentadas acima (19, 20 e 21) somadas à equação da curva padrão de partição, parametrizada conforme a equação 7, constituem um modelo adequado para simulação de operação de ciclones.

As variáveis envolvidas nas três equações apresentadas neste ítem (19, 20 e 21) seguem a simbologia original descrita no início deste trabalho, porém o sistema de unidades é em alguns pontos diferente, sendo mostrado a seguir.

Du, Do, Di em cm.

P em kPa.

Q em l/min.

#### 2.4.3 O Modelo de Plitt.

O modelo matemático empírico de operação de ciclones de PLITT (1) é sem dúvida o mais amplamente aceito e utilizado.

Partindo de um total de duzentos e noventa e sete experimentos realizados com minérios homogêneos por Lynch e Rao, bem como de outros pelo próprio autor, este procurou obter correlações entre a equação 10 e os parâmetros operacionais envolvidos. Uma larga faixa de variação destes parâmetros foi varrida, na tentativa de obter expressões bastante gerais que pudessem ser posteriormente aplicadas à maioria das operações de classificação de minérios. Deriva deste fato uma característica importante do modelo que é a sua aplicação direta, ou seja, não são necessários ensaios de calibração do modelo, desde que usado para aproximações.

No caso de se precisar de resultados mais acurados, as

equações foram formuladas de tal maneira que todas contam com constantes multiplicativas sendo portanto, de fácil e rápida a calibração para aplicações específicas. Havendo a necessidade de rigor extremo no que tange a resultados do modelo, este deve ser reformulado para adaptar-se à situação em questão. Deve-se observar que esta prática não é usual, porém se houver necessidade, as equações do modelo de Plitt permitem, da maneira como estão formuladas, alterações substanciais.

LUCKIE & KLIMPEL (25) mostraram recentemente que este modelo, não garante um balanço de massas consistente, em certas condições.

As quatro equações que compõe o modelo de Plitt são:

$$dS_{cor} = \frac{35,0 \cdot D_c^{0,46} \cdot D_i^{0,6} \cdot D_o^{1,21} \cdot e^{0,063 \cdot C_v}}{D_u^{0,71} \cdot h^{0,38} \cdot Q^{0,45} \cdot (p_s - p_f)} \quad \dots\dots\dots 22$$

$$S = \frac{2,9 \cdot (D_u/D_o)^{3,31} \cdot h^{0,54} \cdot (D_u + D_o)^2 \cdot 0,36 \cdot 0,0054 \cdot C_v \cdot e}{H^{0,24} \cdot D_c^{1,11}} \quad \dots\dots\dots 23$$

$$P = \frac{4,7 \cdot Q^{1,78} \cdot e^{0,0055 \cdot C_v}}{D_c^{0,37} \cdot D_i^{0,94} \cdot h^{0,28} \cdot (D_u + D_o)^2 \cdot 0,87} \quad \dots\dots\dots 24$$

$$n = e^{[(0,58 - 1,58 \cdot R_v) \cdot \left( \frac{D_c^2 \cdot h}{Q} \right)^{0,15}]} \quad \dots\dots\dots 25$$

com

$$R_f = \frac{[S/(S+1)] - R_s \cdot C_v}{(1 - C_v)}$$

..... 26

O autor assume que o "by-pass" mantém-se constante e numericamente igual a  $R_f$  para quaisquer pesos específicos dos sólidos, o que é uma opinião contestada conforme discutido anteriormente neste trabalho.

A equação 26 sugere que são necessárias várias iterações para o cálculo de  $R_f$ , uma vez que esta grandeza é função de  $R_s$ . PLITT (1) afirma que três iterações são suficientes para chegar-se a um valor estabilizado e adequado ao modelo.

## 2.5 Outros Modelos.

Segundo PLITT (1) para que se possa modelar empiricamente operações com ciclones na separação sólido-sólido, são necessários definir quatro parâmetros fundamentais, como função de variáveis geométricas e operacionais. Os parâmetros são :

- (a)  $d_{50cor}$ ;
- (b) Partição de fluxos entre o "underflow" e o "overflow";
- (c) Capacidade do ciclone; e
- (d) Um segundo parâmetro que possa, em conjunto com o  $d_{50cor}$ , definir a curva padrão de partição do sistema. Plitt chamou este parâmetro de eficiência da separação.

De posse das correlações correspondentes aos parâmetros acima apontados, é possível determinar, dadas as condições de operação, o balanço de massas completo assim como as distribuições granulométricas dos produtos.

Serão apresentadas nos ítems subseqüentes os principais modelos existentes, de natureza teórica ou empírica, para quantificação de cada um dos índices apontados acima.

## 2.5.1 Modelos para o Cálculo do Diâmetro Mediano de Partição.

### 2.5.1.1 Hipótese da órbita de Equilíbrio.

A maioria das equações fundamentais para o cálculo do ponto central de curvas de partição, são baseadas no conceito de órbita de equilíbrio. Segundo esta hipótese, formulada por LILGE (20), existe um lugar geométrico de pontos internos ao ciclone onde é nula a resultante das forças que atuam sobre as partículas num plano horizontal: a força de arraste e a força centrífuga.

A Figura 2.9, mostrada na página seguinte, ilustra esquematicamente as duas forças agindo sobre uma partícula sólida em um plano perpendicular ao eixo do ciclone, ou seja: a força centrífuga age na direção radial no sentido do centro para a periferia, contrariamente à força de arraste que tende a conduzir a partícula para o centro do ciclone.

Para uma partícula esférica, a resultante centrífuga pode ser expressa pela seguinte equação:

$$F_c = \frac{\pi \cdot d_i^3 \cdot (\rho_s - \rho_p) \cdot v_t^2}{6 \cdot r} \quad \dots\dots\dots 27$$

Dentro do regime laminar de fluxo, a força de arraste pode ser expressa por:

$$F_d = 3 \cdot \pi \cdot d_i \cdot \mu \cdot v r$$

..... 28

Na condição de equilíbrio das forças teremos :

$$F_c = F_d$$

..... 29

Substituindo-se as equações 27 e 28 na equação 29 e considerando a dimensão de tal partícula como  $d_{50}$ , teremos :

$$d_{50} = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot v r \cdot r}{(\rho_s - \rho_p) \cdot v^2}}$$

..... 30

O parâmetro  $r$  passa a representar o raio da órbita de equilíbrio.

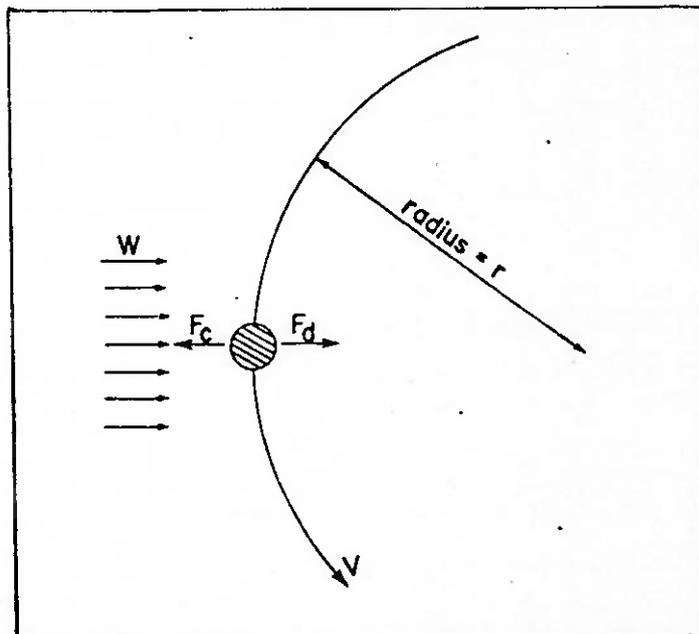


Figura 2.9 Forças que atuam sobre uma partícula sólida no interior de um ciclone. (Segundo PLITT (1)).

KELSALL (11) apresenta equações semi-empíricas desenvolvidas para as variáveis  $v_r$ ,  $v_t$  e  $r$ . Baseado em estudos próprios e no trabalho de Kelsall, LILGE (20) assumiu que a órbita de equilíbrio está localizada num envelope cujo raio é igual a um sexto do raio do ciclone. A Figura 2.9, apresentada anteriormente, mostra a distribuições das componentes radiais e verticais das velocidades da polpa desenvolvidas num ciclone. Essas componentes foram calculadas na condição de equilíbrio e expressas em termos de variáveis geométricas e operacionais por LILGE (20).

Substituindo-se essas relações na equação 30, o mesmo autor obteve o que chamou de "equação de força no cone", dada por:

$$d_{50} = 39 \cdot D_i^{0,87} \cdot D_c^{1,13} \cdot \left( \frac{1}{D_i/D_c} \right)^{-0,8} \cdot \sqrt{\frac{(1-Rv) \cdot \mu}{(\rho_s - \rho_f) \cdot Q \cdot h}} \quad \dots \dots \dots 31$$

Doutros autores como BRADLEY (19) chegaram a relações semelhantes para condições especificamente ensaiadas.

PLITT (1) observou que geralmente tais correlações subestimam os efeitos de alteração dos diâmetros dos orifícios do apex e/ou vortex.

#### 2.5.1.2 Hipótese do Tempo de Retenção.

Os adeptos da hipótese do tempo de retenção argumentam que o intervalo de tempo que as partículas ficam no interior do ciclone (1 ou 2 seg), é insuficiente para que a condição de equilíbrio seja atingida. Afirmam que, por conseguinte, o estudo da trajetória das partículas deva ser feito fora das condições de

equilíbrio.

RIETEMA (21), o maior defensor desta teoria, diz que se as partículas com diâmetro igual a  $d_{50}$  forem introduzidas no ciclone no centro da abertura de entrada, estas migrariam para a periferia, indo para o "underflow", caso permanecessem no interior do ciclone durante um intervalo de tempo maior do que o necessário para alcançar o orifício do apex. O pesquisador obteve a partir da lei de Stokes uma expressão para o  $d_{50}$ , como função de uma constante denominada "número característico do ciclone", que relaciona-se empiricamente com as variáveis dimensionais do ciclone.

#### 2.5.1.3 Teoria do Balanço Populacional.

Segundo FAHLSTROM (5), excetuando-se operações com polpas de baixa densidade, o  $d_{50}$  é função principalmente da capacidade de escoamento do "underflow" pelo orifício do apex, bem como da distribuição granulométrica da alimentação.

De acordo com esse pesquisador, a descarga de partículas grossas dá-se pelo "underflow" em condições limites de capacidade, sendo a fração de sólidos remanescente descarregada pelo "overflow". Para polpas diluídas ou grandes diâmetros de apex há ainda, segundo Fahlstrom, um tamanho de separação que é função do balanço de forças que atuam nas partículas. Este efeito pode ser observado na prática com pequenos diâmetros de apex. Esta hipótese deve ser considerada quando a percentagem de sólidos no "underflow" situar-se entre 40% e 50% em volume.

#### 2.5.1.4 Correlações Empíricas.

Existem inúmeros trabalhos de diversos autores que propõem equações empíricas de correlação entre o d50 e as variáveis operacionais.

BRADLEY (19) apresenta uma relação das principais correlações para cálculo do parâmetro d50 e seus respectivos autores, que reproduzimos na tabela 2.1 da página seguinte.

A última coluna apresenta, para efeito de comparação, a versão das equações, quando aplicadas a uma mesma condição operacional e expressas no mesmo sistema de unidades.

O autor continua sua análise, concluindo que a equação empírica mais adequada aos dados experimentais é a seguinte:

$$d_{50} = 4,5 \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot D_c^3}{(\rho_s - \rho_f) \cdot Q^{1,2}}} \quad \dots\dots\dots 32$$

As unidades da equação 32 são as mesmas apresentadas na última coluna da Tabela 2.1.

O fato mais interessante, segundo BRADLEY (19), neste trabalho, é que as quatro equações teóricas propostas para a situação apontada na última coluna, têm a seguinte forma:

$$d_{50} = 4,5 \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot D_c^3}{(\rho_s - \rho_f) \cdot Q^a}} \quad \dots\dots\dots 33$$

As diferenças são restritas à constante de proporcionalidade. Note-se também que a semelhança entre as equações 32 e 33, é mui-

Tabela 2.1 Correlações teóricas e empíricas para cálculo do parâmetro  $d_{50}$  em ciclones. (Segundo BRADLEY (19)).

Source	Size of cyclone ( $D_c$ )	Equation		Equation applied to a 9° cyclone with $D_t = D_c/7$ $D_o = D_c/5$ $Q$ in l./min, $D_c$ in cm, $\eta$ in cp, $\sigma - \rho$ in g/cm, and $d_{50}$ in $\mu$ .
		Form	Units	
<i>Theoretical</i> 1. Bradley	Any	$\frac{d_{50} \cdot D_c}{D_t^2} = \frac{3(0.38)^n}{\alpha} \left[ \frac{\eta \cdot D_c (1 - R_f)}{Q(\sigma - \rho)} \tan \frac{\theta}{2} \right]^{0.5}$ where $\alpha$ and $n$ are factors dependent on cyclone design and fluid properties. $\alpha$ is also dependent on $Q$	Dimensionless	$d_{50} = 4.1 \left( \frac{D_c^3 \cdot \eta}{Q(\sigma - \rho)} \right)^{0.5}$ using $\alpha = 0.45$ and $n = 0.8$
2. de Gelder	Any	$d_{50} = D_o \left[ \frac{0.35 \text{Re}(D_c - \zeta D_o)}{D_t} \left( \frac{\sigma - \rho}{\rho} - 1 \right) \right]^{-0.5}$ where $\text{Re} = \rho \cdot V_t \cdot D_c / \eta$ and $\zeta$ is a constant dependent on cyclone design	Dimensionally consistent	$d_{50} = 0.15 \left( \frac{D_c^3 \cdot \eta}{Q(\sigma - \rho)} \right)^{0.5}$
3. Rietema	Any	$\frac{d_{50}^2(\sigma - \rho) \cdot L \cdot \Delta p}{\eta \cdot \rho \cdot Q} = C_{Y_{50}}$	Dimensionless	$d_{50} = 14.6 \left( \frac{D_c^3 \cdot \eta}{Q(\sigma - \rho)} \right)^{0.5}$ Using an estimated value for $C_{Y_{50}} = 8.5$
4. Lilgè	Any	$d_{50} = \frac{\rho}{2(\sigma - \rho)} \frac{U_m^2 R_m}{V_m} \cdot C_D$ $V_m R_m^{0.8} = V_e R_e^{0.8}$ $V_e = 5.31 V_t (A_c/A_t)^{0.505}$ $U_m = \frac{316.6 \cdot Q \cdot (1 - R_f)}{D_c \cdot h}$	Dimensionally consistent	$d_{50} = 4.5 \left( \frac{D_c^3 \cdot \eta}{Q(\sigma - \rho)} \right)^{0.5}$
<i>Empirical</i> 5. Dahlstrom	9 in	$d_{50} = \frac{81(D_o \cdot D_t)^{0.68}}{Q^{0.53}} \left( \frac{1.73}{\sigma - \rho} \right)^{0.5}$ water flow in a 20° cyclone	$\mu$ , U.S. gal/min, in, gm/cm <sup>3</sup>	$d_{50} = 5.4 \left( \frac{D_c^{2.72} \cdot \eta}{Q^{1.03}(\sigma - \rho)} \right)^{0.5}$
6. Haas	0.16 in to 0.4 in	$d_{50} = 5.10^3 \left( \frac{D_c \cdot \eta}{(\sigma - \rho) H^{0.3}} \right)^{0.5}$ which by use of the equation of Haas for $H^{0.3}$ becomes: $d_{50} = 1.07 \cdot 10^3 \left( \frac{D_c^{3.05} \cdot \eta}{Q^{1.14}(\sigma - \rho)} \right)^{0.5}$	$\mu$ , in, lb/ft.sec, ft of fluid, lb/ft <sup>3</sup> $\mu$ , in, lb/ft.sec, U.S. gal/min, lb/ft <sup>3</sup>	$d_{50} = 1.8 \left( \frac{D_c^{3.05} \cdot \eta}{Q^{1.14}(\sigma - \rho)} \right)^{0.5}$
7. Yoshioka and Hotta	3 in to 6 in	$d_{50} = \frac{6.3 \cdot 10^8 \cdot D_c^{0.1} \cdot D_t^{0.6} \cdot D_o^{0.6} \cdot \eta^{0.5}}{(Q \cdot (\sigma - \rho))^{0.5}}$	$\mu$ , m, kg/m.sec, l./sec, kg/m <sup>3</sup>	$d_{50} = 4.2 \left( \frac{D_c^3 \cdot \eta}{Q(\sigma - \rho)} \right)^{0.5}$
8. Matschke Dahlstrom	10mm to 40 mm	$d_{50} = \frac{87.2(D_o \cdot D_t)^{0.63}}{Q^{0.6}} \left( \frac{1}{\sigma - \rho} \right)^{0.5}$ water flow in a 10° cyclone	$\mu$ , U.S. gal/min in, gm/cm <sup>3</sup>	$d_{50} = 5.0 \left( \frac{D_c^{2.4} \cdot \eta}{Q^{1.24}(\sigma - \rho)} \right)^{0.5}$

N.B. For  $D_c$  in inches and  $Q$  in Imp. gal/min, multiply the final column, Dahlstrom constant by 1.57 and the remainder by 1.9.

to grande, apesar das condições experimentais serem bastante distintas.

ARTERBURN (22) estabeleceu uma equação para cálculo do parâmetro  $d_{50cor}$ , com três fatores de correção, ou seja:

$$d_{50cor} = 2,84 \cdot D_c^{0,66} \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \quad \dots\dots\dots 34$$

O cálculo do  $d_{50cor}$  segundo a expressão acima fornece o ponto central da curva de partição de um ciclone (conforme especificado anteriormente) operando em condições pré-estabelecidas. A Figura 2.10 apresenta um gráfico onde se relacionam o diâmetro do ciclone e o  $d_{50cor}$  básico em  $\mu m$ .

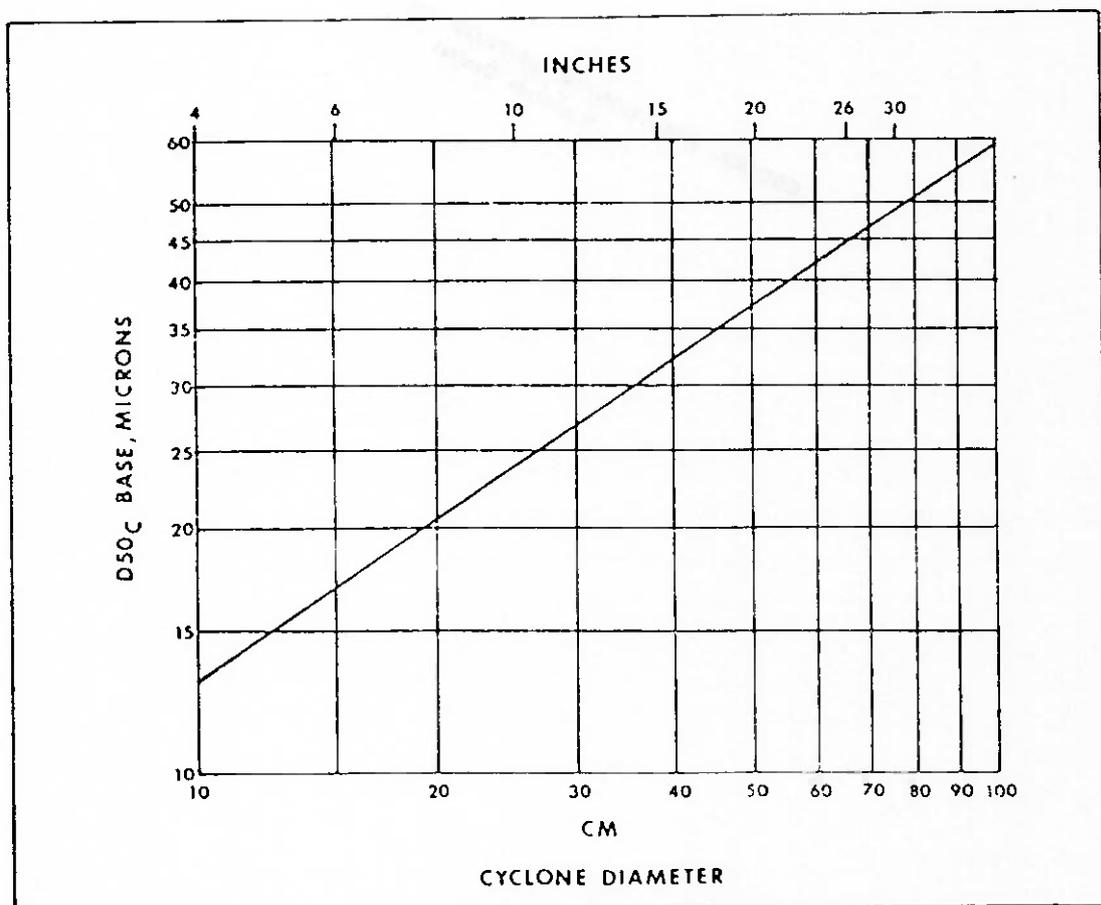


Figura 2.10 Diâmetro mediano de separação básico versus diâmetro do ciclone. (Segundo ARTERBURN (22)).

Os fatores C1, C2, e C3 são multiplicadores do d50cor básico, e levam em consideração situações distintas daquelas estabelecidas como padrão pelo autor para traçar a curva da Figura 2.10, através da variação das seguintes variáveis de processo:

- (a) diluição da polpa,
- (b) pressão de alimentação,
- (c) peso específico dos sólidos.

Assim teremos, conforme a Figura 2.11:

$$C1 = \left(53 - \frac{Cv}{53}\right)^{-1,43}$$

..... 35

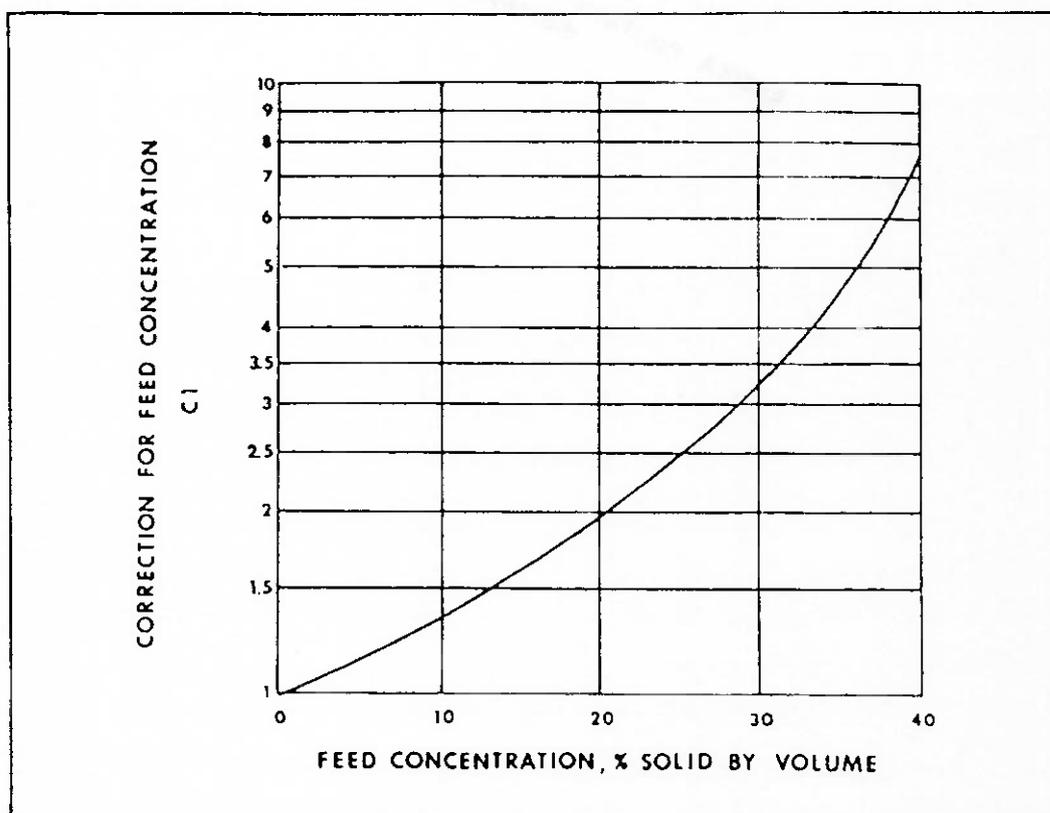


Figura 2.11 Fator de correção C1 da equação 35 versus concentração de sólidos em volume. (Segundo ARTERBURN (22)).

A Figura 2.12 mostra graficamente a relação entre C2 e P.

$$C2 = 3,27 \cdot P^{-0,28}$$

..... 36

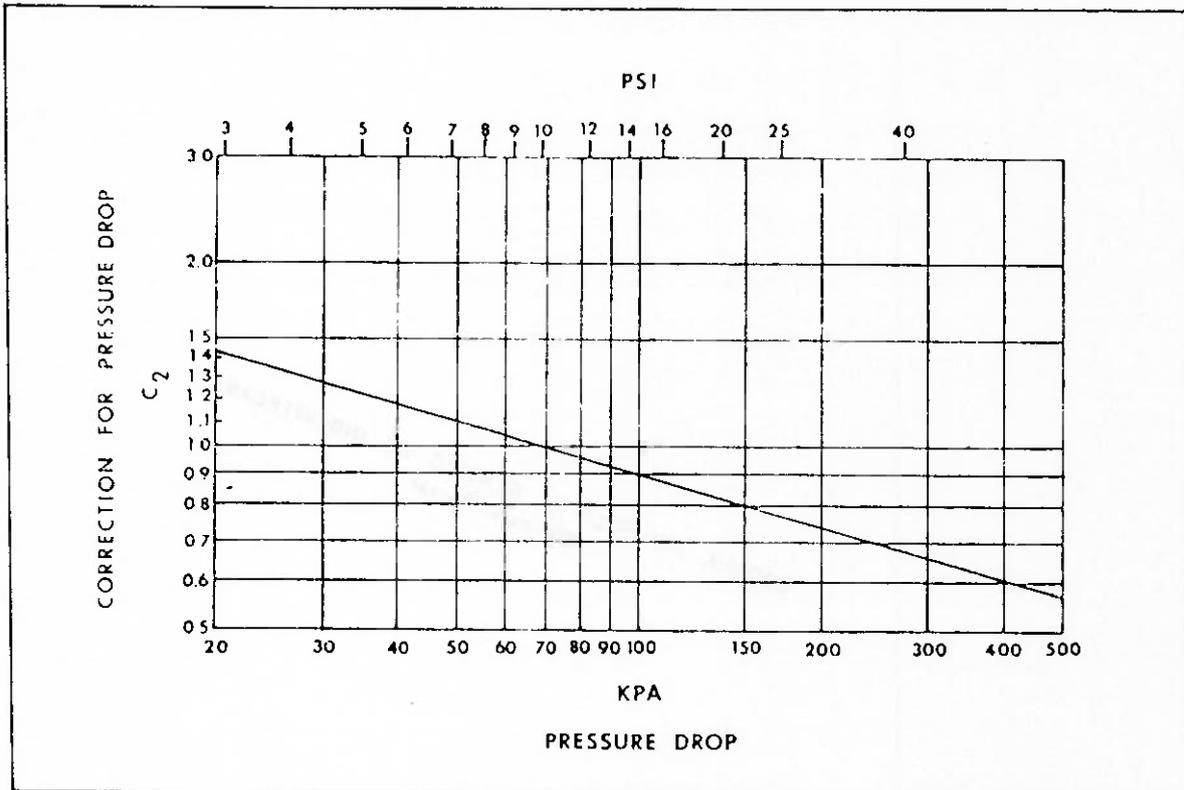


Figura 2.12 Fator de correção C2 da equação 36 versus pressão de alimentação. (Segundo ARTERBURN (22)).

A Figura 2.13 mostra graficamente a relação entre C3 e p.

$$C3 = \frac{1,65}{(ps-pf)}$$

..... 37

Ainda segundo ARTERBURN (22) outros fatores, tais como diâmetro do apex, vortex, comprimento do vortex, etc. têm também in-

fluência, porém de maneira menos acentuada que a dos três parâmetros acima apresentados.

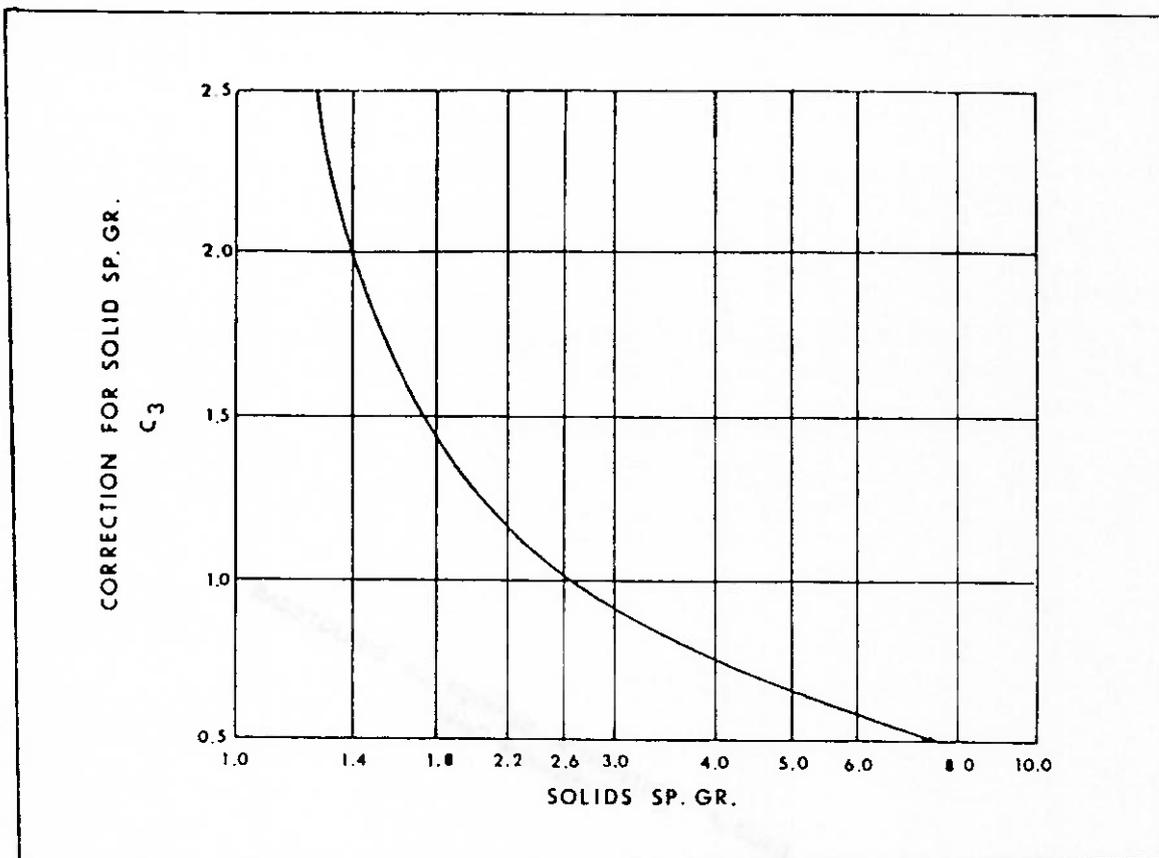


Figura 2.13 Fator de correção C3 da equação 37 versus peso específico dos sólidos. (Segundo ARTERBURN (22)).

2.5.2 Modelos para o Cálculo da Partição de Fluxos.

Para os cálculos relativos ao balanço de massas na operação de um classificador é necessária a determinação da partição de fluxos, ou da componente Rf da equação 10. A partição de fluxos é definida pela seguinte equação:

$$S = \frac{Q_{uf}}{Q_{of}} \dots\dots\dots 38$$

A recuperação volumétrica de sólidos em termos de partição de

fluxos, tem a seguinte expressão:

$$R_v = \frac{S}{S + 1} \quad \dots\dots\dots 39$$

A fração de fluxo encaminhada ao "underflow" ou, o termo  $R_f$  da equação 10, pode então ser calculado por:

$$R_f = \frac{R_v - R_s \cdot C_v}{1 - C_v} \quad \dots\dots\dots 40$$

Como  $R_s$  é função de  $R_f$ , a determinação mais precisa de  $R_f$  é realizada por processos iterativos.

Também são inúmeras as correlações empíricas da partição de fluxos como função de variáveis dimensionais, a maioria apresentando a seguinte forma:

$$S = (D_u/D_o)^x \quad \dots\dots\dots 41$$

O valor da constante  $x$  na equação 41 foi definido por vários pesquisadores, dentre eles:

YOSHIOKA e HOTTA (8) .....	4,0
DAHLSTROM (26) .....	4,4
TARJAN (27) .....	3,0
STAAS (19) .....	3,5

DAHLSTROM (26) observou também a influência da vazão de polpa na partição de fluxos, chegando à seguinte correlação:

$$s = \frac{6,13 \cdot (D_u/D_o)^{4,4}}{q^{0,44}} \dots\dots\dots 42$$

### 2.5.3 Modelos para Cálculo da Eficiência da Classificação.

PLITT (1) postula que curvas de classificação corrigidas podem ser representadas eficientemente por uma expressão do tipo Rosin-Rammler, conforme mostra a equação 8.

Em tal função o termo  $m$  serve como medida da eficiência da separação. Curvas típicas de classificação com ciclones revelam valores deste parâmetro entre 2 e 3; abaixo desta faixa a operação é considerada ineficiente, assim como valores maiores do que 3 revelam boa eficiência da operação.

A equação 7 proposta por LYNCH & RAD (2) para representação da classificação, usa o parâmetro  $\alpha$  como medida de eficiência. Os quais relacionam-se da seguinte maneira :

$$\alpha = 1,54.m - 0,47 \dots\dots\dots 43$$

FAHLSTROM (5) concluiu que a eficiência de separação,  $m$ , decresce com o aumento da densidade da polpa. Já LYNCH & RAD (2) afirmam que  $\alpha$  é somente função de propriedades dos sólidos, tais como forma e peso específico, e não de parâmetros geométricos do equipamento. Essas conclusões foram baseadas em comparações de diversos processos de classificação envolvendo carvão, sílica e calcário, chegando a afirmar que a eficiência cresce com o crescimento do peso específico dos sólidos.

