

MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO E CULTURA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
METALÚRGICA E DOS MATERIAIS - PPGEMM

CARACTERIZAÇÃO DO BENEFICIAMENTO DE CARVÃO POR JIGAGEM NO BRASIL

por

Claudio Luiz Schneider

Engenheiro de Minas

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM.

PORTO ALEGRE

1987

CARACTERIZAÇÃO DO BENEFICIAMENTO DE CARVÃO POR JIGAGEM NO BRASIL

D I S S E R T A Ç Ã O

Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: METALURGIA EXTRATIVA

POR

CLAUDIO LUIZ SCHNEIDER ENGENHEIRO DE MINAS

1987

Esta DISSERTAÇÃO foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Jorge Rubio
Fisicoquímico, DIC, PhD
UFRGS - PPGEMM

Banca Examinadora:

Jaime Antonio Solari
Eng., DIC, PhD
UFRGS - PPGEMM

Jan Papée
Eng., PhD
KOPEX - Industrial Conventos

Antonio Cezar Faria Vilela
Eng., M.Sc., Dr.-Ing.
UFRGS - PPGEMM

Coordenador do PPGEMM
Ivan Guerra Machado
Eng., PhD

RESUMO

Em função da importância do processo de jigagem no beneficiamento de carvão no Brasil, onde 95% da produção bruta, ROM, é beneficiada em jigues para a obtenção de carvão energético ou carvão pré-lavado, e da inexistência de um trabalho sistemático de caracterização deste processo, esta dissertação apresenta um estudo detalhado do desempenho de jigues no beneficiamento de carvão nacional, através do levantamento dos critérios de avaliação de performance dependentes e independentes derivados das curvas de partição e análises densimétricas dos diversos produtos. São desenvolvidos "softwares" para o processamento dos diversos dados levantados "in situ", com aplicação nas áreas de cálculo de balanços de massas e metalúrgico, processamento de análises densimétricas, cálculo de coeficientes de partição, modelamento matemático de curvas de partição e cálculo dos critérios de avaliação de performance. Conclue-se que, de um modo geral, o processo de jigagem é mal empregado no Brasil, conduzindo à obtenção de produtos de baixa recuperação. Isto ocorre basicamente em função das características peculiares do carvão nacional e do fato que, no Brasil, utiliza-se jigues de fabricação estrangeira, dimensionados para outros tipos de carvões de melhor qualidade. Este trabalho pretende alertar aos profissionais da área e oferece algumas sugestões com o objetivo de melhorar a baixa eficiência do beneficiamento de carvão observada em diversos lavadores.

A B S T R A C T

96% of the production of raw coal in Brazil is beneficiated in jigs to produce thermal and metallurgical coal. Because of the lack of a systematic characterization of this process, this dissertation presents a detailed study on the performance of the jigging process as practised in Brazil. This was carried out by determining dependent and independent efficiency criteria derived from the partition curves and from float-and-sink analysis. Software were developed to process data collected "in situ", with application to the areas of mass and metallurgical balance calculation, float-and-sink analysis processing, partition factors calculation, partition curves modelling and performance criteria calculation. It is concluded that, in a general way, the jigging process is used incorrectly in Brazil, often yielding low recovery. This happens because, in Brazil, the jigs being used were designed without taking into account the peculiarities of the coal. This work advises the professionals of the area and offers suggestions with the aim of improving the poor coal cleaning efficiency observed in several coal washeries.

AGRADECIMENTOS

- Ao Professor Jorge Rubio pelo incentivo e dedicação na orientação deste trabalho.

- Aos colegas do Laboratório de Tecnologia Mineral deste Programa pelo companheirismo e apoio ao longo do trabalho.

- Ao CNPq e CAPES pelo suporte financeiro.

- Ao Sr. Jaime pelo auxílio nos desenhos.

- À COPELMI pela cooperação na realização da parte experimental deste trabalho.

- Às diversas Companhias Carboníferas pelo fornecimento de dados de operação.

- Ao Engenheiro Alexandre Grigorieff pelo interesse na realização da parte experimental e discussão dos resultados obtidos.

- Aos Engenheiros Alexandre Rodrigues e Carlos Eduardo Rushel pelo auxílio no desenvolvimento do Software.

- Aos Engenheiros Alexandre Ritter Volkmann, Helio Tavares, Claudio Wiehe e Franco Da Rosa pelas suas contribuições na execução deste trabalho.

- À Vera pelo esmero na datilografia.

- Aos amigos pelo alegre convívio durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais.

ÍNDICE

1. Introdução	14
1.1 Carvões Brasileiros	14
1.2 Estado atual do Beneficiamento de Carvões Brasileiros por Jigagem	16
1.3 Objetivos.....	19
2. Revisão Bibliográfica	20
2.1 Fundamentos Teóricos da Separação Gravimétrica	20
2.2 Aspectos Funcionais e Tipos de Jigues	28
2.2.1 Mecanismos e Princípios Envolvidos	34
2.2.2 Teoria da Energia Potencial	39
2.2.3 Fatores Operacionais	42
2.3 Avaliação do Desempenho do Processo de Jigagem	44
2.3.1 Critérios dependentes	44
2.3.2 Critérios independentes	46
2.4 Modelamento Matemático do Processo de Jigagem	51
3. Experimental	55
3.1 Metodologia	55
3.1.1 Descrição dos Fluxogramas de Jigagem em Estudo	55
3.1.2 Amostragem	57
3.1.3 Análise Física e Química	59
3.2 Cálculo de Parâmetros Operacionais	60
3.2.1 Balanço de Massas e Metalúrgico	60
3.2.1.1 Minimização do Sistema de Equações da Análises Den simétricas	61
3.2.1.2 Minimização da Função Objetivo	65
3.2.2 Cálculo dos Coeficientes de Partição	67
3.2.3 Cálculo dos Critérios de Avaliação de Performance ..	68
4. Resultados e Discussão	72
4.1 Balanços de Massas e Metalúrgico	72
4.2 Curvas de Partição	78
4.3 Avaliação de Performance	84
4.4 Discussão Geral	89

5. Conclusões e Sugestões	101
6. Referências Bibliográficas	104
7. Apêndice	106
7.1. Tabelas	107
7.2. Figuras	116
7.3. Listagens de Programas	120

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela I	Raios de sedimentação para um sistema carvão/mineral em função do teor de sólidos, regime hidrodinâmico e proporção entre carvão e mineral	27
Tabela II	Escala de valores do NGM	46
Tabela III	Tonelagens dos produtos do Lavador da Mina do Faxinal	72
Tabela IV	Balanço de massas por minimização do sistema de equações das análises densimétricas, Lavador da Mina do Faxinal	73
Tabela V	Análise imediata dos diversos produtos, Lavador da Mina do Faxinal	74
Tabela VI	Análise imediata ajustada dos produtos, Lavador da Mina do Faxinal	74
Tabela VII	Balanço de massas e metalúrgico, Lavador da Mina do Recreio	75
Tabela VIII	Balanço de massas por minimização do sistema de equações das análises densimétricas, Lavador da Mina de São Roque	76
Tabela IX	Balanço de cinzas por minimização da função objetivo, Lavador da Mina de São Roque	77
Tabela X	Balanço de massas e de cinzas, Lavador da Mina do Verdinho	77
Tabela XI	Balanço de massas e de cinzas, Lavador da Mina A, Sangão	78
Tabela XII	Resumo das condições operacionais. Jigues de três produtos	84
Tabela XIII	Desempenho dos jigues de três produtos. Critérios dependentes	85
Tabela XIV	Desempenho dos jigues de três produtos. Critérios independentes	85
Tabela XV	Resumo das condições operacionais. Jigues de quatro produtos	86

Tabela XVI	Desempenho dos jigues de quatro produtos. Crité- rios dependentes	86
Tabela XVII	Desempenho dos jigues de quatro produtos. Crité- rios independentes	87
Tabela XVIII	Critérios de avaliação de performance para dois balanços de massas distintos	88
Tabela XIX	Resumo comparativo do desempenho de vários ji- gues	99
Tabela XX	Características operacionais de jigues em rela- ção ao material de rejeito	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Mapa geral dos distritos carboníferos	15
Figura 2	Esquema padrão de beneficiamento em Santa Catarina	16
Figura 3	Beneficiamento nas minas de carvão em Santa Catarina	17
Figura 4	Beneficiamento no Lavador de Capivari	17
Figura 5	Relação entre o coeficiente de cisalhamento e o número de Reynolds	24
Figura 6	Onda de choque provocada pelo jigüe	30
Figura 7	Seção transversal de um jigüe Baum	31
Figura 8	Jigüe Baum, McNally	32
Figura 9	Perfil jigüe Batac	33
Figura 10	Efeito da ascensão diferencial sobre o leito ...	34
Figura 11	Relação de velocidades de sedimentação entre duas partículas distintas	36
Figura 12	Efeito da aceleração diferencial sobre o leito..	37
Figura 13	Efeito da consolidação intersticial sobre o leito	38
Figura 14	Centro de gravidade no leito do jigüe	39
Figura 15	Efeito do tipo de ciclo na precisão de separação	44
Figura 16	Curva de partição com respeito ao carvão lavado.	50
Figura 17	Curvas de partição do jigüe do Lavador da Mina do Faxinal	79
Figura 18	Curvas de partição do jigüe do Lavador da Mina do Recreio	80
Figura 19	Curvas de partição do jigüe do Lavador da Mina de São Roque.....	81
Figura 20	Curvas de partição do jigüe do Lavador da Mina do Verdinho	82
Figura 21	Curvas de partição do jigüe do Lavador da Mina A, Sangão	83

Figura 22	Histograma de distribuição de massa da alimentação do Lavador da Mina do Faxinal	92
Figura 23	Histograma de distribuição de massa da alimentação do Lavador da Mina do Recreio	93
Figura 24	Histograma de distribuição de massa da alimentação do Lavador da Mina de São Roque	94
Figura 25	Histograma de distribuição de massa da alimentação do Lavador da Mina do Verdinho	95
Figura 26	Histograma de distribuição de massa da alimentação do Lavador da Mina A, Sangão	96
Figura 27	Histograma de distribuição de massa da alimentação do jigue Baum 3; Carvão Norte-Americano	97
Figura 28	Histograma de distribuição de massa da alimentação do jigue Baum 4; Carvão Norte-Americano	98

1. INTRODUÇÃO

1.1 CARVÕES BRASILEIROS

As reservas conhecidas de carvão no Brasil se concentram na região sul, mais especificamente nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Em 1986, os recursos totais identificados em camadas de carvão no Brasil atingiram 30.993,55 milhões de toneladas, sendo que no Rio Grande do Sul foram identificados 92% deste total, 7% no estado de Santa Catarina e 1% nos demais.

Os dados da produção nacional de carvão ROM em 1985 mostram que, em termos comparativos, de um total de 24 milhões de toneladas produzidas, Santa Catarina contribuiu com 19 milhões de toneladas, principalmente pelo fato de, nesta região, se encontrarem carvões com características coqueificáveis (carvão metalúrgico). O Rio Grande do Sul contribuiu com 4,5 milhões de toneladas, cabendo o restante da produção ao estado do Paraná. Do total de ROM produzido, foram recuperadas 1,1 milhões de toneladas de carvão metalúrgico, provenientes exclusivamente de Santa Catarina e 6,3 milhões de toneladas de carvão energético. (1)

Um mapa geral dos distritos carboníferos do Brasil é mostrado na figura 1. As reservas de carvão nos estados do Paraná e Rio Grande do Sul estão divididas segundo diversas jazidas que estão localizadas relativamente distantes uma das outras.

Em Santa Catarina as reservas se concentram numa área alongada no sentido norte/sul, situada entre os municípios de Araranguá e Lauro Müller. As reservas estão individualizadas nas camadas mineráveis Barro Branco, Irapuá e Bonito.

Existem atualmente 19 companhias de mineração de carvão atuando nas áreas anteriormente citadas. Em Santa Catarina atuam 12: Carbonífera Próspera S/A, Carbonífera Metropolitana S/A, Carbonífera Criciúma S/A, Companhia Carbonífera de

Urussanga, Carbonífera Treviso S/A, Cia. Brasileira Carbonífera de Araranguá, Cia. Nacional de Mineração do Barro Branco, Ibracoque Mineração Ltda., Cia. Carbonífera Catarinense S/A, Carbonífera Palermo Ltda., Coque Catariense Ltda. e Indústria Carbonífera Rio Deserto Ltda. No Rio Grande do Sul atuam 5: Cia. Rio Grandense de Mineração, Cia. de Pesquisas e Lavras Mineiras, Mineradora Santa Gertrudez, Carbonífera Palermo Ltda. e Cia. Nacional de Mineração Candiota. No Paraná atuam 2: Cia. Carbonífera de Cambuí e Klabin do Paraná Mineração S/A.

Estas empresas fornecem carvão para uso em indústrias de siderurgia, cimento, papel e celulose, têxtil, cerâmica, alimentos, fumo, transporte, química e gaseificação, petroquímica e outras, além do uso para geração de energia elétrica.

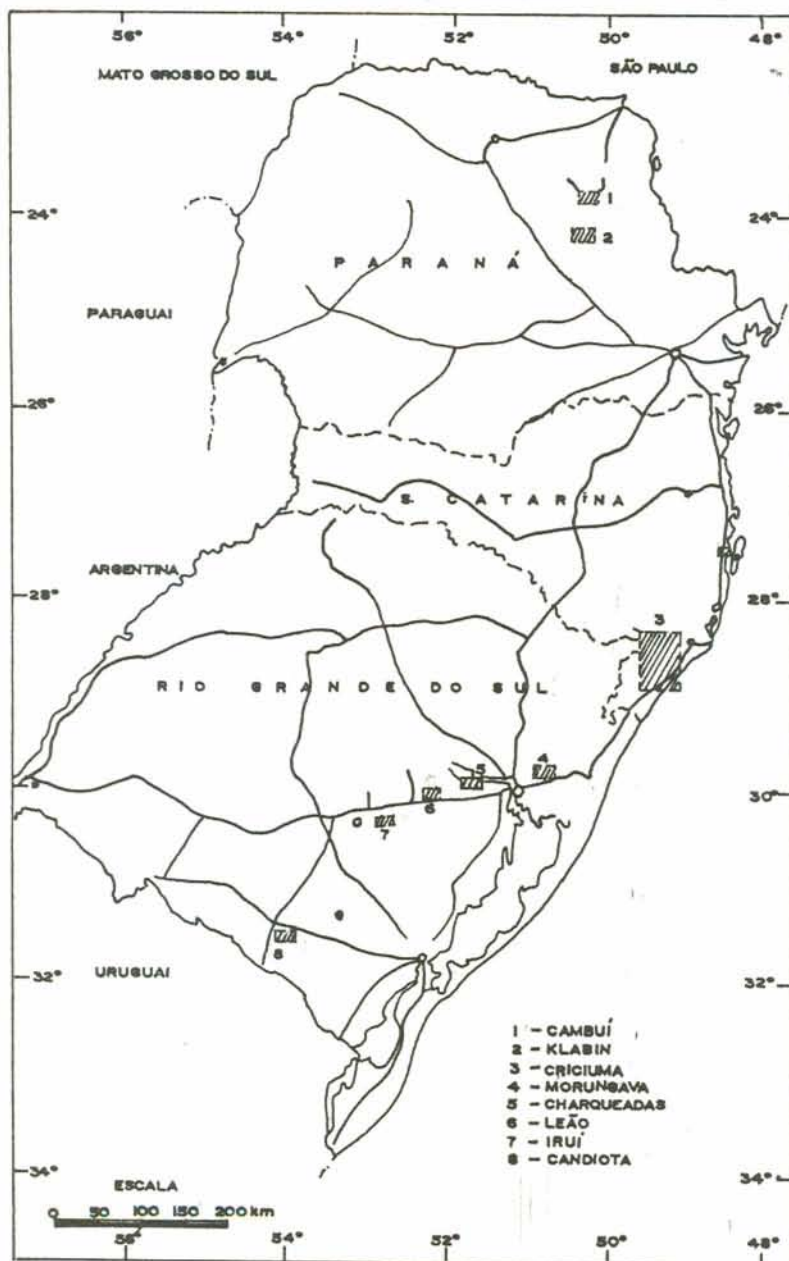


Figura 1: Mapa Geral dos Distritos Carboníferos.

1.2 ESTADO ATUAL DO BENEFICIAMENTO DE CARVÕES BRASILEIROS POR JIGAGEM

Devido às suas características, o carvão brasileiro requer uma etapa de beneficiamento objetivando uma redução no teor de cinzas e enxofre, para o seu consumo industrial. No estado de Santa Catarina, onde há a maior produção de carvão, o esquema padrão de beneficiamento, mostrado na figura 2, pode ser dividido em duas etapas. A primeira etapa é feita pelas companhias de mineração, visando uma redução do teor de cinzas do ROM de 60-65% de cinzas para 32-33% de cinzas. O produto desta primeira etapa, denominado CPL (carvão pré-lavado, é então transportado ao Lavador de Capivari, empresa subsidiária de Carbonífera Próspera S/A a qual pertence, por sua vez, a Companhia Siderúrgica Nacional. No Lavador de Capivari é feita a segunda etapa do beneficiamento, a qual visa a produção de um carvão metalúrgico com 17% de cinzas e carvão energético com poder calorífico de 4.500 e 5.200 kcal /kg.

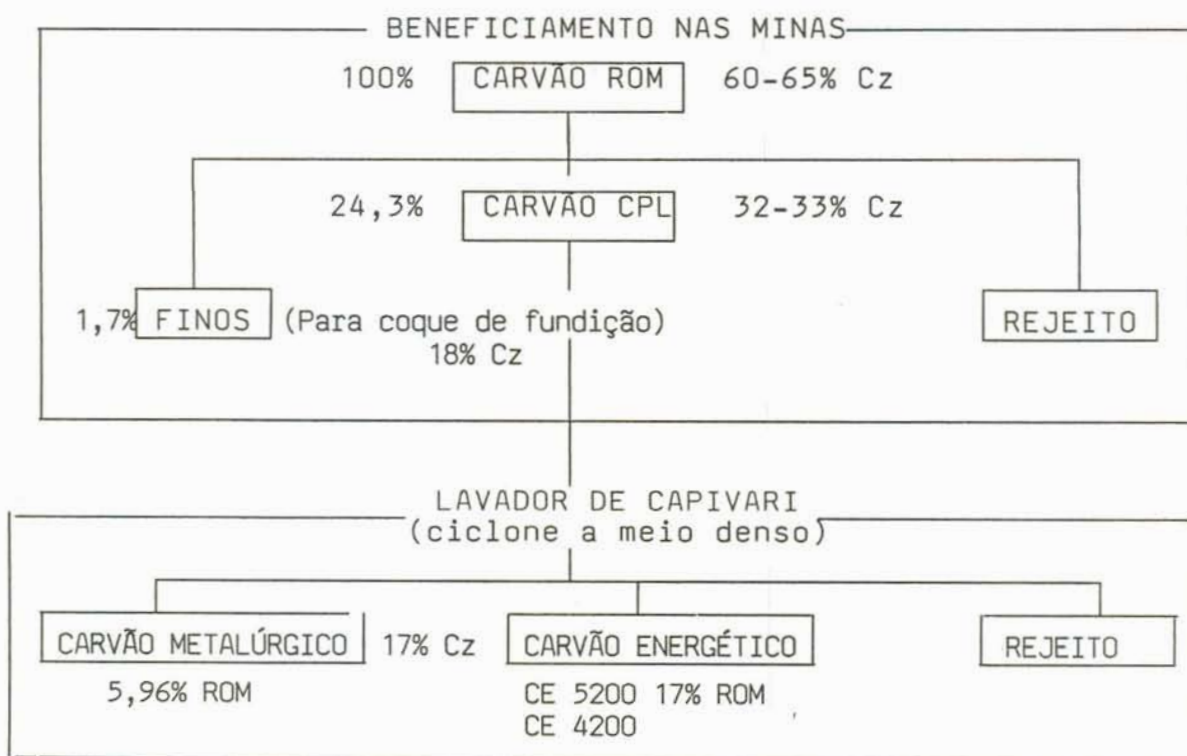


Figura 2: Esquema padrão de beneficiamento em Santa Catarina.

A primeira etapa de beneficiamento visando a produção de CPL é mostrada com mais detalhes na figura 3, na forma de um esquema simplificado. Os processos de beneficiamento mais comumente utilizados nesta etapa são jigagem, mesagem, ciclonação e flotação.

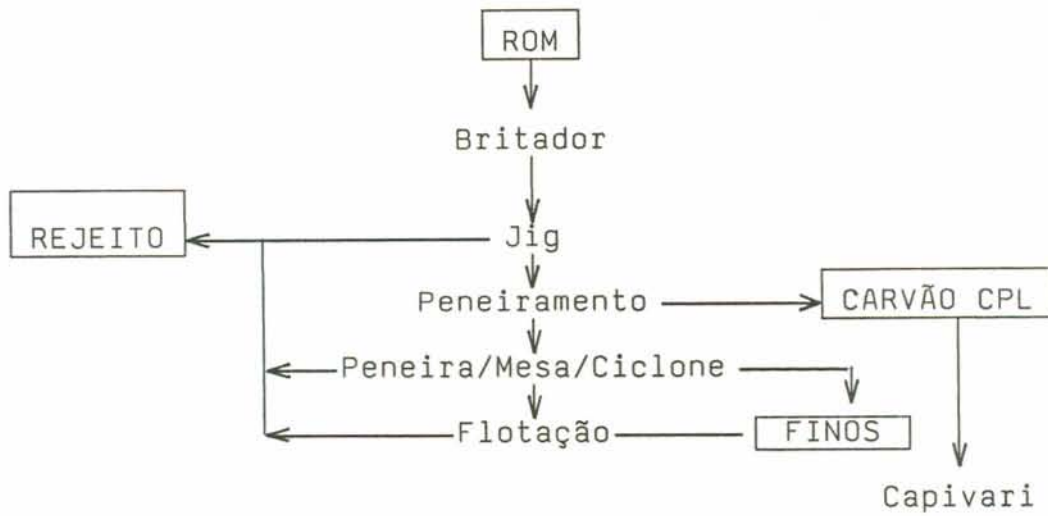


Figura 3: Beneficiamento das minas de carvão de Santa Catarina.

Na figura 4 é mostrado um esquema simplificado da etapa de beneficiamento no Lavador de Capivari. Aqui, o processo utilizado é a ciclonação com meio denso.

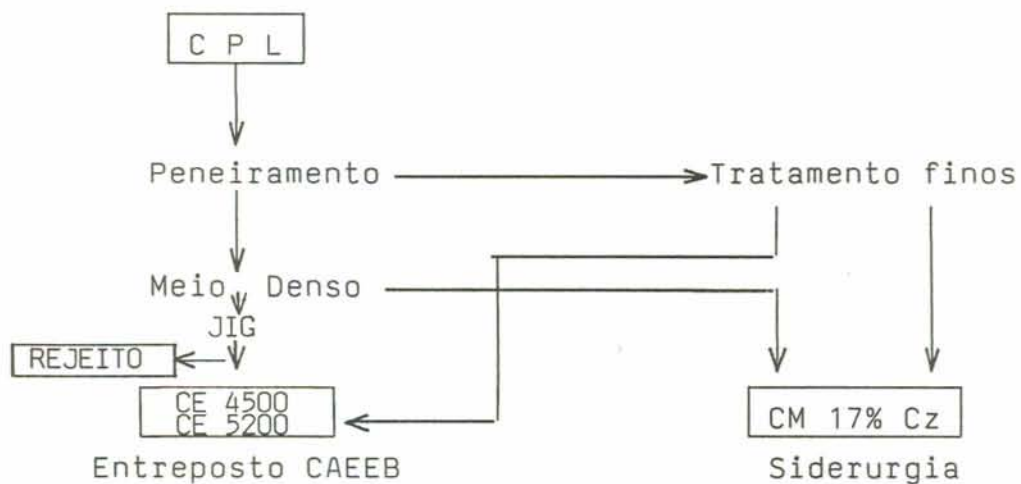


Figura 4: Beneficiamento no Lavador de Capivari

Da produção total de ROM em 1985, apenas 1 milhão de toneladas, representando 4%, não foram beneficiadas em jigues. Este carvão, produzido em Candiota e Charqueadas, Rio Grande do Sul, é usado diretamente para produção de energia elétrica. Os demais 96% são beneficiados invariavelmente em processos que contam com uma etapa de jigagem, por ser este processo mais adequado a grandes taxas de alimentação e, além disso, trabalhar em faixas granulométricas mais grosseiras (top size 1-4").

No quadro 1 estão relacionados os tipos de jigues utilizados pelas companhias de mineração, suas capacidades e recuperações médias. (1).

Quadro 1: Relação de Companhias, usinas, tipos de jigues, suas capacidades e recuperações médias.

Companhia	Usina	Tipo Jig	Capacid. ton/h	Recuper. Média %
Próspera	Mina A	Baum	600	24,9
	Beluno	Baum	350	29,0
	Içara	Baum	80	24,0
Metropolitana	Esperança	Baum	700	22,5
Criciúma	Verdinho	Batac	600	24,0
	Volta Red.	Harz	200	23,1
	São Marcos	Harz	50	26,8
	Santa Rosa	Baum	100	28,9
C.C.Urussanga	St. Augusta	Batac	350	26,8
	Santana	Baum	240	20,0
Treviso	BC-8 / BC-7	Baum	200	23,7
CBCA	Mina 2	Batac	500	25,3
	São Simão	Baum	90	25,8
Barro Branco	Ibramil	Baum	100	27,5
	Rocinha	Baum	80	29,6
Ibracoque	DBS	Baum	100	38,5
Catarinense	Maina	Baum	120	34,9

Palermo	Palermo	Baum	80	38,6
	Boa Vista	Baum	80	32,1
	Capané	Baum	100	25,2
Cocalit	Ex-patrim.	Baum	120	28,6
Rio Deserto	Rio Deserto	Baum	70	26,6
CRM	E.R.Machado	Baum	150	39,7
	Iruí	Baum	100	51,1
COPELMI	Recreio	Baum	400	47,7
	Faxinal	Baum	200	32,1
Cambuí	A.Simões	Harz	80	58,7
Klabin		Baum	46	65,0

1.3 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

Em face de que 96% da produção bruta nacional é beneficiada em aproximadamente 28 jigues com uma capacidade nominal instalada de aproximadamente 6.320 toneladas por hora, este processo assume fundamental importância no contexto da produção de carvão no Brasil. Considerando-se o fato de que a produção bruta até 1990 deve aumentar numa proporção de 56%, atingindo 37,5 milhões de toneladas por ano (1), novos jigues deverão ser instalados e certamente a escolha do equipamento será fundamental para atingir os padrões de eficiência necessários de forma a atender a demanda em níveis satisfatórios de custo e qualidade.

Apesar da importância que o processo de jigagem de carvões assume no contexto nacional, não existem trabalhos sistemáticos sobre caracterização, avaliação e otimização deste processo, fato que justifica claramente os objetivos pretendidos neste trabalho.

Neste sentido, este trabalho pretende analisar em detalhe a performance atual do processo de jigagem no Brasil, utilizando dados levantados "in loco" ou fornecidos pelas próprias companhias de mineração.

Os resultados obtidos, são discutidos em termos dos parâmetros operacionais envolvidos no processo de jigagem, os quais devem ser invariavelmente otimizados em concordância com os fundamentos teóricos envolvidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA SEPARAÇÃO GRAVIMÉTRICA

A separação gravimétrica de partículas minerais é baseada, de um modo geral, em diferenças nos valores de velocidade de sedimentação em um meio fluido, água na maioria dos casos.

O movimento de partículas em meios fluídos é relevante quanto a uma série de processos dentro da área de processamento de recursos minerais, a saber:

1. Classificação
2. Filtração
3. Espessamento
4. Flotação
5. Jigagem
6. Ciclonação
7. Escoamento Laminar

O movimento de partículas em fluídos tem sido estudado por inúmeros autores das mais variadas áreas, não existindo uma unanimidade quanto às leis que definem este movimento devido à alta complexidade deste sistema (2)(3). Esta complexidade provém do elevado número de fatores envolvidos, a saber:

1. Fatores relativos ao sólido particulado: diâmetro, forma, porosidade, interação partícula-partícula, concentração de partículas.

2. Fatores relativos ao fluido: viscosidade, temperatura, densidade, hidrodinâmica.

3. Outros fatores: efeito parede, tipo de "container", inclinação, etc.

O comportamento de uma partícula em movimento através de um fluido pode ser traduzido como:

$$\Sigma F = M \cdot dv/dt \quad \text{onde,}$$

ΣF = Resultante das forças que atuam sobre a partícula

M = Massa da partícula

dv/dt = aceleração resultante do equilíbrio de forças ΣF

Se uma partícula se movimenta por ação de uma força externa F_x , ela será submetida a forças contrárias ao movimento tais como a resistência do fluido ao movimento da partícula por fricção ou cisalhamento, F_d , e a força devida ao empuxo, segundo o princípio de Arquimedes, F_a . Assim a equação anterior fica:

$$\Sigma F = F_x - F_d - F_a = M \cdot dv/dt$$

A força externa pode ser do tipo gravitacional, na maioria dos casos, ou centrífuga, e são expressas pelas equações:

$$F_x = M \cdot g \quad (\text{gravitacional}) \quad \text{ou,}$$

$$F_x = \frac{M \cdot w^2}{r} \quad (\text{centrífuga}) \quad \text{onde:}$$

g = aceleração da gravidade

r = raio de ação da força

w = velocidade angular

A força devida ao empuxo, F_a , é dada pela relação:

$$F_a = M_f \cdot g \quad \text{onde:}$$

M_f = massa de fluido deslocado

A massa de fluido deslocado pode ser expressa em termos de volume e densidade do fluido:

$$M_f = V_f \cdot \rho_f \quad \text{onde:}$$

V_f = volume de fluido deslocado

ρ_f = densidade do fluido

De acordo com Arquimedes, o volume de fluido deslocado é igual ao volume da partícula, ou seja:

$$V_f = V_p \quad \text{onde:}$$

V_p = volume da partícula

Se considerarmos uma partícula esférica e incompressível, seu volume pode ser dado em função do seu diâmetro. Assim:

$$V_p = \frac{\pi}{6} \cdot d^3 \quad \text{onde:}$$

d = diâmetro da partícula (esférica e incompressível)

Portanto, a força devida ao empuxo pode ser dada em função do diâmetro da partícula e da densidade do fluido. Fazendo-se as substituições temos:

$$F_a = \frac{\pi}{6} \cdot d^3 \cdot \rho_f \cdot g$$

A força de cisalhamento F_d é uma função complexa que depende de uma série de variáveis que operam independentemente e de acordo com a hidrodinâmica do sistema. Assim, Stokes definiu a força F_d para o sistema hidrodinâmico laminar, onde não há uma perturbação significativa do meio pelas partículas, como segue:

$$F_d = 3 \cdot \pi \cdot d \cdot v \cdot \mu \quad \text{onde:}$$

v = velocidade de sedimentação

μ = viscosidade do meio

Com base nestas considerações define-se uma equação de sedimentação livre em fluidos, para partículas sólidas não compressíveis, esféricas, não porosas e que não interagem entre si (concentrações diluídas). O somatório de forças em função do diâmetro da partícula é dado por:

$$M \cdot dv/dt = \frac{\pi}{6} \cdot d^3 \cdot g \cdot \rho_s - \frac{\pi}{6} \cdot d^3 \cdot g \cdot \rho_f - 3 \cdot \pi \cdot d \cdot v \cdot \mu$$

Se a velocidade de sedimentação considerada é a velocidade terminal de sedimentação, v_t , ou seja, quando as partículas deixam de acelerar, dv/dt é nula. Assim:

$$v_t = \frac{g \cdot d^2 \cdot (\rho_s - \rho_f)}{18 \cdot \mu} \quad (\text{Stokes, sedimentação livre, laminar})$$

Para partículas maiores, que sedimentam com uma velocidade maior e perturbam consideravelmente o fluido, causando uma hidrodinâmica turbulenta, Newton definiu F_d como:

$$F_d = \frac{\pi}{8} \cdot C_d \cdot v^2 \cdot d^2 \cdot \rho_f \quad \text{onde:}$$

C_d = coeficiente de cisalhamento

A equação de sedimentação proposta por Newton para este caso é a seguinte:

$$v_t = \left[\frac{4}{3} \cdot \frac{g \cdot d \cdot (\rho_s - \rho_f)}{\rho_f \cdot C_d} \right]^{0,5} \quad (\text{Newton, sedimentação livre, turbulenta})$$

Ambas equações podem ser utilizadas com um mínimo de erro quando a hidrodinâmica do sistema é bem definida, laminar ou turbulenta. As complicações surgem para situações intermediárias. Neste caso, a maioria dos autores estabelece aproximações, entre as quais a mais utilizada é:

Regime hidrodinâmico	Nº de Reynolds, Re	C_d
Laminar	$Re < 1$	$24/Re$
Intermediário	$1 < Re < 300$	$18,5/Re^{0,6}$
Turbulento	$Re > 300$	$0,44$

O número de Reynolds é definido por:

$$Re = \frac{v_t \cdot d \cdot \rho_f}{\mu}$$

Outras equações empíricas surgidas para o cálculo do coeficiente C_d , para o regime intermediário são as seguintes (4):

$$C_d = 0,29 \cdot \left(1 + \frac{9,06}{Re}\right)^2$$

$$C_d = 24 \cdot (1 + 0,15 Re^{0,687})/Re$$

$$C_d = 24 \cdot (1 + 0,1875 \cdot Re)/Re$$

$$C_d = 21/Re + 6/Re^{0,5} + 0,25$$

Na figura 5 é mostrada a relação que existe entre o número de Reynolds e o coeficiente de cisalhamento. Enquanto o regime é laminar, a relação entre estas variáveis é linear, seguindo a lei de Stokes. Numa faixa intermediária, estabelece-se uma relação não linear entre as duas grandezas. Aqui se aplicam as relações empíricas entre C_d e Re . No regime turbulento, a relação segue a lei de Newton. Para valores de Re maiores que 200.000 a relação é desconhecida.