Estes autores afirmam ainda que em minérios compostos por

minerais de diferentes pesos específicos, cada mineral apresentará um comportamento individual e diferenciado na classificação. Por outro lado, em se tratando de minerais com pesos específicos próximos, a curva de partição tenderá a ser plana e alongada, sugerindo a diminuição da eficiência.

#### 2.5.4 Modelos para o Cálculo de Vazão e Pressão.

A determinação de uma correlação, entre o parâmetro operacional pressão e as demais variáveis envolvidas, reveste-se de grande importância, já que este é responsável pelo dimensionamento do sistema de alimentação dos ciclones, bem como da determinação da capacidade de instalações existentes.

Calculada a partir da distribuição do campo centrífugo no interior do ciclone, teoricamente chegar-se-ia a:

$$\frac{\delta P}{\delta r} = \frac{\rho v_t^2}{r} \quad \dots\dots\dots 44$$

Integrando-se a equação 44 da parede interna do ciclone até a parede externa do vortex, obteremos:

$$v_t^{0,8} = a \quad \dots\dots\dots 45$$

Utilizando-se o coeficiente de LILGE (20) para cálculo da perda de carga na entrada do ciclone, teremos:

$$\frac{v_o}{v_i} = 5,31 \cdot (D_i/D_c)^{1,13} \quad \dots\dots\dots 46$$

A expressão completa para o cálculo da pressão tornar-se-ia o seguinte:

$$P = \frac{28,6 \cdot Q \cdot (1 - D_i/D_c)^{1,6} \cdot [(D_c/D_o)^{1,6} - 1]}{D_c^{2,26} \cdot D_i^{1,74}} \quad \dots\dots\dots 47$$

BRADLEY (19) apresenta uma relação das principais correlações teóricas e empíricas, desenvolvidas por diversos autores para cálculo da queda de pressão em ciclones, reproduzida na Tabela 2.2 da página seguinte.

Devido ao fato de que na maioria das operações que empregam ciclones como equipamento de classificação as descargas do "underflow" e "overflow" se dão a pressão atmosférica, a queda de pressão é equivalente a pressão de alimentação do ciclone.

Da mesma maneira que na Tabela 2.1, Bradley reserva a última coluna para listar as correlações normalizadas em uma determinada condição de operação, bem como expressas no mesmo sistema de unidades. A operação é com água em temperatura ambiente.

Ainda segundo Bradley, a correlação que melhor se adapta às condições apresentadas, é a seguinte:

Tabela 2.2 Correlações teóricas e empíricas para cálculo da queda de pressão em ciclones. (Segundo BRADLEY (19)).

Source	Size of Cyclone ( $D_c$ )	Equation		Equation applied to a 9° cyclone with $D_t = D_c/7$ , $D_o = D_c/5$ $Q$ in l./min $\Delta p$ in psi $D_c$ in cm
		Form	Units	
Theoretical 1. Bradley	Any	$\frac{\Delta p/\rho}{V_t^2/2g_o} = \frac{\alpha^2}{n} \left[ \left( \frac{D_c}{D_n} \right)^{2n} - 1 \right]$ where $\alpha$ and $n$ are factors dependent on cyclone design and fluid properties. $\alpha$ is also dependent on flowrate	Dimensionless	$\Delta p = 24.3 \cdot Q^2/D_c^4$ using $\alpha = 0.45$ $n = 0.8$
2. de Gelder	Any	$Q = \xi \cdot A_t \cdot \left( \frac{2\Delta p}{\rho} \right)^{0.5}$ where $\xi = \frac{\xi_\infty}{1 - \frac{J \cdot A_c}{6 \cdot A_t} \left( \frac{2}{Re \cdot \sin\theta/2} \right)^{0.5}}$ $\xi$ and $J$ are factors dependent on cyclone design	Dimensionless	$\Delta p = 1.45 \left( \frac{1.35}{\xi^2} - 1 \right) \frac{Q^2}{D_c^4}$ where $\xi = \frac{0.164}{1 - 515/Re^{0.3}}$
3. Trawinski		$Q = K \cdot D_t \cdot D_o \cdot \left( \frac{\Delta p \cdot g_c}{\rho} \right)^{0.5}$ where $K$ is a factor which contains diameter ratios, friction loss and cone angle variables for $\theta = 15$ to $30^\circ$ , $K = 0.5$	Consistent units	$Re = 5.1 \times 10^8 \cdot \frac{Q}{D_c}$ $\Delta p = 19.8 \cdot Q^2/D_c^4$
Empirical 4. Chaston	0.6 in to 27 in	$Q = 10 \cdot A_t \cdot \Delta p^{0.5} \pm 20\%$	Imp. gal/min in <sup>2</sup> , psi.	$\Delta p = .78 \cdot Q^2/D_c^4$
5. Dahlstrom	9 in	$Q/H^{0.5} = 6.38(D_o \cdot D_t)^{0.9}$ (See Note 1)	U.S. gal/min ft of fluid inches	$\Delta p = 13.3 \cdot Q^2/D_c^4$
6. Elcox	Unknown	$Q = 24.7 \cdot K \cdot D_t^2 (\Delta p/\rho)^{0.5}$ where $K$ the discharge coeff. is 0.35	Imp. gal/min in., psi, g/cm <sup>3</sup>	$\Delta p = 64.5 \cdot Q^2/D_c^4$
7. Haas	0.16 in to 0.4 in	$H = \frac{0.07 \cdot Q^{2.27}}{D_c^{0.8} \cdot D_t^{1.3} \cdot D_o^{2.0}}$	U.S. gal/min ft of fluid inches	$\Delta p = 21.2 \cdot Q^{2.27}/D_c^{4.1}$
8. Yoshioka and Hotta	3 in to 6 in	$\frac{\Delta p/\rho}{V_t^2/2g_o} = 54.3 \frac{(D_t/D_c)^{2.8}}{(D_o/D_c)^{1.9}}$	Dimensionless	$\Delta p = 39 \cdot Q^2/D_c^4$
9. Rietema	75 mm	$\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V_t^2} = k_1 \left( \frac{D_t}{D_o} \right)^k \left( \frac{D_c}{L} \right)^{0.7} (1 - R_f)^{0.8}$ at $Re_{Inlet} = 25000$ (see Note 2)	Dimensionless	$\Delta p = 23 \cdot Q^2/D_c^4$

N.B. For  $Q$  in Imp. gal/min and  $D_c$  in inches, divide the final column Dahlstrom constant by 1.40, the Haas constant by 1.43, and the remaining constants by 2.03.

$$P = \frac{27,4 \cdot Q^{2,35}}{D_c^{4,7}} \dots\dots\dots 48$$

Deve-se ressaltar novamente a semelhança das formas das correlações teóricas apresentadas, já que a única diferença reside nas constantes de proporcionalidade.

A energia consumida por um ciclone pode ser expressa por:

$$E = P \cdot Q \dots\dots\dots 49$$

Da equação 49 depreende-se que a pressão é uma medida da energia potencial disponível para ser transformada (no ciclone) em energia cinética, e, utilizada na classificação do minério alimentado.

Segundo ARTERBURN (22) a relação entre a capacidade e a pressão de alimentação de ciclones padrão de diversos diâmetros, é aquela mostrada na Figura 2.14. Esse autor destaca que as capacidades apontadas da figura citada, são para ciclones operando somente com água e que polpas de minério normalmente permitem que o ciclone opere com maiores vazões de alimentação.

O efeito do diâmetro do "vortex-finder" e da área de alimentação também exercem influência no cálculo da vazão, segundo Arterburn. Por esta razão aparece no gráfico uma área sombreada que acompanha cada uma das retas, delimitando o intervalo de capacidade em função de variáveis geométricas de efeito secundário.

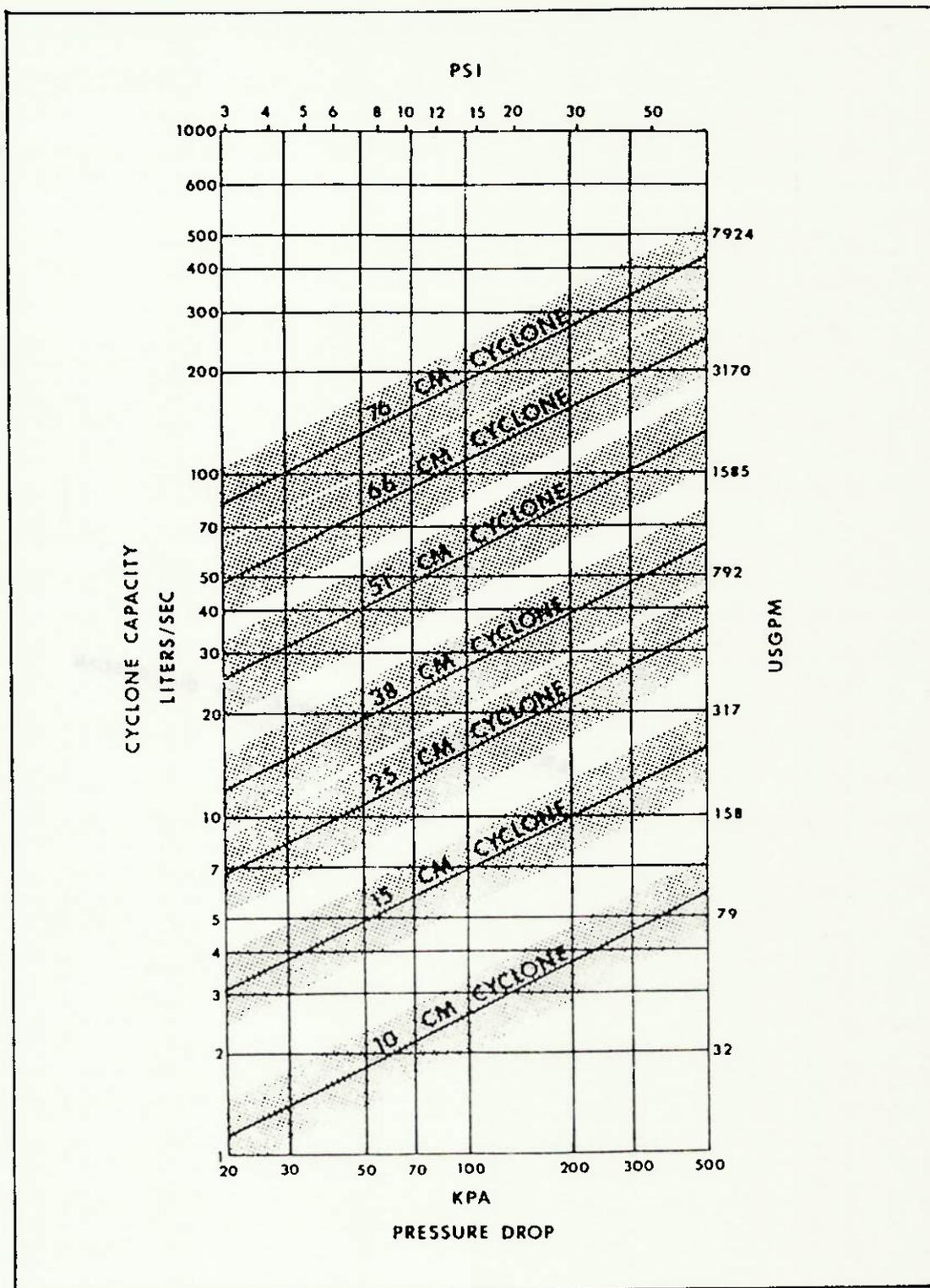


Figura 2.14 Capacidade básica do ciclone versus pressão de alimentação. (Segundo ARTERBURN (22)).

### 3. AJUSTE DE MODELOS

Os trabalhos até aqui descritos de pesquisadores empenhados em definir correlações teóricas ou empíricas, representativas da operação de ciclones, apontam que os modelos empíricos, são os que conseguiram maior êxito, quer pelo número de aplicações, quer pelo número de especialistas dedicados à sua elaboração.

A abordagem teórica, com certeza traria consigo um alargamento deste universo de aplicações porém, devido à complexidade dos fenômenos envolvidos, não se chegou, até o momento, a equações que descrevam satisfatoriamente os sistemas encontrados na prática.

Por mais abrangente que tenham pretendido ser, podendo-se citar o trabalho de Plitt como expoente, é evidente que a aplicação de tais modelos não pode ser feita de modo direto a qualquer processo de classificação com qualquer tipo de minério sem o risco de incorrer em erro. Isto se deve ao fato de que pela sua própria essência, tais modelos constituem-se em correlações entre dados experimentais e parâmetros de performance do processo e portanto, afetadas pelas condições particulares do minério ou da prática operacional.

A corroborar com esta situação, sabemos todos da prática de Engenharia de Minas ou mais precisamente, da Caracterização Tecnológica de Minérios, que não há dois minérios iguais na natureza.

Isto posto conclui-se que, independentemente da ampla aceitação (comprovada pela disseminação de modelos empíricos nas áreas de projeto, controle de processos ou previsão de resultados) seu uso requer necessariamente uma etapa inicial de ajuste ou adequação das equações representativas e dos parâmetros rele-

vantes do processo às aplicações específicas da atividade de beneficiamento de minérios.

A análise dos dois principais modelos matemáticos empíricos de operação de ciclones (Plitt e Lynch), mostra que ambos propõem inicialmente a parametrização da curva de partição do sistema segundo uma lei matemática arbitrariamente definida para que, a partir de correlações empíricas de dados geométricos do equipamento e operacionais do processo, seja possível obter os índices que permitam calcular as partições individuais das malhas analisadas.

Este procedimento deve, segundo cada autor, representar de maneira eficaz os resultados colhidos nas condições em que o modelo foi desenvolvido.

Cabe observar que derivam desta parametrização (índices de importância fundamental para as análises posteriores de performance de processos.

Particularmente, o modelo de Plitt considera a equação 8 (de Rosin-Rammler) suficientemente adequada para representar a distribuição de probabilidades de uma partícula encaminhar-se para um dos dois orifícios de saída do equipamento, em qualquer sistema.

Entretanto, é sabido que esta equação 8, serve para representar satisfatoriamente distribuições bi-caudais e que a despeito da facilidade em ser linearizada, não representa com fidelidade os valores de partição em seus extremos, obtidos em operações reais.

Dentro deste mesmo enfoque, é importante lembrar que Lynch e Rao desenvolveram seu modelo a partir de ensaios em laboratório, em um circuito fechado ciclone/bomba de polpa, com calcário bastante homogêneo, especialmente preparado para este fim. Os

trabalhos posteriores desses dois autores com minérios reais, não objetivaram alterar o modelo obtido, mas sim observar os desvios.

Plitt partiu, para confecção de seu modelo, dos dados de Lynch e Rao, somados aos de seus testes onde o minério que serviu aos estudos era composto exclusivamente por grãos de sílica finamente moída (praticamente 100% passante na malha 200 da escala Tyler), com peso específico, segundo Plitt, igual a 2,60.

Sendo assim, é fácil entender a causa dos desvios em relação ao comportamento previsto pela equação paramétrica de Rosin-Rammler, frente aos valores obtidos a partir de dados com operações reais (minérios compostos por minerais com características físicas bastante heterogêneas entre si e em distribuições granulométricas mais amplas ou variadas).

Um exemplo clássico deste tipo de desvio é observado quando há presença de minerais micáceos em quantidades significativas no minério estudado. O efeito da forma dos grãos desta classe de minerais, tende a conferir um perfil assintótico mais lento a curva de partição, em relação ao previsto pela equação de Rosin-Rammler. Outros desvios significativos podem ser notados quando da presença de minerais argilosos, que podem aumentar significativamente a viscosidade da polpa, e influir fortemente nas condições internas de operação do ciclone. Também a oxidação parcial e/ou total das espécies minerais presentes em determinados minérios, a ponto de alterar-lhes as texturas e consequentemente o grau de liberação, além de propiciar a presença de grãos ultra-finos, certamente contribuem no sentido de alterar o comportamento previsto por modelos matemáticos paramétricos de curvas de partição.

No trabalho onde apresentam seu modelo, LYNCH & RAO (2),

incluem um tópico onde comentam os trabalhos de coleta de dados de usinas que operam com dois minérios reais distintos (um composto de magnetita e sílica e outro de galena e marmatita).

Os autores afirmam que, em minérios contendo uma mistura de minerais com diferentes características físicas, "é importante saber prever o comportamento de cada componente no ciclone, tanto quanto no moinho, de modo a conhecer individualmente as distribuições de tamanho".

Após obterem uma curva padrão de partição para uma mistura hipotética de magnetita e sílica, os autores afirmam que a forma desta curva assemelha-se bastante à curva obtida a partir dos dados da operação real com minério composto essencialmente pelos mesmos minerais. Os mesmos autores afirmam no final do trabalho, que a forma da curva é também afetada pelas distribuições granulométricas dos componentes individuais, concluindo que a curva padrão de partição composta (do minério), pode variar, porém as curvas dos componentes individuais permanecem constantes.

Estas observações de Lynch e Rao permitiram aos autores contornar, neste caso específico, os desvios apresentados pela curva padrão de partição experimental, em relação à previsão apontada pelo modelo paramétrico escolhido para descrevê-la.

Evidentemente a solução proposta por estes autores, não pode ser generalizada para qualquer sistema, pois o minério por eles estudado era composto de apenas dois minerais, facilmente separáveis. Em minérios formados por vários minerais distintos, em quantidades relativas variadas e com características diversas, é praticamente impossível individualizar as curvas padrão de partição dos minerais constituintes. Conseqüentemente a representação algébrica de curvas padrão de partição de minérios assim formados, via fórmulas pré-estabelecidas, mostra-se pouco adequa-

da, se forem seguidas as recomendações propostas por Lynch e Rao.

No caso de aplicação de modelos matemáticos empíricos a operações de classificação com minérios brasileiros, fica clara a necessidade de uma abordagem especial, ou melhor, um ajuste efetivo às condições até certo ponto peculiares de nossos minérios.

O território brasileiro, inserido que está em estruturas cujas origens são das mais antigas conhecidas, encontra-se contido também, em sua maior parte, dentro da faixa de clima tropical. Como consequência, as jazidas brasileiras, via de regra, encontram-se cobertas com mantos de intemperismo enriquecidos nos elementos de interesse, podendo apresentar espessura considerável. Essas condicionantes trazem consigo evidentes e importantes reflexos nas características tecnológicas dos minérios associados.

Os minerais presentes neste manto, geralmente apresentam características físico-químicas distintas das dos minerais contidos no proto-minério. Fraturamento, dissolução, recristalização, reconcentração de minerais, são alguns dos mecanismos que atuam com intensidade neste contexto.

Por outro lado, é de se esperar que minérios típicos de climas temperados, sobre os quais os processos intempéricos atuam de maneira branda e superficial, muitas vezes conferindo apenas fraturamentos devido à grandes variações anuais de temperatura, tenham comportamento diferenciado frente ao processamento se comparados à minérios de gênese semelhante, porém localizados em regiões de clima equatorial ou tropical.

A título de exemplo pode-se citar as jazidas de rocha fosfática das chaminés alcalinas da região de Araxá (Grupo Araxá) onde os processos de intemperismo agiram com grande intensidade, con-

ferindo à essas formações mantos de até 250 m de espessura. Esses minérios têm algumas características semelhantes, que influenciam na forma de curvas padrão de partição observadas nas respectivas usinas de concentração, entre elas : contém grande quantidade de lamelas, formadas por argilo-minerais e frações ultra-finas de vários minerais, entre eles as apatitas; presença de minerais micáceos, minerais recobertos por filmes de hidróxidos de ferro, que lhes alteram a densidade; magnetita que pela elevada densidade e resistência a moabilidade, tendem a permanecer na carga circulante e apresentar uma curva padrão de partição com aspecto diferente das demais (menores coeficientes angulares); etc.

Os estudos que visam o desenvolvimento de técnicas de controle e/ou otimização de processos minerais através de métodos computacionais, não têm merecido grande atenção em nosso país, haja visto o número ínfimo de trabalhos publicados nos últimos dez anos se comparado a países como Canadá e Estados Unidos entre outros.

Desta constatação depreende-se que o trabalho de seleção e ajuste de modelos, que permitam a efetiva introdução desta tecnologia em nossas instalações industriais de processamento de minérios, é fundamental para que se possa compartilhar dos inegáveis benefícios econômicos, do qual a literatura estrangeira é farta em exemplos ("case-studies").

A simples "tradução" de equações algébricas para linguagem computacional com vista à confecção de programas não garante por si só o sucesso de seu uso na solução de problemas correlatos. É necessário que haja uma fase inicial de ajuste dos modelos, pois estes são, em sua grande maioria de natureza empírica, e conseqüentemente, sujeitos a desvios, se aplicados em condições muito distintas daquelas para as quais foi desenvolvido.

Neste capítulo, mostraremos inicialmente algumas tentativas de correlações entre os desvios de curvas de partição em relação ao comportamento esperado e características físicas dos grãos minerais. Posteriormente, descreveremos algumas técnicas para contorno do problema, bem como o tipo de resultado a que chegaram.

Finalmente discutiremos os procedimentos para ajuste dos modelos empíricos de operação de ciclones.

### 3.1 Comportamento dos Modelos de Curvas de Partição Frente a Minérios Heterogêneos.

Além da individualização das curvas padrão de partição dos minerais constituintes, proposta por Lynch e Rao, existem outras técnicas apresentadas por vários autores para ajuste de tais curvas em sistemas reais. Situações onde haja a presença de minérios compostos por minerais com densidades bastante díspares requerem modificações no modelo atual de simulação de operação, conforme verificaram os mesmos LYNCH & RAO (2). É prática consagrada a separação do minério em classes estanques de pesos específicos para levantamento de curvas de partição individualizadas.

Este procedimento permite a estimação de parâmetros do modelo para melhor adequação em relação aos dados experimentais.

A Figura 3.1 mostra, na página seguinte, uma série de curvas de partição referentes a classes de densidades distintas, para uma amostra de carvão conforme o trabalho apresentado por PLITT, TURAK & FLINTOFF (10).

Como pode ser observado, o diâmetro mediano de partição corrigido,  $d_{50cor}$ , varia inversamente com o peso específico dos sólidos  $\rho_s$ , conforme seria de se esperar, se levarmos em conta a teoria da sedimentação.

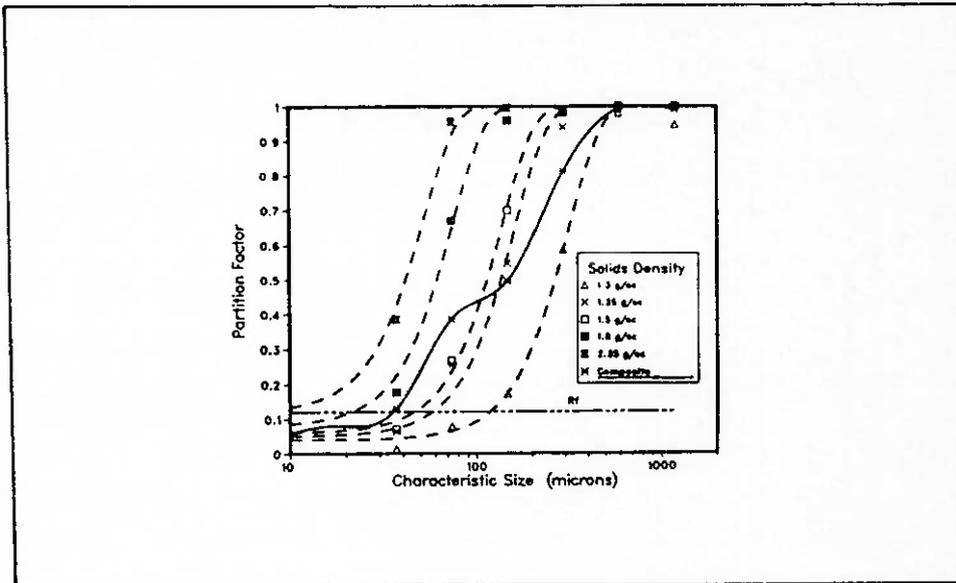


Figura 3.1 Curvas de partição de diferentes classes de densidade para carvão. (Segundo PLITT, TURAK & FLINTOFF (10)).

As leis de Stokes e Newton podem ser utilizadas na tentativa de se obter relações entre os parâmetros  $d_{50cor}$  e o  $\rho_s$ , resultando em relações com a seguinte forma:

$$d_{50} = \frac{C_4}{(\rho_s - 1)^k} \quad \dots\dots\dots 50$$

Na prática, os valores dos parâmetros  $C_4$  e  $k$  são obtidos mediante a utilização de técnicas gráficas sobre a curva de partição. São raros os casos em que o valor de  $k$  está na faixa de valores previstos pela teoria.

A Figura 3.2 mostra, através de um gráfico, a estimação dos parâmetros da equação 50, feita a partir dos dados apresentados na Figura 3.1.

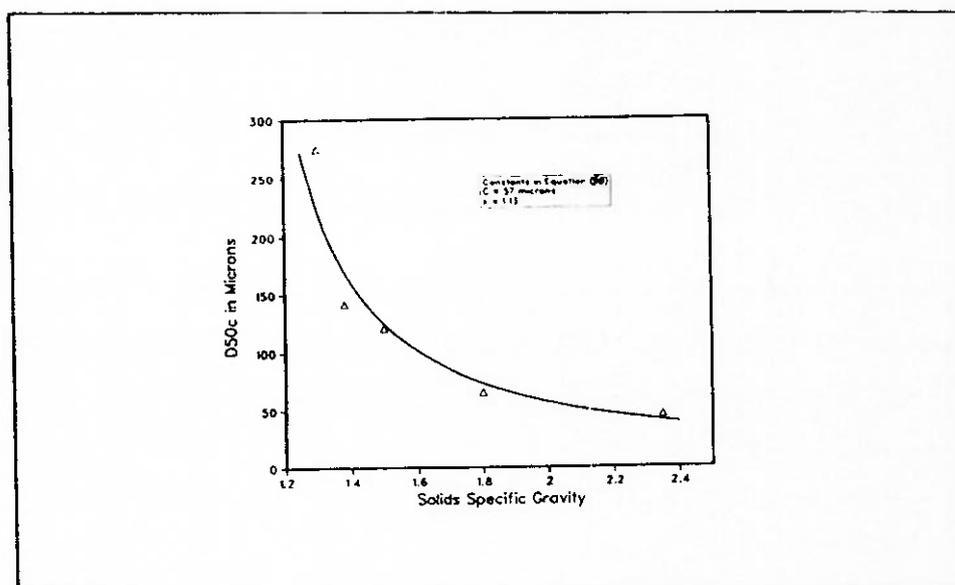


Figura 3.2 Variação do parâmetro  $d_{50cor}$  em relação ao peso específico dos sólidos. (Segundo PLITT, TURAK & FLINTOFF (10)).

Outra observação interessante, diz respeito ao processo de classificação, o parâmetro  $m$  da equação 8. É comum assumir-se a constância deste parâmetro, independentemente do peso específico dos sólidos presentes no processo. Esta prática deriva do fato de assumir-se a priori, que no diagrama de curva padrão de partição, obtém-se, uma curva única para qualquer classe de pesos específicos.

Um exemplo desta prática é a técnica proposta por PLITT (7), que consiste em linearizar-se a equação 8, através de uma transformação logarítmica dupla, obtendo-se os parâmetros  $m$  e  $d_{50cor}$  diretamente no gráfico, ou então por regressão linear.

Um dos principais problemas a serem resolvidos na modelagem do comportamento de minérios heterogêneos diz respeito à quantificação do "by-pass" de partículas finas.

A Figura 3.1 deixa claro que esta parcela não é numericamente igual à parcela de fluido encaminhada ao "underflow" ( $R_f$ ). Uma observação mais atenta desta figura, aponta que classes menos

densas de minério tendem a apresentar menores valores da função "by-pass".

Conclusão semelhante foi relatada por FINCH & MATWIJENKO (28). Este fenômeno é então atribuído à existência de um meio de separação autógeno na parte inferior do ciclone, onde as partículas mais densas movem-se ao redor do apex. As partículas menos densas não conseguem penetrar no fluxo descendente do ciclone, ficando então sujeitas ao fluxo ascensional, sendo finalmente descarregadas pelo "overflow". Presume-se que haja um tamanho abaixo do qual o efeito do peso específico é desprezível, sendo nesta situação o "by-pass" igual à parcela  $R_f$ .

Este efeito é explorado de maneira efetiva nos chamados ciclones autógenos ("water only cyclones", "autogenous cyclones" ou "hydrocyclones"), largamente utilizados no beneficiamento de carvões.

Cabe ainda salientar a forma não convencional da curva de partição para o minério "tal-qual" na Figura 3.1. Este comportamento determina regiões alternadas de eficiência de separação. Um exame mais profundo é necessário para se avaliar de maneira quantitativa, a relação entre a heterogeneidade de características físicas do minério e formato da curva de partição.

### 3.2 Técnicas de Ajuste de Curvas de Partição.

Segundo FLINTOFF, PLITT & TURAK (10), curvas de partição de sólidos representativas de operações de classificação com minérios heterogêneos, como o carvão, não deveriam apresentar aspectos peculiares devido à distribuição contínua de partículas nas classes de pesos específicos. Entretanto, vários são os exemplos de minérios que apresentam duas espécies minerais predominantes,

com distribuições de tamanhos e densidades suficientemente diferentes entre si para determinar curvas de partição que não sigam o comportamento esperado. O exemplo contido no trabalho de LYNCH & RAD (2), citado anteriormente, ilustra o assunto.

LAPLANTE & FINCH (29) apresentaram um trabalho onde o assunto é discutido com referência a estudos em operações industriais. Por peculiares, segundo Laplante e Finch, entendem-se curvas que apresentem formas definidas, ou como no caso apresentado, uma zona central de inclinação acentuada entre dois platôs. Os autores acima apontados ilustram, através de um exemplo, as condições que conduzem à construção de uma curva de partição peculiar. A Figura 3.3 contém um esquema do processo de separação em duas fases, desenvolvido em um ciclone.

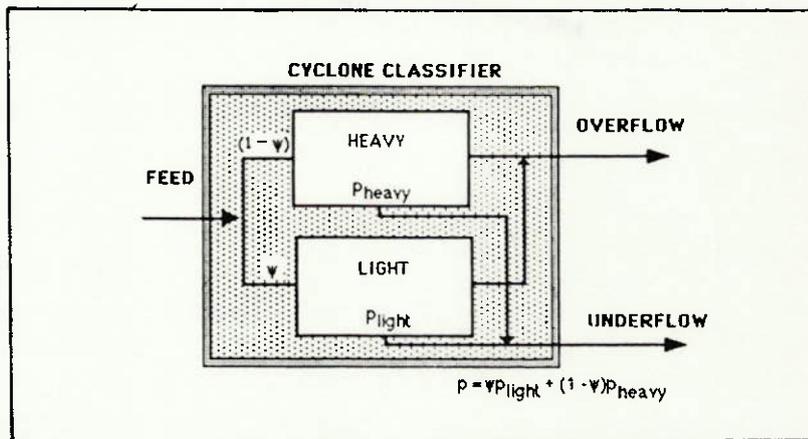


Figura 3.3 Operação de classificação com ciclones, em duas fases. (Segundo PLITT, TURAK & FLINTOFF (10)).

A curva de partição pode então ser obtida conforme pela equação:

$$p = \psi .p_l + (1-\psi) .p_h$$

..... 51

Para efeito de cálculos, a função  $p$  acima, é assumida como

sendo contínua em função do tamanho das partículas. As funções  $p_l$  e  $p_h$  são também assumidas como contínuas e crescentes no intervalo estudado.

Nas condições propostas, seria esperado, que a função  $p$  apresentasse crescimento monotônico. Entretanto como observam LAPLANTE & FINCH (29) este não é necessariamente o caso. Cabe então, detectar o conjunto de soluções da equação:

$$\frac{\delta p}{\delta d} < 0 \quad \dots\dots\dots 52$$

Diferenciando-se a equação 51, obteremos :

$$\frac{\delta p}{\delta d} = \left(-\frac{\delta \psi}{\delta d}\right) \cdot (p_l - p_h) + \psi \cdot \left(\frac{\delta p_l}{\delta d} - \frac{\delta p_h}{\delta p}\right) + \left(-\frac{\delta p}{\delta d}\right) \quad \dots\dots\dots 53$$

Se a diferença entre os dois componentes for muito grande, torna-se possível determinar-se um tamanho  $d^*$  para o qual vale a expressão:

$$\frac{\delta p_l}{\delta d} \approx \frac{\delta p_h}{\delta d} \approx 0 \quad \dots\dots\dots 54$$

A Figura 3.4 contempla a condição na qual as equações 52 ou 53, são válidas.

Nessas condições a equação 53 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\delta p}{\delta d} = -\frac{\delta \psi}{\delta d} \cdot (p_l - p_h) \quad \dots\dots\dots 55$$

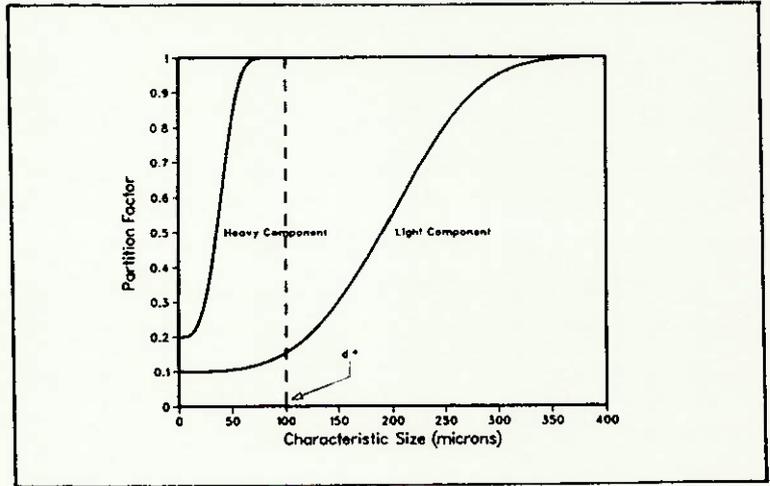


Figura 3.4 Curva de partição de um sistema de sólidos divididos em duas classes de densidades. (Segundo PLITT, TURAK & FLINTOFF (10)).