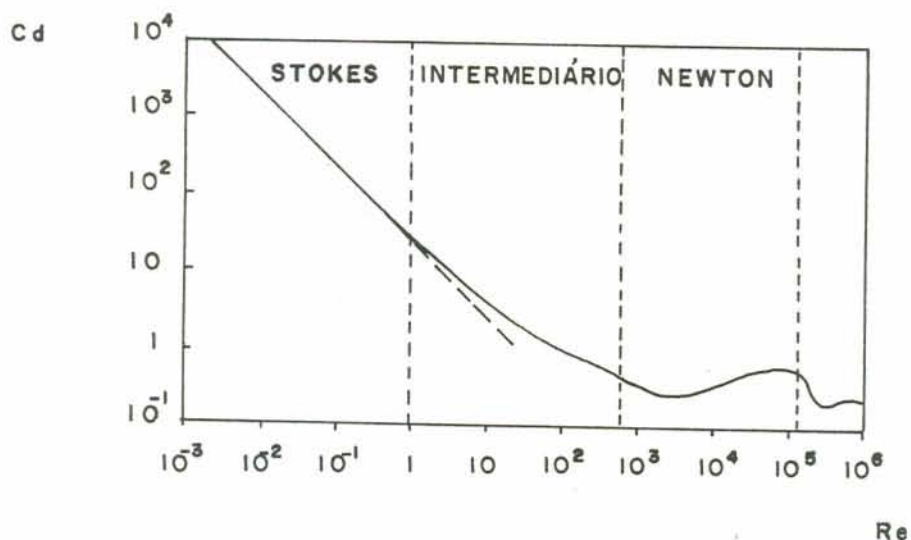


Figura 5: Relação entre o coeficiente de cisalhamento e o número de Reynolds.

O sistema fica ainda mais complicado quando a concentração de partículas sólidas aumenta a níveis tais que surjam in-

terações entre as partículas. Estas interações são geralmente caracterizadas pela fricção e colisão, além de, para partículas muito finas, forças de repulsão e atração por ação dos potenciais superficiais. Ainda, conjuntamente com o fenômeno de sedimentação das partículas, ocorrem alterações hidrodinâmicas do sistema, com fluxos ascendentes do meio. Nestes casos, o coeficiente de cisalhamento fica mais complexo e depende das variações de densidade do meio, da viscosidade, da forma e densidade das partículas e do teor de sólidos em volume. As interações entre as partículas normalmente ocorrem quando a distância média entre elas é igual ou menor a 10 vezes o seu diâmetro. Neste caso já não teremos mais sedimentação livre, propriamente dita, e sim uma sedimentação impedida, estabelecendo-se um aumento na densidade do fluido em decorrência do preenchimento dos espaços dentro da matriz líquida pelas partículas sólidas. A densidade do fluido passa a ser então uma média ponderada entre a densidade do líquido empregado e a densidade das partículas. Assim:

$$\rho'f = (1 - \epsilon) \cdot \rho_s + \epsilon \cdot \rho_f \quad \text{onde:}$$

ϵ = fração em volume do fluido (%)

Uma outra propriedade do fluido que muda é a sua viscosidade. Além disto, na sedimentação impedida, ocorre uma restrição da área efetiva do fluido. Uma equação geral, que corrige a velocidade de sedimentação livre para o caso de sedimentação impedida, através de fatores de correção é a seguinte (5):

$$v_{t\text{impedida}} = v_{t\text{livre}} \cdot (1-\emptyset) \cdot (1-2,5\emptyset) \cdot (1-\emptyset^{2/3}) \cdot \psi$$

onde:

\emptyset = fração em volume de sólidos (%) = $(1 - \epsilon)$

$(1-\emptyset)$ = fator devido ao efeito da densidade do fluido

$(1-2,5\emptyset)$ = fator devido ao efeito na viscosidade do fluido.

$(1-\emptyset^{2/3})$ = fator devido a restrição da área efetiva do fluido.

ψ = fator forma (grau de esfericidade das partículas)

O fator forma é um fator de correção adicional que pode ser usado tanto para casos de sedimentação livre como impedida. Seus valores variam em torno de 0,78 para partículas quase esféricas, 0,72 para partículas angulares, 0,67 para partículas cilíndricas e 0,52 para partículas planares.

A base dos processos de beneficiamento gravimétrico de carvão reside na otimização das diferenças de velocidade de sedimentação entre a matéria mineral e a matéria carbonosa. A priori, deveriam ser calculadas as condições ideais nas quais este diferencial de velocidade traduz-se numa estratificação nítida ou separação ótima deste estado binário.

Uma forma de calcular estas condições é através da definição de raios de sedimentação, n , como sendo a relação entre os diâmetros de duas partículas com densidades diferentes para que elas sedimentem com a mesma velocidade.

Assim, para duas partículas com densidades ρ_a e ρ_b :

$$vt_a = vt_b$$

No caso de sedimentação livre, regime laminar, pela lei de Stokes vem:

$$d_a^2(\rho_a - \rho_f) = d_b^2(\rho_b - \rho_f) \quad e,$$

$$n = \frac{d_a}{d_b} = \left[\frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_a - \rho_f} \right]^{0,5}$$

No caso de sedimentação livre, regime turbulento, pela lei de Newton vem, considerando-se $Cd_a = Cd_b$:

$$n = \frac{d_a}{d_b} = \left[\frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_a - \rho_f} \right]$$

No caso de sedimentação impedida, fazendo-se somente a correção devida à alteração na densidade do fluido, pode-se considerar que, a fórmula do raio de sedimentação é a seguinte:

$$n = \frac{d}{a} = \left[\frac{\rho b - \rho' f}{\rho a - \rho' f} \right]^m \quad \text{onde:}$$

$m = 0,5$ para regime laminar

$m = 1$ para regime turbulento

Se a for carvão e b matéria mineral, a relação $d_a = 2 d_b$, significa que, para que as partículas de matéria carbonosa possam sedimentar com a mesma velocidade das partículas de matéria mineral, o diâmetro mínimo delas deve ser de duas vezes o diâmetro das partículas de matéria mineral.

No caso do sistema carvão/mineral, alguns raios de sedimentação calculados para vários teores de matéria mineral e concentrações de sólidos são mostrados na tabela I. (5)

Tabela I: Raios de sedimentação para um sistema carvão/mineral em função do teor de sólidos, regime hidrodinâmico e proporção entre carvão e matéria mineral.

Teor de mat. mineral %	% sólidos (V/V)							
	10		20		30		40	
	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0
25	2,4	6,0	2,8	7,0	3,3	11,0	4,6	21,0
50	2,6	6,7	3,3	11,0	6,4	41,0		
75	2,8	7,7	4,6	21,0				

Obs.: carvão = 1,4 g/cc
mineral = 2,7 g/cc

As conclusões gerais da tabela I são as seguintes:

a. O diferencial de velocidade que, em definitivo, conduz a estratificação, é maior quando a sedimentação é do tipo impedida. Assim, observa-se na tabela I, um crescimento do raio de sedimentação em função do crescimento do teor de sólidos. Um valor maior de n significa que, em condições de sedimentação impedida, haverá uma segregação mais rápida do sistema, com uma maior e mais rápida deposição de partículas de matéria mineral no leito de qualquer equipamento de beneficiamento.

b. Os raios de sedimentação são maiores em condições de regime hidrodinâmico turbulento, independentemente do tipo de sedimentação (livre ou impedida).

c. Os raios de sedimentação são maiores quando aumenta o teor do componente de maior densidade, no caso a matéria mineral, pela maior contribuição ao aumento da densidade do meio.

Estas considerações analíticas permitem concluir que o beneficiamento de carvão fica mais fácil para granulometrias maiores e altos conteúdos de sólidos no processo. Uma outra conclusão é que um alto teor de matéria mineral não constitui problema na separação do carvão desde que esta esteja liberada ou separada da matéria carbonosa.

Todos os equipamentos de beneficiamento gravimétrico de carvão são baseados nestas variações de velocidade de sedimentação em fluidos. As diferenças entre os diversos equipamentos se devem exclusivamente à forma utilizada para otimizar este diferencial de velocidades. Entretanto, todos os processos gravimétricos existentes tem um limite operacional definido pela granulometria das partículas. Para granulometrias menores, a diferença entre as velocidades de sedimentação dos componentes é mínima, exigindo do equipamento uma maior acuidade ou precisão de separação. O jigue, por exemplo, apresenta uma baixa eficiência para tamanhos inferiores a 0,59 mm. Já as mesas e os hidrociclones são mais eficientes que o jigue para partículas menores porque empregam outras forças e/ou artifícios além da força gravitacional. Por exemplo, a pressão da água de lavagem no caso das mesas concentradoras e as forças centrífuga e centrípeta no caso dos hidrociclones. Estas forças são maiores em magnitude que a força gravitacional, aumentando o intervalo operacional de granulometrias.

2.2 ASPECTOS FUNCIONAIS E TIPOS DE JIGUES

Jigagem é um processo de estratificação de partículas no qual o rearranjo destas resulta de uma expansão e compactação alternada de um leito de partículas por corrente de fluido pulsante. O sentido do fluxo de fluido reverte-se periodicamente.

O rearranjo das partículas resultante das distintas velocidades de sedimentação fazem com que a densidade das partículas aumente do topo para o fundo do leito.

A separação das partículas por jigagem resulta da aplicação repetida de um movimento cíclico complexo da água. Nesta constante mudança do sistema hidrodinâmico, o golpe de impulsão governa, por criação de uma alta velocidade inicial da água, o erguimento das partículas no leito. As partículas são movidas para cima, criando uma expansão do volume do leito. Neste instante, as partículas de menor densidade, matéria carbonosa, são movidas a uma altura maior que as partículas de maior densidade do mesmo tamanho. Em seguida o sistema se desacelera até atingir velocidade nula e muda de direção para o subsequente golpe de sucção. Deve ser enfatizado que nem todas as partículas alcançam velocidade zero no mesmo instante. Sob a condição de leito expandido, cada partícula tem mobilidade suficiente para reposicionar-se umas em relação às outras. Durante o golpe de sucção, as partículas movem-se para baixo formando um leito compacto, onde a separação entre as partículas de menor tamanho continua, depois que as partículas maiores tiverem ocupado posições fixas. O fenômeno que ocorre durante a jigagem pode ser descrito esquematicamente pela figura 6. A figura 6 (a) mostra a altura da água no leito durante um ciclo. A figura 6 (b) mostra uma velocidade "ideal" da água durante este mesmo intervalo. Estas curvas mostram uma alta aceleração inicial durante a qual o leito move-se para cima como uma unidade. Segue-se um período no qual a aceleração muda bruscamente e a velocidade de ascensão da água torna-se constante. O intervalo AB fornece condições para uma abertura do leito do jig, quando as partículas movem-se umas em relação às outras, tornando o leito móvel. Quando o período de sucção começa, a água está na sua altura máxima, e a velocidade de ascensão reverte sua direção, sob efeito da força da gravidade, resistida pelo movimento do êmbolo.

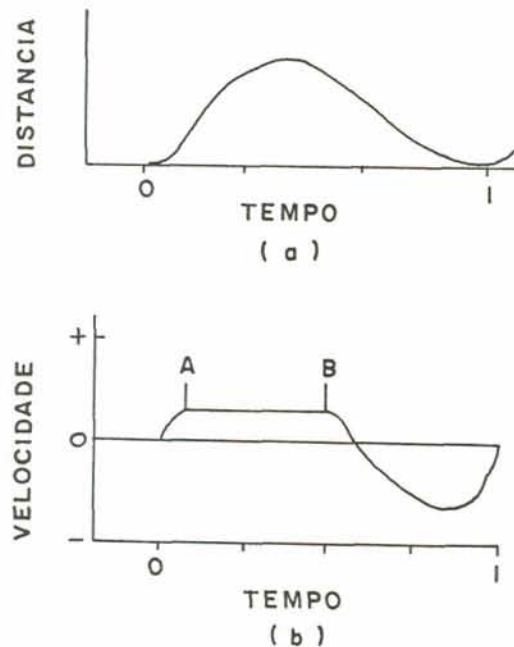


Figura 6: Onda de choque provocada pelo jigue.

A distinção entre os diversos tipos de jigues está principalmente relacionada ao mecanismo que gera os golpes de sucção e impulsão. A maioria dos jigues são do tipo Baum, nos quais o movimento da água é motivado por pressão de ar em uma câmara colocada lateralmente ao leito do jigue (6). A ligação entre a câmara de pulsação e o leito do jigue é feita através de um compartimento em forma de arca. Uma secção transversal de um jigue tipo Baum é mostrada esquematicamente na figura 7. A válvula de admissão de ar comprimido é responsável pelo modelo de onda que se deseja no leito do jigue. No compartimento de pulsação é admitida a água de lavagem. O volume de água de lavagem e o modelo de onda utilizado são os fatores de maior relevância na regulação de um jigue. No fundo da caixa do jigue, a qual tem forma de U, pode ser instalado um transportador de parafuso, para a eliminação de partículas finas que eventualmente transponham o leito do jigue. Este leito é sustentado por uma grelha que pode ser horizontal ou inclinada tanto no sentido da alimentação ou no sentido dos produtos.

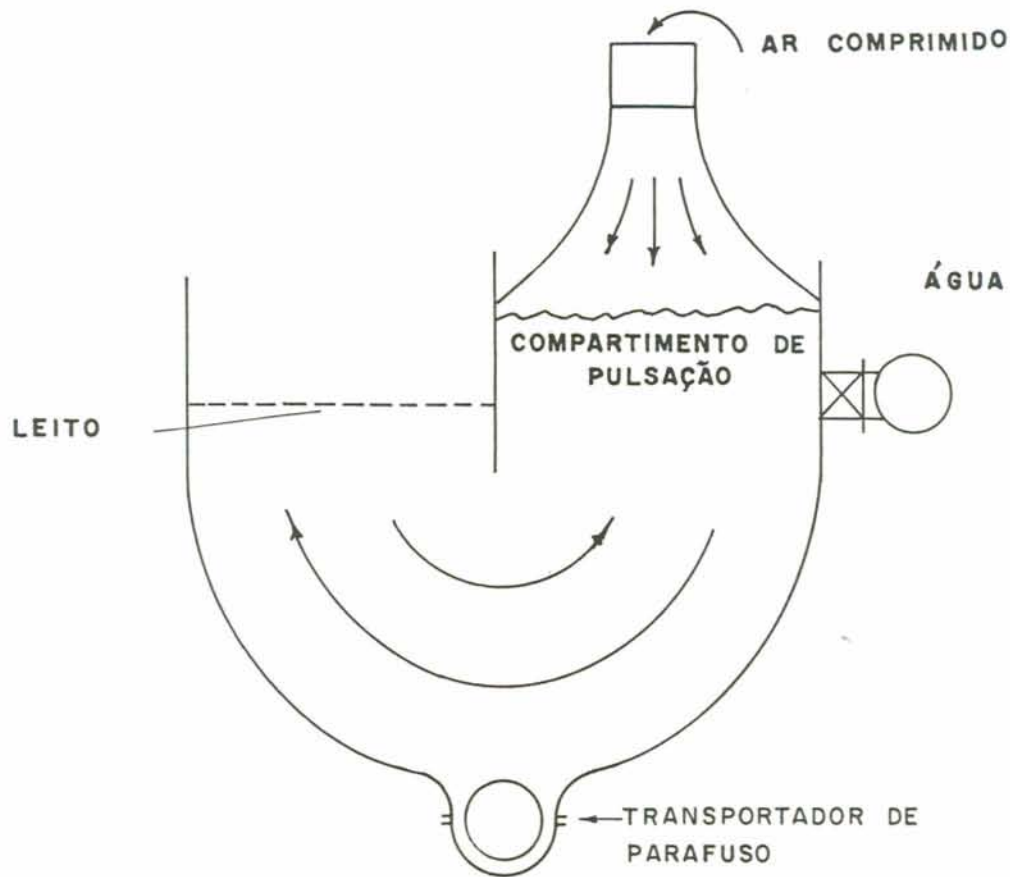


Figura 7: Secção transversal de um jig tipo Baum.

Na figura 8 é mostrado o arranjo geral de um jig tipo Baum, o Mac Nally Mogul. A largura do leito é determinada pela tonelagem e granulometria da alimentação. A caixa é dividida em dois compartimentos, o primeiro destes dividido em duas células e o segundo em três células. Cada célula tem controle de água e ar independentes. O fluxo de rejeito é paralelo ao fluxo do carvão nos dois compartimentos. Nesta figura aparecem também os mecanismos responsáveis pela extração dos rejeitos, os quais são compostos por um flutuador, que regula a abertura dos martelos, que compõem os portões pelos quais os rejeitos são extraídos.

A partir desta comporta, os rejeitos deixam o jig através de elevadores de caçamba.

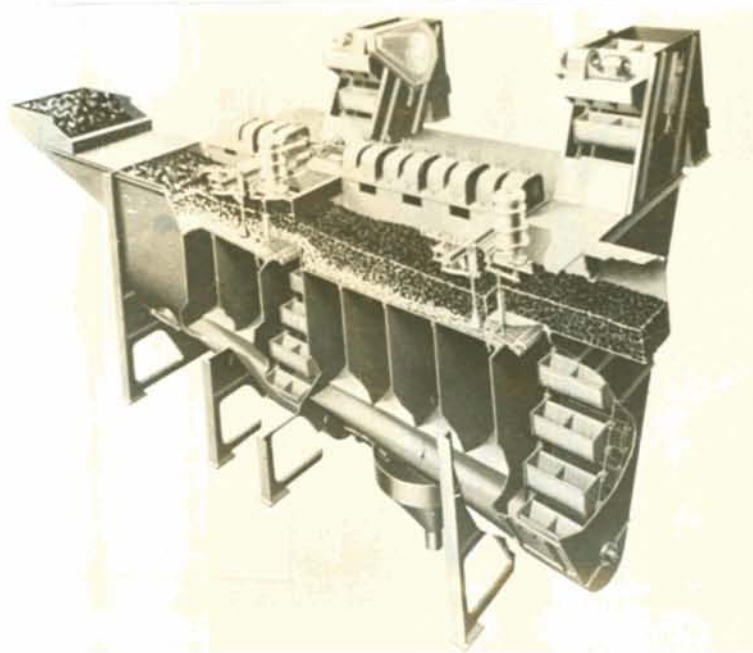


Figura 8: Jig Baum, Mac Nally Mogul Washer.

Os jigues tipo Harz se diferenciam dos jigues tipo Baum basicamente porque o mecanismo de pulsação se constitui de um pistão tipo êmbolo, cujos movimentos determinam a impulsão ou sucção da água.

O jigue Tacub, uma invenção japonesa (7), gera os movimentos de impulsão e sucção através de admissão de ar comprimido em câmaras colocadas diretamente abaixo do leito do jigue. Isto produz uma maior uniformidade do modelo de ondas ao longo da secção transversal do leito.

O jigue Batac foi desenvolvido na Alemanha em resposta à necessidade de maior capacidade de jigagem (8). Este desenvolvimento incluiu um incremento da largura do leito. Para isto foram utilizados conceitos construtivos dos jigues Baum e Tacub, além de uma melhora das válvulas de admissão de ar, controle da profundidade do leito e maior automação, o que leva a uma melhora de performance. O jigue é desenhado, normalmente, com dois

compartimentos e seis células conforme ilustrado na figura 9, com a pulsação de ar sendo produzida diretamente abaixo do leito. As válvulas de ar podem ser ajustadas para a velocidade e forma dos golpes de sucção e impulsão, de acordo com as características da alimentação. Os períodos de admissão e descarga do ar podem ser ajustados independentemente. Cada célula utiliza duas câmaras de ar transversais colocadas abaixo do leito do jigue. A água é introduzida abaixo de cada célula com volumes de admissão independentes.

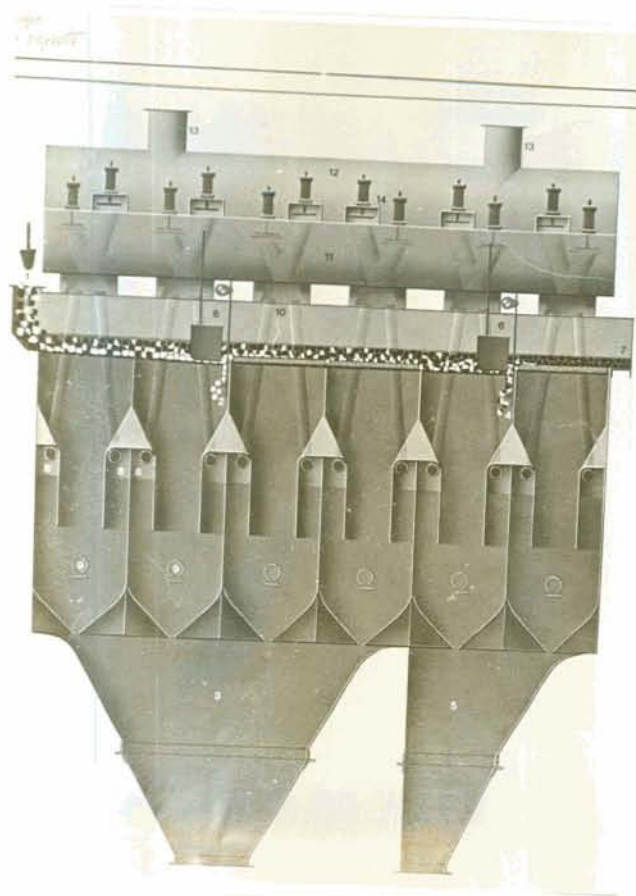


Figura 9: Jig Batac.

2.2.1 Mecanismos e Princípios Envolvidos

O processo de estratificação das partículas durante os ciclos de jigagem resulta da conjugação de diversos fenômenos físicos, os quais foram estudados inicialmente por Gaudin (5). Até o presente, não existe uma análise teórica completamente convincente nem um equacionamento matemático rigoroso a fim de explicar o comportamento do leito durante a jigagem. O modelo clássico desenvolvido neste sentido, considera o movimento de cada partícula separadamente, e tenta expressar a resposta das partículas em face às constantes mudanças das condições às quais estas são submetidas durante a jigagem, fundamentado na teoria da sedimentação desenvolvida por Newton e Stokes. A partir deste modelo, quatro fenômenos distintos são comumente citados como responsáveis pela estratificação durante a jigagem:

a) Ascensão Diferencial: Este fenômeno ocorre durante o ciclo de impulsão, o qual é caracterizado por um movimento ascendente acelerado da água. Durante este ciclo, ocorre uma ascensão mais rápida das partículas mais leves em relação às partículas mais pesadas. Isto se deve a, entre outros fatores, fenômenos inerciais. Assim, as partículas de menor diâmetro bem como as menos densas, serão posicionadas mais alto no leito em relação às de maior diâmetro e mais densas, como é mostrado na figura 10.

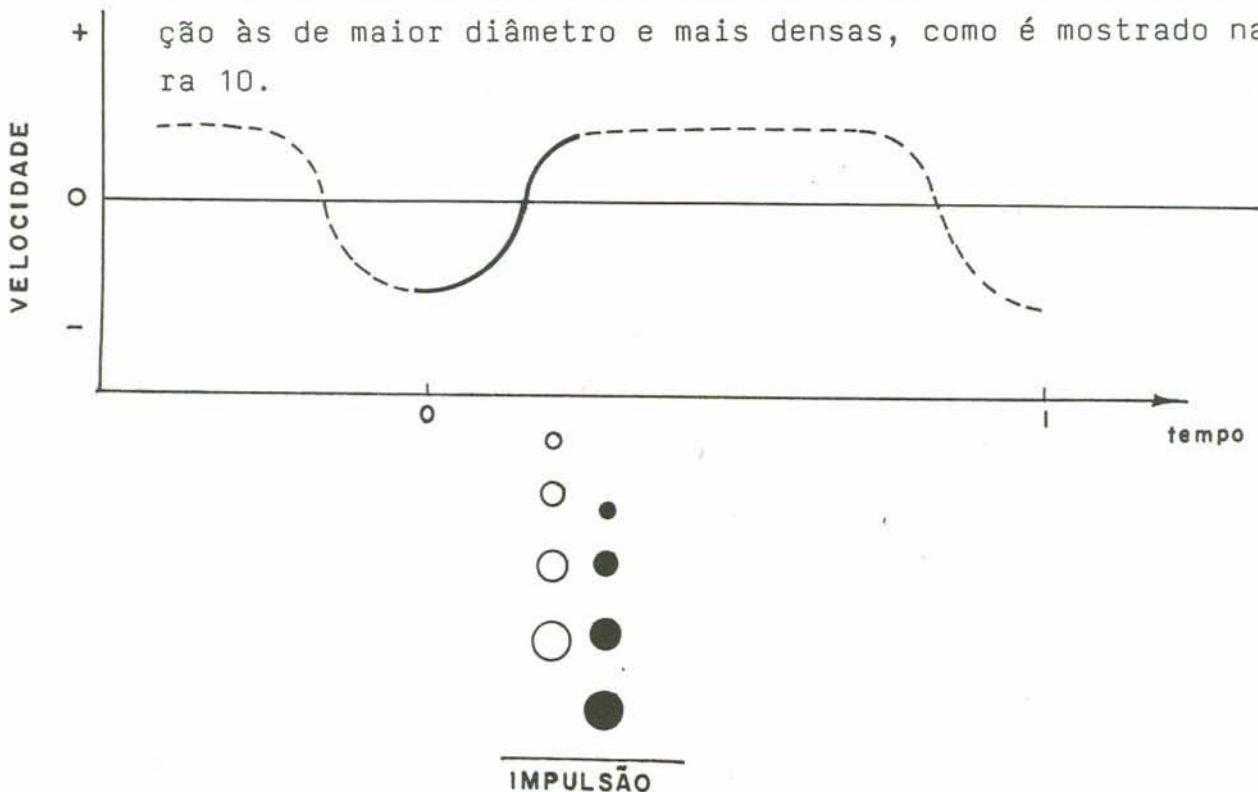


Figura 10: Efeito da ascensão diferencial sobre o leito.

b) Aceleração Diferencial: No final da impulsão, inicia-se uma etapa na qual a velocidade de ascensão da água é constante. Este estado permanece durante um certo intervalo de tempo, fornecendo condições para a abertura do leito do jigue. Durante este intervalo, as partículas sofrem uma inversão no sentido de deslocamento, ou seja, passam de um movimento ascendente para um movimento descendente. Esta reversão se caracteriza por uma fase na qual a velocidade das partículas em relação ao meio fluido é baixa e, conseqüentemente, o coeficiente de cisalhamento é desprezível. Nesta situação, é interessante estudar a relação existente entre as acelerações de partículas de diferentes diâmetros e densidades. Se $F_d = 0$, então o equilíbrio de forças é dado pela seguinte expressão:

$$M \cdot A = M \cdot g - MF \cdot g \quad \text{onde:}$$

A = aceleração da partícula de massa M

g = aceleração da gravidade

MF = massa do fluido deslocado pela partícula de massa M

Considerando-se uma partícula designada por x de densidade maior que uma partícula designada por y, a relação entre as acelerações destas fica dada pela seguinte equação:

$$\frac{A_x}{A_y} = \frac{(M_x - MF_x) \cdot M_y}{(M_y - MF_y) \cdot M_x}$$

Colocando-se as massas em função dos respectivos volumes e densidades, chega-se à seguinte expressão:

$$\frac{A_x}{A_y} = \frac{(\rho_x - \rho_f) \cdot \rho_y}{(\rho_y - \rho_f) \cdot \rho_x}$$

A expressão acima define a razão de aceleração de duas partículas como sendo uma função das densidades destas e do fluido, independentemente do diâmetro das mesmas, para $F_d = 0$. Se a partícula x tem densidade 3.0 e a partícula y tem densidade 1.5, em

água, a razão de acelerações é igual a 2, o que significa que a partícula x tem uma aceleração duas vezes maior que a partícula y nestas condições.

Um gráfico representando as velocidades de sedimentação de duas partículas distintas em densidade e diâmetro é mostrado na figura 11.

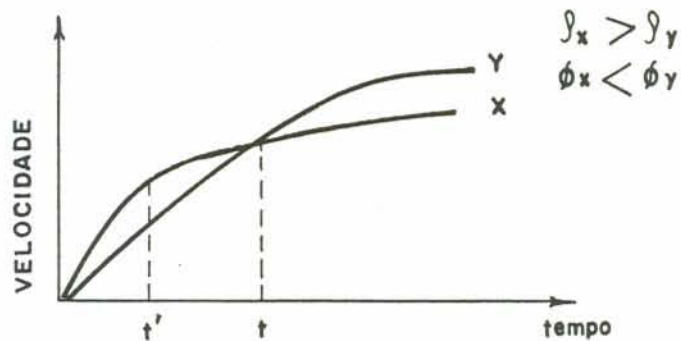


Figura 11: Relação de velocidades de sedimentação entre duas partículas distintas.

A partícula y tem uma velocidade terminal maior que a partícula x. No entanto, até o tempo t', a aceleração da partícula x é maior que a da partícula y. No tempo t, as velocidades de sedimentação se igualam. Até este instante, a partícula x terá percorrido uma distância maior que a partícula y devido ao diferencial de acelerações. Este fenômeno de aceleração diferencial é de curta duração, podendo-se torná-lo produtivo se o tempo de ciclo durante o qual ele ocorre for cuidadosamente controlado, e se for convenientemente repetido. Na figura 12 é mostrado o efeito deste ciclo de jigagem sobre as partículas do leito.

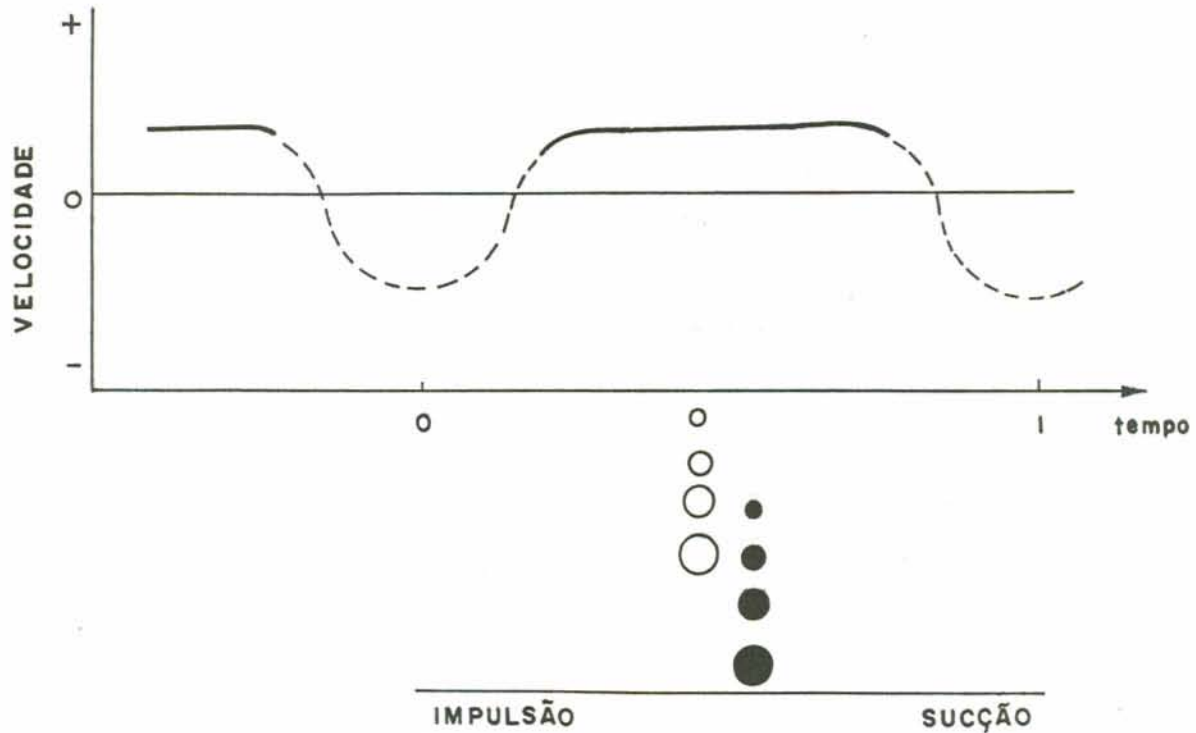


Figura 12: Efeito da aceleração diferencial sobre o leito.

c) Sedimentação Impedida: Este fenômeno ocorre durante os ciclos de impulsão e sucção. Devido as partículas estarem muito próximas umas das outras no leito, elas interferem mutuamente nos seus movimentos de ascensão e sedimentação. Esta interferência aumenta o raio de sedimentação e por conseguinte, provoca uma separação mais rápida (Ver tabela I). Este processo leva as partículas de maior diâmetro e mais densas a se colocarem no fundo do leito enquanto as partículas mais finas e menos densas são levadas a se posicionarem no topo do leito. De acordo com Gaudin, este fenômeno controla a estratificação do leito, enquanto este estiver aberto, sofrendo interferência da aceleração diferencial.

d) Consolidação Intersticial: No final do golpe de sucção as partículas sofrem um processo de compactação conhecido como consolidação intersticial. Primeiramente ocorre a compactação das partículas mais grosseiras, cessando-se o movimento destas. Este leito compacto de partículas grosseiras funciona como um filtro para as partículas mais finas, que se deslocam através

dos interstícios. A relação de diâmetros entre as partículas que se deslocam através dos interstícios e as que formam o leito compacto é dada pela seguinte fórmula empírica:

$$\emptyset' = 0,41 \emptyset \quad \text{onde:}$$

\emptyset = diâmetro das partículas que formam o leito

\emptyset' = diâmetro das partículas que se deslocam nos interstícios.