Se for respeitada a condição:

$p_h > p_l$  ..... 56

Obteremos os seguintes resultados:

$\frac{\delta \psi \cdot (d^*)}{\delta d} = 0$  ..... 57

ou

$\frac{\delta \psi \cdot (d^*)}{\delta d} > 0$  ..... 58

O resultado representado pela equação 57 conduz à formação de

platos, assim como a seguinte leva à formação de um trecho com inclinação acentuada, também chamado de mergulho.

O significado físico destas equações, corresponde a situações onde haja liberação significativa entre sólidos de peso específico mais alto, porém mais finos do que aqueles de menor peso específico.

Essa situação ocorre com freqüência em usinas de processamento de minérios sulfetados. Em circuitos fechados de moagem e classificação os sulfetos que, naturalmente são menos tenazes e de peso específico mais alto em relação aos minerais de ganga, tendem a se concentrar nas frações mais finas do minério. A Figura 3.5.a da página seguinte, mostra um exemplo da situação descrita.

Combinando-se os dados das Figuras 3.4 e 3.5.a, obteremos a curva de partição mostrada na Figura 3.5.b.

Resumindo, as duas condições aqui discutidas, suficientes para garantir uma forma particularmente diferente da curva de partição de sólidos submetidos a um processo de classificação, são:

(a) Significativa diferença de densidades entre as duas fases do minério, levando a situações como as mostradas pela curva da Figura 3.4;

(b) Diferentes distribuições granulométricas nas duas fases, levando a situações como as mostradas pela curva da Figura 3.5.a.

Se tais condições forem abrandadas a curva de partição terá um formato considerado típico.

Os comentários até aqui tecidos, referentes a trabalhos de vários autores, com respeito ao ajuste de modelos de curvas de partição, partem do princípio de que a pura e simples divisão do minério em classes de densidades e posterior individualização dessas curvas, seja suficiente para a garantir do sucesso da aplicação de modelos empíricos na previsão de resultados da

performance de ciclones.

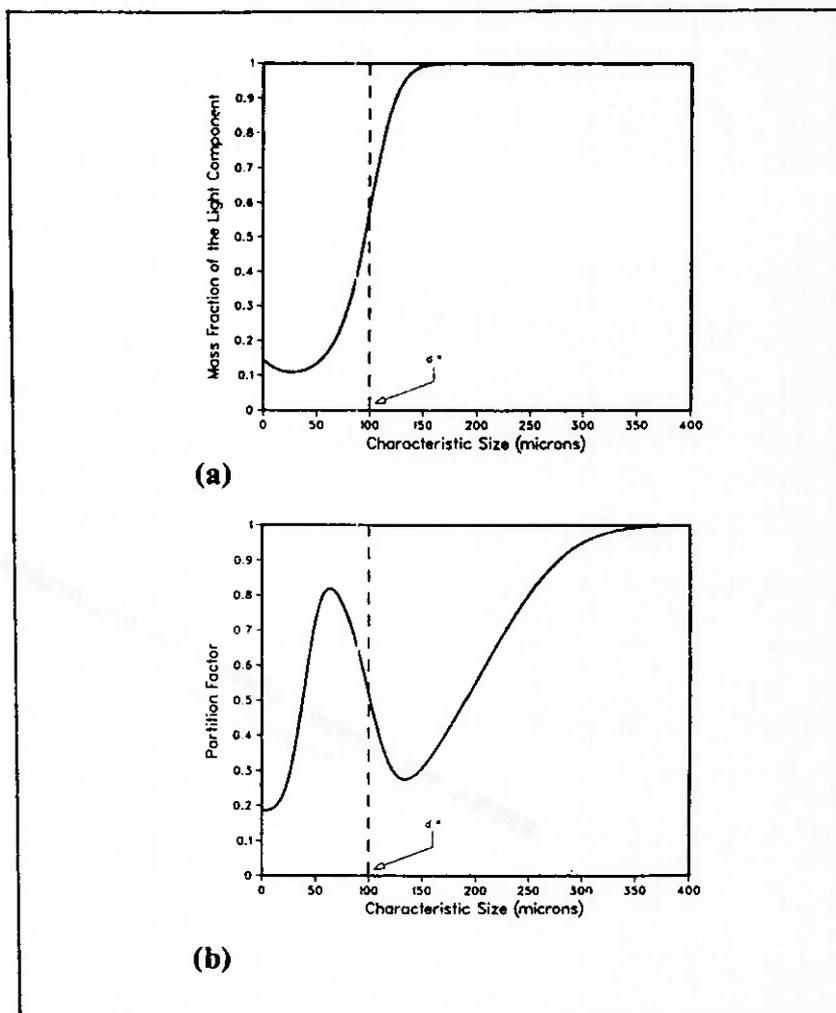


Figura 3.5 Origem de curvas de partição peculiares: (a) distribuição granulométrica da fração leve, (b) curva de partição do minério. (Segundo PLITT, TURAK & FLINTOFF (10)).

Existem porém na literatura trabalhos que sugerem a utilização de modelos estatísticos de curvas de partição, assim como autores que empregam métodos heurísticos de busca de funções que representem com fidelidade, determinada curva obtida experimentalmente.

Os dois ítems seguintes trazem aspectos relevantes de trabalhos pertencentes a estas duas linhas de abordagem.

### 3.2.1 Modelos Estatísticos de Curvas de Partição.

Além dos modelos já comentados, Soma Exponencial, Rosin-Rammler e Logístico, pode-se listar outros modelos, que associam valores de partição à funções de distribuições de probabilidades (27), dadas por:

- (a) Distribuição de Gauss;
- (b) Distribuição Log-Normal;
- (c) Distribuição de Gaudin-Schumann.

### 3.2.2 Modelos Heurísticos de Curvas de Partição.

Nesta classe de modelos, inicialmente obtém-se a curva de partição experimental, para posteriormente parametrizá-la.

O objetivo deste método é portanto, a formulação de uma função contínua, que descreva a curva padrão de partição, partindo-se de valores conhecidos. Esta função pode ser de dois tipos distintos:

- (a) A curva passa obrigatoriamente pelos pontos dados;
- (b) A curva interpola os pontos dados.

Pertence ao primeiro caso, o emprego da técnica de regressão polinomial de Lagrange, que não será aqui descrita pois a literatura especializada é farta em exemplos e aplicações.

O segundo caso merece aqui maior atenção, pois com o advento dos computadores que trouxeram consigo, o aumento da velocidade de cálculos bem como maior precisão de resultados, os métodos que empregam interpolações da curva de partição ganharam impulso bastante grande, conforme atesta TRAWINSKI (3), seu trabalho, traz uma metodologia de obtenção de equação paramétrica de curvas padrão de partição, ou de Tromp. Esse estudo prossegue, assinalando que, de maneira geral, curvas padrão de partição frequente-

mente apresentam anomalias em relação ao comportamento previsto, sendo as mais comuns :

(a) Curto-Circuito, denominada pelo autor de fluxo morto. Já discutida;

(b) Oposto ao Curto-Circuito. São situações onde há ausência de partículas superfinas, fato este que implica em que a curva de partição alcance o eixo das abscissas em um ponto onde  $x=p$ , com  $p > 0$ . A Figura 3.6.a, da página seguinte, apresenta um exemplo desta condição;

(c) Situações onde a alimentação é limitada a um valor máximo (material escalpado), fazendo com que a curva alcance o valor 100% ( $c=1$ ), num ponto  $S_i$ , conforme ilustra a Figura 3.6.b. O autor considera este um fato até certo ponto corriqueiro, desde que o ponto  $x_s$  seja menor do que 3;

(d) Casos onde a curva alcance lentamente a assíntota  $c=1$  na faixa de valores considerados, conforme aponta a Figura 3.6.c.

O autor propõe uma "fórmula universal", que visa parametrizar curvas padrão de partição, que apresentem anomalias, dos tipos acima listadas. A fórmula é a seguinte:

$$c = \frac{\frac{c_0}{1 + 2.c_0} + x_i^\alpha - x_p^\alpha}{1 + (c_0/c_{00}).(x_p^\alpha - 1) + \left(\frac{1}{1 - 2.c_0}\right) - 2.x_p^\alpha} \quad \dots\dots\dots 59$$

com

$$c_{00} = \frac{1}{\sigma} \quad \dots\dots\dots 60$$

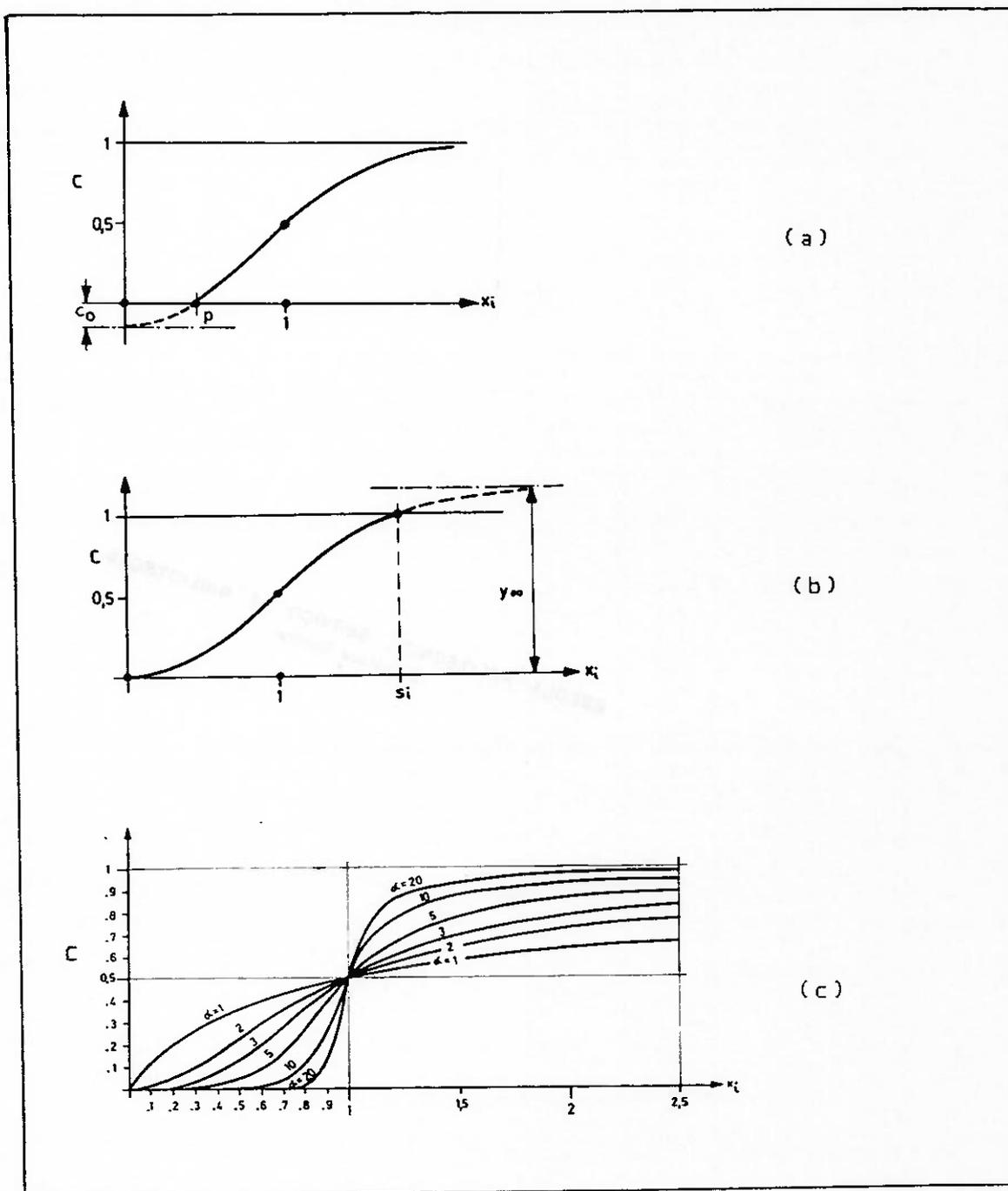


Figura 3.6 Principais desvios de curvas padrão de partição:  
 (a) curto-circuito negativo, (b) curva ultrapassa a reta  $c=1$  e  
 (c) curva atinge lentamente a assíntota  $c=1$ . (Segundo TRAWINSKI  
 (3)).

e

$$\sigma = \frac{x_s^{\kappa} - 2}{x_s^{\kappa} - 1} \dots\dots\dots 61$$

Outro trabalho que merece atenção é o apresentado por REID, MAIXI & SHENGGUI (30). Os autores desenvolveram um programa computacional para simulação de curvas de lavabilidade de carvões através de seis diferentes modelos, com dois métodos de otimização distintos. Dentre os seis modelos, três são da linha de abordagem aqui discutida, ou seja:

- (a) Modelo de Erasmus;
- (b) Modelo de Tangente Hiperbólica;
- (c) Modelo Modificado de Tangente Hiperbólica.

Estes modelos foram testados então em curvas de partição segundo densidades. Evidentemente que com poucas modificações estes modelos podem ser adaptados à simulação de processos de classificação, conforme atesta TRAWINSKI (3).

Os mesmos autores, em outro trabalho (31), efetuaram testes comparativos dos modelos formulados para seleção da melhor opção na operação em estudo, chegando a coeficientes de correlação considerados por eles mesmos como bons.

TAMILMANI & KAPUR (32) desenvolveram também um modelo matemático heurístico para parametrização de curvas de Tromp.

Esse trabalho contém uma equação geral que conta com quatro parâmetros, bem como inclui a aplicação da equação formulada, na simulação de operação de processos de beneficiamento de carvão.

### 3.3 Ajuste das Equações Descritivas do Processo.

PLITT (1) afirma, como conclusão do trabalho onde apresenta o seu modelo matemático de operação de ciclones, que:

(a) O modelo formulado permite o cálculo da performance de ciclones com precisão aceitável quando não se dispõe de dados experimentais;

(b) As equações revelam clara e independentemente os efeitos e a importância relativa das variáveis relevantes que influenciam a operação dos ciclones;

(c) Apesar de não ser o mais preciso ou de importância relativa maior em relação a outros modelos, a ampla faixa de valores experimentais, assim como a inclusão das variáveis mais significativas do processo, permite que as equações do modelo possam ser aplicadas a uma ampla gama de condições operacionais;

(d) De posse dos dados experimentais, as constantes numéricas presentes em todas as equações propostas podem ser apropriadamente ajustadas para que sirvam como um eficiente modelo de operação de ciclones.

O autor pondera ainda, em seus comentários finais, sobre a necessidade de adaptação de seu modelo aos dados experimentais para uma melhor correlação entre os dados reais e os obtidos através de simulações posteriores. Essa adaptação consiste única e exclusivamente, segundo o autor, na correção das constantes das equações mediante cálculos a partir dos dados de operação.

LYNCH & RAD (2) propõem o seguinte procedimento para contorno deste problema:

(a) Construção de curvas padrão de partição individuais, uma para cada tipo de mineral;

(b) Correção das constantes da equação do parâmetro  $d_{50cor}$

para cada um dos minerais contidos no minério.

LYNCH, RAD & PRISBREY (33) sugerem ainda que a sequência de cálculos para determinação das vazões, distribuições granulométricas e concentrações de sólidos nos produtos de ciclones, quaisquer que sejam as condições operacionais, deva iniciar-se pela determinação da curva padrão de partição (e do  $d_{50cor}$ ), já que esta apresenta-se com o mesmo aspecto para um determinado minério, independentemente das variáveis operacionais do processo.

### 3.4 Conclusões.

É possível apresentar um resumo dos pontos mais relevantes pertinentes ao tópico de ajuste de modelos de operação de ciclones, conforme até aqui exposto:

(a) Os autores de modelos empíricos de operação de ciclones são unânimes em afirmar que há necessidade de adequação do modelo à operação de classificação específica que se deseje estudar com um determinado minério, já que cada minério apresenta características tecnológicas próprias;

(b) A parametrização da curva padrão de partição do sistema, passo inicial para a construção de qualquer dos modelos apresentados, é feita geralmente segundo um tipo de equação pré-determinada que, no caso de minérios heterogêneos, revela-se inadequada para prever a performance do processo. Alguns métodos de ajuste foram propostos por vários autores, porém não há consenso quanto à metodologia de tais operações;

(c) Uma vez ajustados, os modelos ou as correlações empíricas obtidas permitem simular com razoável grau de confiabilidade processos de classificação, ou ainda projetar equipamentos e

circuitos, assim como analisar o processo e controlar as variáveis relevantes para otimização de resultados.

(d) No caso de aplicações desses modelos em operações com minérios intemperizados, comuns no território brasileiro, a fase inicial de ajuste reveste-se de importância fundamental, dadas as características físicas próprias destes tipos de minérios.

SECRETARIA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
BRASÍLIA

#### 4. TÉCNICA DE AJUSTE PROPOSTA

##### 4.1 Objetivo.

O objetivo primeiro deste trabalho restringe-se a estabelecer uma metodologia que permita obter um tipo de parametrização, onde sejam preservadas as características intrínsecas de curvas padrão de partição.

O produto da aplicação desta técnica deverá ser o fornecimento de subsídios técnicos suficientes para calibrar satisfatoriamente um modelo empírico de operação de ciclones, adequado a determinada situação.

##### 4.2 Descrição.

Tendo como ponto de partida as conclusões a que autores de modelos de operação de ciclones chegaram, tais como as apontadas no capítulo anterior, assim como a experiência pessoal acumulada pelo Autor, é proposta, uma técnica de parametrização de curvas de partição (assim como as implicações decorrentes de sua utilização) abaixo descrita:

###### (a) Primeiro Passo - Correção dos Dados.

Adotou-se como critério que todos os dados levantados a partir de ensaios de classificação executados para tal fim em laboratório, ou coletados em operações contínuas, serão corrigidos para tornarem-se consistentes com a melhor aproximação aos fluxos calculados, mediante o emprego da técnica que se baseia na distribuição dos erros individuais proporcionalmente a magnitude dos fluxos calculados e posteriormente ajustados pelo método dos mínimos quadrados, conforme proposta por LYNCH (34);

(b) Segundo Passo - Preparação.

Após os cálculos do balanço de materiais referente à separação efetuada, determina-se o valor da função "by-pass", igualando-a à recuperação total de fluido no "underflow" do ciclone. A etapa termina com o cálculo da curva de partição corrigida referente ao conjunto de dados experimentais considerado;

(c) Terceiro Passo - Parametrização da Curva de Partição.

Inicialmente é levantada a curva padrão de partição individual, representativa de um conjunto de dados experimentais; o passo seguinte consiste em efetuar-se regressões lineares sucessivas entre um dos pontos extremos da curva e pontos adjacentes, sendo calculados concomitantemente os coeficientes de correlação. Fixando-se a priori um valor mínimo do coeficiente de correlação, estabelece-se então um processo iterativo de cálculos, de modo a se determinar a reta média de um conjunto de pontos contíguos.

A rotina prossegue de tal forma que o ponto extremo do segmento de reta que respeita o coeficiente de correlação pré-estabelecido, seja o primeiro ponto do segmento seguinte.

O produto desta técnica de parametrização de curvas de partição é portanto um conjunto de pontos  $d_i/d_{50cor}$  versus  $c_i$  em intervalos discretos, de modo a serem facilmente manipuláveis algebricamente. Evidentemente que quanto maior o número de pontos no gráfico (malhas utilizadas nas análises granulométricas da alimentação e dos produtos), maior será a precisão alcançada.

O passo seguinte consiste em interpolações lineares nas semi-retas obtidas segundo a técnica proposta, visando o cálculo dos valores de recuperação nos pontos  $d_i/d_{50cor}$  em intervalos regulares.

A adoção desta metodologia traz como conseqüências principais os seguintes fatos:

- A definição a priori da precisão da parametrização a ser feita em determinada curva de partição, ficando a critério do engenheiro de processos decidir sobre o grau de aderência do modelo aos valores experimentais;

- Evita-se assim a obrigatoriedade imposta por Plitt, de que a equação de Rosin-Rammler seja a expressão algébrica de qualquer curva de partição, independentemente do tipo de minério.

Amplia-se ainda mais o espectro de possíveis aplicações desta técnica particular ao observar-se que outros autores de modelos empíricos de operação de ciclones têm como ponto de partida a parametrização de curvas de partição segundo determinados modelos de equacionamento conhecido, ou mesmo curvas típicas ("cozinhamento" de curvas).

(d) Quarto Passo - Curva Padrão de Partição Média.

Para que os dados assim tratados possam representar com fidelidade maior a separação em estudo, há necessidade de execução de vários ensaios com o mesmo minério sob condições operacionais variadas.

A partir de um conjunto de curvas individuais parametrizadas será então levantada uma curva padrão de partição média composta por pontos calculados de acordo com a média aritmética dos valores das inclinações dos segmentos de reta cujas abscissas dos pontos extremos, formadas pelo parâmetro  $d_i/d_{50cor}$ , sejam tomadas em intervalos regulares em cada uma das curvas padrão de partição individuais. A equação abaixo resume o procedimento apresentado:

$$\bar{p}_i = \frac{p_i}{n_0}$$

Pode-se afirmar então, que se forem realizados ensaios em número suficiente para cobrir uma faixa relativamente ampla de condições experimentais das variáveis controladas para um determinado tipo de equipamento, a curva padrão média assim obtida é representativa do desempenho de ciclones, referente ao minério em estudo na faixa de valores experimentais atingida.

(e) Quinto Passo - Calibração do Modelo de Operação.

O quinto passo compõe-se inicialmente pela formação de um banco de dados referentes aos valores das variáveis sob controle dos ensaios, assim como dos valores dos parâmetros de processo calculados a posteriori (d50, Partição de fluxos, etc.). Serão efetuados os cálculos segundo as equações representativas do processo de acordo com o modelo escolhido para tal fim, de modo a calibrá-lo para o sistema em questão.

Os valores das constantes de proporcionalidade obtidos serão também arquivados para posteriormente serem utilizados em exercícios de simulação.

#### 4.3 Discussão.

Conforme procurou se deixar claro no ítem anterior, a preocupação primeira da técnica proposta, não foi outra senão a de apresentar uma alternativa mais precisa aos modelos de parametrização existentes de curva de partição, tais como as contidas nos trabalhos de Plitt, Lynch, Trawinski, etc.

As mais importantes tentativas de parametrização de curvas de partição feitas anteriormente objetivavam:

(a) Poder correlacionar variáveis de operação a parâmetros definidos a partir da curva de partição do processo em modelos empíricos de operação de ciclones,

(b) Buscar uma generalização destes mesmos modelos através do emprego da parametrização proposta a quaisquer sistemas de classificação de minérios em ciclones,

(c) Tornar possível a estimação de parâmetros quando a simulação da separação não fosse precedida de ensaios que visassem a calibração prévia do modelo,

(d) Obter uma expressão matemática relativamente simples da curva de partição e com isso evitar as técnicas gráficas (menos precisas) de obtenção de parâmetros.

Particularmente a equação de Rosin-Rammler utilizada por Plitt como base de parametrização de curvas de partição em seu modelo, tem características tais que ao plotar-se os valores do parâmetro  $\ln(1/(1-c_i))$  versus  $d_i$  em gráficos com escala di-logarítmica, a equação é linearizada, resultando em uma reta.

Este método de apresentação de resultados de curva de partição tem como peculiaridade adicional, o fato de expandir ambos os extremos da escala vertical, fazendo com que a curva de distribuição granulométrica (conforme originalmente proposta), aproxime-se de uma reta em papel log-log.

Desta maneira Plitt aliou a vantagem da linearização relativamente simples da curva de partição, com o fato de que estas aproximam-se de retas cuja inclinação é o parâmetro  $m$  (chamado também pelo autor de índice de seletividade da operação), e a abscissa correspondente à ordenada igual a 0,6931 ser o parâmetro  $d_{50}$ , já que  $c_i = 0,5$ , quando  $i = d_{50}$ .

Porém, conforme atestam KELLY & SPOTISWOOD (35), apenas algumas curvas de distribuição são relativamente lineares. Evidentemente Plitt generalizou o método, aproximando qualquer conjunto de pontos para uma reta no gráfico especialmente construído para isso, uma vez que do contrário o parâmetro  $m$  não seria constante

ao longo de uma distribuição (como não afirma em contrário o autor).

A técnica de parametrização proposta neste trabalho não permite que sejam realizadas generalizações tão amplas conforme proposta por Plitt ou Lynch, já que cada tipo de operação envolvendo minérios distintos, em determinadas etapas de processo (circuito fechado de moagem, deslamagem, etc.), gerará uma curva de partição que poderá ou não, conforme critério do engenheiro de processos, ser utilizada dentro de um espectro maior, porém sempre limitado do processo global de uma usina.

Em operações de classificação e/ou deslamagem com minérios residuais ou mesmo com grau acentuado de alteração, a análise de curvas de partição geralmente aponta índices baixos de correlação entre o melhor comportamento previsto pela equação de Rosin-Rammler e os dados obtidos experimentalmente. Isto deve-se, conforme já discutido anteriormente, às características físicas peculiares de tais minérios. A aplicação posterior de um modelo empírico na previsão de resultados, dificilmente deverá alcançar sucesso se já se partir de uma premissa que pode ser inadequada.

Já o modelo proposto tem, da maneira como foi estruturado, maiores chances de adequar-se melhor à uma dada operação, uma vez que a parametrização inicial da curva de partição permite, definir a priori o grau de aderência desejado para o modelo em relação aos dados experimentais, não ficando portanto limitada a uma equação pré-estabelecida.

Em contrapartida, esta maior precisão obtida pelo método proposto requer necessariamente a utilização de computadores para efetuar as longas sequências de rotinas de cálculos, bem como para a geração de arquivos (em programas específicos para tal fim), já que a utilização de métodos gráficos como o proposto por

Plitt não faz sentido dentro deste esquema.

Outra limitação imposta pela própria concepção do modelo reside no fato de que em função da inconveniência de linearização da curva de partição (ou mesmo da sua expressão em termos de uma lei matemática), existe uma maior dificuldade de se fazerem extrapolações para obtenção de valores de recuperação em tamanhos de partículas maiores do que a máxima ou menores do que a mínima analisadas. Fica então ressaltada a necessidade de se obter dados experimentais representativos do processo na faixa de valores que se deseja estudar, ou, os resultados não serão confiáveis.

O cálculo de uma curva padrão de partição média (ou daquela referente as médias aritméticas dos valores das inclinações dos segmentos de reta cujas abscissas dos pontos extremos, formadas pelo parâmetro  $d_i/d_{50cor}$ , sejam tomadas em intervalos regulares em cada uma das curvas padrão de partição individuais), transforma-se em uma ferramenta adicional poderosa que o engenheiro de processos dispõe para obter curvas generalizadas. Estas curvas teriam a característica de respeitar um coeficiente de correlação pré-estabelecido, além de permitir a busca a um melhor entendimento dos efeitos das características físicas de minérios quaisquer sobre a sua performance em processos de classificação.

A adoção da curva padrão de partição média, traz como consequência adicional a possibilidade de minimização do impacto de erros aleatórios das medidas experimentais. Por outro lado os erros sistemáticos são de difícil detecção, sendo reservados a profissionais de maior experiência no assunto o julgamento da validade ou não de certos desvios na curva de partição experimental em relação às curvas consideradas típicas para determinados minérios.

#### 4.4 Considerações Técnico-Econômicas.

Se fizermos um exercício de comparação, ainda que a nível qualitativo, da relação custo/benefício entre a técnica proposta neste trabalho e a proposta por Plitt (como exemplo), chegaremos muito provavelmente à conclusão de que para estimativas iniciais de performance de processos de classificação, onde não se dispõe de tempo ou mesmo de recursos suficientes para levantamento de dados experimentais, a técnica de Plitt é a mais adequada. Isto se deve ao fato que, mediante a fixação de apenas um parâmetro de eficiência ( $m$  da equação 8), essa técnica torna possível o cálculo dos demais.

Já a adoção da técnica proposta pelo Autor implica no dispêndio de maiores volumes de recursos materiais e humanos na confecção do programa e procedimentos para calibração do modelo.

Suponha-se entretanto que se deseje implantar em uma usina de beneficiamento de minérios um sistema de controle otimizador de processo, onde haja necessidade de se controlar a granulometria do produto de um circuito fechado de moagem. Esta situação exige um modelo de processo bastante preciso e calibrado, que exigirá certamente níveis baixos de variações dos parâmetros de controle, ao invés de um modelo que seja versátil com poucos recursos de adaptação à operação desejada.

Então, uma vez decidida a finalidade da utilização do modelo empírico de operação do ciclone, a escolha da mais adequada deve necessariamente ser feita à luz do nível de detalhe exigido, (como também do nível de recursos materiais e humanos disponíveis).

Seguindo este raciocínio o modelo proposto neste trabalho apresenta, em determinadas situações práticas, vantagens em relação aos modelos disponíveis, como procuraremos demonstrar nos ca-

pítulos 6 e 7.

Cabem ainda duas observações relevantes:

- A utilização freqüente do nosso modelo em sistemas compostos por minérios semelhantes contribuirá no sentido de fazer diminuir os custos operacionais envolvidos, comparados ao modelo de Plitt,

- No caso do emprego da modelagem na previsão de resultados relativos a vários sistemas, com tipos diversos de minérios, tal como se observa em empresas de consultoria ou em fabricantes de equipamentos, a relação custo/benefício certamente deverá revelar mais vantajosa a aplicação direta do modelo de Plitt.

## 5. ARQUITETURA DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

Este capítulo trata da apresentação de um sistema computacional integrado, composto por uma série de módulos-programa, cujo objetivo principal é:

(a) Calcular a curva padrão de partição de uma série de ensaios, segundo a técnica proposta neste trabalho, e posteriormente com esta curva, calibrar o modelo de Plitt,

(b) Previsão de resultados através de simulações com o modelo ajustado e com o modelo tal como proposto inicialmente por Plitt, para comparações.

A Figura 5.1 apresentada na página seguinte, ilustra na forma de um diagrama de blocos a estrutura geral do sistema proposto.

### 5.1 Descrição do Sistema.

Conforme pode ser observado na Figura 5.1, o sistema foi dividido em duas partes compostas por sete módulos distintos, acessados via um menu principal.

A divisão foi a seguinte:

Primeira parte: Módulos 1, 2, 3, 4 e 5. Obtenção da curva padrão de partição média de uma série de ensaios e calibração do modelo de Plitt.

Esta parte do programa deverá ser capaz de:

(a) Ler, ajustar e armazenar em arquivos independentes uma série de dados relativos às condições de operação de ensaios de classificação;

(b) Mostrar, através de um gráfico, a curva padrão de partição de cada ensaio;

(c) Calcular os coeficientes das equações de Plitt para cada

arquivo de dados, em função da curva de padrão de partição e dados de operação;

(d) Calcular a curva padrão de partição média de uma série de ensaios cujos dados deverão estar contidos em arquivos;

(e) Calcular os coeficientes médios das equações de Plitt para a curva padrão de partição média do item (d) acima.

Segunda parte: Módulos 6 e 7. Simulação.

Esta parte do programa deverá ser capaz de:

(a) Ler e armazenar dados de distribuição granulométrica e demais parâmetros da operação de classificação que se deseje estudar;

(b) A partir da curva padrão de partição média e das equações calibradas obtidas na primeira parte do programa, calcular o balanço de massas de toda a operação, as distribuições granulométricas dos produtos e demais parâmetros representativos do processo;

(c) Apresentar resultados;

(d) Possibilitar a alteração de valores dos parâmetros de operação com posterior apresentação dos novos resultados;

(e) Emissão de listagem resumindo a simulação.

Este diagrama de blocos procura deixar claras as etapas em que foram divididas cada uma das duas partes do programa. Cada bloco compreende uma seqüência de cálculos intermediários que não estão aqui apresentados.

O módulo 1 trata da apresentação geral do sistema, através da descrição e das instruções de operação de cada um dos módulos.

O módulo 2, o principal do sistema, desempenha as funções de entrada de dados, cálculo das curvas padrão individuais de partição, segundo a técnica proposta neste trabalho, além de calcular as constantes das equações do modelo de Plitt de opera-

ção de ciclones.

Os dados necessários para entrada no sistema são:

- Distribuição granulométrica (nas malhas escolhidas) da alimentação, do "overflow" e do "underflow",
- Recuperação total de sólidos e de água,
- Variáveis de operação tais como geometria do ciclone, pressão da polpa na entrada, vazão total de polpa, concentração de sólidos na alimentação e densidade média dos sólidos.

Em seguida os dados de distribuição granulométrica são ajustados pelo método dos mínimos quadrados sobre os fluxos calculados, conforme proposto por LYNCH (34) para correção de eventuais erros de medidas experimentais.

Com os valores corrigidos, são então calculados os valores da recuperações calculadas e corrigidas. Cabe aqui frisar que a parcela "by-pass" foi admitida como numericamente igual à fração de fluido total encaminhada ao "underflow".

A etapa seguinte consiste em se fazer uma regressão linear com os pares de pontos da curva de partição corrigida  $\ln(\ln(1/(1-ci)))$  e  $\ln(di)$ , conforme a parametrização de Rosin-Rammler, segundo a técnica proposta por Plitt, para obtenção da equação da reta de maior coeficiente de correlação em relação aos dados disponíveis.

O bloco seguinte deste módulo apresenta o gráfico onde constam os pontos recuperação versus diâmetro médio da classe granulométrica, a reta produzida pela regressão linear e os valores calculados de  $d_{50cor}$ , inclinação  $m$  e o coeficiente de correlação obtido.

São efetuados na seqüência os cálculos segundo a técnica proposta neste trabalho, ou seja a discretização da curva de partição em intervalos ou segmentos de retas, cujas equações

respeitem o coeficiente de correlação escolhido. Evidentemente que a forma da curva é função direta do número de pontos que a compõe.

É apresentado o gráfico onde constam os pontos recuperação versus diâmetro médio da classe granulométrica, a(s) reta(s) obtida(s), e ainda os valores do  $d_{50cor}$  e coeficiente de correlação obtido.