Este fenômeno tende a posicionar as partículas finas e mais densas no fundo do leito e as grosseiras e menos densas no topo do leito, como é mostrado na figura 13.

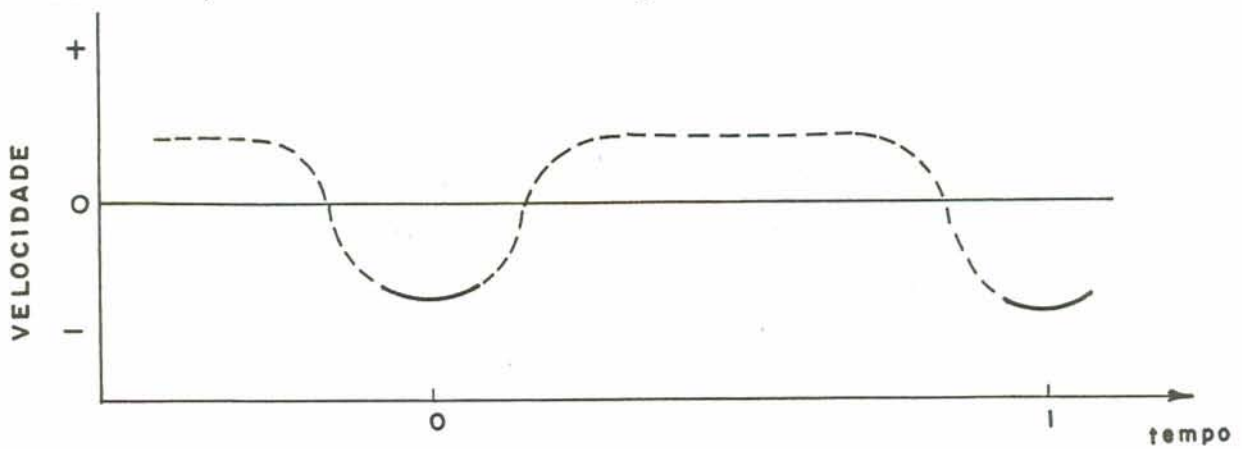


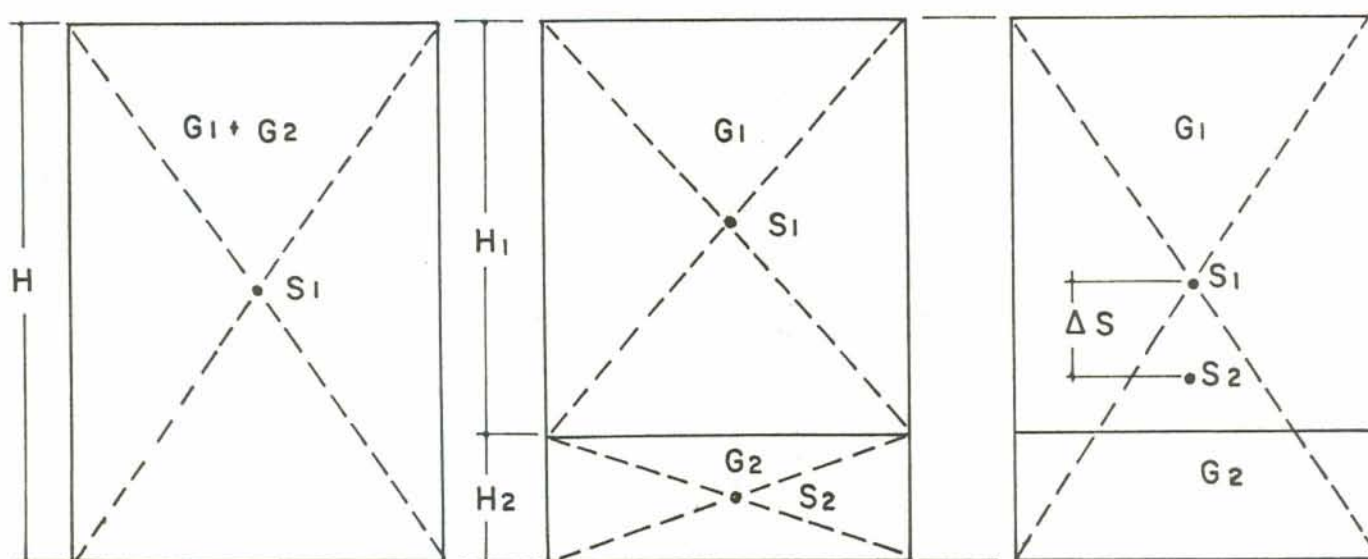
Figura 13: Efeito da consolidação intersticial sobre o leito.

A conjugação de todos estes fenômenos, ascensão diferencial, aceleração diferencial, sedimentação impedida e consolidação intersticial, levam a uma quase perfeita estratificação relacionada somente a variações nas densidades específicas. Do ponto de vista da relação existente entre a capacidade e a eficiência, um tempo mínimo para cada ciclo é requerido para que ocorra uma ótima resposta para uma dada alimentação. Qualquer extensão além deste tempo ocorreria enquanto o leito estivesse fixo e nenhuma separação ocorreria durante este intervalo, diminuindo a capacidade.

2.2.2 Teoria da Energia Potencial

De acordo com Mayer (9), em termos termodinâmicos, a força motriz envolvida na estratificação seria um diferencial energético produzido pela diminuição da energia potencial que ocorre no sistema que constitui o leito do jigue, em função do rebaixamento do seu centro de gravidade.

A figura 14 mostra duas situações hipotéticas referentes ao posicionamento das partículas dentro de um leito de jigue.



(a) (b) (c)
 Figura 14: Centro de gravidade no leito de um jigue.

A figura 14 (a) representa uma mistura binária perfeita, antes da estratificação, de partículas leves com peso G_1 e partículas pesadas com peso G_2 , com o centro de gravidade da mistura em S_1 . A energia potencial do sistema homogêneo pode ser expressa por:

$$E_h = (G_1 + G_2) \cdot H/2$$

Após a estratificação perfeita, como mostrado na figura 14 (b), existem centros de gravidade para cada um dos componentes G_1 e G_2 . A energia potencial do sistema estratificado pode ser agora expressa por:

$$E_e = G_1 \cdot (H_1/2 + H_2) + G_2 \cdot (H_2/2)$$

A variação da energia potencial é a energia disponível para a estratificação da mistura binária, e pode ser expressa, para este caso, no ar, por:

$$\Delta E = E_h - E_e = 1/2 \cdot (G_2 \cdot H_1 - G_1 \cdot H_2)$$

O termo $1/2 \cdot (G_2 \cdot H_1)$ representa a energia útil do sistema, enquanto o termo $1/2 (G_1 \cdot H_2)$ representa a energia necessária para que as partículas pesadas desloquem as partículas leves para cima.

O rebaixamento do centro de gravidade, como mostrado na figura 14 (c), pode ser expresso por:

$$\Delta S = S_I - S_{II} = \Delta E / (G_1 + G_2)$$

A variação da energia potencial do sistema é dada sempre por um valor positivo e, conseqüentemente, será acompanhada por um rebaixamento do centro de gravidade do sistema. Assim, o sistema evolue sempre na direção da energia potencial mínima, a qual é acompanhada invariavelmente de uma tendência à estratificação.

A introdução das densidades dos materiais na expressão anterior, assume um comportamento estatístico entre as partículas. Ainda, expressando-se as alturas dos leitos formados em termos percentuais e limitando-se a altura do leito de partículas pesadas a um mínimo, um valor máximo de ΔS é obtido. Este valor máximo é expresso por:

$$\Delta S_{\text{máx}} = 100 / [(\rho_1 / \rho_2)^{0,5} + 1]$$

Por outro lado, a taxa de formação do leito e a velocidade de estratificação obedecem uma lei logarítmica e podem ser expressos por:

$$Y_t = \Delta S \cdot e^{-k \cdot t}$$

onde Y_t é a ordenada do centro de gravidade a um tempo t e k é um parâmetro constante que contém o conceito de lavabilidade. Esta relação indica uma separação inicial rápida, a qual tem sido

encontrada frequëntemente na prática. Introduzindo-se nesta relação o número de ciclos de jigagem, impulsões, em lugar do tempo, obtém-se:

$$Y_n = \Delta S \cdot e^{-k \cdot n}$$

O parâmetro k é então encontrado experimentalmente através da seguinte relação:

$$k = 1 - \left(\frac{Y_n}{\Delta S} \right)^{1/n}$$

Portanto, quanto mais alto for o valor de k , mais rapidamente ocorrerá o rebaixamento do centro de gravidade e, conseqüentemente, a estratificação.

Expressando-se o número de ciclos de jigagem em termos de um valor mediano, ou seja, o número de ciclos necessários para que a metade do rebaixamento teoricamente possível ocorra, obtém-se uma importante ferramenta para o cálculo do número de ciclos necessários para que um determinado rebaixamento ocorra, qual seja:

$$N_{1/2} = \frac{\text{LOG}(1/2)}{\text{LOG}(1-k)}$$

Deve ser lembrado que a estratificação do sistema não é função somente dos golpes de impulsão. Estes golpes meramente liberam a energia potencial do sistema, ou seja, são fonte de energia para vencer a energia de ativação entre os estados inicial e final. Existe um rebaixamento máximo do centro de gravidade, o qual é somente função da razão entre as densidades específicas dos materiais leve e pesado, dada uma altura do leito de material pesado. A restrição que existe ao mecanismo de estratificação está relacionada ao fato de as partículas pesadas necessitam deslocar as partículas leves para cima, sendo isto possível somente através de contato direto das partículas ou por impacto.

2.2.3 Fatores Operacionais

Diversos fatores estão envolvidos no controle operacional e na eficiência dos jigues (6), a saber:

a. Fatores relativos à alimentação

Homogeneização: A alimentação do jigue deve ser a mais homogênea possível do ponto de vista das características de lavabilidade do carvão, de forma que o jigue possa ser regulado para um material de características bem definidas.

Molhamento: O molhamento do carvão como uma etapa inicial de condicionamento é fundamental para evitar que ocorra uma diminuição da densidade real das partículas em função do ar ocluído no interior da matriz sólida. Quanto maior for a porosidade das partículas, maior será a quantidade de ar ocluído na matriz e, consequentemente, maior a necessidade de molhamento como etapa de condicionamento. A forma convencional de se proceder o molhamento das partículas consiste na utilização de jatos de água na entrada do jigue.

Taxa de alimentação: A taxa de alimentação deve ser a mais uniforme possível, proporcionando-se assim condições para que o número de pulsações por unidade de massa seja igualmente uniforme. Desta forma, fica assegurada uma melhor estratificação do leito e um melhor aproveitamento da capacidade nominal de jigagem.

Granulometria: A distribuição granulométrica e a proporção de finos devem ser mantidas o mais constante possível. O objetivo básico, neste caso, é manter a regulagem do jigue o mais adequada possível a uma determinada distribuição granulométrica da alimentação, e manter a contribuição dos finos e ultrafinos à densidade do meio dentro de uma faixa bem estabelecida¹. A friabilidade do carvão, neste aspecto, é também muito importante e deve ser avaliada para se manter esta proporção de finos inalterada.

Distribuição: A homogeneidade da alimentação ao longo da largura do jigue é fundamental para que não haja problemas localizados de mobilidade, levando a um melhor aproveitamento da capacidade nominal do jigue.

¹Tecnicamente, quando a proporção de finos (- 1 mm) é maior que 5%, torna-se necessário descartá-los antes de entrarem no jigue, para beneficiá-los em separado.

Proporção de rejeito: A jigagem de um determinado carvão de ve otimizar a proporção entre a área de jigagem e a tonelagem ho rária de rejeito, face a possíveis variações da altura do leito de material de rejeito e sobrecarga dos elevadores de rejeito.

b. Fatores relativos ao leito.

Mobilidade: O leito deve estar em constante movimentação. Na etapa de impulsão, o leito deve se abrir completamente para movi mentar inclusive as partículas mais pesadas. Esta abertura do lei to é possível através da administração ótima de ar e água. Uma impulsão muito forte pode acarretar a ruptura do leito, destruindo a estratificação.

Profundidade: A profundidade ou altura do leito deve ser mantida em níveis que permitam a mobilidade do mesmo. Quanto maior a profundidade do leito, menor será a mobilidade do mesmo, levan do a uma menor velocidade de jigagem.

c. Fatores relativos aos mecanismos de impulsão e sucção.

Uma correta estratificação do carvão bruto em carvão lavado, misto e rejeito pode ser obtida através de um correto ajuste das válvulas de entrada de ar e água no jig. A frequência e o tipo de ciclo (modelo de onda) devem ser otimizados de modo que se obtenha a maior eficiência. Outro fator essencial é a velocidade inicial da impulsão, a qual define a expansão do leito. Esta velocidade inicial, originada pela admissão de ar e água, deve ser dimensionada levando-se em conta os seguintes fatores:

1. Variações do teor de sólidos
2. Variações de granulometria
3. Taxa de alimentação
4. Profundidade do leito
5. Proporção de material "near gravity".

A regulagem da água de pressão, se existir, é fundamental para manter o leito aberto no final da impulsão e para diminuir a intensidade da sucção. Esta regulagem depende basicamente das propriedades de densidade e tamanho, e varia de compartimento pa ra compartimento. Assim, no primeiro compartimento, a admissão de água de pressão é vantajosa porque aqui são descartadas as par

tículas mais densas e grosseiras. Se a proporção de matéria mineral está acumulada nos finos, a água de pressão deve diminuir para melhorar a ação da sucção e permitir a consolidação intersticial. Isto ocorre normalmente no último compartimento do jigge.

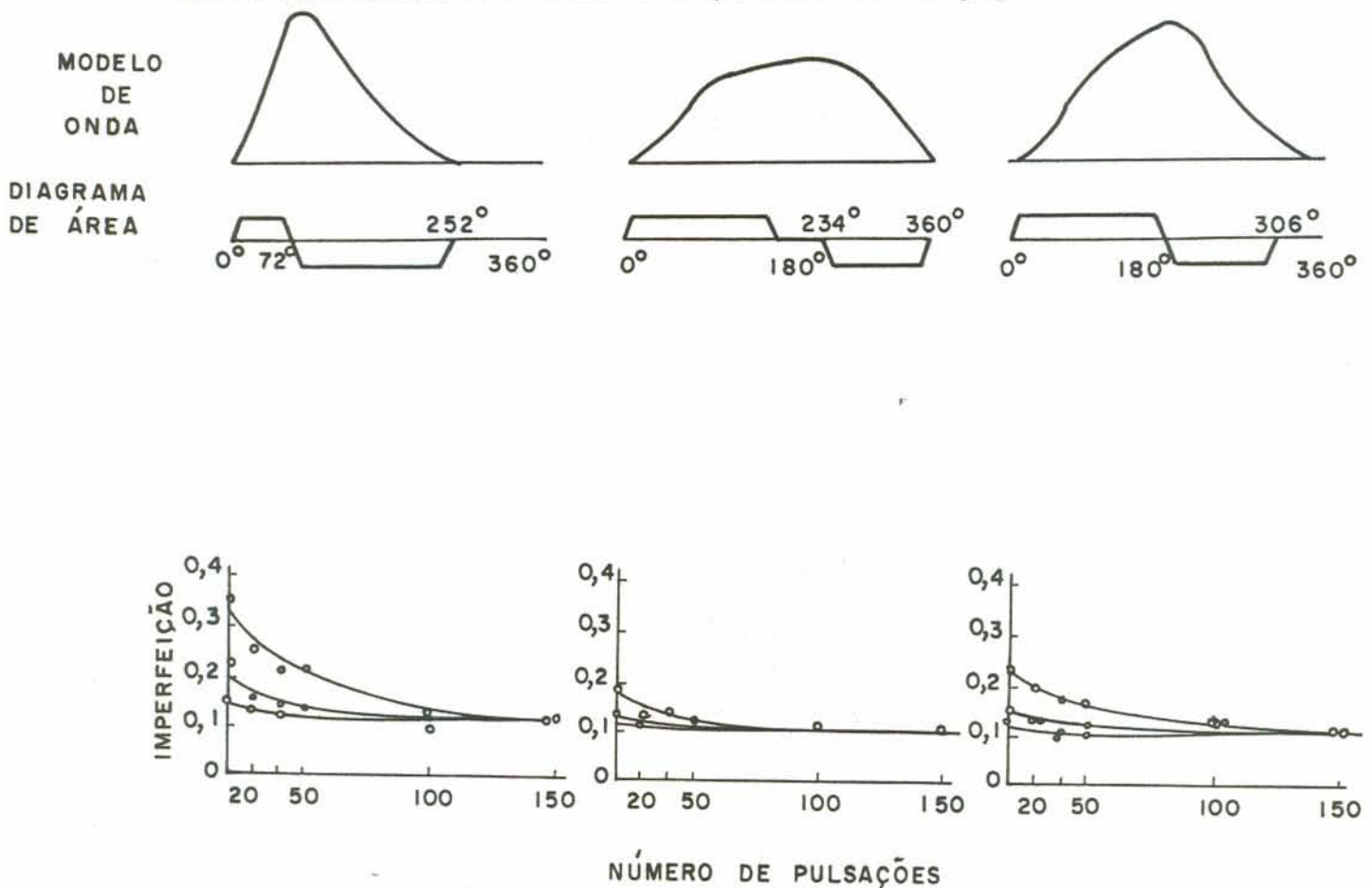


Figura 15: Efeito do tipo de ciclo na precisão de separação.