O objetivo da apresentação destes dois gráficos, ou seja, o relativo à técnica de Plitt (Rosin-Rammler) e o relativo à técnica proposta, é permitir a avaliação comparativa dos resultados dos cálculos segundo os dois tipos de parametrizações.

Os passos seguintes deste segundo módulo são a apresentação da curva padrão de partição do ensaio e cálculo da constante de proporcionalidade de cada uma das quatro equações do modelo de Plitt.

São então efetuados os cálculos de recuperações nos pontos  $d_i/d_{50cor}$  em intervalos de 0,01, segundo interpolações lineares nas retas resultantes da parametrização proposta. Esta técnica visa possibilitar o cálculo da curva padrão de partição média de vários ensaios em intervalos regulares.

O programa prossegue com a criação de arquivos de:

- (a) Conjuntos de pontos  $d_i/d_{50cor}$  versus recuperação,
- (b) Parâmetros de operação e constantes ajustadas do modelo de Plitt.

Na seqüência os arquivos são armazenados em discos para utilizações posteriores.

O módulo 3 refere-se à consulta de dados de arquivos existentes.

Após escolha do arquivo a ser consultado são apresentados na seguinte ordem:

(a) Distribuições granulométricas da alimentação e dos produtos conforme obtidos experimentalmente,

(b) Curva de partição corrigida segundo o modelo discretizante e dos parâmetros  $d_{50cor}$  e coeficiente de correlação fixado.

A tabela que é apresentada em seguida no programa, demonstra os valores de recuperações segundo as parametrizações de Plitt e a proposta, além dos valores calculados diretamente sobre os dados experimentais, para as malhas escolhidas. São calculados e mostrados ainda nesta mesma tabela, para efeito de comparação, os valores das somas dos quadrados dos desvios e a somatória das variâncias para cada uma das parametrizações propostas.

O módulo 3 termina com a apresentação da curva padrão de partição do ensaio escolhido.

O módulo 4 refere-se ao cálculo, partindo-se dos ensaios individuais, da curva padrão de partição média.

Após a seleção dos arquivos de curvas padrão de partição individuais que formarão a curva média, estes são lidos no arquivo correspondente e transferidos para a memória utilizável do computador. O passo seguinte é o cálculo, para cada par de pontos  $d_i/d_{50cor}$  regularmente espaçados (cujo tamanho depende da precisão fixada) da média aritmética dos valores de inclinação da reta que une esses dois pontos em cada um dos arquivos individuais que os contenham. A rotina prossegue até que sejam consultados todos os pares de pontos de todos os arquivos selecionados.

Obtém-se, após o término dos cálculos, uma série de segmentos de reta (de iguais projeções no eixo das abscissas), cujas inclinações representam a média desses valores nos arquivos individuais que os contenham, e que unidos formam a curva padrão de partição média desses mesmos arquivos.

Vale lembrar que os arquivos são formados por pares de pontos

di/d50cor versus ci em intervalos regulares, o que dispensa, nesta fase, novas interpolações.

Não são efetuadas extrapolações nos dados de arquivo, já que a faixa de valores di/d50cor pode ser diferente nos diversos arquivos selecionados, por não existir, segundo a técnica proposta, uma reta média que se preste a esta tarefa. Desse modo o denominador da equação da média aritmética é numericamente igual ao número de arquivos onde haja efetivamente o par de pontos di/d50cor considerado.

A faixa de valores da abscissa da curva padrão de partição média é determinada pelos valores extremos do parâmetro di/d50cor dentre os contidos nos arquivos selecionados.

Após os cálculos dos valores das médias aritméticas das constantes das equações do modelo de Plitt, para os arquivos selecionados, são criados arquivos para esses valores, assim como para os dados referentes à curva padrão de partição média.

O módulo 5, último da primeira parte do sistema, tem como objetivo a comparação de resultados obtidos pelas três parametrizações distintas de um determinado ensaio individual de classificação em ciclones, contido em arquivo.

Após a escolha do arquivo individual e do arquivo médio será apresentada uma tabela onde constam:

- (a) Malhas do ensaio,
- (b) Valores de recuperações corrigidas,
- (c) Valores de recuperações seguindo a curva padrão de partição individual segundo o modelo discretizante,
- (d) Valores de recuperações seguindo a curva padrão de partição média segundo o modelo discretizante,
- (e) Valores de recuperações seguindo a parametrização proposta por Plitt (Rosin-Rammler) do ensaio individual.

Constarão ainda da tabela os valores das somas dos quadrados dos desvios e a somatória das variâncias para cada conjunto de valores de partição corrigida obtido. Ao final são apresentados os valores das variáveis de processo conforme descrito no final do módulo 2.

A segunda parte do sistema, relativa à simulação de operação de ciclones, inicia-se pelo módulo 6 cuja função é efetuar a previsão de resultados segundo o modelo discretizante.

Inicialmente dá-se a escolha do tipo de arquivo de curva padrão de partição (curva de ensaio individual, curva gerada no módulo 2 do sistema ou curva média gerada no módulo 4), acompanhada pelas constantes ajustadas pelo modelo de Plitt.

O próximo passo é a entrada de dados da operação que se deseje simular, compostos por:

- (a) Distribuição granulométrica da alimentação,
- (b) Dados geométricos do ciclone escolhido,
- (c) Pressão de operação,
- (d) Vazão de polpa na alimentação,
- (e) Densidade dos sólidos e
- (f) Concentração de sólidos em peso.

Terminada a entrada de dados, o programa calcula o  $d_{50}$  utilizando a equação de Plitt ajustada. Depois de calculadas as médias geométricas entre as malhas (segundo os valores de distribuição granulométrica digitados na etapa de entrada de dados), o arquivo selecionado de curva padrão de partição fornecerá os valores de recuperação.

De posse desses dados é calculado o balanço de massas geral da operação.

As etapas finais deste módulo do sistema consistem na apresentação de tabelas de:

(a) Distribuições granulométricas da alimentação, "underflow" e "overflow",

(b) Balanços globais e de cada produto, tais como: vazões de sólidos, vazões de fluido, vazões de polpa, concentração de sólidos em volume e em peso, etc.

(c) Geometria do ciclone escolhido e

(d) Variáveis operacionais.

Eventualmente, se o número de ciclones resultante dos cálculos não for inteiro, há a opção de acertar o número de ciclones mediante a alteração da pressão de operação.

O último módulo desta segunda parte do sistema é bastante semelhante ao anterior, as únicas diferenças sendo:

(a) A escolha inicial do arquivo tem por objetivo fornecer apenas as constantes ajustadas do modelo de Plitt, e

(b) Os valores de recuperação das malhas escolhidas são calculados pela equação de Rosin-Rammler, definida pelos parâmetros  $d_{50}$  e  $m$  do modelo de Plitt.

A apresentação de resultados é idêntica à do módulo anterior.

## 5.2 Aplicações do Sistema.

O sistema, tal como formulado, permite a sua utilização como ferramenta adicional nas seguintes tarefas listadas abaixo em ordem crescente de sofisticação:

(a) Arquivo de dados de operações de classificação que envolvam ciclones,

(b) Arquivo de dados de performance de minérios agrupados por tipos, frente a processos de classificação que envolvam ciclones,

(c) Arquivos de dados de operação de ciclones agrupados por tipos de equipamentos,

(d) Verificação da aderência de valores experimentais frente a modelos paramétricos de curvas de partição,

(e) Simulações, para levantamento de parâmetros técnicos e econômicos de processos de classificação com ciclones, segundo tipo de equipamento ou tipo de minério,

(f) Verificação da performance do processo em função de alterações nos valores de variáveis de operação,

(g) Obtenção, mediante simulações, de valores otimizados de variáveis de operação em função de índices técnico e/ou econômicos do processo,

(h) Simulações de performance de circuitos completos de classificação, segundo o tipo de minério escolhido.

## 6. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO AJUSTE PROPOSTO

### 6.1 Introdução.

O trabalho experimental visou verificar a aplicabilidade e possíveis benefícios provenientes do emprego do ajuste proposto. Ele pode ser executado graças ao apoio do corpo técnico da equipe de tecnologia mineral da Serrana S.A. de Mineração.

A partir de dados históricos de operação do circuito de moagem e classificação da principal usina de beneficiamento do minério carbonatítico de Jacupiranga, foi formado, mediante o uso do sistema computerizado desenvolvido, um banco de dados contendo informações detalhadas de desempenho e valores das variáveis de operação relevantes no processo.

O passo seguinte foi o cálculo de curvas padrão de partição médias, parametrizadas de acordo com a técnica proposta e pela equação de Rosin-Rammler, assim como calibrações, em função das características do circuito, das equações do modelo de Plitt, descritivas do processo.

Foram realizadas então, várias simulações em computador, visando comparar os resultados obtidos nas simulações, frente a dados experimentais de operação do circuito. No final deste capítulo são apresentados elementos para análise de todo o trabalho desenvolvido.

### 6.2 Descrição do Processo da Serrana.

A operação global de exploração mineral da Serrana S.A. de Mineração, sobre o corpo carbonatítico de origem ígnea, do depósito alcalino de Jacupiranga, estado de São Paulo, tem como

principais produtos a apatita, empregada como matéria prima na indústria de fertilizantes fosfatados, e a calcita, utilizada na fabricação de cimento. A composição mineralógica média do depósito é apresentada na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Composição mineralógica média do minério de Jacupiranga.

Mineral	Quantidade (%)
Apatita	12
Calcita	57
Dolomita	21
Magnetita	7
Flogopita	2
Doutros	1
Total	100

O minério é lavrado a céu aberto a uma razão de 10,5 milhões t/ano, com teor médio de 5,4 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, além de serem removidos 2,0 milhões t/ano de material estéril. O minério é denominado calcítico ou dolomítico, em função da quantidade relativa de dolomita, já que o teor do elemento magnésio é condicionante de sua utilização como matéria prima na fabricação de cimento. A proporção de minério calcítico e dolomítico é de aproximadamente 4:1.

A britagem do "run-of-mine" é feita em dois estágios, sendo o primeiro em britador giratório em circuito aberto, e o segundo em

britadores cônicos em circuito fechado com peneiras, que limitam o tamanho máximo do material a 32 mm ( 1 1/4" ).

A etapa seguinte é a homogeneização do minério em duas pilhas prismáticas paralelas através de "stacker". A retomada dá-se por retomador de placas, sendo então, transportado até a planta de beneficiamento.

O minério lavrado em Jacupiranga, é beneficiado em duas usinas distintas, a Usina 310 e a Usina 320.

A Usina 310 é a pioneira da Companhia, já que lá era beneficiado o minério intemperizado que originalmente cobria o então Morro da Mina. Após diversas modificações e ampliações esta unidade tem hoje uma capacidade instalada de moagem de 100 t/h, processando carbonatito dolomítico.

A Usina 320, principal unidade de concentração de rocha fosfática em Jacupiranga, apresenta fluxograma muito parecido com o da Usina 310, beneficiando porém tanto minério calcítico como dolomítico. A capacidade instalada de moagem não é a mesma para os dois tipos de minério, devido às diferenças de moabilidade que estes apresentam, situando-se em 550 t/h para o minério calcítico e em 610 t/h para o minério dolomítico.

A Tabela 6.2 apresenta a distribuição granulométrica típica do material que alimenta a usina.

A granulação de liberação relativamente grossa da apatita, que se encontra entre as malhas 35 e 48 da escala Tyler (420 e 300  $\mu$ m respectivamente) determinou, já no projeto original, que a moagem fosse realizada somente em moinhos de barras (em circuito fechado).

Ro longo de sua existência, foram sendo testadas e implantadas algumas modificações no circuito de moagem e classificação da usina industrial, particularmente no equipamento de classifica-

Tabela 6.2 - Distribuição granulométrica típica da alimentação da Usina 320, Serrana.

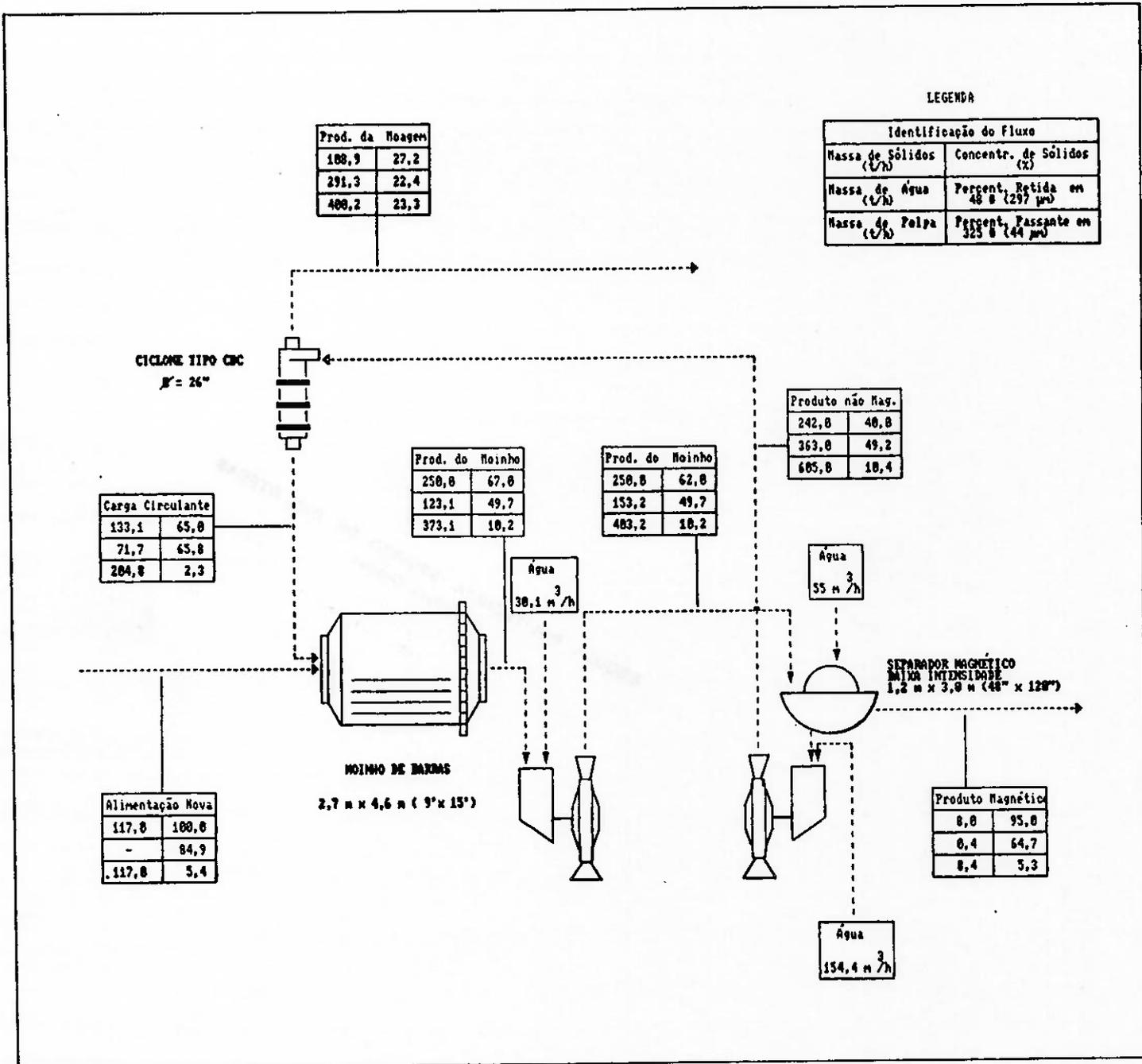
Fração Granulométrica ( $\mu\text{m}$ )	Massa Retida (%)	
	Simples	Acumulada
25.400 (1")	10	10
10.050 (3/4")	18	28
12.700 (1/2")	13	41
6.350 (1/4")	16	57
2.380 (8#)	11	68
297 (48#)	16	84
149 (100#)	5	89
44 (325#)	6	95
-44	5	100

ção, visando maximizar a capacidade do circuito. A configuração atual desta parte da usina, com um fluxograma de processo e balanço de massas típico, é mostrada na Figura 6.1 da página seguinte.

O circuito consiste em cinco linhas paralelas e independentes de moagem, desmagnetização e classificação, cada uma contando com um moinho de barras com dimensões de 2,7 X 4,6 m (9' X 15'), um ciclone tipo C.B.C., cujo diâmetro é de 660 mm (26") e um separador magnético de baixa intensidade, via úmida, com diâmetro de 48" e largura de 120", operando em contra-corrente.

A introdução, a partir de 1978, da etapa de separação magnética na saída do moinho implicou em um aumento na

Figura 6.1. Fluxograma de processo e balanços de massa e água do circuito de moagem da Usina 320 (cinco linhas em paralelo). Serrana.



capacidade do circuito, uma vez que devido à sua grande resistência à moabilidade, altas densidade e dureza, a magnetita originalmente tendia a ficar retida na carga circulante do moinho, aumentando o desgaste de corpos moedores e revestimentos dos moinhos, reduzindo a capacidade de moagem e aumentando o consumo energético.

Os ciclones empregados desde 1984 na classificação, são do tipo fundo chato, conhecidos como C.B.C. ou "circulating-bed-classifier"; operando a altas concentrações de sólidos e baixas pressões na alimentação, permitem obter produtos relativamente grossos, com cerca de 14 % de material retido em 35 malhas (420  $\mu\text{m}$ ), além de evitar a sobre-moagem do minério pela menor carga circulante gerada, com conseqüente minimização da quantidade de finos no produto da classificação. Esta última característica do circuito implica em uma minimização de perdas em apatita na deslamagem em 44  $\mu\text{m}$  subsequente do produto moído.

A distribuição granulométrica média do produto desta etapa é mostrada na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Distribuição granulométrica do produto da etapa de moagem da Usina 320, Serrana.

Fração Granulométrica ( $\mu\text{m}$ )	Massa Retida (%)	
	Simple	Acumulada
297 (48#)	25	25
149 (100#)	27	52
44 (325#)	24	76
-44	24	100

Deve-se notar ainda que, no caso específico da Serrana, além de maximizar a recuperação de P205 na deslamagem, a performance da classificação em equipamentos que operam com baixa eficiência aumenta a capacidade do circuito de moagem pela menor carga circulante gerada, além de elevar os índices de recuperação de P205 na etapa posterior de flotação, devido à ausência de finos de apatita na polpa.

Ainda, com relação ao tipo de classificação praticada na usina da Serrana, pode-se atribuir a esta:

- Uma minimização substancial nos gastos com o reagente empregado na depressão da calcita (amido de milho), já que há condicionamento separado de finos e grossos, e a dosagem praticada nos finos é da ordem de dez vezes maior que a dos grossos;

- Facilidade de operação devido à simplicidade do circuito;

- Minimização de gastos com instrumentação e controle do processo;

- Estabilidade de operação devido à baixa concentração de sólidos nas linhas de classificação;

- Aumento de 5 % na capacidade global de moagem do circuito;

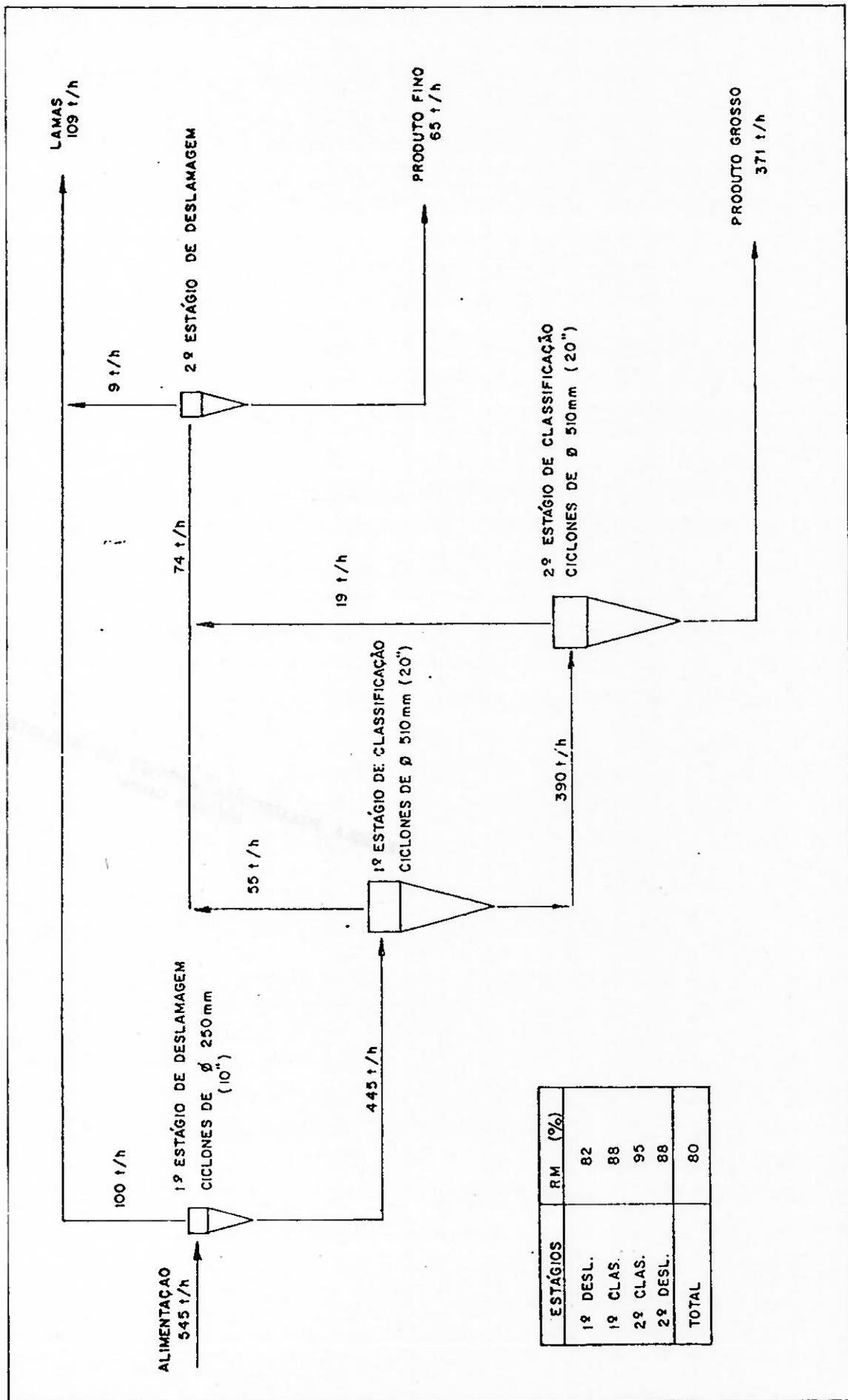
O produto da moagem é encaminhado à etapa de deslamagem, conforme mostra o fluxograma simplificado da Figura 6.2 da página seguinte.

Nesta parte do circuito há geração de duas frações, grossos e finos que, após condicionamento, serão encaminhados às etapas de concentração por flotação.

A secção de flotação é constituída de dois circuitos distintos, a saber:

- Circuito Mecânico, formado por 88 células de pequeno volume (1,7 m<sup>3</sup>) e beneficiando cerca de 2/3 da massa alimentada.

Figura 6.2. Fluxograma do Circuito de Deslamagem, Usina 320 da Serrana



Apresenta circuito clássico "rougher-scavenger", seguido de duas etapas de lavagem, ou "cleaner-recleaner", e

- Circuito Pneumático, constituído de duas células, "rougher-scavenger", de 37 m<sup>3</sup> cada; beneficia 1/3 da massa alimentada.

A Tabela 6.4 em sua parte (a), mostra um balanço de massas e metalúrgico atual da Usina-320, e na parte (b), as recuperações em cada uma das etapas do processo. Os dados são médios, já que os concentrados calcíticos apresentam teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e os dolomíticos, 37 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

### 6.3 Amostragens.

Dentro do programa sistemático de controle de qualidade praticado pela equipe técnica da Serrana nas diversas etapas do processamento do minério, é realizada a cada mês, pelo menos uma campanha completa de amostragem no circuito de moagem/desmagnetização/classificação do minério apatítico.

Essas amostragens constam inicialmente, da coleta, em cada uma das cinco linhas independentes de moagem, de alíquotas incrementais dos fluxos de alimentação, "underflow" e "overflow", que servirão posteriormente para cálculos de distribuições granulométricas. São ainda feitas medidas para a determinação da vazão mássica da alimentação nova e da carga circulante, assim como de dados de operação: pressão de alimentação, concentração de sólidos, e medidas de apex, vortex, etc. é anotado o tipo de minério, calcítico ou dolomítico, com o qual o circuito operava no momento das amostragens.

A cada campanha, de maneira alternada, é eleita uma linha individual, para a qual se estabelece um balanço de massas e de água completo do circuito.

Tabela 6.4 (a) Balanço de Massas e Metalúrgico, Usina 320 da Serrana.

Produto	Vazão Massa (t/h)	Massa (% do total)	Teor de P2O5 (%)	Massa de P2O5 (%)
Alimentação	585,0	100,0	5,3	100,0
Magnético	41,0	7,0	1,6	2,2
Lamas	108,2	18,5	3,5	12,3
Concentrado de Fosfato	64,4	11,0	35,8	75,0
Calcário	371,4	63,5	1,0	10,5

Tabela 6.4 (b). Recuperações em Massa e de P2O5, Usina 320 da Serrana.

Etapa do Processo	Recuperação em Massa (%)	Recuperação em P2O5 (%)
Desmagnetização	93	98
Deslamagem	80	87
Flotação	15	88
Global	11	75

Para efeito do trabalho proposto, foram fornecidas pela Serra-na, dezoito planilhas completas referentes às amostragens reali-zadas no circuito, que cobriram o período de setembro de 1987 a novembro de 1988, de quinze meses portanto. Este material encon-tra-se à disposição para consultas.

#### 6.4 Formação do Banco de Dados.

Das dezoito campanhas completas de amostragens, dezesseis foram reservadas para formação do banco de dados ; as duas últi-mas, de números 19 e 20, datadas de 23 e 29 de novembro de 1988 respectivamente, destinaram-se à aferição dos modelos. Conseqüen-temente, partiu-se inicialmente de oitenta conjuntos completos de dados (dezesseis amostragens vezes cinco linhas de moagem cada) de análises granulométricas e condições operacionais, para forma-ção do banco de dados.

Conforme descrito no capítulo anterior, o sistema computeriza-do desenvolvido, conta com uma parte inicial de criação de arqui-vos para armazenagem de dados experimentais. Dessa maneira, cada um dos oitenta conjuntos de dados foi introduzido individualmen-te no sistema, em seu módulo 2, de modo a compor curvas padrão de partição, além do cálculo e armazenamento das constantes das equações de modelo de Plitt, partindo-se de dois tipos de parame-trização da curva padrão de partição individual: equação de Rosin-Rammler e modelo discretizante. Os arquivos são completados com todos os dados experimentais levantados.

Durante esta fase dos trabalhos, nove amostragens foram ex-cluídas do banco de dados devido a problemas diversos, tais como: partições não decrescentes com a diminuição da malha de peneira-mento, grandes variações nas vazões medidas da carga circulante,

valores discrepantes de concentração de sólidos nos diversos fluxos, etc.

A Tabela 6.5 apresenta a identificação de cada um dos setenta e um arquivos gerados, de acordo com as planilhas de amostragem que lhes deram origem. A organização do programa impôs o seguinte tipo de nomenclatura seqüencial aos arquivos: palavra SERR, seguida do número da planilha de amostragem, ou seja, 01,02,..., até 18 (exceto 15 e 16), letra M e o número da linha de moagem. Assim, o arquivo identificado por SERR13M4 designa os dados da quarta linha de moagem da décima-terceira planilha de amostragem, ou conforme a Tabela 6.5, de 08/07/88.

A título de exemplo, encontra-se descrita a seguir, a seqüência de entradas de dados, cálculos e apresentações de resultados em forma de tabelas e gráficos, referentes à formação do arquivo SERR01M1.

A Figura 6.3 mostra a planilha de amostragem datada de 02/10/87, tal como fornecida pela Serrana. Observam-se nesta figura as distribuições granulométricas da alimentação, "underflow" e "overflow", assim como as concentrações mássicas de sólidos das cinco linhas de moagem da Usina 320. Fazem parte ainda desta planilha, dados geométricos e vazões de alimentação dos ciclones.

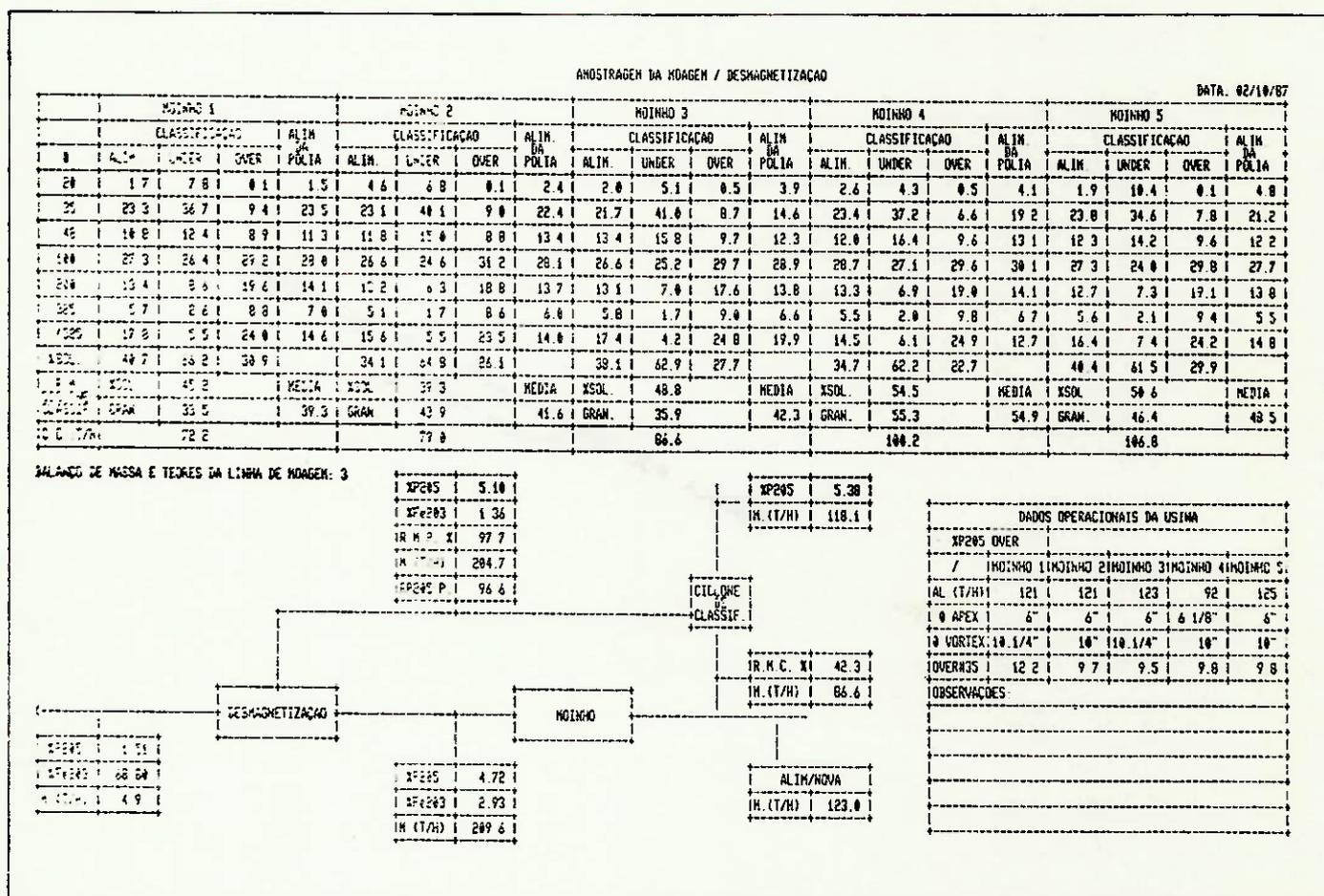
A seguir é apresentado um exemplo da seqüência de etapas cumpridas pelo programa computerizado que vão desde a introdução de dados pelo usuário, até a criação dos arquivos individuais referentes a cada uma das amostragens realizadas. Para o exemplo foi escolhida a primeira linha de moagem da primeira planilha de amostragem, de 02/10/87.

Após a identificação do arquivo a ser gerado, são introduzidas no módulo 2 do programa desenvolvido, as frações mássicas retidas

Tabela 6.5. Identificação dos arquivos gerados.

NÚMERO SEQUENCIAL DA FOLHA DE AMOSTRAGEM	DATA DE REALIZAÇÃO DA AMOSTRAGEM	TIPO DE MINÉRIO	NÚMERO DE LINHAS APROVEITADAS	IDENTIFICAÇÃO DOS ARQUIVOS GERADOS
01	02/10/87	DOL	5	SERR01M1, SERR01M2, SERR01M3, SERR01M4 e SERR01M5
02	25/09/87	DOL	5	SERR02M1, SERR02M2, SERR02M3, SERR02M4 e SERR02M5
03	23/02/87	DOL	5	SERR03M1, SERR03M2, SERR03M3, SERR03M4 e SERR03M5
04	29/02/88	CAL	5	SERR04M1, SERR04M2, SERR04M3, SERR04M4 e SERR04M5
05	15/03/88	DOL	4	SERR05M2, SERR05M3, SERR05M4 e SERR05M5
06	26/03/88	CAL	4	SERR06M2, SERR06M3, SERR06M4 e SERR06M5
07	12/04/88	CAL	5	SERR07M1, SERR07M2, SERR07M3, SERR07M4 e SERR07M5
08	23/04/88	DOL	5	SERR08M1, SERR08M2, SERR08M3, SERR08M4 e SERR08M5
09	25/05/88	DOL	5	SERR09M1, SERR09M2, SERR09M3, SERR09M4 e SERR09M5
10	31/05/88	CAL	5	SERR10M1, SERR10M2, SERR10M3, SERR10M4 e SERR10M5
11	03/08/88	DOL	4	SERR11M1, SERR11M3, SERR11M4 e SERR11M5
12	28/07/88	CAL	4	SERR12M1, SERR12M2, SERR12M3 e SERR12M5
13	08/07/88	DOL	5	SERR13M1, SERR13M2, SERR13M3, SERR13M4 e SERR13M5
14	23/06/88	DOL	4	SERR14M1, SERR14M2, SERR14M3, e SERR14M4
15	NÃO FORAM GERADOS			ARQUIVOS
16	NÃO FORAM GERADOS			ARQUIVOS
17	29/08/88	CAL	3	SERR17M1, SERR17M4 e SERR17M5
18	19/10/88	CAL	3	SERR18M1, SERR18M4 e SERR18M5
19	23/11/88	CAL	5	SERR19M1, SERR19M2, SERR19M3, SERR19M4 e SERR19M5
20	29/11/88	DOL	5	SERR20M1, SERR20M2, SERR20M3, SERR20M4 e SERR20M5
TOTAL			71	

Figura 6.3. Planilha de amostragem do circuito de classificação da Usina 320 da Serrana, datada de 02/10/87.



em cada uma das malhas selecionadas, relativas a cada um dos fluxos amostrados. A Figura 6.4.a apresenta a configuração final de entrada de dados de distribuições granulométricas da alimentação, "overflow" e "underflow", para o arquivo SERR01M1. A mesma figura em sua parte b, apresenta a tela contendo as opções de entrada de dados referentes às recuperações de sólidos e água, que podem ser feitas diretamente (opção a), ou através das concentrações de sólidos (em peso) de cada um dos fluxos do ciclone.