2.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PROCESSO DE JIGAGEM

A avaliação do desempenho de uma unidade de jigagem pode ser feita através do cálculo de uma série de índices que medem a eficiência e a nitidez de separação do processo. Assim, a eficiência ou precisão de um jigge, ou qualquer unidade de beneficiamento gravimétrico, pode ser medida através dos seguintes critérios (11):

- 1 - Critérios dependentes
- 2 - Critérios independentes

2.3.1 Critérios dependentes

Os critérios dependentes são, de um modo geral, definidos tanto

pelas características do carvão da alimentação, como pelas características da unidade de beneficiamento utilizada. Sendo assim, duas unidades de beneficiamento exatamente iguais poderão apresentar índices de eficiência diferentes se estiverem lavando carvões diferentes.

Os principais parâmetros que definem estes critérios dependentes são os seguintes:

a) Eficiência Orgânica: existem diversas formas de definir a eficiência de um aparelho ou de uma usina de beneficiamento. A fórmula usada é a de Fraser & Yancey (USBM, 1922).

$$E(\%) = \frac{\text{Recuperação de carvão lavado}}{\text{Recuperação teórica}} \cdot 100$$

onde a recuperação teórica é a porcentagem de carvão contido na alimentação com o mesmo teor de cinzas do carvão lavado.

Este critério apresenta duas limitações importantes: a primeira delas se deve ao fato de que a fórmula que o define é muito sensível ao cálculo do balanço de massas (vers seção 4.3). A segunda tem relação com a friabilidade de alguns carvões, os quais estão sujeitos a sofrer liberação durante o processo de beneficiamento, podendo-se encontrar não raramente, valores de eficiência maiores que 100%.

b) Material Deslocado Total: define-se como material deslocado total a quantidade de material de rejeito presente no carvão lavado somado à quantidade de carvão lavado presente no rejeito, guardando-se as proporções entre lavado e rejeito. Estas quantidades são medidas em termos percentuais. Quanto menores as proporções de material deslocado, melhor o desempenho do equipamento. As medidas são feitas com base nas curvas densimétricas dos produtos e na densidade de corte do equipamento.

c) Um outro critério que normalmente não é classificado na literatura como critério dependente, embora seja usado na avaliação de unidades de jigagem é o Material "Near Gravity", que se define como uma medida do grau de dificuldade de separação de um determinado carvão para uma dada densidade de corte. O material "Near Gravity" é dado pela massa de material que existe em torno da densidade de corte numa faixa de ± 0.1 unidades de densidade. Quanto mais alto o valor do Material "Near Gravity", mais difícil se torna o beneficiamento do carvão, implicando numa queda de eficiência e aumento do mate

rial deslocado. O material "Near Gravity" é dado em termos percentuais. Este critério é de utilidade prática pois serve como base de comparação entre eficiências de unidades idênticas que beneficiam carvões diferentes ou o mesmo carvão em diferentes densidades de corte.

Uma escala de valores do material "Near Gravity" (NGM) em relação ao grau de dificuldade de lavagem de um carvão é mostrada na Tabela II (6).

Tabela II: Escala de valores no NGM

NGM (%)	Grau de dificuldade
0 - 7	Simple
7 - 10	Moderadamente Difícil
10 - 15	Difícil
15 - 20	Muito Difícil
20 - 25	Excessivamente Difícil
> 25	Impraticável

2.3.2 Critérios independentes

Os critérios independentes de performance característicos de uma unidade de beneficiamento não dependem significativamente da composição densimétrica do carvão da alimentação nem da densidade de separação. Estes critérios são derivados da curva de partição do aparelho, também conhecida como curva de Tromp, curva de distribuição, curva de recuperação e curva de erro (12). Esta curva define quantitativamente a proporção de massas por faixa densimétrica que o equipamento distribui para o produto lavado e para o rejeito. Para determinar-se a curva de partição de um determinado aparelho, são necessárias as recuperações e análises densimétricas dos produtos considerados. O procedimento geral consiste em processar os dados de forma ponderada para o cálculo dos coeficientes de partição ou distribuição de massas. Os coeficientes assim calculados são lançados nas ordenadas enquanto nas abcissas são lançados os valores de densidade média de cada fração.

Nos extremos da curva, ou seja, nas frações mais leves e mais pesadas, não há um limite exato de densidade. Para a menor densidade, comumente 1.3, o coeficiente de partição deveria ser plotado

entre esta e a densidade da partícula mais leve. No extremo o-
posto, o coeficiente de partição correspondente deveria ser plo-
tado entre a densidade mais alta e a densidade da partícula mais
pesada. Como estes limites não são conhecidos, o coeficiente de
partição da fração mais leve é plotado, por convenção, contra a
densidade mais baixa menos 0.03 unidades de densidade. No outro
extremo utiliza-se a densidade mais alta mais 0.3 ou 0.4 unida-
des de densidade.

Um exemplo do procedimento de cálculo dos coeficientes de
partição é mostrado na planilha 1. O gráfico correspondente a es-
ta curva é mostrado na figura 16. (11)

Os principais parâmetros que definem os critérios indepen-
dentes derivados da curva de partição são os seguintes:

a) Densidade de Separação ou de Corte, D50: a densidade de
corte é normalmente definida como a densidade coincidente com um
coeficiente de partição igual a 50%. A densidade de corte repre-
senta, portanto, aquela densidade na qual uma partícula teria i-
gual probabilidade de se reportar ao carvão lavado ou ao rejeito.

b) Erro Provável, EPM: é um critério que representa a preci-
são com a qual carvão e impurezas são separados. É uma medida do
desvio da curva de partição em relação a curva de separação per-
feita. Numericamente, é definido pela metade do intervalo de den-
sidade correspondente a 25%-75% nas ordenadas. Pode ser expresso
por:

$$EPM = D50 - D75, \text{ ou}$$

$$EPM = \frac{D25 - D75}{2}$$

A última forma de se expressar o EPM é a mais comum e leva
em conta a distribuição assimétrica. Valores baixos de EPM desig-
nam uma separação nítida, enquanto valores altos denotam uma se-
paração não nítida ou imprecisa. A faixa usual de valores do EPM
é de aproximadamente 0.02 até 0.30 ou mais.

c) Imperfeição, I: este critério envolve a influência da den-
sidade de corte na forma das curvas de partição. Existe uma ten-
dência da curva verticalizar-se a medida que a densidade de cor-
te decresce. Em outras palavras, separações a baixas densidades
de corte tendem a ser mais precisas que aquelas a altas densida-

des de corte. Este conceito parece contradizer o bem estabelecido princípio de que a eficiência cresce com o incremento da densidade de corte (6). Porém, deve-se ter em conta que o critério de eficiência está associado ao conceito de recuperações enquanto a imperfeição está associada à precisão ou acuidade de separação.

As fórmulas para a imperfeição são:

$$I = \frac{EPM}{(D50 - 1)} \quad (\text{água como meio de separação})$$

$$I = \frac{EPM}{D50} \quad (\text{meio denso})$$

d) Área de Erro, AE: Desde que a curva de partição para uma separação perfeita mostraria todo o material mais leve que D50 reportando-se ao carvão lavado e todo o mais pesado reportando-se ao rejeito, ela seria composta de três segmentos de reta. Um estaria no eixo de partição 100%; um, paralelo às ordenadas, correspondente à densidade de corte nas abcissas; e o terceiro no eixo de partição 0%. A área entre a curva de partição real e a de separação perfeita é, como o EPM e a imperfeição, uma medida de precisão da separação. Esta área é mostrada hachureada na figura 16.

Para a padronização dos valores de Área de Erro, é tomada uma unidade de comprimento para representar 2% nas ordenadas e 0.1 unidades de densidade nas abcissas. Os valores de Área de Erro se situam entre 10 para separações precisas e acima de 100 para separações imprecisas.

PLANILHA 1: Cálculos dos Coeficientes de Partição de uma Unidade de Beneficiamento Hipotética

Intervalos de densidade	Carvão		Lavado		Rejeito		Alimentação Recalculada	
	A	B+	C [‡]	DII	E+	F [‡]	GII	H§
	P%	P% como % da alimentação	Coeficiente de partição %	P%	P% como % da alimentação	Coeficiente de partição %	P%	Coeficiente de partição %
		= $B \cdot Y_c$	= C/H		= $E \cdot Y_r$	= F/H	= C + F	= D + G
		= B(0.8083)			= E(0.1917)			
1.30	0.20	0.16	100.00	0.00	0.0	0.00	0.16	100.00
1.30-1.40	85.30	68.95	97.46	9.41	1.80	2.54	70.75	100.00
1.40-1.50	11.18	9.04	80.43	11.49	2.20	19.57	11.24	100.00
1.50-1.60	2.32	1.88	42.53	13.27	2.54	57.47	4.42	100.00
1.60-1.70	0.58	0.47	18.22	10.93	2.11	81.78	2.58	100.00
1.70-1.80	0.22	0.18	8.91	9.61	1.84	91.09	2.02	100.00
1.80	<u>0.20</u>	<u>0.15</u>	1.70	<u>45.29</u>	<u>8.68</u>	98.30	<u>8.83</u>	100.00
	100.00	80.83		100.00	19.17		100.00	
		= Y_c			= Y_r			

NOTAS:

* Densidade de corte = 1.53

+ Resultados das análises densimétricas do carvão lavado e rejeito dados nas colunas B e E, respectivamente.

‡ Coluna C é obtida multiplicando-se a coluna B pela recuperação de carvão lavado 80,83%; coluna F é obtida de maneira correspondente.

§ Alimentação reconstituída na coluna H é obtida pela soma das colunas C e F.

II A Coluna D é obtida dividindo-se a coluna C pela coluna H; a coluna G é obtida de maneira correspondentes.

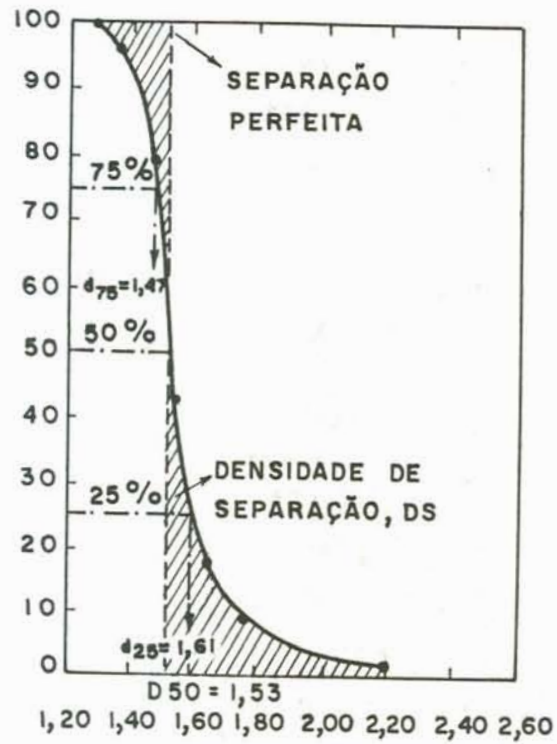


Figura 16: Curva de Partição com Respeito ao Carvão Lavado.

2.4 MODELAMENTO MATEMÁTICO DO PROCESSO DE JIGAGEM

O cálculo dos critérios de avaliação de performance de uma unidade de beneficiamento de carvão envolve medidas diretamente relacionadas com a curva de partição desta unidade. Estas medidas requerem um modelo de função que interpole os dados experimentais correspondentes à curva de partição dada. Desde modo, a informação do tipo discreta, pontos experimentais relacionando densidades e coeficientes de partição, passa a ser contínua, ou seja, coeficientes de partição dados como uma função das densidades.

As funções que interpolam os dados experimentais correspondentes à curva de partição de uma unidade de beneficiamento são chamadas de modelos. Existem vários modelos empregados para este fim. Neste trabalho serão descritos seis modelos. Os modelos de Erasmus (13) e de Weibull (14), mais antigos, e os modelos da Tangente Hiperbólica, Tangente Hiperbólica Modificado, Integral Quasi Normal e Integral Normal Modificado (15).

As equações para estes modelos são dadas a seguir, sendo C_p o coeficiente de partição calculado para uma densidade d em todos os casos:

1 - Modelo de Erasmus

$$C_p = 100 \{t_2 - \arctan [k(d-c)]\}(t_1-t_2)$$

onde k , c , t_1 e t_2 são parâmetros do modelo.

2 - Modelo da Integral Quasi Normal

$$C_p = 100 \{a+c \int_{1.2}^d \exp [-k(6-x\emptyset)^2] dt\}$$

onde a , c , k e $x\emptyset$ são parâmetros de modelo. O limite inferior de 1.2 para a integração é tomado arbitrariamente e é um valor abaixo da menor densidade conhecida da curva de partição. O valor selecionado influe nos valores dos outros parâmetros, mas não afeta a curva de partição em si; t é uma variável integral.

3 - Modelo da Integral Normal Modificado

$$C_p = 100 \{a + b(d - 1.2) + c \int_{1.2}^d \exp[-k(t - x_0)^2] dt\}$$

onde b é um parâmetro adicional e todos os outros são definidos como no modelo anterior. Este modelo é o modelo da Integral Quasi Normal modificado pela adição do termo linear $b(d - 1.2)$. Em alguns casos a adição deste termo melhora muito a curva de partição calculada, especialmente na região das altas densidades.

4 - Modelo da Tangente Hiperbólica

$$C_p = 100 \{a + c \tanh[k(d - x_0)]\}$$

onde a , c , k e x_0 são parâmetros do modelo.

5 - Modelo da Tangente Hiperbólica Modificado

$$C_p = 100 \{a + c \tanh[k(d - x_0)] + bd\}$$

onde b é parâmetro adicional. Este modelo é o modelo da Tangente Hiperbólica modificado pela adição do termo linear bd . Como no caso do modelo da Integral Normal modificado, este termo linear melhora, em alguns casos, a interpolação dos dados experimentais.

6 - Modelo de Weibull

$$C_p = 100 \{y_0 + a \exp [d - x_0]^b\} / c$$

onde a , b , x_0 e y_0 são parâmetros do modelo.

Para soluções realísticas, o parâmetro b nos modelos modificados deve ser negativo. Em alguns casos, valores positivos de b são encontrados e o modelamento obtido é inaceitável nos extremos da curva. O modelo da Integral Normal Modificado está significativamente menos sujeito a este problema. Em algumas ocasiões, ambos modelos modificados são inadequados e, portanto, outro mo-

delo deve ser empregado.

O método dos mínimos quadrados é a rotina mais comumente utilizada para o cálculo dos parâmetros de cada modelo. Consiste na minimização da soma dos quadrados das diferenças entre os pontos experimentais e a curva que os interpola. Esta soma é chamada de desvio de interpolação. Se as densidades experimentais são $d_1, d_2 \dots d_n$ com os coeficientes de partição correspondentes $C_{p1}, C_{p2} \dots C_{pn}$, e se a equação do modelo escolhido é $C_p = f(d)$, então o desvio de interpolação é definido como:

$$S = \sum_{i=1}^n [f(d_i) - C_{pi}]^2$$

Se S é mínimo, então suas derivadas parciais em relação a cada um dos parâmetros envolvidos são nulas. Estas derivadas parciais formam um sistema de equações no qual as incógnitas são os parâmetros do modelo. No caso dos modelos aqui descritos, o sistema de equações formado é do tipo não linear. Estes sistemas são resolvidos pelo método de Newton. O método de Newton é iterativo e requer estimativas iniciais para as raízes. É muito comum, quando as estimativas não são muito próximas das raízes, que o método não convirja. Para contornar o problema de convergência tem-se usado variantes do método de Newton (16), variantes do método dos mínimos quadrados (17), e recursos gráficos em computadores para procura de estimativas, sendo este último desenvolvido neste trabalho.

Existe uma série de métodos para avaliar se o modelo utilizado se adequa ou não aos dados, sendo os mais comuns o cálculo do desvio de interpolação (18) e a avaliação da forma da curva resultante da interpolação. Os modelos que tem apresentado o menor desvio de interpolação são o da Tangente Hiperbólica Modificado e o da Integral Normal Modificado. Por outro lado, o modelo de Weibull é o que tem apresentado os maiores desvios de interpolação quando comparado aos modelos aqui descritos. É importante considerar que, nem sempre o modelo que apresenta o menor desvio de interpolação é o que mais se adequa aos pontos experimentais. Além disso, um grande desvio de interpolação pode significar tan

to uma inadequação do modelo como um grande erro experimental.