O programa retifica os dados experimentais segundo o método dos mínimos quadrados.

São então calculadas as partições experimentais e corrigidas para cada uma das médias entre as malhas analisadas. O cálculo da partição corrigida é efetuado mediante a subtração da parcela  $R_f$  de cada uma das médias das malhas. Adotou-se como critério que, quando o valor da recuperação corrigida calculada for negativo, este é igualado a zero; da mesma maneira, quando o valor deste parâmetro for maior do que 100%, é igualado a 100%.

O passo subsequente é a composição do gráfico em escala bilogarithmica, cujos eixos x e y abrigam as dimensões dos grãos e a expressão  $\ln((1-R_s)/R_s)$  respectivamente. Trata-se de um gráfico onde a equação de Rosin-Rammler apresenta-se como uma reta.

Após a marcação dos pontos neste gráfico é feita uma regressão linear com os mesmos visando-se obter a equação de Rosin-Rammler, cujos quadrados dos desvios em relação aos dados experimentais sejam mínimos. São calculados e arquivados os parâmetros  $d_{50}$  e  $m$ .

A Figura 6.5 mostra o gráfico contendo os valores calculados de partição corrigida, representados pelos pontos plotados, assim como da reta obtida, para o arquivo SERR01M1.

O programa executa a seguir as rotinas de cálculos para obtenção da curva de partição corrigida segundo a técnica de discreti-

Figura 6.4. Configuração final da entrada de dados de distribuições granulométricas, para o arquivo SERR01M1.

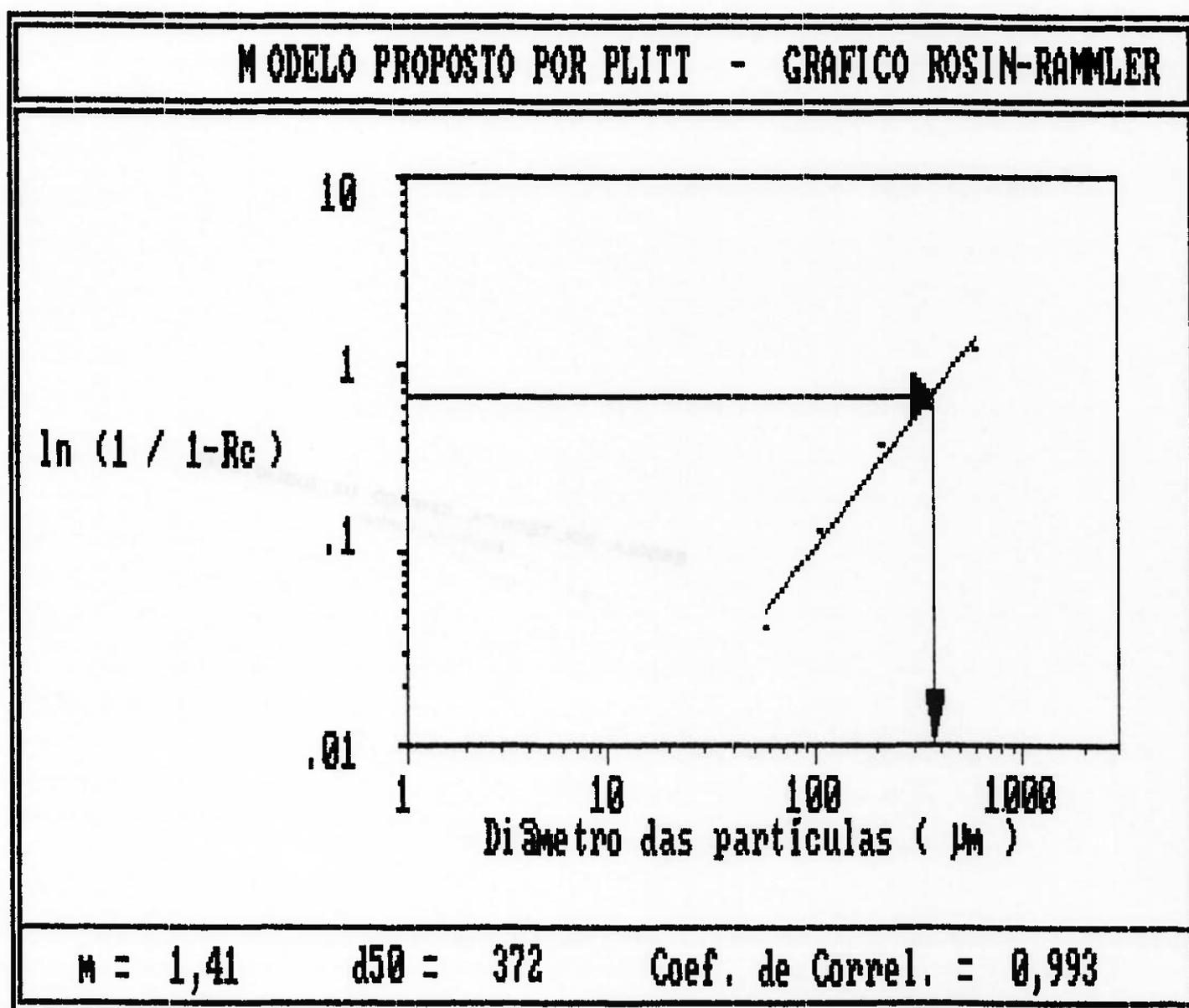
ENTRADA DE DADOS - DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS			
Malha ( $\mu\text{m}$ )	Alimentação ( % retida )	Overflow ( % retida )	Underflow ( % retida )
840	1,7	,1	7,8
420	23,3	9,4	36,7
297	10,8	8,9	12,4
149	27,3	29,2	26,4
74	13,4	19,6	8,6
44	5,7	8,8	2,6
-44	17,8	24,0	5,5
Somas	100,0	100,0	100,0

(a)

ENTRADA DE DADOS - RECUPERAÇÕES	
OPÇÃO A	
Recuperação de sol no underflow (%)	:
Recuperação de água no underflow (%)	:
OPÇÃO B	
Concentração de sol em peso na alimentação (%)	40,7
Concentração de sol em peso no overflow (%)	30,9
Concentração de sol em peso no underflow (%)	66,2

(b)

Figura 6.5. Gráfico contendo os valores plotados de partição corrigida e a reta obtida por regressão linear com os pontos; equação de Rosin-Rammler, arquivo SERR01M1.



zação proposta neste trabalho, ou seja, a interpolação linear dos pontos de partição corrigida. A Figura 6.6 apresenta o gráfico, assim como o produto da parametrização pelo método discretizante, com os dados do arquivo SERR01M1.

Passa-se então à entrada dos dados da geometria do ciclone e de operação do circuito, que servirão para calibração das quatro equações do modelo de Plitt se a parametrização da curva de partição for feita de acordo com a equação de Rosin-Rammler, e apenas três (exceto a do parâmetro  $m$ ) no caso de parametrização segundo o método discretizante. A Figura 6.7 mostra a configuração final de entrada de dados de geometria do ciclone e de operação para o arquivo SERR01M1.

Neste ponto calcula-se a curva padrão de partição do sistema, segundo o método discretizante, mediante a divisão das abscissas de todos os pares ordenados da curva de partição, pelo parâmetro  $d50cor$  obtido anteriormente.

Criam-se arquivos para armazenagem de todos os dados experimentais, além de pontos da curva padrão de partição produto do método discretizante. Este último arquivo é composto por pares ordenados equidistantes de 0,01 (parâmetro adimensional  $d_i/d50cor$ ) nas abscissas, previamente calculados por interpolações lineares nas semi-retas anteriormente geradas.

O módulo é concluído com a apresentação de duas telas no monitor do micro-computador, que estão reproduzidas na Figura 6.8 da seguinte maneira:

- curva padrão de partição obtida segundo o método discretizante. A Figura 6.8.a mostra a curva obtida para o arquivo SERR01M1, e

- tabela de comparação de valores de partições obtidas segundo a parametrização proposta por Plitt e pelo método discretizante,

Figura 6.6. Gráfico contendo os valores plotados de partição corrigida e o produto da parametrização pelo método discretizante, arquivo SERR01M1.

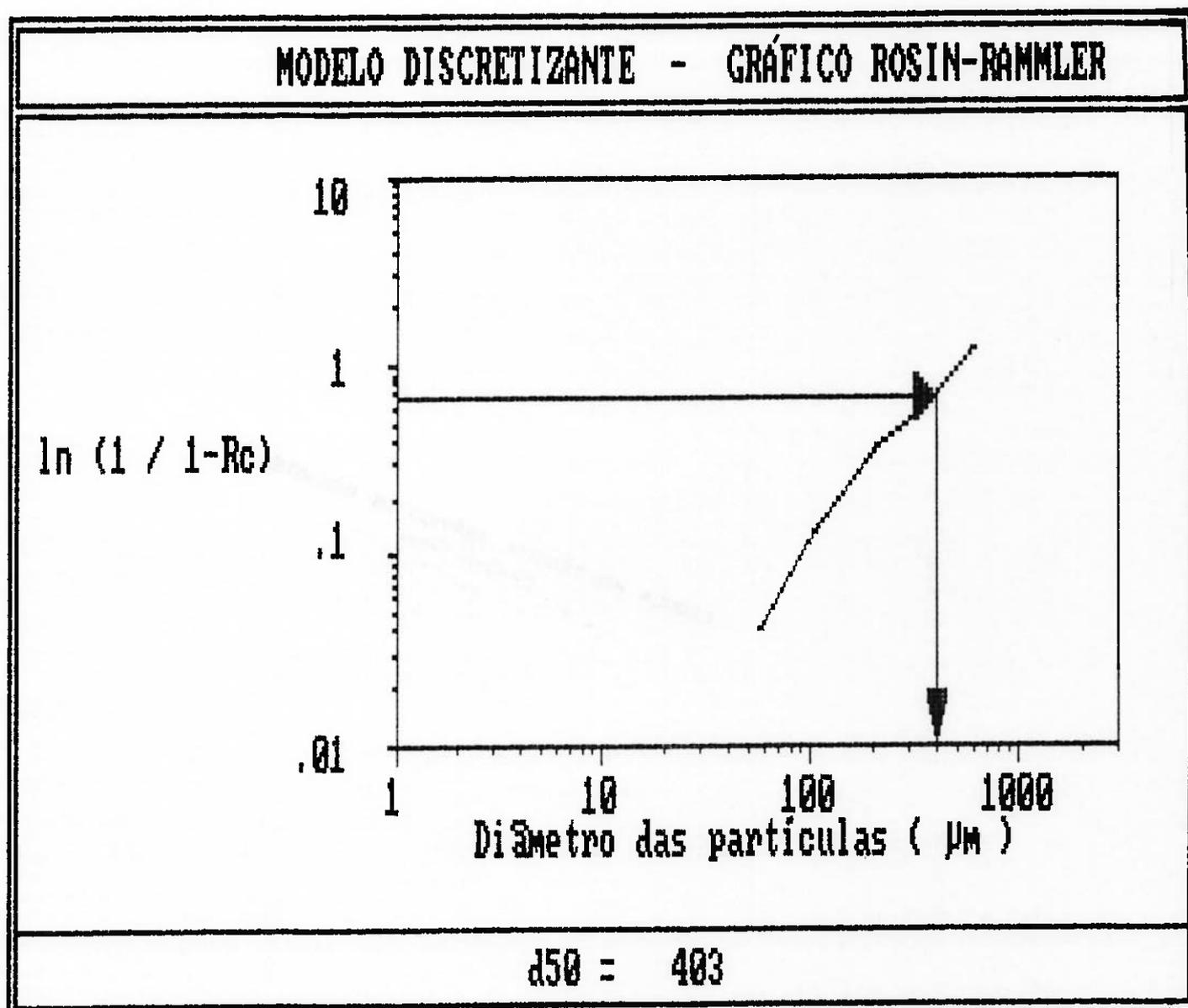
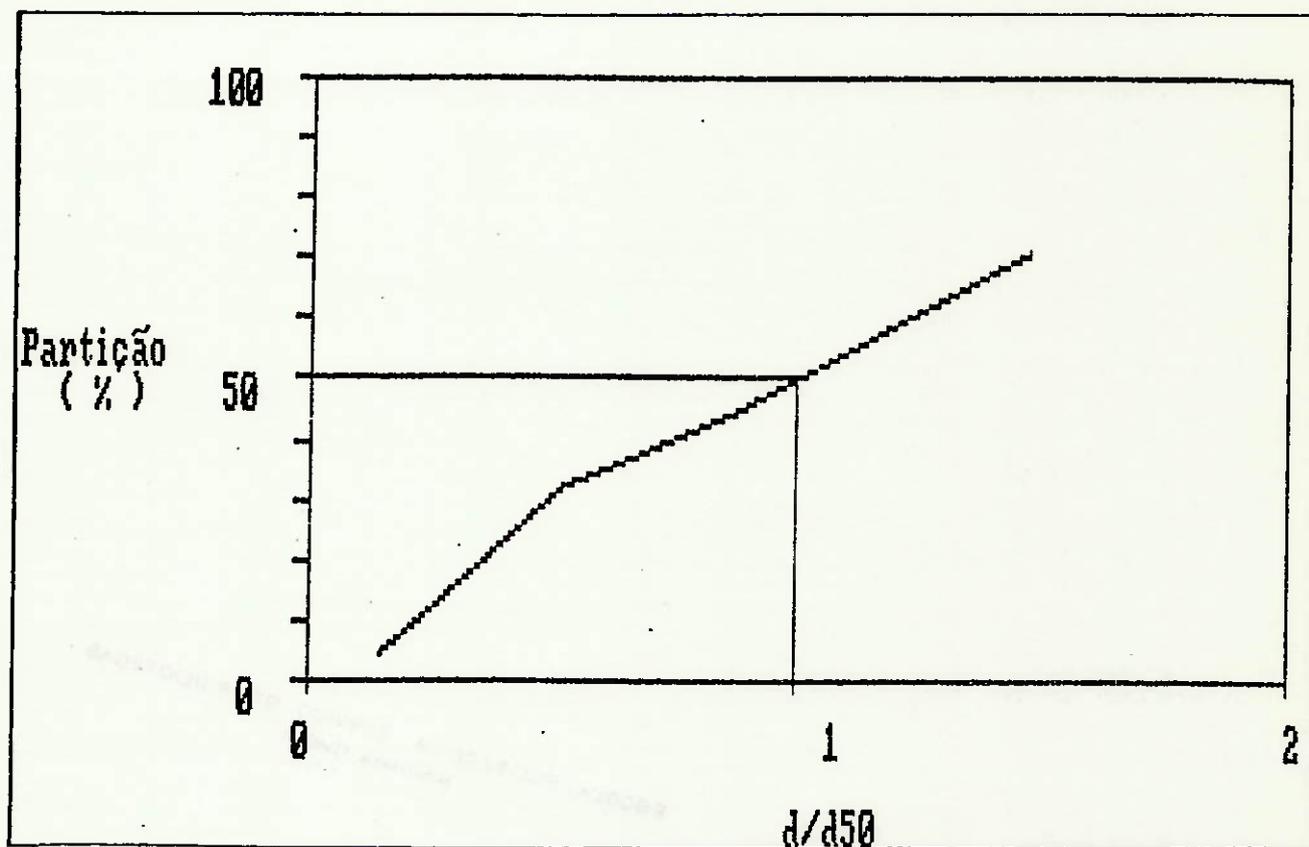


Figura 6.7. Configuração final da entrada de dados de geometria do ciclone e de operação para o arquivo SERR01M1.

ENTRADA DE DADOS - GEOMETRIA DO CICLONE E DADOS DE PROCESSO	
Diâmetro do ciclone (pol)	26,0
Diâmetro do apex (pol)	6,0
Diâmetro do vortex (pol)	10,25
Área de alimentação (pol <sup>2</sup> )	60,0
Altura livre do vortex (pol)	67,0
Vazão de polpa na alimentação (m <sup>3</sup> /h)	328,0
Concentração de sólidos em peso na Alim (%)	40,7
Densidade dos sólidos (t/m <sup>3</sup> )	2,8
Pressão (psi)	12

Figura 6.8. Gráfico da curva padrão de partição calculada com os dados do arquivo SERR01M1.



(a)

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO				
DADOS Malha ( $\mu\text{m}$ )	EXPERIMENTAIS		MÉTODO DE PLITT	MÉTODO DISCRETIZANTE
	Partição Observada	Partição Corrigida	Partição Calculada	Partição Calculada
840	1,000	1,000	-	-
420	0,755	0,709	0,739	0,709
297	0,533	0,445	0,475	0,445
149	0,427	0,319	0,266	0,319
74	0,261	0,123	0,109	0,123
44	0,192	0,041	0,048	0,041
-44	0,170	0,014	-	-
Soma dos Quadrados dos Desvios			0,477	0,000
Variância			0,095	0,000

(b)

frente aos valores experimentais, além dos desvios apresentados em cada metodologia. A Figura 6.8.b mostra a tabela descrita para o arquivo SERR01M1.

A formação de cada um dos setenta arquivos subseqüentes seguiu os mesmos passos mostrados até este ponto para o arquivo SERR01M1.

Devido à inconveniência de se apresentarem os gráficos contendo as setenta e uma curvas padrão de partição formadas nesta fase dos trabalhos, foram listadas na Tabela 6.6, os valores calculados de partição corrigida de cada um dos arquivos, referentes a vinte pontos contados a partir da origem e espaçados de 0,1 do parâmetro adimensional  $d_i/d_{50}$ , no eixo das abscissas.

Essa tabela serve para ilustrar simplificadaamente o extenso trabalho realizado, uma vez que são apresentados os valores de partição (para cada um dos arquivos individuais) tomados em intervalos distanciados de 0,1 do parâmetro adimensional  $d_i/d_{50cor}$ . Vale frisar que cada um dos arquivos individuais são formados por pares ordenados de valores de partição e do parâmetro  $d_i/d_{50cor}$  em intervalos de 0,01 deste, que juntos correspondem às setenta e uma curvas padrão de partição geradas.

O módulo 4 do sistema permite, a partir da escolha de arquivos individuais, calcular a curva padrão de partição média e a média das constantes das equações do modelo de Plitt. Assim, a etapa seguinte dos trabalhos constou do cálculo computerizado de três arquivos médios assim formados:

a) Arquivo SERMEDIO (Médio). Calculado pela média dos dados contidos em cada um dos setenta e um arquivos individuais;

b) Arquivo SERDOLOM (Dolomítico). Calculado pela média dos dados contidos nos quarenta e dois arquivos de amostragens realizadas com o circuito operando com minério dolomítico, ou seja,

Tabela 6.6. Valores de partição tomados em pontos discretos do eixo das abscissas das curvas padrão de partição, referentes aos diversos arquivos individualmente gerados.

Arquivo	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	
PARTIÇÕES																					
SER0101.COR	0.0	8.1	15.2	22.8	30.3	34.7	38.3	41.8	45.4	50.0	54.4	58.8	63.2	67.7							
SER0102.COR	0.0	3.3	9.6	16.2	22.7	28.8	34.4	40.1	45.8	50.0	54.0	58.0	62.0	66.0	70.0						
SER0103.COR	0.0	2.8	11.1	18.1	25.0	31.8	36.6	41.1	45.5	50.0	54.0	57.7	61.4	65.2	68.9	72.6	76.4				
SER0104.COR	0.0	1.7	9.5	17.2	23.9	30.5	37.2	43.0	48.5	50.0	53.5	57.0	60.4	63.1	65.8	68.5	71.1	73.8	76.5	79.1	
SER0201.COR	0.0	2.4	8.9	16.4	23.9	31.0	35.8	40.6	45.4	50.0	54.0	58.0	61.9	65.9	69.9	73.9					
SER0202.COR	0.0	8.5	19.5	25.6	31.4	36.5	39.9	43.2	46.4	50.0	53.5	57.0	60.5	64.0	67.5						
SER0203.COR	0.0	3.0	7.3	14.8	21.9	28.8	34.2	39.6	45.0	50.0	53.9	57.7	61.6	65.5	69.4	73.2					
SER0204.COR	0.0	9.3	17.2	23.0	28.8	34.4	38.3	42.2	46.1	50.0	53.6	57.3	60.9	64.5	68.2	71.8					
SER0205.COR	0.0	16.5	20.8	24.7	28.7	32.4	36.6	41.1	45.5	50.0	54.5										
SER0206.COR	0.0	7.5	14.5	20.2	25.9	31.3	36.0	40.7	45.4	50.0	54.5	59.0	63.5	68.0	72.5						
SER0301.COR	0.0	0.0	7.0	16.8	23.7	29.5	35.2	41.0	46.0	50.0	54.0	58.1	62.1	66.1	70.1	74.1	78.1	82.1	86.1	90.1	94.1
SER0302.COR	0.0	5.5	11.4	17.7	24.0	30.3	35.7	40.5	45.2	50.0	54.1	56.9	59.6	62.3	65.1	67.8	70.5				
SER0303.COR	0.0	7.8	14.8	20.2	25.3	30.4	35.4	40.2	45.1	50.0	54.4	57.7	61.0	64.3	67.7	71.0	74.3				
SER0304.COR	0.0	5.2	11.0	19.1	27.2	33.0	37.3	41.5	45.7	50.0	54.3	58.6	62.9	67.2	71.5						
SER0305.COR	0.0	4.0	12.7	19.2	25.0	30.7	36.0	40.7	45.3	50.0	54.7	57.6	60.5	63.3	66.2	69.1	71.9	74.8			
SER0401.COR	0.0	6.3	15.2	24.4	29.0	33.2	37.4	41.6	45.8	50.0	54.2										
SER0402.COR	0.0	5.3	11.2	17.2	23.0	28.8	34.4	39.8	44.9	50.0	55.1										
SER0403.COR	0.0	8.3	17.0	22.5	28.0	33.1	37.7	42.4	47.0	50.0	52.6	55.3	57.9	60.5	63.2						
SER0404.COR	0.0	8.6	12.8	18.2	24.3	30.4	36.0	40.7	45.3	50.0	54.7	57.9	60.8	63.6	66.5	69.3	72.2	75.0			
SER0405.COR	0.0	5.6	15.9	22.9	29.8	36.4	39.9	43.3	46.7	50.0	52.4	55.1	57.7	60.2	62.8	65.3					
SER0502.COR	0.0	6.5	12.4	18.4	24.5	30.0	35.2	40.4	45.6	50.0	54.3	58.6	62.9	67.2	71.5						
SER0503.COR	0.0	6.2	14.5	22.3	27.5	32.7	38.0	42.7	46.4	50.0	53.6	57.3	60.8	62.9	64.9	66.9	68.9	70.9	72.9	75.0	
SER0504.COR	0.0	7.9	14.6	21.4	28.2	34.3	38.3	42.3	46.3	50.0	53.2	56.4	59.6	62.9	66.1	69.3					
SER0505.COR	0.0	7.2	12.2	17.6	23.5	29.4	35.1	40.1	45.0	50.0	55.0	58.7	60.9	63.1	65.2	67.4	69.6	71.8	73.9		
SER0602.COR	0.0	6.3	13.0	20.7	28.4	33.6	37.4	41.2	45.0	50.0	55.0	59.9	64.9	69.9	74.8						
SER0603.COR	0.0	0.0	9.9	16.8	23.0	29.1	35.3	41.1	45.5	50.0	54.5	58.9	63.4	65.6	67.6	69.6	71.6	73.7	75.7	77.7	
SER0604.COR	0.0	1.8	6.1	12.5	18.9	25.3	32.0	38.6	45.2	50.0	52.9	55.8	58.8	61.7	64.6	67.5					
SER0605.COR	0.0	14.2	1.9	7.4	16.1	24.8	31.8	37.8	43.9	50.0	55.0	58.2	61.4	64.6	67.8	71.0	74.2				
SER0701.COR	0.0	1.6	7.2	13.7	20.4	27.1	33.0	38.7	44.3	50.0	54.6	57.8	61.0	64.2	67.4	70.6	73.8				
SER0702.COR	0.0	3.4	7.7	15.0	22.2	28.9	34.9	41.0	47.0	50.0	52.2	54.3	56.5	58.7	60.8						
SER0703.COR	0.0	6.8	9.6	17.2	24.8	30.7	36.0	41.4	46.3	50.0	53.7	57.3	61.0	64.7							
SER0704.COR	0.0	5.9	8.5	17.3	26.0	32.3	36.8	41.3	45.7	50.0	54.2	58.5	62.7	67.0	71.2						
SER0705.COR	0.0	3.7	13.2	19.8	25.5	31.2	36.3	40.8	45.4	50.0	54.3	57.1	59.9	62.7	65.5	68.3	71.2	74.0			
SER0801.COR	0.0	7.4	12.5	17.3	24.5	32.3	40.1	43.5	46.7	50.0	53.3										
SER0802.COR	0.0	8.8	14.5	20.3	26.5	32.7	38.2	42.1	46.1	50.0	53.9	57.7	60.2	62.7	65.2	67.6	70.1	72.6	75.0	77.5	
SER0803.COR	0.0	5.1	13.5	20.8	26.5	32.3	38.1	42.2	46.1	50.0	53.9	57.7	60.2	62.7	65.2	67.6	70.1	72.6	75.0	77.5	
SER0804.COR	0.0	12.0	14.8	18.8	23.9	29.0	34.2	39.4	44.7	50.0	55.3	60.3	62.5	64.6	66.8	69.0	71.2	73.4	75.6	77.8	
SER0805.COR	0.0	7.5	13.3	18.0	22.6	27.2	32.7	38.5	44.2	50.0	53.9	56.2	58.6	60.9	63.3	65.6	67.9				
SER0901.COR	0.8	6.9	13.0	18.5	23.5	28.6	34.0	39.3	44.7												
SER0902.COR	0.0	7.2	12.1	18.8	25.4	31.0	36.2	41.3	46.4	50.0	53.6	57.2	60.8	64.4	67.9						
SER0903.COR	0.0	7.5	14.0	19.9	25.4	30.2	35.0	39.8	44.9	50.0	55.1	60.2	65.2								
SER0904.COR	0.0	3.4	10.3	18.5	26.6	32.6	37.3	42.1	46.8	50.0	53.2	56.4	59.6	62.8	66.0						
SER0905.COR	1.1	3.7	9.7	15.7	20.9	26.1	31.5	37.7	43.8	50.0	56.2										
SER1001.COR	0.0	1.9	7.4	14.7	21.3	26.7	32.0	37.5	43.7	50.0	56.3	62.5	68.8								
SER1002.COR	0.0	2.6	8.1	14.0	20.3	26.7	33.1	38.8	44.4	50.0	55.6	61.2									
SER1003.COR	0.0	7.9	13.2	18.2	23.7	29.3	34.9	40.0	45.0	50.0	55.0										
SER1004.COR	0.0	7.2	15.7	24.4	33.2	38.7	41.1	43.6	46.0	50.0	54.4	58.7	63.1	67.5	71.9						
SER1005.COR	0.0	0.4	4.4	11.8	19.2	26.2	33.3	40.3	45.8	50.0	54.2	58.5	62.7	66.9							
SER1101.COR	0.0	5.9	10.5	16.2	22.0	27.9	33.9	39.9	45.5	50.0	54.5	58.9	63.4	67.9							
SER1103.COR	0.0	3.9	10.3	16.0	21.7	27.8	33.9	40.1	45.8	50.0	54.2	58.4	62.6	66.9							
SER1104.COR	0.0	3.5	9.8	16.4	23.1	28.9	34.5	40.2	45.4	50.0	54.6	59.2	63.8	68.3							
SER1105.COR	0.0	4.3	11.4	19.1	26.2	31.3	36.4	41.5	45.7	50.0	54.3	58.5	62.8								
SER1201.COR	0.0	4.2	11.7	17.6	23.5	29.4	35.3	41.3	46.1	50.0	53.9	57.8	61.8	65.7							
SER1202.COR	0.0	1.9	7.2	14.5	21.9	27.8	33.8	39.7	45.0	50.0	55.0	59.9	64.9	69.9							
SER1203.COR	0.6	5.1	10.5	16.4	22.2	28.1	33.7	39.3	44.9	50.0	54.0	58.0	62.0	65.9	69.9	73.9					
SER1205.COR	0.0	4.7	10.2	16.8	23.5	29.5	35.1	40.7	46.4	50.0	53.5	57.0	60.4	64.1	67.6						
SER1301.COR	0.0	7.6	14.2	20.7	26.6	31.2	35.7	40.3	45.1	50.0	54.9	59.7	64.4								
SER1302.COR	0.0	1.7	8.4	17.3	25.0	30.2	35.4	40.5	45.3	50.0	54.7	59.5	64.2								
SER1303.COR	0.0	5.9	13.9	21.4	29.0	33.6	37.8	42.1	46.2	50.0	53.8	57.7	61.5	65.3							
SER1304.COR	0.0	10.7	19.2	28.6	34.9	37.8	40.6	43.6	46.8	50.0	53.2	56.4									
SER1305.COR	0.0	0.6	2.1	10.7	19.3	27.9	33.5	39.0	4												

planilhas de amostragem 1, 2, 3, 5, 8, 9, 11, 13 e 14 da Tabela 6.5;

c) Arquivo SERCALCT (Calcítico). Calculado segundo a média dos dados dos vinte e nove arquivos de amostragens realizadas com minério calcítico, ou seja, planilhas 4, 6, 7, 10, 12, 17 e 18 da Tabela 6.5.

A formação de arquivos separados para operação dos ciclones com minério calcítico ou dolomítico, prende-se à possibilidade de se poder analisar comparativamente as parametrizações segundo os métodos examinados, entre o arquivo médio, que reúne a média de todos os dados e o arquivo específico por tipo de minério.

#### 6.5 Tratamento dos Dados Experimentais.

Este item contém estudos comparativos sobre as duas alternativas investigadas de parametrizar as curvas padrão de partição médias.

A Tabela 6.7 apresenta, para cada um dos arquivos individuais, uma relação das constantes calculadas das quatro equações do modelo de Plitt, respectivamente:

- K1, constante da equação referente ao parâmetro  $d_{50}$ ;
- K2, constante da equação referente ao parâmetro S, partição de fluxos;
- K3, constante da equação referente ao parâmetro m, inclinação da curva parametrizada pela equação de Rosin-Rammler;
- K4, constante da equação referente a grandeza Q, vazão volumétrica de alimentação do ciclone.

Nesta tabela encontram-se ainda listados os valores dos parâmetros  $d_{50}$  e m obtidos segundo a parametrização da curva padrão de partição pela equação de Rosin-Rammler. Ao final são

Tabela 0.7. Valores das constantes das equações do modelo de Plitt (K1-d50, K2-S, K3-m, K4-Q), de arquivos individuais e médios. Valores dos parâmetros d50 e m individuais e médios, extraídos das curvas padrão de partição individuais, parametrizadas pela equação de Rosin-Rammler.

ARQUIVOS	K1	K2	K3	K4	d50	m
SERRO1M1	107.3	1.697	0.474	.3666	403	1.41
SERRO1M2	155.1	1.173	1.168	.4847	387	3.60
SERRO1M3	114.2	1.903	1.298	.4819	341	3.62
SERRO1M4	104.6	1.736	0.626	.4488	272	1.75
SERRO1M5	108.8	2.119	1.362	.4528	360	3.65
SERRO2M1	82.5	2.140	0.551	.3653	378	1.54
SERRO2M2	140.3	1.474	0.686	.5178	361	1.99
SERRO2M3	137.3	1.078	0.400	.4741	358	1.27
SERRO2M4	128.3	1.418	0.384	.3836	516	1.15
SERRO2M5	144.6	1.867	0.515	.5155	372	1.45
SERRO3M1	98.7	3.182	1.114	.7314	246	2.50
SERRO3M2	118.1	1.480	0.510	.4746	330	1.50
SERRO3M3	128.9	1.256	0.446	.5328	330	1.34
SERRO3M4	152.8	1.460	0.569	.5336	389	1.64
SERRO3M5	123.5	1.548	0.598	.5435	320	1.70
SERRO4M1	137.2	2.039	0.618	.4146	514	1.72
SERRO4M2	176.9	1.813	1.247	.4795	498	3.48
SERRO4M3	170.0	1.313	0.473	.5192	385	1.41
SERRO4M4	111.9	1.791	0.456	.4910	315	1.27
SERRO4M5	142.4	1.807	0.624	.5424	354	1.71
SERRO5M2	149.1	1.272	0.510	.5194	390	1.53
SERRO5M3	100.5	1.921	0.476	.5692	273	1.27
SERRO5M4	141.2	1.181	0.435	.4808	365	1.34
SERRO5M5	125.3	1.256	0.437	.5164	305	1.32
SERRO6M2	115.3	1.495	0.524	.3520	393	1.60
SERRO6M3	105.1	1.623	0.565	.4970	271	1.62
SERRO6M4	109.2	1.364	1.169	.3402	371	3.68
SERRO6M5	109.9	1.661	0.757	.3986	333	2.22
SERRO7M1	101.6	1.745	1.277	.4037	334	3.68
SERRO7M2	103.7	1.536	0.604	.3849	383	1.81
SERRO7M3	114.2	1.593	0.431	.3847	403	1.30
SERRO7M4	125.8	1.752	0.505	.4406	388	1.43
SERRO7M5	131.4	1.403	0.628	.4950	326	1.86
SERRO8M1	140.7	1.420	1.119	.3831	502	3.42
SERRO8M2	171.2	1.171	0.638	.4454	528	1.99
SERRO8M3	106.1	1.607	0.494	.4870	295	1.44
SERRO8M4	97.2	2.331	0.440	.5178	297	1.12
SERRO8M5	108.3	2.492	0.509	.4737	338	1.29
SERRO9M1	159.7	1.080	0.608	.3806	601	1.97
SERRO9M2	148.4	1.544	0.470	.5059	394	1.38
SERRO9M3	149.1	1.103	0.523	.4262	451	1.68
SERRO9M4	106.9	1.437	1.182	.3917	392	3.57
SERRO9M5	186.1	0.955	0.555	.4364	522	1.81
SERR10M1	176.9	1.742	1.335	.5291	450	3.71
SERR10M2	184.3	1.467	1.218	.4621	494	3.60
SERR10M3	184.0	1.177	0.531	.4490	501	1.67
SERR10M4	96.0	2.493	0.616	.4393	383	1.56
SERR10M5	163.5	1.731	1.404	.4899	419	3.96
SERR11M1	133.2	1.331	0.521	.4721	404	1.51
SERR11M3	109.4	1.888	1.266	.4385	403	3.57
SERR11M4	135.7	2.126	1.363	.4867	409	3.60
SERR11M5	131.9	1.941	1.278	.4262	441	3.55
SERR12M1	136.6	1.313	0.510	.4927	418	1.55
SERR12M2	130.7	1.627	1.249	.4092	421	3.71
SERR12M3	132.1	1.423	0.546	.4505	366	1.65
SERR12M5	118.3	1.644	0.599	.4481	390	1.73
SERR13M1	122.8	1.320	0.498	.4246	446	1.51
SERR13M2	114.5	1.915	1.304	.4029	450	3.71
SERR13M3	107.6	1.772	0.672	.3977	411	1.96
SERR13M4	125.5	1.891	0.403	.4239	464	1.16
SERR13M5	104.9	2.051	1.421	.4484	350	3.85
SERR14M1	148.6	1.373	0.581	.3809	525	1.77
SERR14M2	148.7	1.439	1.185	.4120	464	3.62
SERR14M3	123.7	1.434	0.539	.4081	422	1.65
SERR14M4	122.4	1.501	1.220	.4253	410	3.61
SERR17M1	156.8	1.072	1.051	.3756	490	3.48
SERR17M4	182.2	1.377	0.708	.4665	481	2.11
SERR17M5	151.4	1.158	1.116	.4117	493	3.52
SERR18M1	100.6	1.903	0.449	.4632	326	1.26
SERR18M4	126.7	1.706	1.296	.4791	321	3.66
SERR18M5	134.7	1.409	1.200	.4900	363	3.55
MÉDIA TOTAL	130.9	1.607	0.775	.4553	397	2.25
DESV PADRÃO	24.8	0.384	0.348	.0623	73	0.99
MÉDIA ARQ DOL	127.7	1.616	0.746	.4617	396	2.15
MÉDIA ARQ CAL	135.5	1.592	0.817	.4462	399	2.40

apresentadas a média global e as médias por tipo de minério, de cada um dos dois parâmetros; foi calculado também o desvio padrão de toda a população.

Na Tabela 6.8 estão contidos os valores tomados em intervalos regulares de comprimento igual a 0,05 do parâmetro adimensional  $d_i/d_{50cor}$  no eixo das abscissas, relativos a partições segundo as seis curvas padrão de partição assim construídas:

a) Parametrização de Rosin-Rammler, com valores de inclinação de:

{	$m=2,25$ que corresponde à média global;
	$m=2,15$ que corresponde à média dos arquivos com dados de operação do circuito com minério dolomítico;
	$m=2,40$ que corresponde à média dos arquivos com dados de operação do circuito com minério calcítico;

b) Arquivos Médios. Resultados de cálculos de parametrizações segundo o método discretizante, conforme já detalhado. São resultados relativos a consultas aos arquivos médios.

Para tornar mais claras as comparações entre os resultados obtidos, foram construídos gráficos e tabelas para cada tipo de arquivo.

A Figura 6.9, contém um gráfico que mostra duas curvas padrão de partição médias, ou seja, a que representa os dados do arquivo SERMEDIO (método discretizante), e a calculada pela equação de Rosin-Rammler, com o valor médio de inclinação de todos os setenta e um arquivos individuais ( $m=2,25$ ). A Tabela 6.9 contém pares ordenados das duas curvas apresentadas na Figura 6.9.

Da mesma maneira, o conjunto da Figura 6.10/Tabela 6.10 contém dados comparativos entre os arquivos SERDOLDM e a equação de Rosin-Rammler, obtida pela média das inclinações contidas nos arquivos com amostragens feitas com minério dolomítico ( $m=2,15$ ).

O mesmo se dá com o conjunto Figura 6.11/Tabela 6.11 que

Tabela 6.8. Valores de partições obtidos em seis curvas padrão de partição médias, geradas segundo parametrização de Rosin-Rammler e do método discretizante.

PARTIÇÕES						
di/d50	Equação de Rosin-Rammler			Método Discretizante		
	m=2,25	m=2,15	m=2,40	SERMEDIO	SERDOLOM	SERCALCT
0.05	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
0.10	0.4	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0
0.15	1.0	1.2	0.7	1.6	1.7	1.4
0.20	1.8	2.2	1.4	5.8	6.2	5.2
0.25	3.0	3.5	2.5	8.6	9.3	7.7
0.30	4.5	5.1	3.8	11.8	12.6	10.6
0.35	6.3	7.0	5.4	15.1	16.0	13.8
0.40	8.4	9.2	7.4	18.4	19.3	17.2
0.45	10.9	11.7	9.7	21.7	22.5	20.6
0.50	13.6	14.5	12.3	24.8	25.6	23.8
0.55	16.5	17.4	15.2	27.9	28.5	27.0
0.60	19.7	20.6	18.4	30.6	31.2	29.9
0.65	23.1	24.0	21.8	33.3	33.7	32.7
0.70	26.7	27.5	25.5	35.9	36.2	35.3
0.75	30.4	31.2	29.4	38.4	38.7	37.9
0.80	34.3	34.9	33.4	40.8	41.0	40.4
0.85	38.2	38.7	37.5	43.2	43.4	43.0
0.90	42.1	42.5	41.6	45.6	45.7	45.4
0.95	46.1	46.2	45.8	47.8	47.9	47.8
1.00	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
1.05	53.9	53.7	54.1	52.1	52.1	52.2
1.10	57.6	57.3	58.2	54.2	54.1	54.3
1.15	61.3	60.8	62.1	56.1	56.1	56.2
1.20	64.8	64.1	65.8	58.0	58.0	58.1
1.25	68.2	67.4	69.4	59.9	59.8	59.9
1.30	71.4	70.4	72.8	61.7	61.7	61.7
1.35	74.4	73.3	75.9	63.4	63.4	63.4
1.40	77.2	76.0	78.9	65.1	65.2	65.0
1.45	79.8	78.6	81.6	66.7	66.9	66.6
1.50	82.2	80.9	84.0	68.3	68.5	68.1
1.55	84.4	83.1	86.3	69.8	70.0	69.6
1.60	86.4	85.1	88.3	71.2	71.4	71.0
1.65	88.2	86.9	90.0	72.6	72.8	72.3
1.70	89.8	88.6	91.6	73.9	74.0	73.6
1.75	91.3	90.1	93.0	75.2	75.3	75.0
1.80	92.6	91.4	94.2	76.4	76.5	76.2
1.85	93.7	92.6	95.2	77.5	77.6	77.5
1.90	94.7	93.6	96.1	78.6	78.6	78.6
1.95	95.6	94.6	96.8	79.7	79.7	79.6
2.00	96.3	95.4	97.4	80.7	80.7	80.6
2.05	96.9	96.1	97.9	81.7	81.8	81.6
2.10	97.5	96.7	98.4	82.7	82.8	82.7
2.15	97.9	97.3	98.7	83.7	83.8	83.7
2.20	98.3	97.7	99.0	84.6	84.7	—
2.25	98.6	98.1	99.2	85.4	85.4	—
2.30	98.9	98.4	99.4	86.2	86.2	—
2.35	99.1	98.7	99.5	86.9	87.0	—
2.40	99.3	98.9	99.7	87.7	87.7	—
2.45	99.5	99.1	99.7	—	—	—
2.50	99.6	99.3	99.8	—	—	—

Figura 6.9. Gráfico comparativo de Curvas de Partição Médias. Curva do Arquivo SERMEDIO (método discretizante) e Curva da equação de Rosin-Rammler, com m médio de todos os arquivos(2,25).

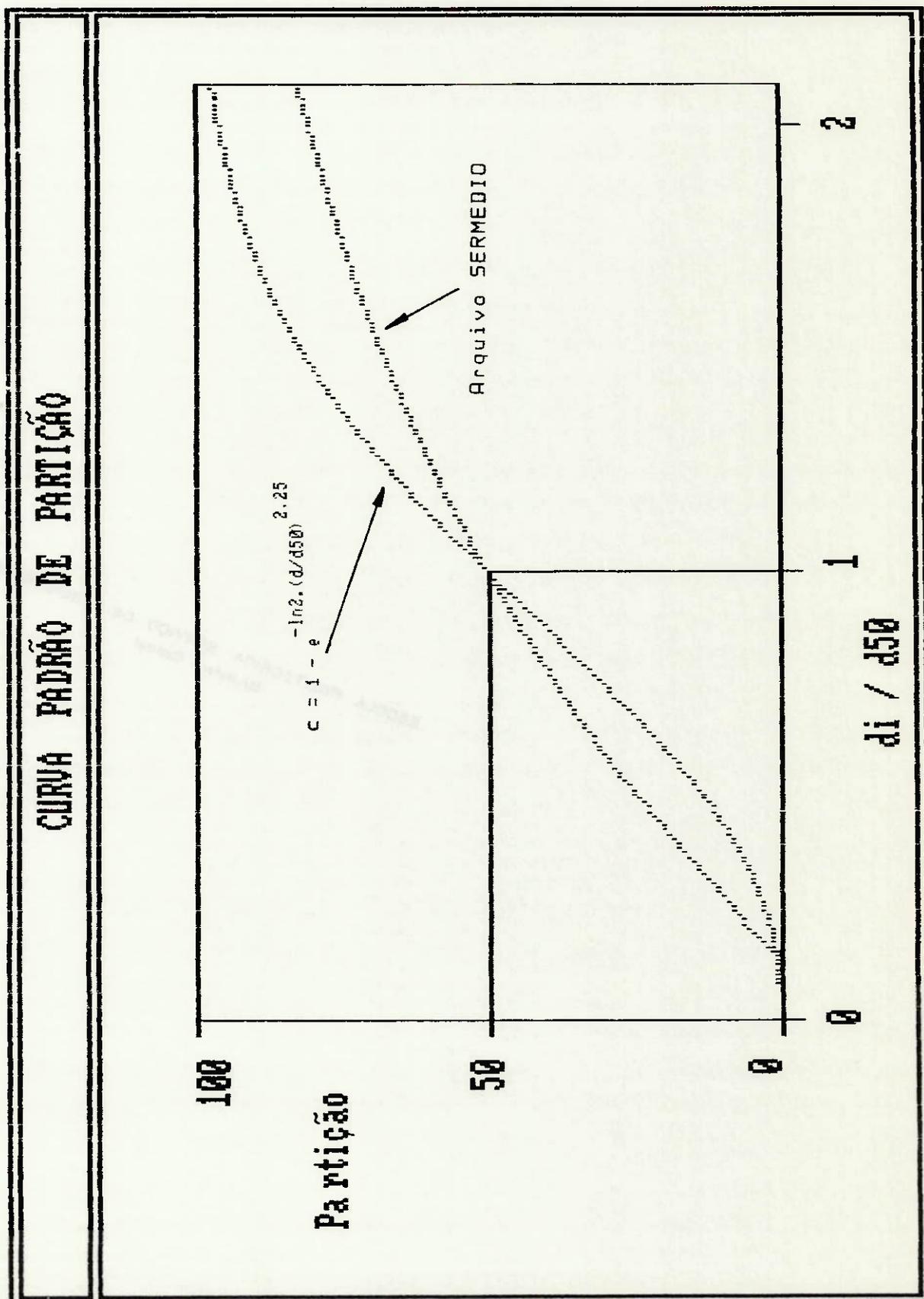


Tabela 6.9. Comparação de resultados de métodos de cálculos de partições, referentes ao arquivo SERMEDIO (método discretizante) e a equação de Rosin-Rammler, com m médio de todos os arquivos.

PARTIÇÕES		
di/d50	Rosin-Rammler m=2,25	Arquivo Medio SERMEDIO
0.05	0.1	0.0
0.10	0.4	0.0
0.15	1.0	1.6
0.20	1.8	5.8
0.25	3.0	8.6
0.30	4.5	11.8
0.35	6.3	15.1
0.40	8.4	18.4
0.45	10.9	21.7
0.50	13.6	24.8
0.55	16.5	27.9
0.60	19.7	30.6
0.65	23.1	33.3
0.70	26.7	35.9
0.75	30.4	38.4
0.80	34.3	40.8
0.85	38.2	43.2
0.90	42.1	45.6
0.95	46.1	47.8
1.00	50.0	50.0
1.05	53.9	52.1
1.10	57.6	54.2
1.15	61.3	56.1
1.20	64.8	58.0
1.25	68.2	59.9
1.30	71.4	61.7
1.35	74.4	63.4
1.40	77.2	65.1
1.45	79.8	66.7
1.50	82.2	68.3
1.55	84.4	69.8
1.60	86.4	71.2
1.65	88.2	72.6
1.70	89.8	73.9
1.75	91.3	75.2
1.80	92.6	76.4
1.85	93.7	77.5
1.90	94.7	78.6
1.95	95.6	79.7
2.00	96.3	80.7
2.05	96.9	81.7
2.10	97.5	82.7
2.15	97.9	83.7
2.20	98.3	84.6
2.25	98.6	85.4
2.30	98.9	86.2
2.35	99.1	86.9
2.40	99.3	87.7
2.45	99.5	—
2.50	99.6	—

Figura 6.10. Gráfico comparativo de Curvas de Partição Médias. Curva do Arquivo SERDOLOM (método discretizante) e Curva da equação de Rosin-Rammler, com m médio de todos os arquivos com minério dolomítico (2,15).

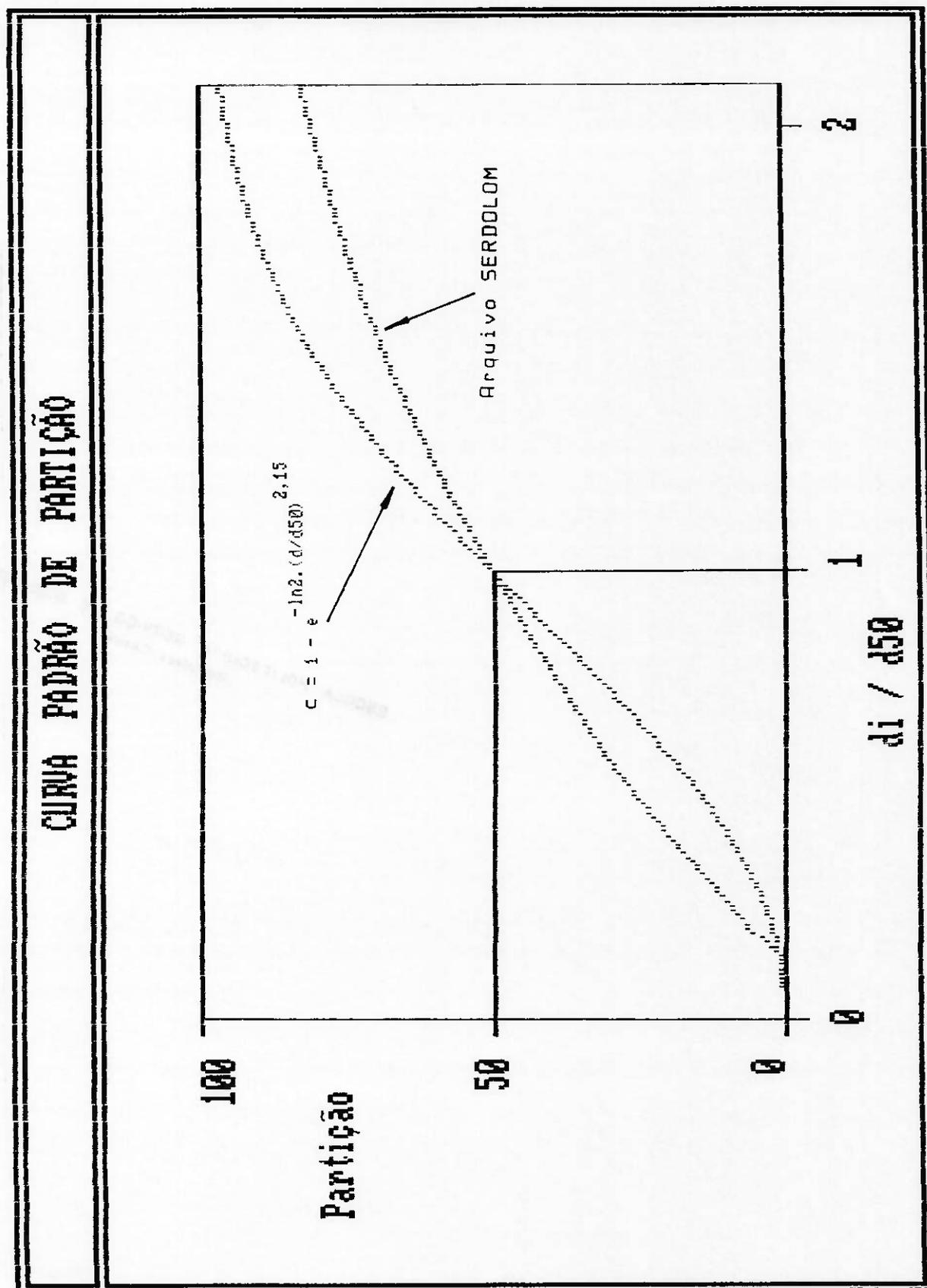


Tabela 6.10. Comparação de resultados de métodos de cálculos de partições, referentes ao arquivo SERDOLOM (método discretizante) e a equação de Rosin-Rammler, com  $m$  médio de todos os arquivos com minério dolomítico.

di/d50	PARTIÇÕES	
	Rosin-Rammler	Arquivo Medio
	$m=2,15$	SERDOLOM
0.05	0.1	0.0
0.10	0.5	0.0
0.15	1.2	1.7
0.20	2.2	6.2
0.25	3.5	9.3
0.30	5.1	12.6
0.35	7.0	16.0
0.40	9.2	19.3
0.45	11.7	22.5
0.50	14.5	25.6
0.55	17.4	28.5
0.60	20.6	31.2
0.65	24.0	33.7
0.70	27.5	36.2
0.75	31.2	38.7
0.80	34.9	41.0
0.85	38.7	43.4
0.90	42.5	45.7
0.95	46.2	47.9
1.00	50.0	50.0
1.05	53.7	52.1
1.10	57.3	54.1
1.15	60.8	56.1
1.20	64.1	58.0
1.25	67.4	59.8
1.30	70.4	61.7
1.35	73.3	63.4
1.40	76.0	65.2
1.45	78.6	66.9
1.50	80.9	68.5
1.55	83.1	70.0
1.60	85.1	71.4
1.65	86.9	72.8
1.70	88.6	74.0
1.75	90.1	75.3
1.80	91.4	76.5
1.85	92.6	77.6
1.90	93.6	78.6
1.95	94.6	79.7
2.00	95.4	80.7
2.05	96.1	81.8
2.10	96.7	82.8
2.15	97.3	83.8
2.20	97.7	84.7
2.25	98.1	85.4
2.30	98.4	86.2
2.35	98.7	87.0
2.40	98.9	87.7
2.45	99.1	—
2.50	99.3	—

Figura 6.11. Gráfico comparativo de Curvas de Partição Médias. Curva do Arquivo SERCALCT (método discretizante) e Curva da equação de Rosin-Rammler, com m médio de todos os arquivos com minério calcítico (2,40).

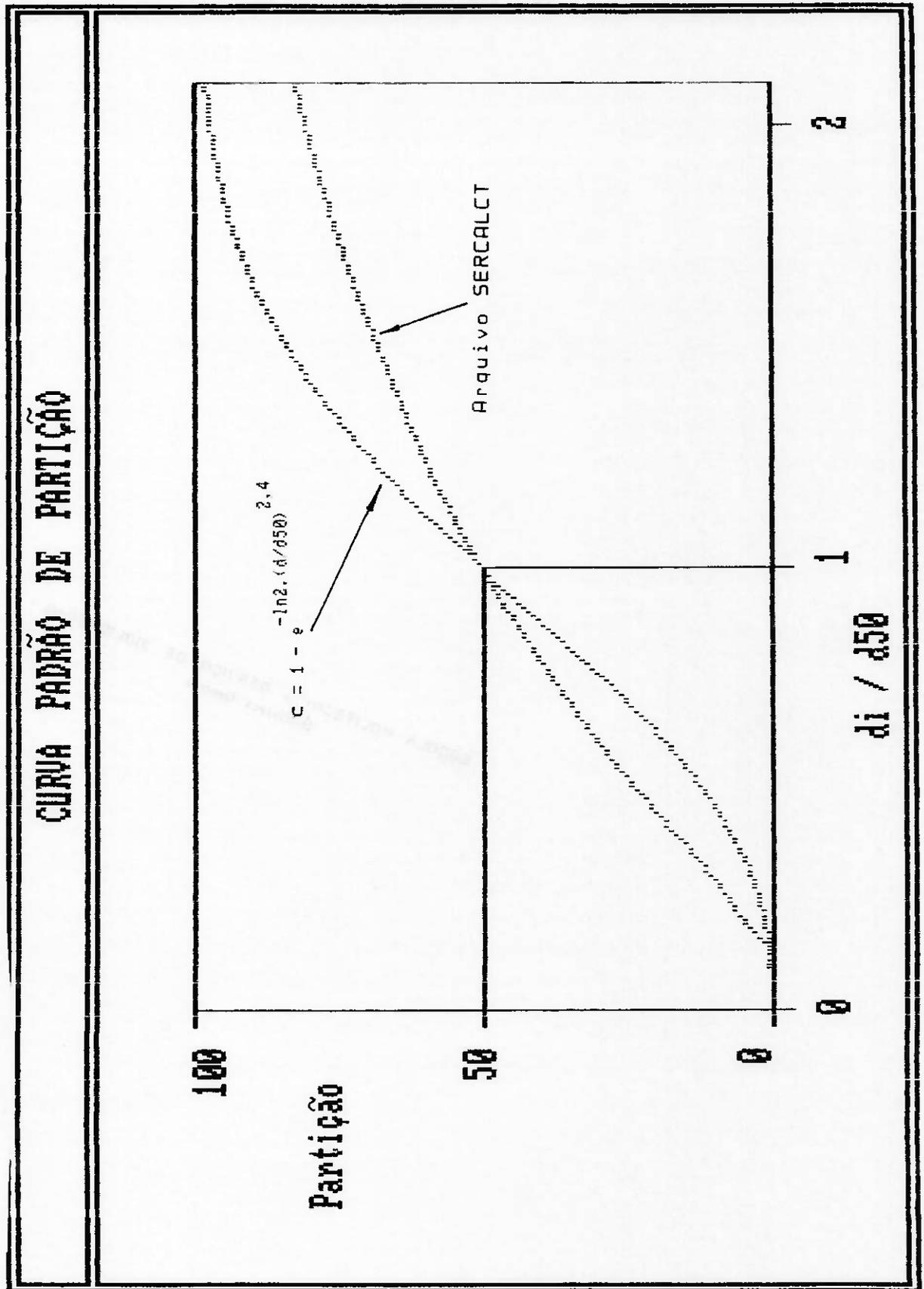


Tabela 6.11. Comparação de resultados de métodos de cálculos de partições, referentes ao arquivo SERCALCT (método discretizante) e a equação de Rosin-Rammler, com  $m$  médio de todos os arquivos com minério calcítico.

di/d50	PARTIÇÕES	
	Rosin-Rammler	Arquivo Medio
	m=2,40	SERCALCT
0.05	0.1	0.0
0.10	0.3	0.0
0.15	0.7	1.4
0.20	1.4	5.2
0.25	2.5	7.7
0.30	3.8	10.6
0.35	5.4	13.8
0.40	7.4	17.2
0.45	9.7	20.6
0.50	12.3	23.8
0.55	15.2	27.0
0.60	18.4	29.9
0.65	21.8	32.7
0.70	25.5	35.3
0.75	29.4	37.9
0.80	33.4	40.4
0.85	37.5	43.0
0.90	41.6	45.4
0.95	45.8	47.8
1.00	50.0	50.0
1.05	54.1	52.2
1.10	58.2	54.3
1.15	62.1	56.2
1.20	65.8	58.1
1.25	69.4	59.9
1.30	72.8	61.7
1.35	75.9	63.4
1.40	78.9	65.0
1.45	81.6	66.6
1.50	84.0	68.1
1.55	86.3	69.6
1.60	88.3	71.0
1.65	90.0	72.3
1.70	91.6	73.6
1.75	93.0	75.0
1.80	94.2	76.2
1.85	95.2	77.5
1.90	96.1	78.6
1.95	96.8	79.6
2.00	97.4	80.6
2.05	97.9	81.6
2.10	98.4	82.7
2.15	98.7	83.7
2.20	99.0	—
2.25	99.2	—
2.30	99.4	—
2.35	99.5	—
2.40	99.7	—
2.45	99.7	—
2.50	99.8	—

compara dados de amostragens realizadas do circuito com minério calcítico ( $m=2,40$ ).

### 6.6 Simulações.

Após a montagem do banco de dados, composto de arquivos de amostragens individuais e arquivos médios, passou-se à fase de verificação da qualidade dos mesmos, em termos de poder reproduzir com fidelidade a operação de classificação do minério fosfático, tal como é praticada hoje na usina de processamento mineral da Serrana.

Conforme menção anterior, as duas últimas planilhas disponíveis de amostragens, a de 23/11/88 com minério calcítico e a de 29/11/88 com minério dolomítico, não participaram da formação do banco de dados, ficando reservadas para exercícios posteriores de simulação.

Dando início aos trabalhos, cada uma as dez linhas de moagem, uma vez que são cinco em cada planilha, foi simulada, tendo como base o arquivo médio (SERMEDID) e o arquivo específico conforme o tipo de minério (SERDOLDM para o minério dolomítico e SERCALCT para o minério calcítico).

Cada simulação foi executada seguindo-se a sequência abaixo:

1. Entrada no sistema computerizado;
2. Escolha do módulo de comparação e simulação de arquivos;
3. Escolha de um dos arquivos individuais para fornecimento dos dados experimentais necessários. Neste caso os arquivos a serem simulados já se encontravam previamente armazenados no sistema, identificados por SERR19M1, 2, 3, 4 e 5, assim como SERR20M1, 2, 3, 4 e 5 (amostragens de 23/11/88 e 29/11/88 respectivamente);

4. Escolha do arquivo médio para fornecimento de uma curva padrão de partição;

5. Verificação via tela do monitor do micro-computador, dos resultados obtidos em termos de partições, conforme as quatro simulações executadas para cada um dos vinte arquivos;

6. Impressão dos resultados.

O produto desta parte dos trabalhos encontra-se nas Tabelas 6.12 a 6.21 das páginas seguintes. Cada conjunto de tabelas, (a) e (b), representa a simulação seqüencial dos arquivos das planilhas 19 e 20, com os dados do arquivo SERMEDIO, tabelas (a), e com os dados do arquivo SERCALCT (arquivo 19) ou do arquivo SERDOLOM (arquivo 20), tabelas (b).

As segundas colunas destas tabelas mostram as partições calculadas a partir de dados experimentais, ou seja a base para as comparações.

As terceiras e quartas colunas, identificadas sob o título de curva individual, representam os valores de partição obtidos por intermédio de cálculos sobre as curvas padrão de partição individuais parametrizadas pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler. No caso desta última, o cálculo se deu sobre a equação que maior coeficiente de correlação apresentou em relação aos dados experimentais.

As duas últimas colunas de cada tabela, identificadas sob o título de curva média, representam os valores de partição calculados sobre a curva padrão de partição média obtida pelo método discretizante (SERMEDIO, SERDOLOM ou SERCALCT), e a equação de Rosin-Rammler com a inclinação  $m$  calculada segundo a média de todos os arquivos que representa.

As duas linhas inferiores de cada uma das Tabelas 6.12 a 6.21 mostram, para efeito de confrontação, as somatórias dos quadrados

Tabela 6.12. Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 19, linha 1 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERCALCT parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler.

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR19M1   CURVA MÉDIA SERMEDIO					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha µm	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0,896	-	-	-	-
420	0,666	0,666	0,726	0,640	0,763
297	0,416	0,416	0,407	0,415	0,357
149	0,228	0,228	0,191	0,239	0,127
74	0,069	0,069	0,061	0,081	0,028
44	0,018	0,018	0,022	0,065	0,007
-44	0,000	-	-	-	-
Soma Quad. Desvios		0,000	0,516	0,314	2,502
Variância		0,000	0,103	0,063	0,500

(a)

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR19M1   CURVA MEDIA SERCALCT					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MEDIA	
Malha µm	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0,896	-	-	-	-
420	0,666	0,666	0,726	0,639	0,742
297	0,416	0,416	0,407	0,411	0,321
149	0,228	0,228	0,191	0,228	0,105
74	0,069	0,069	0,061	0,073	0,021
44	0,018	0,018	0,022	0,059	0,005
-44	0,000	-	-	-	-
Soma Quad. Desvios		0,000	0,516	0,238	3,249
Variância		0,000	0,103	0,048	0,650

(b)

Tabela 6.13. Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 19, linha 2 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERCALCT parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler.

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR19M2   CURVA MÉDIA SERMEDIO					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha µm	Particao Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0,907	-	-	-	-
420	0,714	0,714	0,841	0,651	0,856
297	0,410	0,410	0,472	0,424	0,444
149	0,321	0,321	0,200	0,246	0,164
74	0,122	0,122	0,053	0,085	0,036
44	0,007	0,007	0,016	0,066	0,009
-44	0,000	-	-	-	-
Soma Quad. Desvios		0,000	3,945	1,469	5,354
Variância		0,000	0,789	0,294	1,071

(a)

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR19M2   CURVA MEDIA SERCALCT					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MEDIA	
Malha µm	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0,907	-	-	-	-
420	0,714	0,714	0,841	0,650	0,843
297	0,410	0,410	0,472	0,421	0,407
149	0,321	0,321	0,200	0,236	0,138
74	0,122	0,122	0,053	0,075	0,027
44	0,007	0,007	0,016	0,060	0,006
-44	0,000	-	-	-	-
Soma Quad. Desvios		0,000	3,945	1,644	5,926
Variância		0,000	0,789	0,329	1,185

(b)

Tabela 6.14. Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 19, linha 3 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERCALCT parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler.

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR19M3 [CURVA MÉDIA SERMEDIO]					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha µm	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0,856	-	-	-	-
420	0,727	0,727	0,980	0,677	0,896
297	0,443	0,443	0,439	0,447	0,493
149	0,211	0,211	0,082	0,263	0,185
74	0,049	0,049	0,007	0,093	0,040
44	0,000	0,000	0,001	0,008	0,010
-44	0,000	-	-	-	-
Soma Quad Desvios		0,000	8,228	0,732	3,169
Variância		0,000	1,646	0,146	0,634

(a)

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR19M3 [CURVA MÉDIA SERCALCT]					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha µm	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0,856	-	-	-	-
420	0,727	0,727	0,980	0,675	0,887
297	0,443	0,443	0,439	0,445	0,456
149	0,211	0,211	0,082	0,254	0,157
74	0,049	0,049	0,007	0,083	0,031
44	0,000	0,000	0,001	0,009	0,007
-44	0,000	-	-	-	-
Soma Quad Desvios		0,000	8,228	0,583	2,888
Variância		0,000	1,646	0,117	0,578

(b)

Tabela 6.15. Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 19, linha 4 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERCALCT parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler.

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR19M4   CURVA MÉDIA SERMEDIO					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha µm	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0,963	-	-	-	-
420	0,687	0,687	0,972	0,638	0,787
297	0,401	0,401	0,409	0,413	0,385
149	0,230	0,230	0,075	0,237	0,142
74	0,036	0,036	0,006	0,081	0,032
44	0,000	0,000	0,001	0,065	0,008
-44	0,000	-	-	-	-
Soma Quad Desvios		0,000	10,585	0,885	1,816
Variância		0,000	2,117	0,177	0,363

(a)

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR19M4   CURVA MÉDIA SERCALCT					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha µm	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0,963	-	-	-	-
420	0,687	0,687	0,972	0,637	0,769
297	0,401	0,401	0,409	0,409	0,349
149	0,230	0,230	0,075	0,227	0,118
74	0,036	0,036	0,006	0,072	0,024
44	0,000	0,000	0,001	0,059	0,006
-44	0,000	-	-	-	-
Soma Quad Desvios		0,000	10,585	0,730	2,204
Variância		0,000	2,117	0,146	0,441

(b)

Tabela 6.16. Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 19, linha 5 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERCALCT parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler.