Foram desenvolvidos, por Schneider e Rubio (19), programas em BASIC para microcomputador Apple II Plus ou compatível, para o cálculo dos parâmetros dos modelos de Erasmus, Tangente Hiperbólica e Tangente Hiperbólica Modificado. As listagens destes programas são mostradas no apêndice.

3. EXPERIMENTAL

3.1 METODOLOGIA

3.1.1 Descrição dos fluxogramas de Jigagem em estudo

Os dados referentes aos Jigues dos Lavadores da Mina de São Roque e da Mina A (Sangão), Carbonífera Criciúma e Carbonífera Próspera, foram extraídos de trabalhos conjuntos entre as empresas e o Centro de Tecnologia Mineral - CETEM. Estes trabalhos visam atender aos objetivos propostos pelo projeto "Caracterização e Beneficiamento de Carvões no Brasil", especialmente dentro da atividade Otimização de Funcionamento de Jigues, cc 1551, de interesse do PME/DNPM (20).

Os dados referentes ao jigue do Lavador da Mina do Verdinho, Carbonífera Criciúma, foram extraídos do Relatório da Posta-em-Marcha do lavador, sendo a amostragem responsabilidade da KOPEX (21) juntamente com a respectiva Carbonífera.

Os dados referentes aos Jigues pertencentes a Companhia de Pesquisas e Lavras Minerais - COPELMI foram cedidos diretamente pela empresa, sendo que a amostragem dos produtos do Lavador da Mina do Faxinal foi feita conjuntamente com a UFRGS/Laboratório de Tecnologia Mineral.

Os Jigues caracterizados aqui fazem parte da etapa de Jigagem dos seguintes lavadores:

- Lavador da Mina do Faxinal/COPELMI
- Lavador da Mina do Recreio/COPELMI
- Lavador da Mina São Roque/Carbonífera Criciúma
- Lavador da Mina do Verdinho/Carbonífera Criciúma
- Lavador da Mina A (Sangão)/Carbonífera Próspera

Lavador da Mina do Faxinal: O carvão proveniente da lavra a céu aberto é primeiramente classificado em um grelha fixa, 500 mm, sendo o retido quebrado sobre a grelha por um martelo de impacto. O passante segue para o circuito de britagem onde é comi-

nuido por britadores de duplo rolo dentados abaixo de 3", sendo conduzido então a uma pilha cônica que alimenta um Jigue tipo Baum da McNally, o qual descarta dois rejeitos. O produto flutuado é peneirado em 0.50 mm. A fração maior que 50 mm, denominada CE3100 (3.100 Kcal/Kg), e a fração 50 x .50 mm, denominada CE4700 (4.700 Kcal/Kg), são conduzidas diretamente para o mercado consumidor. A figura 1 do apêndice mostra o fluxograma simplificado da etapa de jigagem do lavador da Mina do Faxinal.

Lavador da Mina do Recreio: O carvão proveniente da lavra a céu aberto é primeiramente classificado em um grelha fixa, 400 mm, sendo o retido quebrado sobre a grelha por um martelo de impacto. O passante segue para o circuito de britagem onde é peneirado em 4". O material retido nesta peneira é cominuído abaixo de 4" por um britador de rolo simples. Do circuito de britagem o carvão passa para uma pilha cônica a qual alimenta um jigue tipo Baum da McNally, o qual descarta dois rejeitos. O produto flutuado é peneirado em 1 mm, sendo que o material fino é conduzido ao circuito de finos onde é beneficiado por hidrociclones, enquanto o material grosseiro é conduzido diretamente ao mercado consumidor. A figura 2 do apêndice mostra um fluxograma simplificado da etapa de jigagem do lavador da Mina do Recreio.

Lavador da Mina São Roque: O carvão proveniente da lavra subterrânea é primeiramente cominuído a 1.1/2" e, a seguir, conduzido a dois jigues. Um deles é de madeira, tipo Harz e o outro metálico, tipo Baum. Os jigues descartam do circuito três rejeitos. O produto flutuado é peneirado a 28 malhas. O material fino permanece no circuito para ser beneficiado em mesas e por flotação e o material grosseiro é conduzido ao Lavador de Capivari para separação das frações metalúrgica e energética. A figura 3 do apêndice mostra um fluxograma simplificado da etapa de jigagem do Lavador da Mina de São Roque.

Lavador da Mina do Verdinho: O carvão proveniente da lavra subterrânea é primeiramente cominuído abaixo de 1" e, a seguir, conduzido a uma peneira curva, onde é desviado o material menor que 0.50 mm para o circuito de finos. O material retido na peneira curva alimenta um jigue tipo BATAC, OM243D da KOPEX, o qual descarta 3 rejeitos. O produto flutuado é peneirado em 0.50 mm, sendo que o material fino permanece no circuito para ser beneficiado em hidrociclones, mesas e flotação enquanto o material gros

seiro é conduzido ao Lavador de Capivari para separação das frações metalúrgica e energética. A figura 4 do apêndice mostra um fluxograma simplificado da etapa de jigagem do lavador da Mina do Verdinho.

Lavador da Mina A (Sangão): O carvão proveniente da lavra subterrânea é primeiramente classificado em peneira vibratória de 2 "Decks", 10" e 2", sendo o retido em 10" descartado do circuito. O passante nesta, e retido em 2", é cominuído em britador de rolos abaixo de 2". A seguir, é ensilado e, posteriormente, conduzido ao lavador. O carvão, através de um divisor de fluxo, alimenta dois jiges iguais, tipo Baum de McNally, que operam em paralelo. Os jiges descartam do circuito dois rejeitos. O produto flutuado é peneirado em 28 malhas, sendo que o material fino permanece no circuito para ser beneficiado em hidrociclones e por flotação enquanto o material grosseiro é conduzido ao Lavador de Capivari. A figura 5 do apêndice mostra um fluxograma simplificado da etapa de jigagem do Lavador da Mina A (Sangão).

No quadro 2 é mostrado um resumo comparativo das características dos Jiges dos lavadores descritos.

Quadro 2: Resumo comparativo das características dos Jiges dos lavadores descritos.

Lavador Mina	JIG Tipo	Capacidade Nominal	Produtos	Granulometria Alimentação
Faxinal	BAUM	200 t/h	3	3" x 0
Recreio	BAUM	400 t/h	3	4" x 0
São Roque	BAUM	250 t/h	4	1.1/2" x 0
Verdinho	BATAC	600 t/h	4	1" x 28 ≠
A-Sangão	BAUM	600 t/h	3	2" x 0

3.1.2 Amostragem

Mina do Faxinal: O trabalho de amostragem dos produtos de Jigagem da Mina do Faxinal foi realizado tomando-se amostras da alimentação, rejeitos primário e secundário, finos, CE3100 e CE 4700 durante um mês de operação do lavador, recolhendo-se incrementos a cada 30 minutos. As amostras foram colhidas nas correias transportadoras e no duto de finos sem que houvesse defasa

gem de tempo entre um produto e outro. As amostras foram colhidas nas correias com pá de amostrador, sendo que cada amostra era constituída de cinco alíquotas, quatro delas tomadas diagonalmente ao eixo da correia, duas pelo lado direito e duas pelo lado esquerdo, e uma no centro da correia, tomada paralelamente ao eixo da mesma. A amostra de finos era tomada no duto através de um balde, no ponto de maior turbulência da polpa, e então transferida para um tonel, onde decantava. Posteriormente, as amostras foram enviadas ao laboratório da COPELMI em Charqueadas, onde foram quarteadas para a execução dos ensaios densimétricos. As amostras quarteadas foram flutuadas em líquidos com densidades de 1.3 a 2.2.

Mina do Recreio: O trabalho de amostragem dos produtos do Lavador da Mina do Recreio foi realizado pela COPELMI, sendo que o tempo de amostragem abrangeu 4 horas de operação. Foram tomadas amostras do carvão lavado, rejeitos primário e secundário, recolhendo-se incrementos a cada 15 minutos. A totalidade das amostras foram flutuadas em líquidos com densidades de 1.3 a 2.6. A fração menor que 1 mm não foi considerada.

Mina de São Roque: A amostragem foi feita pela Carbonífera Criciúma sob orientação do CETEM. As análises química e densimétrica foram executadas pela Carbonífera. Foram tomadas amostras da alimentação, rejeitos primário, secundário e terciário, bem como do carvão lavado. O tempo de amostragem foi de 8 horas, sendo tomados incrementos a cada 1 hora. Cada amostra foi quarteada para a realização das análises. As amostras quarteadas foram flutuadas em líquido com densidades de 1.3 a 2.6. A fração abaixo de 28 malhas foi descartada.

Mina do Verdinho: A amostragem foi feita pela Carbonífera Criciúma e pela Industrial Conventos. As análises química e densimétrica foram executadas pela Carbonífera. Foram tomadas amostras da alimentação, rejeitos primário, secundário e terciário, bem como do carvão lavado. O tempo de amostragem equivaleu a um dia de operação da planta. As frações menores que 0.50mm foram analisadas separadamente. As amostras foram flutuadas em líquidos com densidades de 1.3 a 2.2.

Lavador da Mina A (Sangão): A amostragem para a realização dos ensaios densimétricos foi feita pela Carbonífera sob orientação do CETEM. Foram tomadas amostras da alimentação, rejeitos primário e secundário e carvão lavado, que foram acumuladas durante dois turnos de operação dos dois jigues juntos. Posteriormente, as amostras foram quarteadas e enviadas ao Lavador de Capivari para a execução dos ensaios densimétricos. As amostras quarteadas foram flutuadas em líquidos com densidades de 1.3 a 2.8. A fração granulométrica abaixo de 28 malhas, proveniente das peneiras desaguadoras, foi descartada.

As curvas de distribuição densimétrica dos diversos produtos dos lavadores são apresentadas nas tabelas I até V do apêndice. Estão incluídos os teores de cinzas recompostos de cada produto.

3.1.3 Análise física e química

Lavador da Mina do Faxinal: a amostragem constou de uma coleta de amostras de aproximadamente duas toneladas para cada produto amostrado, exceto os finos que pesaram aproximadamente 400 kg. Estas amostras foram secadas ao sol e posteriormente, foi feita homogeneização e quarteamento segundo a norma NBR 8292, separando-se para cada produto 20 kg para análise imediata completa, 140 kg para análise granulométrica e 140 kg para análise densimétrica. No caso dos finos, as alíquotas separadas foram proporcionais. As análises granulométricas foram feitas de acordo com a norma NBR 8629, sendo que as frações foram devidamente pesadas. A fração destinada à análise densimétrica foi primeiramente submetida a uma separação granulométrica em 1 mm, exceto no caso dos finos. O material entre 1 mm x 0 foi pesado e submetido a análise imediata completa. O material entre 3" x 1 mm foi submetido a análise densimétrica segundo a norma NBR 8738. Os líquidos densos utilizados foram gasolina e tetracloreto de carbono para densidades até 1.6 e tetracloreto de carbono e bromofórmio para densidades maiores que 1.6. O intervalo de densidades utilizado foi de 0.1 unidades de densidade. Cada fração gerada na análise densimétrica foi secada e posteriormente sofreu uma análise imediata completa.

A análise imediata completa consistiu em britagem e moagem da amostra abaixo de 60 μ e em seguida homogeneização e quarteamento até a obtenção de uma alíquota de 200 gramas. Esta alíquota é então analisada para cinza base seca (NBR 8289), matéria volátil (NBR 8290), carbono fixo (NBR 8299), poder calorífico (NBR 8628), umidade (NBR 8293) e enxofre eschka (NBR 8294).

Todas as análises foram realizadas em duplicatas.

A etapa de análise física e química nos outros lavadores seguiu uma rotina semelhante a da utilizada na Mina do Faxinal, obedecendo as mesmas normas.

3.2 CÁLCULO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS

3.2.1 Balanço de Massas e Metalúrgico

Qualquer informação a respeito de qualquer unidade ou circuito de processamento mineral, tais como os índices de eficiência ou os valores dos parâmetros de modelo para a sua simulação, requer medidas dos fluxos e composição dos produtos que entram ou saem do circuito. A investigação da eficiência de uma unidade de jigagem usando-se técnicas de simulação envolve o cálculo completo do balanço de massas, bem como o cálculo dos parâmetros de modelos utilizados na simulação. Uma exposição completa de todas as técnicas conhecidas de cálculo do balanço de massas que podem ser usadas, incluindo seus méritos e falhas fica fora do escopo do presente trabalho, em função de sua extensão. Entretanto, as técnicas utilizadas aqui serão descritas em detalhe.

Além do problema econômico envolvido na amostragem e análise dos produtos de jigagem (relativamente alto se comparado aos custos de outros tipos de unidades de beneficiamento de carvão, devido às altas taxas de fluxo envolvidas), deve-se procurar evitar erros no fechamento do balanço de massas, pois isto poderia acarretar na perda de todo o trabalho de amostragem e análise realizado.

Existem, de uma maneira geral, duas alternativas para a compleção do balanço de massas de uma unidade de jigagem. A primeira se desenvolve durante os trabalhos de amostragem, pela pesa-

gem sistemática de todos os produtos que entram e saem do jigue. Aqui, o erro envolvido é o erro da balança utilizada. Normalmente, pode-se pesar a alimentação, rejeitos e lavado, sendo que a massa de finos é medida por diferença. É necessário, além da pesagem, a análise de umidade de cada um dos produtos envolvidos, inclusive finos, colocando-se desta forma as respectivas toneladas na mesma base de umidade. Uma vez que todos os pesos estejam na mesma base de umidade, pode-se calcular o balanço em termos percentuais da alimentação.

A segunda alternativa é a utilização de técnicas de balanço de massas, as quais se baseiam em dados da análise do material a mostrado. As técnicas de balanço de massas utilizadas neste trabalho são duas:

- Minimização do sistema de equações das análises densimétricas;

- Minimização da função objetivo.

Estas técnicas estão sujeitas não só a erros de balança, análise física, como também a todos aqueles erros inerentes à amostragem, quarteamento e análise química do material.

Uma breve explanação a respeito das técnicas citadas acima é dada a seguir.

3.2.1.1 Minimização do sistema de equações das análises densimétricas

Desde que se disponha das análises densimétricas dos diversos produtos de jigagem e da alimentação do jigue, é possível calcular as recuperações dos produtos com base no sistema de equações formado a partir destas análises. Este sistema de equações tem a seguinte estrutura:

$$R1.\%M1,1 + R2.\%M1,2 + R3.\%M1,3 + \dots + Rn.\%M1,n = \%M1, \text{ rom}$$

$$R1.\%M2,1 + R2.\%M2,2 + R3.\%M2,3 + \dots + Rn.\%M2,n = \%M2, \text{ rom}$$

$$\begin{array}{ccccccc} \cdot & & \cdot & & \cdot & & \dots & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & \cdot & & \dots & & \cdot & & \cdot \end{array}$$

$$R1,\%Mm,1 + R2.\%Mm,2 + R3.\%Mm,3 + \dots + Rn.\%Mm,n = \%Mm, \text{ rom}$$

onde:

R_j = Recuperação do produto j

$\%M_{i,j}$ = Porcentagem em massa flutuada na densidade i da análise densimétrica do produto j .