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR19MS   CURVA MÉDIA SERMEDIO					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha µm	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0,966	-	-	-	-
420	0,663	0,663	0,971	0,635	0,866
297	0,409	0,409	0,417	0,410	0,464
149	0,245	0,245	0,079	0,235	0,177
74	0,048	0,048	0,007	0,080	0,040
44	0,000	0,000	0,001	0,064	0,010
-44	0,038	-	-	-	-
Soma Quad Desvios		0,000	12,401	0,610	4,900
Variância		0,000	2,480	0,122	0,980

(a)

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR19MS   CURVA MÉDIA SERCALCT					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha µm	Particao Corrigida	Metodo Discretizante	Metodo de Plitt	Metodo Discretizante	Metodo de Plitt
840	0,966	-	-	-	-
420	0,663	0,663	0,971	0,634	0,854
297	0,409	0,409	0,417	0,406	0,428
149	0,245	0,245	0,079	0,224	0,150
74	0,048	0,048	0,007	0,071	0,031
44	0,000	0,000	0,001	0,058	0,007
-44	0,038	-	-	-	-
Soma Quad Desvios		0,000	12,401	0,521	4,648
Variância		0,000	2,480	0,104	0,930

(b)

Tabela 6.17. Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 20, linha 1 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERDOLOM parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler.

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR20M1   CURVA MÉDIA SERMEDIO					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha $\mu\text{m}$	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0,892	-	-	-	-
420	0,666	0,666	0,688	0,648	0,740
297	0,427	0,427	0,421	0,421	0,339
149	0,241	0,241	0,226	0,244	0,120
74	0,091	0,091	0,089	0,084	0,026
44	0,035	0,035	0,038	0,066	0,007
-44	0,005	-	-	-	-
Soma Quad Desvios		0,000	0,076	0,135	3,295
Variância		0,000	0,015	0,027	0,659

(a)

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR20M1   CURVA MÉDIA SERDOLOM					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha $\mu\text{m}$	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0,892	-	-	-	-
420	0,666	0,666	0,688	0,649	0,754
297	0,427	0,427	0,421	0,423	0,364
149	0,241	0,241	0,226	0,251	0,136
74	0,091	0,091	0,089	0,091	0,032
44	0,035	0,035	0,038	0,069	0,008
-44	0,005	-	-	-	-
Soma Quad Desvios		0,000	0,076	0,152	2,698
Variância		0,000	0,015	0,030	0,540

(b)

Tabela 6.18. Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 20, linha 2 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERDLOM parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler.

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR20M2   CURVA MÉDIA SERMEDIO					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha µm	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0,972	-	-	-	-
420	0,744	0,744	0,989	0,692	0,806
297	0,458	0,458	0,496	0,460	0,393
149	0,298	0,298	0,100	0,274	0,141
74	0,083	0,083	0,008	0,099	0,031
44	0,000	0,000	0,001	0,013	0,008
-44	0,032	-	-	-	-
Soma Quad Desvios		0,000	10,635	0,367	3,549
Variância		0,000	2,127	0,073	0,710

(a)

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR20M2   CURVA MÉDIA SERDLOM					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha µm	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0,972	-	-	-	-
420	0,744	0,744	0,989	0,693	0,817
297	0,458	0,458	0,496	0,461	0,418
149	0,298	0,298	0,100	0,280	0,159
74	0,083	0,083	0,008	0,106	0,037
44	0,000	0,000	0,001	0,013	0,010
-44	0,032	-	-	-	-
Soma Quad Desvios		0,000	10,635	0,354	2,837
Variância		0,000	2,127	0,071	0,567

(b)

Tabela 6.19. Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 20, linha 3 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERDOLOM parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler.

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR20M3   CURVA MÉDIA SERMEDIO					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha $\mu\text{m}$	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0,972	-	-	-	-
420	0,798	0,798	0,928	0,731	0,880
297	0,497	0,497	0,528	0,497	0,472
149	0,303	0,303	0,194	0,301	0,175
74	0,112	0,112	0,040	0,114	0,038
44	0,003	0,003	0,009	0,023	0,009
-44	0,005	-	-	-	-
Soma Quad Desvios		0,000	3,493	0,494	2,926
Variância		0,000	0,699	0,099	0,585

(a)

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR20M3   CURVA MÉDIA SERDOLOM					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha $\mu\text{m}$	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0,972	-	-	-	-
420	0,798	0,798	0,928	0,733	0,886
297	0,497	0,497	0,528	0,497	0,496
149	0,303	0,303	0,194	0,307	0,195
74	0,112	0,112	0,040	0,123	0,046
44	0,003	0,003	0,009	0,026	0,012
-44	0,005	-	-	-	-
Soma Quad Desvios		0,000	3,493	0,492	2,387
Variância		0,000	0,699	0,098	0,477

(b)

Tabela 6.20. Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 20, linha 4 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERDOLOM parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler.

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR20M4   CURVA MÉDIA SERMEDIO					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha $\mu\text{m}$	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0,880	-	-	-	-
420	0,723	0,723	0,764	0,795	0,743
297	0,591	0,591	0,530	0,563	0,347
149	0,317	0,317	0,327	0,352	0,126
74	0,158	0,158	0,154	0,146	0,028
44	0,072	0,072	0,075	0,048	0,007
-44	0,026	-	-	-	-
Soma Quad Desvios		0,000	0,547	0,789	11,721
Variância		0,000	0,109	0,158	2,344

(a)

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR20M4   CURVA MÉDIA SERDOLOM					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha $\mu\text{m}$	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0.880	-	-	-	-
420	0.723	0.723	0.764	0.795	0.756
297	0.591	0.591	0.530	0.563	0.372
149	0.317	0.317	0.327	0.356	0.142
74	0.158	0.158	0.154	0.155	0.034
44	0.072	0.072	0.075	0.050	0.009
-44	0.026	-	-	-	-
Soma Quad Desvios		0,000	0,547	0,805	9,880
Variância		0,000	0,109	0,161	1,976

(b)

Tabela 6.21. Resultados de simulações dos dados experimentais referentes à amostragem 20, linha 5 de moagem, sobre as curvas padrão de partição: individual e média (SERMEDIO parte (a) e SERDOLOM parte (b)), segundo as parametrizações pelo método discretizante e pela equação de Rosin-Rammler.

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR20MS   CURVA MÉDIA SERMEDIO					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha $\mu\text{m}$	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0,910	-	-	-	-
420	0,699	0,699	0,807	0,743	0,558
297	0,511	0,511	0,481	0,509	0,226
149	0,294	0,294	0,231	0,311	0,078
74	0,103	0,103	0,074	0,120	0,017
44	0,017	0,017	0,026	0,029	0,004
-44	0,037	-	-	-	-
Soma Quad Desvios		0,000	1,733	0,270	15,604
Variância		0,000	0,347	0,054	3,121

(a)

PARAMETRIZAÇÕES DA CURVA DE PARTIÇÃO DO ARQUIVO SERR20MS   CURVA MÉDIA SERDOLOM					
DADOS EXPERIMENTAIS		CURVA INDIVIDUAL		CURVA MÉDIA	
Malha $\mu\text{m}$	Partição Corrigida	Método Discretizante	Método de Plitt	Método Discretizante	Método de Plitt
840	0.910	-	-	-	-
420	0.699	0,699	0,807	0,745	0,578
297	0.511	0,511	0,481	0,509	0,248
149	0.294	0,294	0,231	0,316	0,090
74	0.103	0,103	0,074	0,129	0,021
44	0.017	0,017	0,026	0,030	0,006
-44	0.037	-	-	-	-
Soma Quad Desvios		0,000	1,733	0,342	13,248
Variância		0,000	0,347	0,068	2,650

(b)

dos desvios em relação aos valores experimentais, e as variâncias.

A fase seguinte dos trabalhos constou da simulação, através do uso de uma curva padrão de partição média e das equações ajustadas do modelo de Plitt, da operação completa do ciclone de classificação de uma linha de moagem da planilha de amostragem 19 e outra da planilha 20. Foi eleita para esta tarefa a linha 3 de cada planilha.

Por operação completa entenda-se a seguinte seqüência de entrada e saída de dados:

1. Entrada no sistema computerizado;
2. Escolha de um dos módulos:
  - (a) Simulação de Processo - Modelo de Plitt pelo método discretizante;
  - (b) Simulação de Processo - Modelo de Plitt pela equação de Rosin-Rammler;
3. Escolha do arquivo médio com o propósito de:
  - No caso de uso do modelo discretizante, o arquivo escolhido fornecerá os pontos da curva padrão de partição e as constantes das três equações do modelo de Plitt, referentes ao  $d_{50}$ ,  $Q$  e  $S$ .
  - No caso de uso da equação de Rosin-Rammler, o arquivo escolhido fornecerá as constantes das quatro equações do modelo de Plitt, referentes ao  $d_{50}$ ,  $Q$ ,  $S$  e  $m$ ;
4. Entrada de dados:
  - Distribuição granulométrica dos sólidos na alimentação do ciclone;
  - Dados de geometria do ciclone, tais como diâmetro do apex, vortex, etc.;
  - Parâmetros de operação, como concentração e densidade

de sólidos na alimentação, pressão, etc.;

#### 5. Saída de dados:

- Balanço de massas completo da operação;
- Distribuição granulométrica do "underflow" e do "overflow";
- Demais parâmetros de operação, como partição de água e sólidos,  $d_{50exp}$ ,  $d_{50cor}$ , etc.

As Figuras 6.12 a 6.17 das páginas seguintes contêm listagens dos resultados, tais como são obtidas na impressora do micro-computador empregado na simulação.

As três primeiras figuras, 6.12, 6.13 e 6.14, são relativas às simulações do modelo de Plitt, com os dados da linha de moagem 3 da planilha 19. São apresentadas em seqüência nestas mesmas figuras: simulação segundo o método discretizante com o arquivo SERMEDIO (Figura 6.12), e com o arquivo SERCALCT (Figura 6.13); simulação segundo a equação de Rosin-Rammler (Figura 6.14), com as constantes das equações fornecidas pelo arquivo SERMEDIO.

Da mesma forma, as Figuras 6.15, 6.16 e 6.17, representam simulações do modelo de Plitt com os dados da terceira linha de moagem da planilha 20.

A seqüência é a mesma descrita acima, a menos do arquivo SERDOLDM que substituiu o arquivo SERCALCT.

#### 6.7 Tratamento dos Resultados das Simulações.

Os diversos resultados obtidos nas simulações realizadas, partindo-se de dados das duas amostragens para este fim separadas, estão reunidos neste ítem, sob a forma de gráficos e tabelas sintéticas, para fornecer elementos de análise de todo o trabalho feito.

Figura 6.12. Simulação realizada com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante, arquivo SERMEDIO, com os dados da amostragem 19, linha de moagem 3.

## PROGRAMA DE AJUSTE E SIMULAÇÃO

### PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Diâmetro do ciclone (pol) :	26,0
Área de entrada (pol <sup>2</sup> ) :	60,0
Diâmetro do vortex (pol) :	10,5
Diâmetro do apex (pol) :	6,0
Altura livre do vortex (pol) :	67,0

### PARÂMETROS OPERACIONAIS

Pressão de Operação (psi) :	12,0
Vazão global de polpa (m <sup>3</sup> /h) :	404,0
Número de ciclones :	1,0
d50 real (µm) :	324
d50 corrigido (µm) :	356
Partição corrigida (%) :	40,3
Partição real (%) :	47,8
Partição de água (%) :	12,7

### BALANÇO DE MASSAS

	Alimentação	Underflow	Overflow
Vazão de sólidos (t/h)	185,0	88,5	96,5
Vazão de sólidos (m <sup>3</sup> /h)	66,1	31,6	34,5
Vazão de água (m <sup>3</sup> /h)	351,3	44,6	306,6
Vazão de polpa (t/h)	536,3	133,1	403,1
Vazão de polpa (m <sup>3</sup> /h)	417,3	76,2	341,1
Conc de solid em peso (%)	34,5	66,5	23,9
Conc de solid em volume (%)	15,8	41,5	10,1
Densidade de sólidos (t/m <sup>3</sup> )	2,8	2,8	2,8
Densidade de polpa (t/m <sup>3</sup> )	1,3	1,7	1,2

### DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Malha (µm)	Alimentação (%)	Underflow (%)	Overflow (%)
840	9,9	17,0	3,4
420	26,6	42,5	12,0
297	10,8	12,6	9,1
149	20,8	17,0	24,3
74	9,0	4,3	13,3
44	4,9	1,5	8,0
-44	18,0	5,1	29,9

Figura 6.13. Simulação realizada com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante, arquivo SERCALCT, com os dados da amostragem 19, linha de moagem 3.

## PROGRAMA DE AJUSTE E SIMULAÇÃO

### PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Diâmetro do ciclone (pol) :	26,0
Área de entrada (pol <sup>2</sup> ) :	60,0
Diâmetro do vortex (pol) :	10,5
Diâmetro do apex (pol) :	6,0
Altura livre do vortex (pol) :	67,0

### PARÂMETROS OPERACIONAIS

Pressão de Operação (psi) :	12,0
Vazão global de polpa (m <sup>3</sup> /h) :	404,0
Número de ciclones :	1,0
d50 real (µm) :	340
d50 corrigido (µm) :	372
Partição corrigida (%) :	38,8
Partição real (%) :	46,6
Partição de água (%) :	12,8

### BALANÇO DE MASSAS

	Alimentação	Underflow	Overflow
Vazão de sólidos (t/h)	181,3	84,6	96,7
Vazão de sólidos (m <sup>3</sup> /h)	64,7	30,2	34,5
Vazão de água (m <sup>3</sup> /h)	344,2	44,2	300,0
Vazão de polpa (t/h)	525,5	128,7	396,7
Vazão de polpa (m <sup>3</sup> /h)	408,9	74,4	334,6
Conc de solid em peso (%)	34,5	65,7	24,4
Conc de solid em volume (%)	15,8	40,6	10,3
Densidade de sólidos (t/m <sup>3</sup> )	2,8	2,8	2,8
Densidade de polpa (t/m <sup>3</sup> )	1,3	1,7	1,2

### DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Malha (µm)	Alimentação (%)	Underflow (%)	Overflow (%)
840	9,9	17,5	3,2
420	26,6	42,5	12,7
297	10,8	12,6	9,2
149	20,8	16,6	24,5
74	9,0	4,1	13,3
44	4,9	1,5	7,9
-44	18,0	5,2	29,2

Figura 6.14. Simulação realizada com o modelo de Plitt, segundo a equação de Rosin-Rammler, com as constantes médias, com os dados da amostragem 19, linha de moagem 3.

## PROGRAMA DE AJUSTE E SIMULACAO

### PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Diâmetro do ciclone (pol) :	26,0
Área de entrada (pol <sup>2</sup> ) :	60,0
Diâmetro do vortex (pol) :	10,5
Diâmetro do apex (pol) :	6,0
Altura livre do vortex (pol) :	67,0

### PARÂMETROS OPERACIONAIS

Pressão de Operação (psi) :	12,0
Vazão global de polpa (m <sup>3</sup> /h) :	404,0
Número de ciclones :	1,0
d50 real (µm) :	326
d50 corrigido (µm) :	356
Eficiencia (m) :	2,3
Partição corrigida (%) :	43,2
Partição real (%) :	50,1
Partição de água (%) :	12,1

### BALANÇO DE MASSAS

	Alimentação	Underflow	Overflow
Vazão de sólidos (t/h)	185,0	92,7	92,3
Vazão de sólidos (m <sup>3</sup> /h)	66,1	33,1	33,0
Vazão de água (m <sup>3</sup> /h)	351,3	42,7	308,6
Vazão de polpa (t/h)	536,3	135,4	400,9
Vazão de polpa (m <sup>3</sup> /h)	417,3	75,8	341,6
Conc de solid em peso (%)	34,5	68,5	23,0
Conc de solid em volume (%)	15,8	43,7	9,6
Densidade de sólidos (t/m <sup>3</sup> )	2,8	2,8	2,8
Densidade de polpa (t/m <sup>3</sup> )	1,3	1,8	1,2

### DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Malha (µm)	Alimentação (%)	Underflow (%)	Overflow (%)
840	9,9	19,6	0,2
420	26,6	48,2	4,9
297	10,8	12,0	9,6
149	20,8	11,8	29,9
74	9,0	2,8	15,2
44	4,9	1,3	8,5
-44	18,0	4,4	31,7

Figura 6.15. Simulação realizada com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante, arquivo SERMEDIO, com os dados da amostragem 20, linha de moagem 3.

## PROGRAMA DE AJUSTE E SIMULAÇÃO

### PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Diâmetro do ciclone (pol) : 26,0  
 Área de entrada (pol<sup>2</sup>) : 60,0  
 Diâmetro do vortex (pol) : 10,5  
 Diâmetro do apex (pol) : 6,0  
 Altura livre do vortex (pol) : 67,0

### PARÂMETROS OPERACIONAIS

Pressão de Operação (psi) : 12,0  
 Vazão global de polpa (m<sup>3</sup>/h) : 453,0  
 Número de ciclones : 1,1  
 d50 real (µm) : 332  
 d50 corrigido (µm) : 366  
 Partição corrigida (%) : 37,7  
 Partição real (%) : 45,9  
 Partição de água (%) : 13,1

### BALANÇO DE MASSAS

	Alimentação	Underflow	Overflow
Vazão de sólidos (t/h)	189,6	87,0	102,6
Vazão de sólidos (m <sup>3</sup> /h)	67,7	31,1	36,6
Vazão de água (m <sup>3</sup> /h)	349,1	45,8	303,3
Vazão de polpa (t/h)	538,7	132,8	405,9
Vazão de polpa (m <sup>3</sup> /h)	416,8	76,9	339,9
Conc de solid em peso (%)	35,2	65,5	25,3
Conc de solid em volume (%)	16,2	40,4	10,8
Densidade de sólidos (t/m <sup>3</sup> )	2,8	2,8	2,8
Densidade de polpa (t/m <sup>3</sup> )	1,3	1,7	1,2

### DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Malha (µm)	Alimentação (%)	Underflow (%)	Overflow (%)
840	7,6	13,5	2,6
420	25,8	42,5	11,7
297	11,5	13,8	9,5
149	21,5	18,1	24,4
74	9,9	4,9	14,2
44	4,4	1,4	6,9
-44	19,3	5,8	30,7

Figura 6.16. Simulação realizada com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante, arquivo SERDOLOM, com os dados da amostragem 20, linha de moagem 3.

## PROGRAMA DE AJUSTE E SIMULAÇÃO

### PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Diâmetro do ciclone (pol) : 26,0  
 Área de entrada (pol<sup>2</sup>) : 60,0  
 Diâmetro do vortex (pol) : 10,5  
 Diâmetro do apex (pol) : 6,0  
 Altura livre do vortex (pol) : 67,0

### PARÂMETROS OPERACIONAIS

Pressão de Operação (psi) : 12,0  
 Vazão global de polpa (m<sup>3</sup>/h) : 453,0  
 Número de ciclones : 1,1  
 d50 real (µm) : 321  
 d50 corrigido (µm) : 355  
 Partição corrigida (%) : 38,9  
 Partição real (%) : 46,8  
 Partição de água (%) : 13,0

### BALANÇO DE MASSAS

	Alimentação	Underflow	Overflow
Vazão de sólidos (t/h)	192,3	90,0	102,2
Vazão de sólidos (m <sup>3</sup> /h)	68,7	32,2	36,5
Vazão de água (m <sup>3</sup> /h)	353,9	46,0	207,9
Vazão de polpa (t/h)	546,2	136,0	-10,1
Vazão de polpa (m <sup>3</sup> /h)	422,6	78,2	244,4
Conc de solid em peso (%)	35,2	66,2	24,9
Conc de solid em volume (%)	16,2	41,1	10,6
Densidade de sólidos (t/m <sup>3</sup> )	2,8	2,8	2,8
Densidade de polpa (t/m <sup>3</sup> )	1,3	1,7	1,2

### DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Malha (µm)	Alimentação (%)	Underflow (%)	Overflow (%)
840	7,6	13,4	2,5
420	25,8	42,3	11,2
297	11,5	13,8	9,4
149	21,5	18,3	24,3
74	9,9	5,0	14,2
44	4,4	1,4	7,0
-44	19,3	5,7	31,3

Figura 6.17. Simulação realizada com o modelo de Plitt, segundo a equação de Rosin-Rammler, com as constantes médias, com os dados da amostragem 20, linha de moagem 3.

## PROGRAMA DE AJUSTE E SIMULAÇÃO

### PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Diametro do ciclone (pol) :	26,0
Área de entrada (pol <sup>2</sup> ) :	60,0
Diâmetro do vortex (pol) :	10,5
Diâmetro do apex (pol) :	6,0
Altura livre do vortex (pol) :	67,0

### PARÂMETROS OPERACIONAIS

Pressao de Operação (psi) :	12,0
Vazão global de polpa (m <sup>3</sup> /h) :	453,0
Número de ciclones :	1,1
d50 real (µm) :	333
d50 corrigido (µm) :	366
Eficiência (m) :	2,3
Partição corrigida (%) :	39,9
Partição real (%) :	47,5
Partição de água (%) :	12,7

### BALANÇO DE MASSAS

	Alimentação	Underflow	Overflow
Vazão de sólidos (t/h)	189,6	90,1	99,5
Vazão de sólidos (m <sup>3</sup> /h)	67,7	32,2	35,6
Vazão de água (m <sup>3</sup> /h)	349,1	44,4	304,7
Vazão de polpa (t/h)	538,7	134,4	404,3
Vazão de polpa (m <sup>3</sup> /h)	416,8	76,5	340,3
Conc de solid em peso (%)	35,2	67,0	24,6
Conc de solid em volume (%)	16,2	42,0	10,4
Densidade de sólidos (t/m <sup>3</sup> )	2,8	2,8	2,8
Densidade de polpa (t/m <sup>3</sup> )	1,3	1,8	1,2

### DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Malha (µm)	Alimentação (%)	Underflow (%)	Overflow (%)
840	7,6	15,8	0,2
420	25,8	48,6	5,1
297	11,5	13,1	10,1
149	21,5	12,7	29,5
74	9,9	3,3	15,8
44	4,4	1,3	7,2
-44	19,3	5,2	32,1

As Figuras 6.18, 6.19, 6.20 e 6.21 contêm gráficos que permitem visualizar a aderência entre os resultados obtidos nas diversas simulações e os dados experimentalmente gerados pela equipe da Serrana.

A Figura 6.18 apresenta testes de aderência entre:

6.18(a). Dados de partições experimentais de todas as linhas de moagem das amostragens 19 e 20, versus as partições obtidas por simulações com o modelo de Plitt, segundo a equação de Rosin-Rammler de cada um dos arquivos individuais 19 e 20. São os valores contidos nas quartas colunas das Tabelas 6.12 a 6.21;

6.18(b). Análogo ao 6.18(a), porém as simulações foram realizadas com dados dos arquivos médios, ou seja, com as médias das constantes das equações do modelo de Plitt. São as últimas colunas das Tabelas 6.12 a 6.21;

6.18(c). Análogo ao 6.18(a), porém as simulações foram realizadas sob o modelo de Plitt, com os dados do arquivo médio SERMEDIO. São as quintas colunas das Tabelas 6.12(a) a 6.21(a).

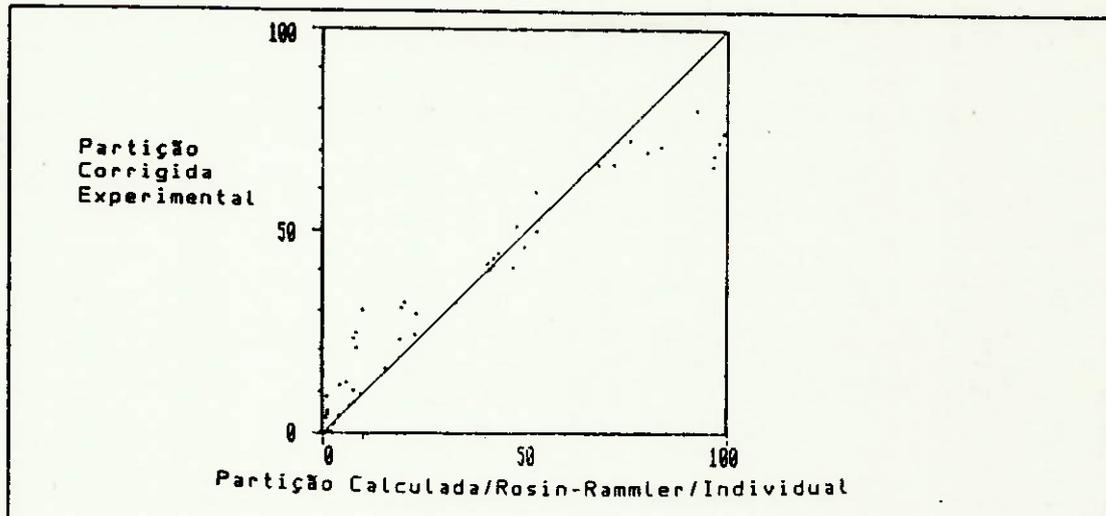
A Figura 6.19 apresenta testes de aderência entre os dados de partição experimentais de todas as linhas de moagem referentes a amostragem 19 versus:

6.19(a). Partições obtidas por simulações com o modelo de Plitt, segundo a equação de Rosin-Rammler, em cada um dos arquivos individuais;

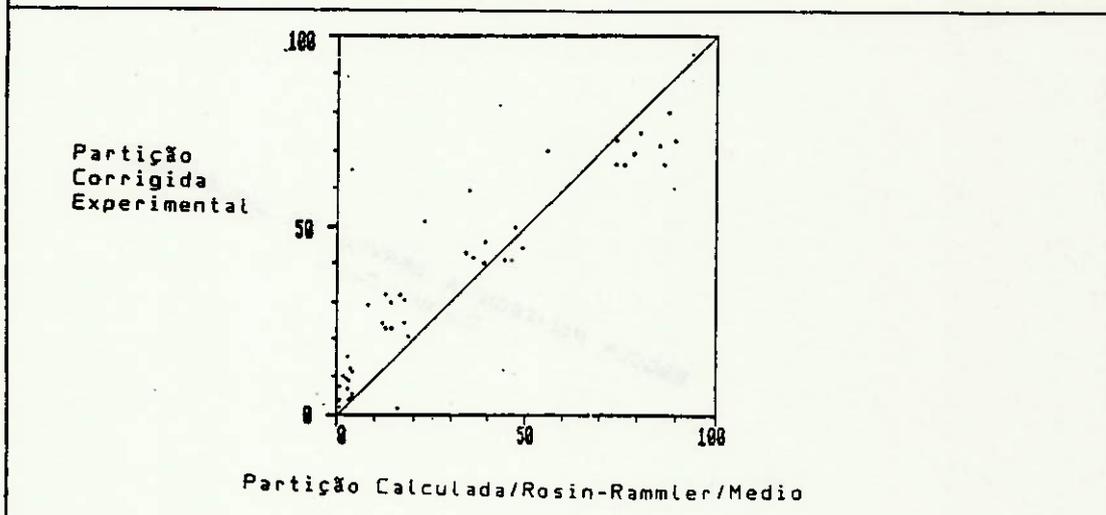
6.19(b). Análogo ao 6.19(a), porém com dados dos arquivos médios;

6.19(c). Partições obtidas por simulações com o modelo de Plitt, segundo dados do arquivo médio SERCALCT. São as quintas colunas da Tabelas 6.12(b) a 6.16(b);

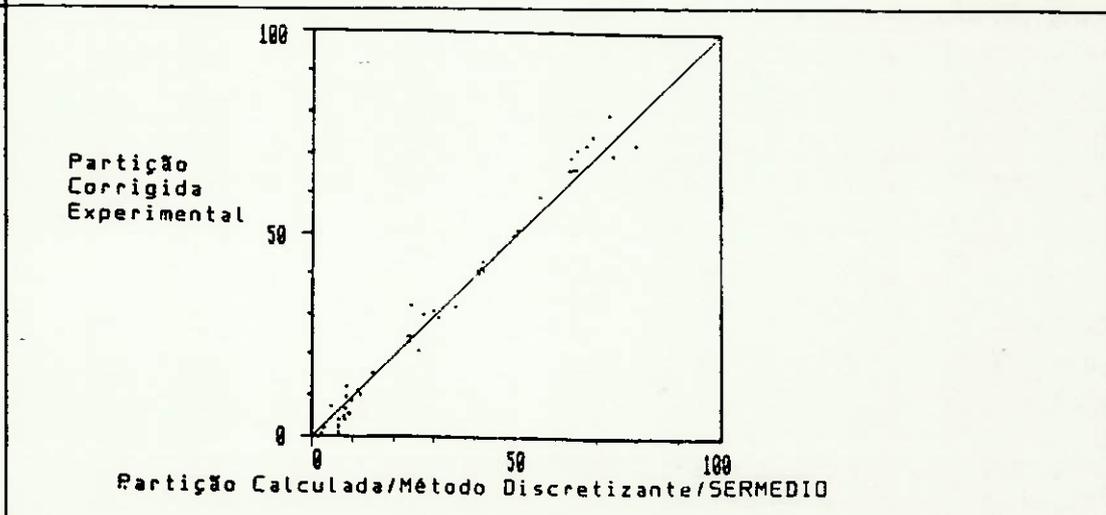
6.19(d). Análogo ao 6.19(a), porém com dados do arquivo médio SERMEDIO. São as quintas colunas das Tabelas 6.12(a) a 6.16(a).



(a) Partição Corrigida (Dados Experimentais) versus Partição Obtida pela parametrização da curva padrão de partição, de acordo com a equação de Rosin-Rammler. Arquivos Individuais. Amostragens 19 e 20, todas as linhas de moagem.



(b) Partição Corrigida (Dados Experimentais) versus Partição Obtida pela parametrização da curva padrão de partição, de acordo com a equação de Rosin-Rammler. Arquivos Médios. Amostragens 19 e 20, todas as linhas de moagem.



(c) Partição Corrigida (Dados Experimentais) versus Partição Obtida pela parametrização da curva padrão de partição, de acordo com o método discretizante. Arquivo SERMEDIO. Amostragens 19 e 20, todas as linhas de moagem.

Figura 6.19. Testes de Aderência entre valores experimentais de partição corrigida e valores de partição obtidos segundo diferentes parametrizações da curva padrão de partição. Amostragem 19.

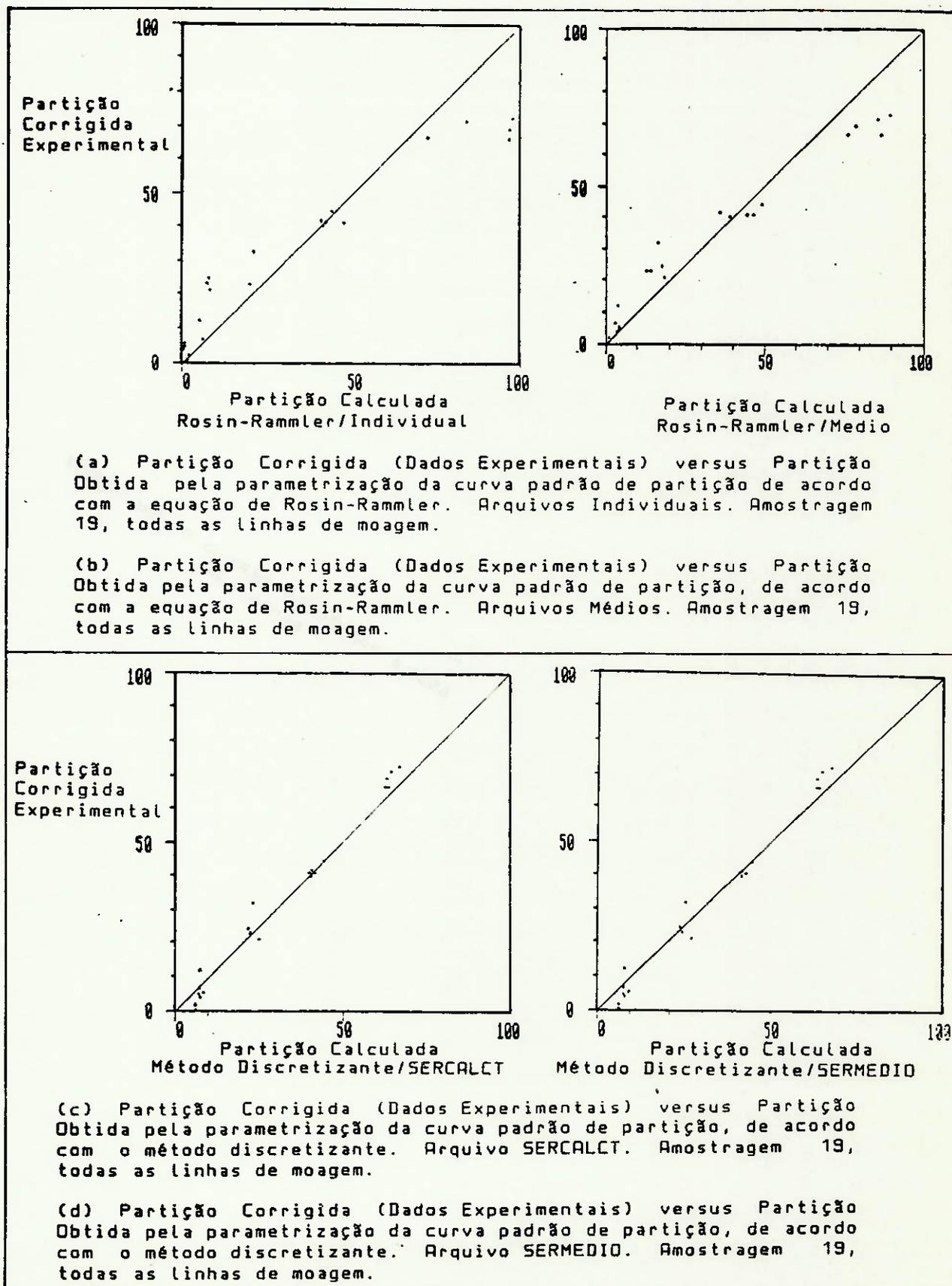


Figura 6.20. Testes de Aderência entre valores experimentais de partição corrigida e valores de partição obtidos segundo diferentes parametrizações da curva padrão de partição. Amostragem 20.

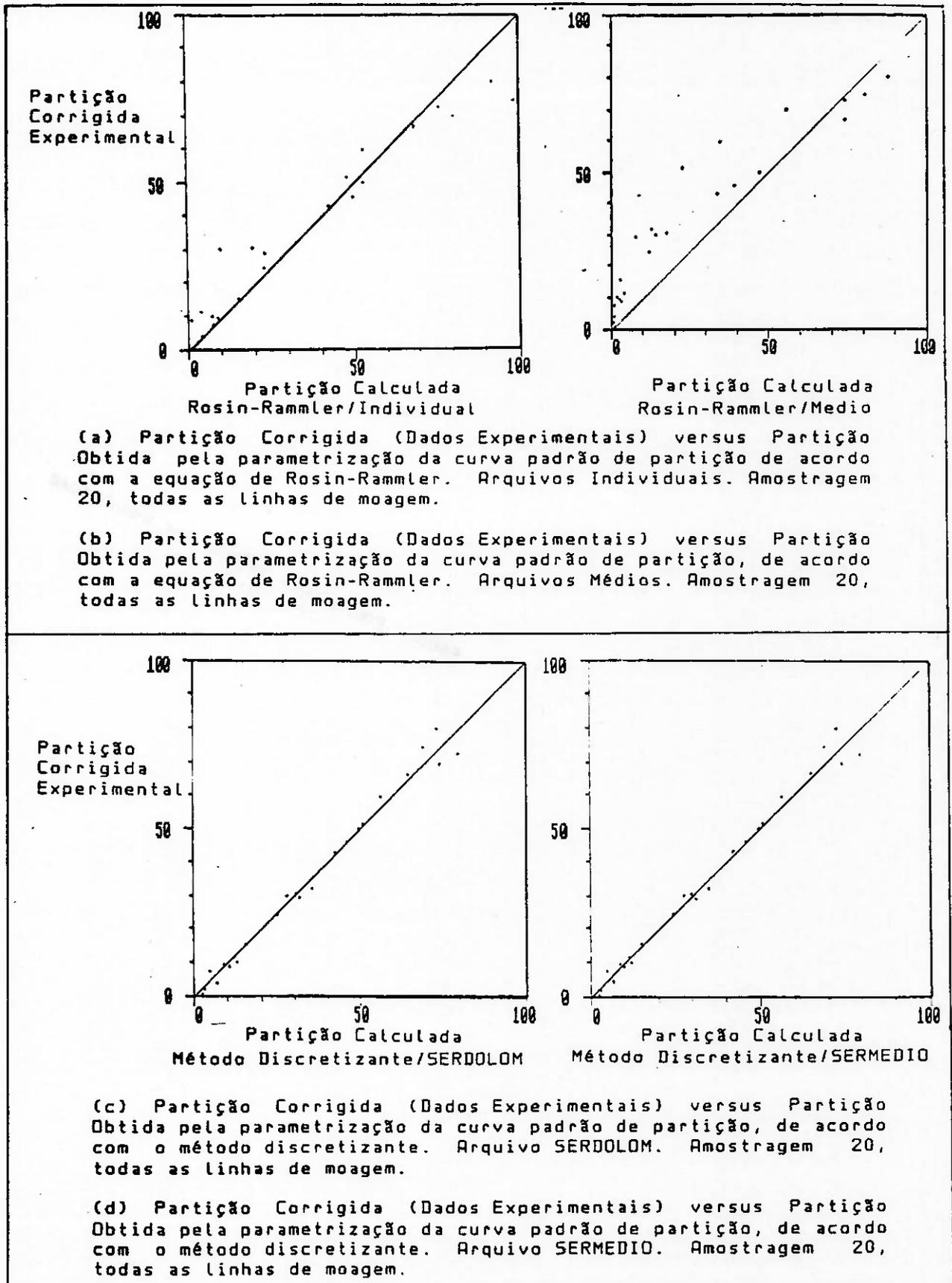
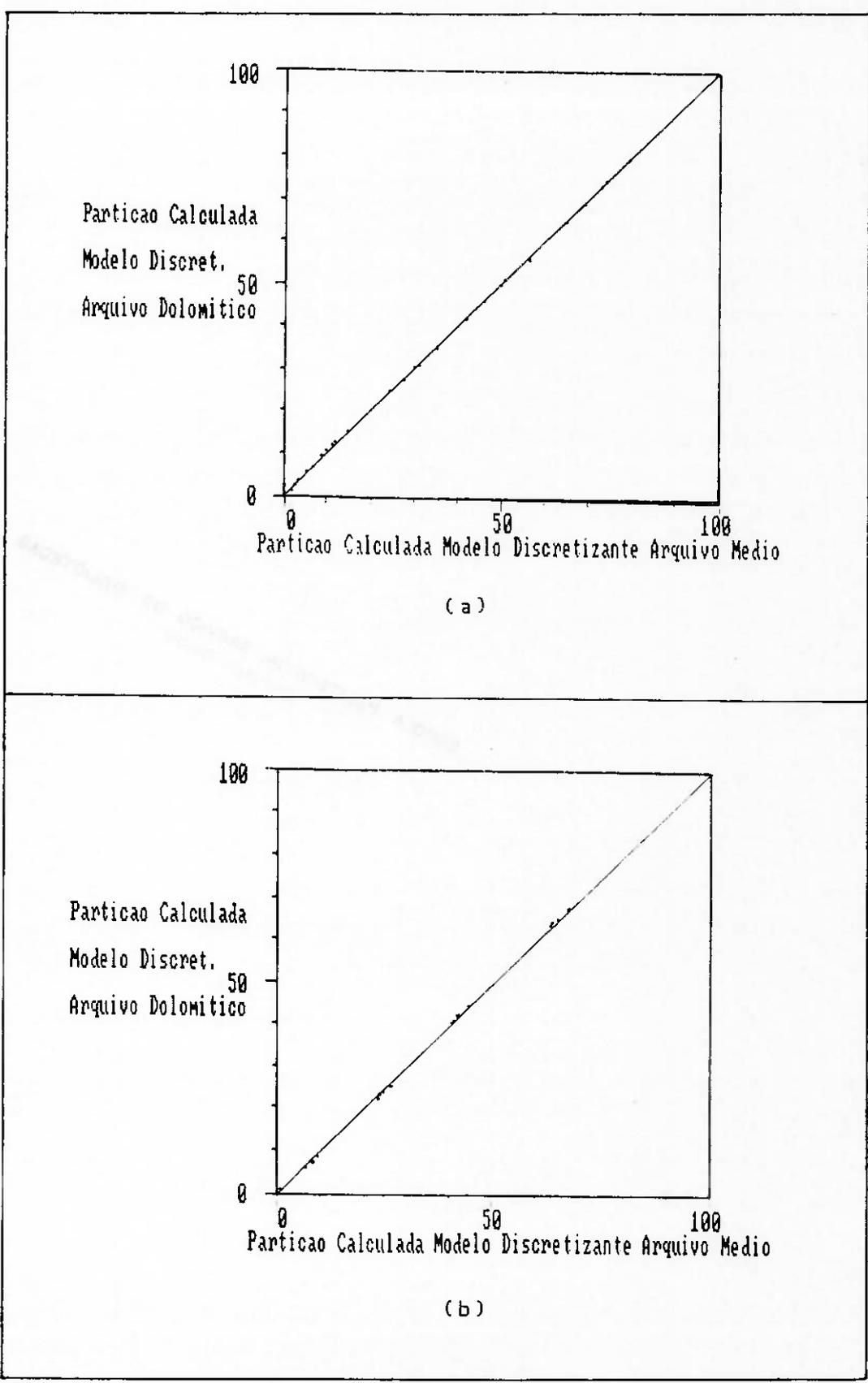


Figura 6.21. Testes de Aderência entre os valores de partições: arquivos médios de minério calcítico e dolomítico (SERCALCT e SERDOLOM) versus arquivo médio SERMEDIO.



A Figura 6.20 contém a mesma seqüência de gráficos da Figura 6.19, mas os dados experimentais são referentes à amostragem 20. No gráfico da Figura 6.20(c) estão as partições de simulações com o arquivo SERDOLOM.

A Figura 6.21 conta com dois gráficos de testes de aderência entre:

6.21(a). Dados de simulações da amostragem 20, com o modelo de Plitt, segundo dados do arquivo SERMEDIO, versus dados do arquivo SERDOLOM;

6.21(b). Análogo ao anterior, todavia o arquivo SERDOLOM, foi substituído pelo arquivo SERCALCT.

A Tabela 6.22 sumariza todas as simulações da amostragem 19 (linhas de moagem 1, 2, 3, 4 e 5) e amostragem 20 (linhas de moagem 1, 2, 3, 4 e 5), segundo o método discretizante e método de Plitt, curvas individuais e médias, em termos de somatórias dos quadrados dos desvios e variâncias, apresentados individualmente nas Tabelas 6.12 a 6.21. Cada valor desta tabela corresponde à soma de vinte e cinco cálculos entre a partição experimental e a partição obtida por simulação.

Nota-se ainda na Tabela 6.22 as diferenças significativamente maiores entre os valores apresentados segundo a metodologia de parametrização da curva padrão de partição pela equação de Rubin-Rammler, em relação ao método discretizante.

As Figuras 6.22 e 6.23 reúnem, através de fluxogramas simplificados, os dados dos balanços de massas obtidos nas simulações cujas listagens aparecem nas Figuras 6.12 a 6.17.

A Figura 6.22 contém em sua parte superior o balanço de massas tal como obtido pela Serrana, além da legenda que identifica cada posição no quadro esquemático ilustrado. Os três balanços da parte inferior da Figura 6.22, são resultados das simulações,

Tabela 6.22. Resumo das somatórias dos quadrados dos desvios e das variâncias apresentadas pelos valores de partição gerados a partir de simulações, frente aos dados experimentais.

Amostragem	Arquivo	Curva Individual			Curva Média	
			Método		Método	
			Discre- tizante	Plitt	Discre- tizante	Plitt
Amostr. 19 Linhas de Moagem 1,2 3,4 e 5	SERMEDIO	Desvios	0	35,675	4,010	31,703
		Variância	0	7,135	0,822	6,341
	SERCALCT	Desvios	0	35,675	3,716	31,703
		Variância	0	7,135	0,744	6,341
Amostr. 20 Linhas de Moagem 1,2 3,4 e 5	SERMEDIO	Desvios	0	16,484	2,055	17,122
		Variância	0	3,297	0,411	3,424
	SERDOLOM	Desvios	0	16,484	2,145	17,122
		Variância	0	3,297	0,428	3,424

Figura 6.22. Balanços de massas experimental e produtos das simulações com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante (arquivos SERMEDIO e SERCALCT) e a equação de Rosin-Rammler.

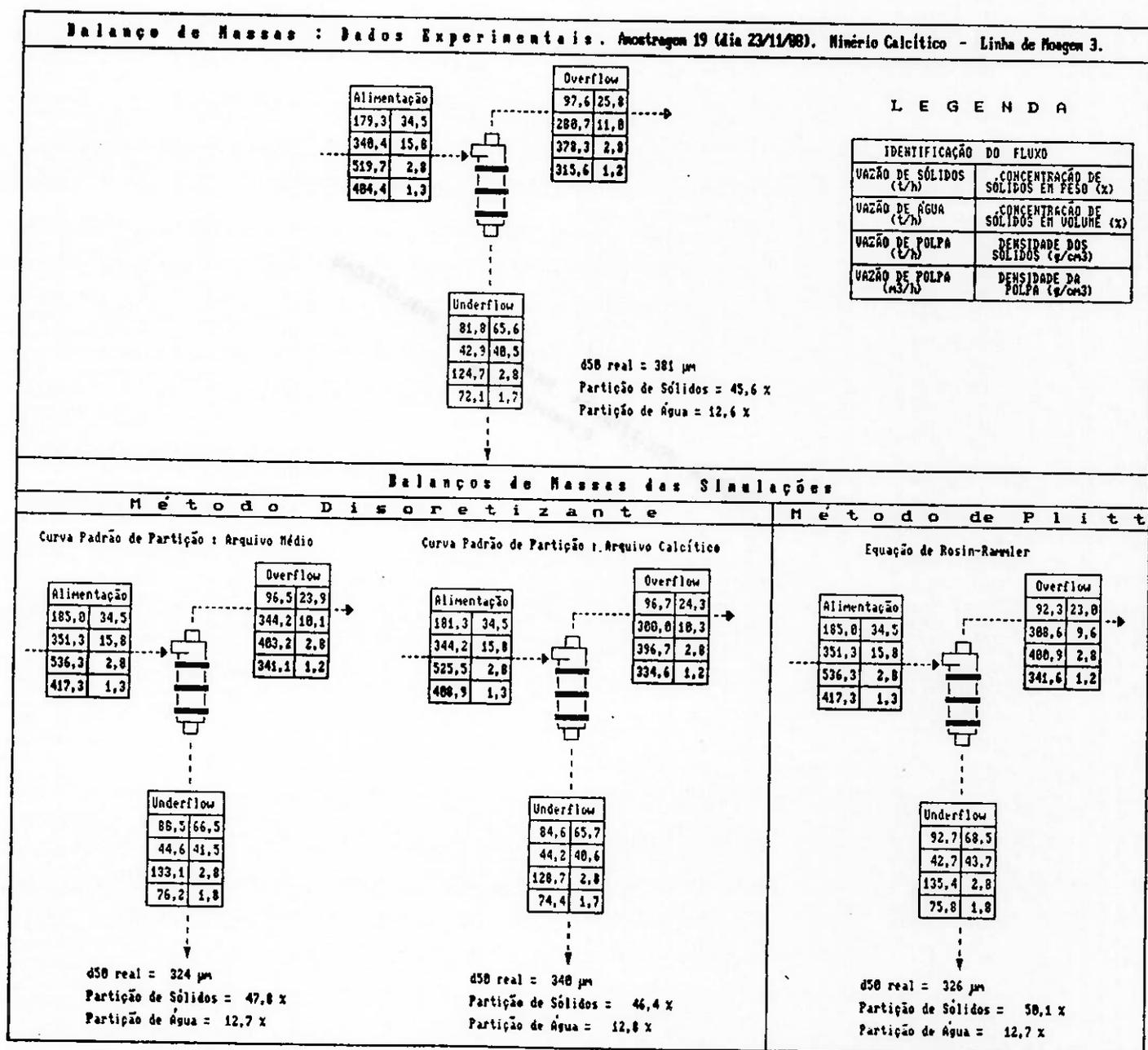
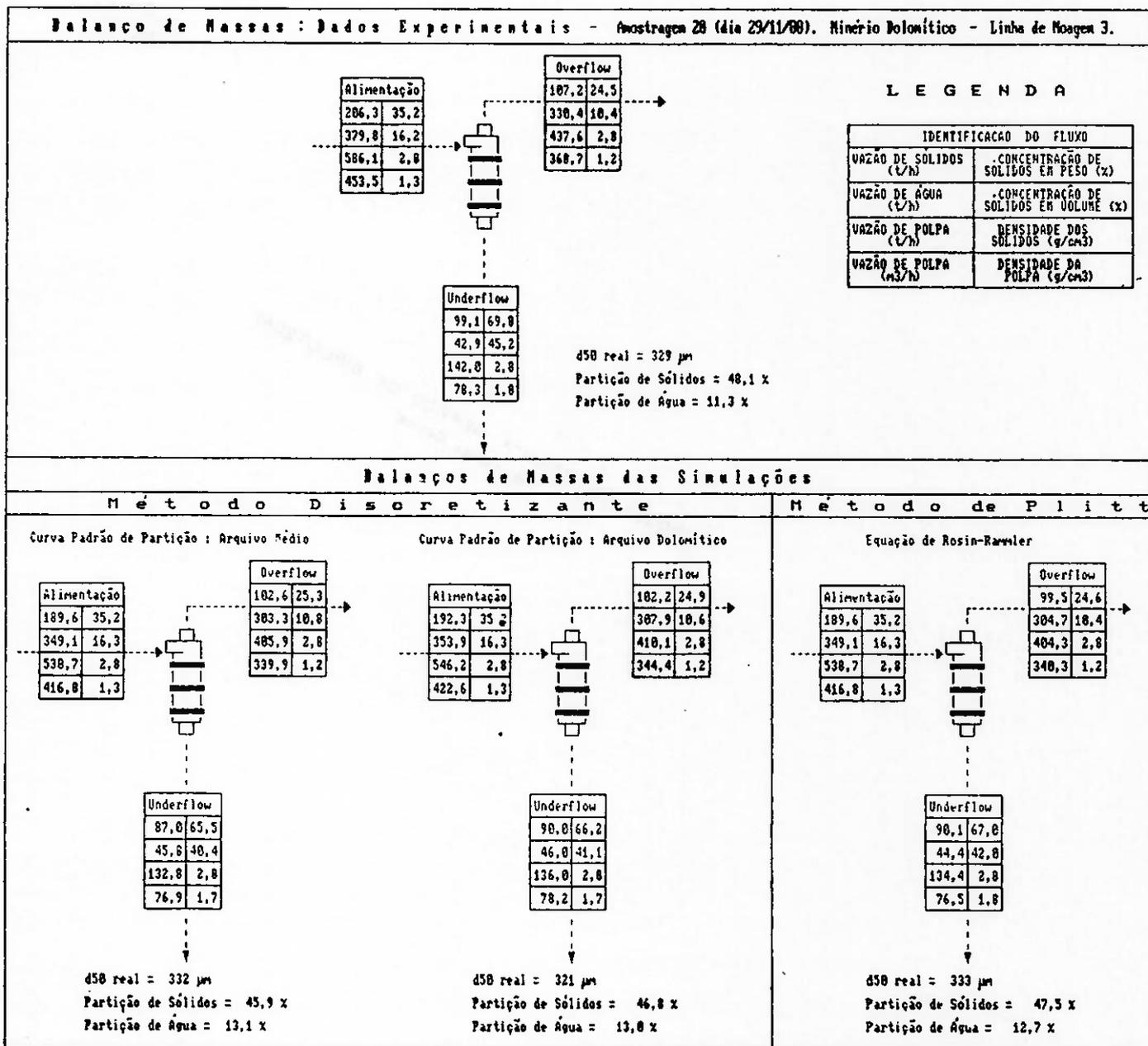


Figura 6.23. Balanços de massas experimental e produtos das simulações com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante (arquivos SERMEDIO e SERDOLOM) e a equação de Rosin-Rammler.



quais sejam :

- Modelo Discretizante - Arquivo Médio SERMEDIO;
  - Arquivo Calcítico SERCALCT;
- Equação de Rosin-Rammler - Arquivo Médio SERMEDIO, só constantes das equações de Plitt.

São ainda apontados, para cada balanço, os valores do parâmetro  $d_{50exp}$ , partição de sólidos e partição de água.

A Figura 6.23 segue o mesmo esquema da Figura 6.22, porém no lugar da simulação com o arquivo SERCALCT, há o arquivo SERDOLDM.

Apesar de as equações de Plitt terem sido empregadas em todas as simulações realizadas, ao comparar-se os balanços de massas das três simulações contidas na Figura 6.22, observa-se que estes apresentam diferenças entre si. Abaixo encontram-se listadas as principais diferenças e suas causas:

- As constantes das equações de Plitt são diferentes para as duas simulações pelo método discretizante, pois o arquivo SERMEDIO contém valores médios das constantes dos setenta e um arquivos individuais, e o arquivo SERCALCT de apenas vinte e nove;

- Os valores correspondentes a vazões de sólidos e água na alimentação são diferentes nos balanços das simulações com o método discretizante pois, a vazão assinalada refere-se à capacidade unitária por ciclone, calculada através de uma das equações do modelo de Plitt. Não há diferença nos quadros de alimentação dos balanços com o arquivo SERMEDIO segundo o método discretizante e a equação de Rosin-Rammler pois, ambas utilizam as mesmas constantes das equações do modelo de Plitt;

- As partições de sólidos assinaladas abaixo dos balanços, bem como as conseqüentes vazões assinaladas nos fluxos de "underflow" e "overflow" são diferentes em todos os balanços, uma vez que o

valor de partição para cada simulação é calculado pela somatória das partições individuais em cada uma das faixas granulométricas definidas no fluxo de alimentação. Como os diversos arquivos geram partições distintas, o mesmo se dá com os balanços de massa.

As Tabelas 6.23 e 6.24 sumarizam os resultados das distribuições granulométricas obtidas nas simulações realizadas, frente aos dados experimentais. A Tabela 6.23 apresenta os dados da amostragem 19 da seguinte maneira: Tabela 6.23(a) distribuições no "underflow" e 6.23(b) no "overflow", para as duas alternativas de simulação com o método discretizante: SERMEDIO e SERCALCT, além do uso da equação de Rosin-Rammler.

A Tabela 6.24 é análoga à Tabela 6.23, porém os dados experimentais e de simulações são relativos à amostragem 20.

Constam também das Tabelas 6.23 e 6.24 os resultados dos cálculos da somatória dos quadrados dos desvios para cada conjunto de dados perante aos dados experimentais, assim como da variância.

## 6.8 Conclusões da Parte Experimental.

A análise de todas as etapas do trabalho efetuado, sobre os dados experimentais da operação de classificação do minério fosfático, no circuito fechado de moagem da usina de processamento mineral da Serrana, permite concluir que:

(a) O sistema computerizado criado é capaz de receber, corrigir e armazenar dados experimentais relativos a uma operação de classificação de minério em ciclones;

(b) é possível criar curvas padrão de partição médias, assim como médias das constantes das equações do modelo de Plitt, a

Tabela 6.23(a). Distribuições granulométricas do "underflow" de simulações com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante (arquivos médios SERMEDIO e SERCALCT) e a equação de Rosin-Rammler. Folha de amostragem 19, linha de moagem 3.

Distribuição Granulométrica do "Underflow"				
Malhas ( $\mu\text{m}$ )	Amostragem 19 Linha 3 Dados Experimentais	Simulações com o Modelo de Plitt		
		Modelo SERMEDIO	Discretizante SERCALCT	Equação de Rosin-Rammler Coef. Médios
840	15,2	17,0	17,5	19,6
420	45,2	42,5	42,5	48,2
297	13,0	12,7	12,6	12,0
149	15,5	17,0	16,6	11,8
74	4,2	4,3	4,1	2,8
44	1,4	1,5	1,5	1,3
-44	5,5	5,1	5,2	4,4
Somatória dos Quadrados dos Desvios		13,1	14,1	46,2
Variância		3,6	3,7	6,8

Tabela 6.23(b). Distribuições granulométricas do "overflow" de simulações com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante (arquivos médios SERMEDIO e SERCALCT) e a equação de Rosin-Rammler. Folha de amostragem 19, linha de moagem 3.

Distribuição Granulométrica do "Overflow"				
Malhas ( $\mu\text{m}$ )	Amostragem 19 Linha 3 Dados Experimentais	Simulações com o Modelo de Plitt		
		Modelo SERMEDIO	Discretizante SERCALCT	Equação de Rosin-Rammler Coef. Médios
840	1,0	3,4	3,2	0,2
420	10,5	12,0	12,7	4,9
297	9,0	9,1	9,2	9,6
149	25,6	24,3	24,5	29,9
74	15,2	13,3	13,3	15,2
44	8,4	8,0	7,9	8,5
-44	30,3	29,9	29,2	31,7
Somatória dos Quadrados dos Desvios		13,6	16,0	52,8
Variância		3,7	4,0	7,3

Tabela 6.24(a). Distribuições granulométricas do "underflow" de simulações com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante (arquivos médios SERMEDIO e SERCALCT) e a equação de Rosin-Rammler. Folha de amostragem 20, linha de moagem 3.

Distribuição Granulométrica do "Underflow"				
Malhas ( $\mu\text{m}$ )	Amostragem 20 Linha 3 Dados Experimentais	Simulações com o Modelo de Plitt		
		Modelo SERMEDIO	Discretizante SERCALCT	Equação de Rosin-Rammler Coef. Médios
840	14,5	13,5	13,4	15,8
420	43,9	42,5	42,3	48,6
297	13,8	13,8	13,8	13,1
149	16,9	18,1	18,3	12,7
74	4,6	4,9	5,0	3,3
44	1,4	1,4	1,4	1,3
-44	4,9	5,8	5,7	5,2
Somatória dos Quadrados dos Desvios		5,3	6,5	43,7
Variância		2,3	2,6	6,6

Tabela 6.24(b). Distribuições granulométricas do "overflow" de simulações com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante (arquivos médios SERMEDIO e SERCALCT) e a equação de Rosin-Rammler. Folha de amostragem 20, linha de moagem 3.

Distribuição Granulométrica do "Overflow"				
Malhas ( $\mu\text{m}$ )	Amostragem 20 Linha 3 Dados Experimentais	Simulações com o Modelo de Plitt		
		Modelo SERMEDIO	Discretizante SERCALCT	Equação de Rosin-Rammler Coef. Médios
840	0,2	2,6	2,5	0,2
420	8,5	11,7	11,2	5,1
297	9,9	9,5	9,4	10,1
149	24,4	24,4	24,4	29,5
74	15,2	14,2	14,2	15,8
44	8,5	6,9	7,0	7,2
-44	33,3	30,7	31,3	32,7
Somatória dos Quadrados dos Desvios		26,5	20,1	41,1
Variância		5,1	4,5	6,4

partir de dados previamente contidos em arquivos individuais;

(c) Após a criação de arquivos, o sistema é capaz de simular operações, de modo a prever resultados em função das necessidades do usuário;

(d) São também exeqüíveis rotinas comparativas acerca do de simulações empregando o método discretizante de parametrização da curva padrão de partição, perante a solução adotada por Plitt de uso da equação de Rosin-Rammler para esta tarefa;

Sobre os resultados obtidos nas diversas simulações efetuadas, conclui-se que:

(e) As tentativas de se obter uma curva padrão de partição média, conforme a parametrização desta pela equação de Rosin-Rammler, revelaram discrepâncias bastante grandes, em relação aos dados experimentais, tornando a sua utilização pouco confiável. As Tabelas 6.23 e 6.24 comparativas de distribuições granulométricas, e a Tabela 6.22 comparativa dos desvios em relação ao valor experimental das simulações realizadas, ratificam esta conclusão;

(f) O ajuste de curvas padrão de partição pelo método discretizante, mostrou ser esta uma técnica adequada à tarefa de se obter uma curva média característica da operação estudada, tornando possível a aplicação das equações ajustadas do modelo de Plitt na previsão de resultados da operação estudada;

(g) As tentativas de individualização das curvas padrão de partição médias, para cada um dos dois tipos de minério, calcítico e dolomítico, frente à curva média global, não revelaram vantagens significativas, se forem analisados os índices técnicos de desempenho mostrados anteriormente.

## 7. CONCLUSÕES GERAIS DO TRABALHO

O modelo de Plitt, como qualquer outro de natureza empírica, parte de uma parametrização da curva de performance do sistema.

No caso estudado, a curva padrão de partição do sistema, mostrou como esperado, a baixa eficiência dos ciclones de fundo chato na classificação do minério da Serrana. Como consequência, a parametrização tal como proposta por Plitt, revelou-se inadequada, uma vez que a equação de Rosin-Rammler representa bem apenas distribuições bi-caudais.

O método discretizante proposto neste trabalho, proporcionou a obtenção de uma curva padrão de partição média, que incorporasse as peculiaridades da operação estudada.

Este fato acarretou uma melhor adequação dos dados gerados em simulações posteriores em relação àqueles levantados experimentalmente. Pode-se verificar, através da comparação dos desvios apresentados nas três tabelas finais do Capítulo 6, as diferenças significativas de correlação entre os dados experimentais e produtos de simulações, a favor do método discretizante.

Como conclusão final deste trabalho, pode-se afirmar que o método discretizante melhora o modelo de Plitt no sentido de torná-lo mais abrangente a operações distintas daquelas sob as quais foi desenvolvido, evitando assim a obrigatoriedade de que toda e qualquer curva padrão de partição de qualquer sistema de classificação de minérios em ciclones, respeite a priori a equação de Rosin-Rammler.

## 8. BIBLIOGRAFIA

8.1 Referências.

- (1) PLITT, L.R. A mathematical model of hydrocyclone classifier. CIM Bulletin, Montreal, 69 (776): 114-23, Dec. 1976.
- (2) LYNCH, A.J.; RAD, T.C. Modelling and scale-up of hydrocyclone Classifiers. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 11, Cagliari, 1975. Proceedings. Cagliari Instituto di Arte Mineraria, 1975. Paper 9, 24p.
- (3) TRAWINSKI, H. The mathematical simulation of Tromp curves. In: I INTERCERAM, 1978.
- (4) TARR Jr., D.T. Hydrocyclones. In: WEISS, N.L., ed. SME mineral processing handbook. New York, SME/AIME, 1985. p. 3D-10 a 3D-38.
- (5) FAHLSTROM, P.H. Studies of hydrocyclone as a classifier. Mineral Processing. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 6, Cannes, 1963. Proceedings. Oxford, Pergamon Press, 1965. p. 87-114.
- (6) KELLY, E.G.; SPOTTISWOOD, D.J. Classification. In: Introduction to mineral processing. New York, Wiley, 1982. p. 199-236.
- (7) PLITT, L.R. The analysis of solid-solid separation in classifiers. CIM Bulletin, Montreal, 64(78): 42-47, April, 1971.
- (8) YOSHIOKA, N.; HOTTA, Y. Liquid cyclone as a hydraulic classifier. Chemical Engineer, Japan. 19(12): 632-640, Dec. 1955.

- (9) ANDERY, P.A.; CHAVES, A.P.; PÓVORA, F.V. Ensaio industriais de classificação de minérios de ferro. Minérios e Metais, São Paulo, 3(7):23-30, out. 1973.
- (10) FLINTOFF, B.C.; PLITT, L.R.; TURAK, A.A. Cyclone modelling: a review of present technology. CIM Bulletin, Montreal 80(905):39-50, Sept. 1987.
- (11) KELSALL, D.F. A study of the motion of the solid particles in a hydraulic cyclone. Transactions of the Institution of the Chemical Engineers. London, 30(2):84-108, 1952.
- (12) AUSTIN, L.G.; KLIMPEL, R.R. An improved method of analysing classifier data. Powder Technology. New York, 29(43):275-279, Feb. 1981.
- (13) FINCH, J.A. Modeling a fish-hook in hydrocyclone selectivity curves. Powder Technology. New York, 36(74):124-129, Oct. 1983.
- (14) FINCH, J.A.; LAPLANTE, A.R.; VILLAR, R. Modeling cyclone performance curves with a size dependent correction factor. s.l., Department of Mining and Metallurgy of McGill University, 1985. p.1-8.
- (15) LILGE, E.O.; PLITT, L.R. The cone force equation and hydrocyclone design. Materials Technology - An Inter-American Approach. In: INTERAMERICAN CONFERENCE ON MATERIAL TECHNOLOGY, 3, San Antonio, 1968. Proceedings. ASME, San Antonio, p. 108.
- (16) BERALDO, J.L. Classificação. In: Moagem de minérios em moinhos tubulares. São Paulo, Blücher, 1987. p.65-106.
- (17) BOYSAN, F.; SWITHENBANK, F. Numeric predictions of confined vortex flows. In: NUMERICAL METHODS IN LAMINAR AND TURBULENT FLOW, Veneza, Julho, 1981. Proceedings.

- (18) PERICLEDUS, K.A.; RHODES, N.; CUTTING, G. A mathematical model for predicting the flow field in a hydrocyclone classifier. In: II INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROCYCLONES. BHRA Fluid Engineering, 1984. Proceedings p. 23-34.
- (19) BRADLEY, D. The hydrocyclone. Oxford, Pergamon Press. 1965.
- (20) LILGE, E.O. Hydrocyclone fundamentals. Transactions of Institute of Mining and Metallurgy, London, 71(211): 285-337, Aug. 1972.
- (21) RIETEMA, K. The mechanism of separation of finely dispersed solids in cyclones. In: Cyclones in Industry. Amsterdam, 1961, cap. 4, p. 46-63.
- (22) ARTERBURN, R.A. The sizing and selection of hydrocyclones. In: MULAR, A.L.; JERGENSEN II, G.V. Design and Installation of Comminution Circuits. New York, SME/AIME, 1982. p. 592-607.
- (23) PLITT, L.R.; FLINTOFF, B.C. SPOC Manual. CANMET Report. MRP/MSL. 1983 Cap. 5b, 83-24 (IP).
- (24) FORD, M.A.; KING, R.P. The simulation of ore dressing plants. International Journal of Mineral Processing. Amsterdam, 12(4):285-304, Apr. 1984.
- (25) LUCKIE, P.T.; KLIMPEL, R.R. Classification and its interaction with other mineral processing operations. In: SOMASUNDARAN, P. ed. Advances in Mineral Processing. New York, AIME, 1986. p. 81-95.
- (26) DAHLSTRDM, D.A. Fundamentals and applications of the liquid cyclone. Chemical Engineering Program Symposium Series. Mineral Engineering Technics, New York, 15(50):41-61, 1954.

- (27) TARJAN, G. Application of distribution functions to partition curves. International Journal of Mineral Processing. Amsterdam, 1(3):261-265, Sept. 1974.
- (28) FINCH, J.A.; MATWIJENKO, D. Individual mineral behaviour in a closed grinding circuit. CIM Bulletin, Montreal, 70(787):164-172, Nov. 1977.
- (29) LAPLANTE, A.R.; FINCH, J.A. The origin of unusual cyclone performance curves. International Journal of Mineral Processing, Amsterdam, 13(1):1-11, June 1984.
- (30) REID, K.J.; MAIXI, L.; SHENGGUI, Z. Coal-cleaning distribution curve simulation; fitting six different models by microcomputer. International Journal of Mineral Processing, Amsterdam, 14(4):291-299, June, 1985.
- (31) REID, K.J.; MAIXI, L.; SHENGGUI, Z. Computer reability analysis of coal-cleaning distribution curves. International Journal of Mineral Processing, Amsterdam, 14(4):301-312, June 1985.
- (32) TAMILMANI, M.; KAPUR, P.C. A heuristic model of Tromp (distribution) curve. International Journal of Mineral Processing, Amsterdam, 18(1/2):47-56, Sept. 1986.
- (33) LYNCH, A.J.; RAD, T.C.; PRISBREY, K.A. The influence of hydrocyclone diameter on reduced efficiency curves. International Journal of Mineral Processing. Amsterdam, 1(2):173-181, May 1974.
- (34) LYNCH, A.J. Mineral crushing and grinding circuits. Amsterdam, Elsevier, 1977. pag. 105-155.
- (35) KELLY, E.G.; SPOTTISWOOD, D.J. Characterization of particles. In: Introduction to mineral processing. New York, Wiley, 1982. p. 21-43.