$\%M_{i,rom}$ = Porcentagem em massa flutuada na densidade i da análise densimétrica da alimentação (rom).

m = Número de faixas densimétricas $i = 1, 2, 3, \dots, m$

n = Número de produtos $j = 1, 2, 3, \dots, n$

Normalmente, o número de produtos de jigagem varia de 2 a 4. Portanto, o número de incógnitas do sistema varia dentro desta faixa. O material fino não é considerado produto aqui, pois na análise densimétrica dos diversos rejeitos e carvão lavado, os finos são descartados. Não fosse assim, teriam que ser incluídos como produto no sistema de equações. O número de faixas densimétricas nas quais cada produto é flutuado, raramente é menor que 7. Cada faixa densimétrica representa uma equação do sistema. Conseqüentemente, teremos sempre mais equações do que incógnitas no sistema. Para encontrar-se o valor das recuperações de cada produto, é necessário minimizarmos o sistema de forma que o número de equações se torne igual ao número de incógnitas. Isto pode ser feito da seguinte forma: A soma dos quadrados das diferenças entre a porcentagem em massa da alimentação nas diversas faixas densimétricas, $\%M_{i,rom}$, e a porcentagem em massa calculada da alimentação nas diversas faixas densimétricas, $\%M_{i,rom}$, deve ser um mínimo. Se chamarmos esta soma de S , teremos a seguinte expressão:

$$S = \sum_{i=1}^n (\%M_{i,rom} - \%M_{i,rom})^2 = \text{Mínimo} \quad (1)$$

onde:

$\%M_{i,rom}$ é dado pela análise densimétrica da alimentação

$$\%M_{i,rom} = \sum_{j=1}^n R_j \cdot \%M_{i,j}$$

A derivada de S em relação aos diversos R_j deverá ser nula, desde que S é mínimo. Portanto,

$$S = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n R_{j,i,j} - \%Mi,rom \right)^2 = \text{mínimo}$$

$$\frac{dS}{dR_j} = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{q=1}^n R_{q,i,q} \%Mi,j - \%Mi,rom \%Mi,j \right) = 0$$

As derivadas de S em relação a cada R_j constituem um sistema de equações lineares, onde o número de incógnitas é igual ao número de equações. Este sistema tem a seguinte forma:

$$\begin{array}{l} R1. \sum_{i=1}^m (\%Mi,1)^2 + R2. \sum_{i=1}^m \%Mi,2.\%Mi,1 + \dots + Rn. \sum_{i=1}^m \%Mi,n.\%Mi,1 = \sum_{i=1}^m \%Mi,rom.\%Mi,1 \\ R1. \sum_{i=1}^m \%Mi,1.\%Mi,2 + R2. \sum_{i=1}^m (\%Mi,2)^2 + \dots + Rn. \sum_{i=1}^m \%Mi,n.\%Mi,2 = \sum_{i=1}^m \%Mi,rom.\%Mi,2 \\ \cdot \qquad \qquad \qquad \cdot \qquad \qquad \qquad \dots \qquad \qquad \qquad \cdot \qquad \qquad \qquad \cdot \\ \cdot \qquad \qquad \qquad \cdot \qquad \qquad \qquad \dots \qquad \qquad \qquad \cdot \qquad \qquad \qquad \cdot \\ \cdot \qquad \qquad \qquad \cdot \qquad \qquad \qquad \dots \qquad \qquad \qquad \cdot \qquad \qquad \qquad \cdot \\ R1. \sum_{i=1}^m \%Mi,1.\%Mi,n + R2. \sum_{i=1}^m \%Mi,2.\%Mi,n + \dots + Rn. \sum_{i=1}^m (\%Mi,n)^2 = \sum_{i=1}^m \%Mi,rom.\%Mi,n \end{array}$$

Resolvendo-se este sistema de equações, encontra-se os valores de R_i mais consistentes com o sistema dado. No entanto, é necessário colocar-se uma condição de contorno no problema de forma que o somatório dos R_j seja igual a unidade, ou seja $\sum_{j=1}^n R_j = 1$, condição esta necessária para o fechamento do balanço de massas. Isto pode ser feito adicionando-se ao sistema original uma equação m + 1 da seguinte forma:

$$P.R1 + P.R2 + P.R3 + \dots + P.Rn = P$$

onde P é um peso associado a esta equação de fechamento. Na prática tem-se encontrado valores de P em torno de 6, suficiente para o fechamento do balanço, desde que se associe peso 1 às demais equações do sistema.

Um programa em BASIC para microcomputador CP300 ou compatível foi desenvolvido para minimizar o sistema de equações com excesso de equações. O sistema minimizado é resolvido por uma rotina do tipo Gauss:Seidel com pivoteamento simples. A listagem deste programa está mostrada no apêndice.

Um caso particular de minimização do sistema de equações das análises densimétricas, é a fórmula de Grumbrecht (22), aplicável somente ao beneficiamento a três produtos. A fórmula é dada a seguir:

$$Rl(\%) = \frac{\Sigma\{(Ma-Mr)(Ml-Mr)\} \cdot \Sigma(Mm-Mr)^2 - \Sigma\{(Ma-Mr)(Mm-Mr)\} \cdot \Sigma\{(Ml-Mr)(Mm-Mr)\}}{\Sigma(Ml-Mr)^2 \cdot \Sigma(Mm-Mr)^2 - \{\Sigma[(Ml-Mr)(Mm-Mr)]\}^2}$$

$$Rm(\%) = \frac{\Sigma\{(Ma-Mr)(Mm-Mr)\} \cdot \Sigma(Ml-Mr)^2 - \Sigma\{(Ma-Mr)(Ml-Mr)\} \cdot \Sigma\{(Ml-Mr)(Mm-Mr)\}}{\Sigma(Ml-Mr)^2 \cdot \Sigma(Mm-Mr)^2 - \{\Sigma[(Ml-Mr)(Mm-Mr)]\}^2}$$

$$Rr(\%) = 100 - Rl(\%) - Rm(\%)$$

onde:

Rl(%) = Recuperação de carvão lavado

Rm(%) = Recuperação de rejeito intermediário (middling)

Rr(%) = Recuperação de rejeito primário

Ma = Porcentagem em massa da alimentação em cada faixa densimétrica.

Mm = Porcentagem em massa do rejeito intermediário em cada faixa densimétrica.

Mr = Porcentagem em massa do rejeito primário em cada faixa densimétrica.

O fechamento do balanço aqui é feito por diferença, no cálculo da recuperação de rejeito primário, onde acumular-se-ão todos os erros de fechamento.

Um programa em BASIC para microcomputador CP300 ou compatível foi desenvolvido para o cálculo das recuperações via fórmula de Grumbrecht. O programa acessa dados diretamente do banco de dados em disco, tornando-se de operação muito simples. Os resultados obtidos são muito similares àqueles obtidos pela minimização do sistema de equações e solução via Gauss-Seidel, ficando a restrição para utilização somente para casos em que três produtos estejam envolvidos. A listagem deste programa está mostrada no apêndice.

3.2.1.2 Minimização da função objetivo

Esta técnica não se baseia no princípio de excesso de dados, como as técnicas descritas anteriormente, mas sim objetiva o ajuste dos dados ao sistema de equações formado por eles. Estes dados se referem à medidas de fluxo mássico da alimentação e dos diversos produtos do processo, bem como à análise de teor de diversas espécies minerais contidas nestes fluxos.

Estes dados formam um sistema de equações da seguinte forma:

$$\begin{aligned} M1.a_{1,1} + M2.a_{1,2} + M3.a_{1,3} + \dots &= M_I.a_{1,I} \\ M1.a_{2,1} + M2.a_{2,2} + M3.a_{2,3} + \dots &= M_I.a_{2,I} \\ \cdot & \quad \cdot \quad \cdot \quad \dots \quad \cdot \\ \cdot & \quad \cdot \quad \cdot \quad \dots \quad \cdot \\ M1.a_{J,1} + M2.a_{J,2} + M3.a_{J,3} + \dots &= M_I.a_{J,I} \end{aligned}$$

onde:

- I = número de fluxos entrando ou saindo do processo
- J = número de espécies analisadas em cada fluxo
- M_i = fluxo mássico medido i
- a_{i,j} = teor da espécie j no fluxo i

O que se pretende aqui é ajustar os valores de fluxo mássico e teores às diversas equações de balanço disponíveis. Surge então o conceito de função objetivo, que consiste num somatório dos quadrados das diferenças entre variáveis medidas e ajustadas, ponderadas por um fator peso relativo:

$$\emptyset = \sum_{i=1}^I (M_i - \hat{M}_i)^2 \cdot K_i$$

onde:

- \emptyset = Função objetivo
- I = Número de variáveis a ajustar
- M_i = Variável medida
- \hat{M}_i = Variável ajustada
- K_i = Fator peso relativo ao fluxo i

O procedimento de cálculo para a determinação do valor dos fluxos mássicos ajustados (incógnitas) é a minimização da função

objetivo. Diversas técnicas podem ser utilizadas com tal finalidade, porém a que tem sido a mais efetiva é a minimização usando-se multiplicadores de Lagrange (23). A expressão de Lagrange pode ser escrita da seguinte forma:

$$\tau = \emptyset + \sum_{j=1}^J \lambda_j \cdot \Psi_j$$

onde:

J = Número de equações do balanço

λ_j = Multiplicador de Lagrange correspondente a cada equação do balanço

Ψ_j = Valor correspondente a cada equação do balanço

Ψ_j é dado por:

$$\Psi_j = \sum_{i=1}^I a_{i,j} \cdot \hat{M}_i$$

sendo:

$a_{i,j}$ = coeficientes constantes das equações de balanço.

Assim, a expressão completa de Lagrange para o caso aqui descrito é a seguinte:

$$\tau = \sum_{i=1}^I (M_i - \hat{M}_i)^2 \cdot K_i + \sum_{j=1}^J \lambda_j \cdot \sum_{i=1}^I a_{i,j} \cdot \hat{M}_i$$

Se calcula então as I derivadas parciais com respeito a cada \hat{M}_i e as J derivadas parciais com respeito a cada λ_j , igualando-as a zero:

$$\frac{\partial \tau}{\partial \hat{M}_i} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial \tau}{\partial \lambda_j} = 0$$

Tem-se assim um sistema de equações com $I + J$ derivadas parciais e $I + J$ incógnitas ($\lambda_j + \hat{M}_i$).

Este sistema de equações pode ser resolvido por cálculo matricial visto que a estrutura matricial se adapta bem para o trabalho com linguagens computacionais convencionais. A seqüência de minimização apresenta diversas variações utilizadas por diversos autores (24). Neste trabalho, tem-se utilizado o sistema de a

juste de balanço desenvolvido por Girardi e Casali (25), um programa de microcomputador em BASIC chamado BAMAC.

3.2.2 Cálculo dos Coeficientes de Partição

Os coeficientes de partição com respeito ao carvão lavado são calculados com base na distribuição densimétrica do ROM recalculada, nas distribuições densimétricas dos diversos produtos e no balanço de massas calculado conforme o item 3.2.1. Para cada jigue são calculados os coeficientes da curva de partição total (carvão lavado contra o somatório dos rejeitos) e os das curvas de partição de cada corte, sendo três cortes para os aparelhos de quatro produtos e dois cortes para os aparelhos de três produtos.

Os coeficientes de partição da curva total são calculados de acordo com a seguinte expressão:

$$Cp_{total,i} = \frac{\%Rcl \cdot \%Mcl,i}{100 \cdot \%Mrom,i}$$

onde:

$Cp_{total,i}$ = coeficiente de partição da curva total correspondente à densidade i .

$\%Mcl,i$ = porcentagem em massa de carvão lavado na densidade i .

$\%Mrom,i$ = porcentagem em massa da alimentação recalculada na densidade i .

$\%Rcl$ = recuperação de carvão lavado

Para os aparelhos de três produtos, os coeficientes de partição de cada corte são calculados da seguinte forma:

$$Cp_{1,i} = \frac{\%R2 \cdot \%M2,i + \%Rcl \cdot \%Mcl,i}{100 \cdot \%Mrom,i}$$

$$Cp_{2,i} = \frac{\%Rcl \cdot \%Mcl,i}{\%R2 \cdot \%M2,i + \%R3 \cdot \%M3,i}$$

onde:

$Cp_{j,i}$ = coeficiente de partição do corte j correspondente a densidade i .

%M_{j,i} = porcentagem em massa do produto j na densidade i.
 %R_j = recuperação do produto j

Para os aparelhos de quatro produtos, os coeficientes de partição de cada corte são calculados da seguinte forma:

$$Cp_{1,i} = \frac{\%R2 \cdot \%M2,i + \%R3 \cdot \%M3,i + \%Rc1 \cdot \%Mcl,i}{100 \cdot \%Mrom,i}$$

$$Cp_{2,i} = \frac{\%R3 \cdot \%M3,i + Rc1 \cdot \%Mcl,i}{\%R2 \cdot \%M2,i + \%R3 \cdot \%M3,i + Rc1 \cdot \%Mcl,i}$$

$$Cp_{3,i} = \frac{\%Rc1 \cdot \%Mcl,i}{\%R3 \cdot \%M3,i + Rc1 \cdot \%Mcl,i}$$

Os coeficientes de partição assim calculados são plotados contra as densidades médias de cada faixa, sendo que o coeficiente de partição correspondente à menor densidade ($Cp_{j,1}$) é plotado nesta densidade descontadas 0.03 unidades de densidade e o coeficiente de partição correspondente à maior densidade ($Cp_{j,I}$) é plotado nesta densidade acrescida de 0.4 unidades de densidade.

3.2.3 Cálculo dos Critérios de Avaliação de Performance

Para o cálculo dos critérios de avaliação de performance, é necessário um modelo que descreva a curva de partição dada pelos coeficientes de partição e suas respectivas densidades. O modelo escolhido aqui é do tipo que passa pelos pontos da curva, a fim de que a caracterização dos equipamentos não seja mascarada pelo uso de modelos do tipo que interpolam os pontos dados. Desta forma, usou-se interpolação Lagrangeana, a qual consiste em determinar polinômios que passam pelos pontos que descrevem a função. Como será visto mais adiante, as curvas de partição dos jigsawes considerados neste estudo, apresentam um comportamento caótico em determinadas faixas de densidade. Estas anomalias ficam melhor caracterizadas por modelos que passam pelos pontos da curva, em vista de que os modelos que interpolam os pontos da curva literalmente suprimem estas anomalias.

Os polinômios de Lagrange são dados pela seguinte fórmula:
para $(d_i, C_{pi}), i = 0, 1, \dots, n$

$$P_n(d) = \sum_{k=0}^n L_k(d) \cdot C_{pk}$$

onde:

$$L_k(d) = \frac{(d-d_k) \dots (d-d_{k-1})(d-d_{k+1}) \dots (d-d_n)}{(d_k - d_0) \dots (d_k - d_{k-1})(d_k - d_{k+1}) \dots (d_k - d_n)}$$

Sendo assim, tendo-se uma série de valores de $C_{pi} \times d_i$, é possível determinar-se um coeficiente de partição correspondente à qualquer densidade dentro do intervalo conhecido. Devido à natureza da curva de partição e de eventuais desvios que esta sofre em relação ao modelo de probabilidade, em função da operação dos equipamentos, principalmente tratando-se de jigagem de carvões brasileiros, os polinômios de grau 1 são os que melhor descrevem as curvas de partição dadas, encontrando-se resultados muito ruins para polinômios de grau maior. O uso de polinômios de grau 1 pode ser entendido como descrever-se a curva de partição por uma série de segmentos de reta entre cada dois pontos consecutivos. A fórmula de Lagrange para grau 1 se reduz então para:

$$(d_i, C_{pi}), i = 0, 1$$

$$P_1(d) = L_0(d) \cdot C_{p0} + L_1(d) \cdot C_{p1}$$

onde:

$$L_0(d) = \frac{(d-d_1)}{(d_0 - d_1)} \quad ; \quad L_1(d) = \frac{(d - d_0)}{(d_0 - d_1)}$$

A partir deste modelo, são calculados os critérios independentes. No caso dos critérios dependentes, usou-se o mesmo modelo para descrever as curvas de distribuição densimétrica envolvidas.

Os valores de D75, D50 e D25, necessários para o cálculo do Erro Provável Médio e da Imperfeição, são dados pela intersecção

das retas $C_p = 75\%$, $C_p = 50\%$ e $C_p = 25\%$ com os segmentos de reta que descrevem a curva de partição. Quando estas densidades assim determinadas são maiores que a maior densidade conhecida da curva, o valor é considerado não válido para determinação dos índices. Assim, o Erro Provável Médio, EPM, é dado por $EPM = (D_{75} - D_{25})/2$ ou por $EPM = D_{75} - D_{50}$ quando não dispõe-se de D_{25} . No caso de não haver disponibilidade do valor de D_{50} , nem o EPM nem a Imperfeição, I , são calculados. Havendo estes dados, a imperfeição é calculada por $I = EPM / (D_{50} - 1)$. A área de erro é calculada considerando-se as áreas dos trapézios formados pela curva de partição, delimitando-a pela curva de Imperfeição nula (11). Para melhor interpretação deste parâmetro, além da área de erro total de cada curva, são calculadas separadamente as áreas correspondentes às porções à esquerda e à direita de D_{50} .

Quanto aos critérios dependentes, para o cálculo do Material "Near Gravity", NGM, é determinada a massa de material entre ± 0.1 unidades de densidade em relação à densidade de referência, na curva de distribuição densimétrica da alimentação de cada corte, as quais são descritas por interpolação Lagrangeana, tal qual as curvas de partição. As eficiências de cada corte são calculadas com base na recuperação teórica do corte, dada pela curva de distribuição densimétrica da alimentação do corte, correspondente ao teor de cinzas do produto do corte. Assim:

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{Recuperação real}}{\text{Recuperação teórica}} \cdot 100$$

O material deslocado, rejeito no lavado, MD R/L, é calculado com base na curva de distribuição densimétrica do flutuado no corte. Toda massa de material com densidade menor que a densidade de corte é considerada material deslocado, rejeito do lavado. Com base na curva de distribuição densimétrica do afundado de cada corte, calcula-se o material deslocado, lavado no rejeito, MD L/R. Considera-se material deslocado, lavado no rejeito, todo o material com densidade inferior à densidade de corte. O material deslocado total, MD, do corte é a soma do material deslocado, rejeito no lavado, com o material deslocado, lavado no rejeito, mantendo-se as proporções entre lavado e rejeito.

Para o cálculo dos coeficientes de partição da curva total, bem como os de cada corte, como descrito no item anterior e dos critérios independentes, foi desenvolvido um programa em BASIC para microcomputador CP300 ou compatível. Existem três versões similares, uma para quatro produtos, uma para três produtos e outra para dois produtos. Estes programas acessam dados diretamente de um banco de dados em disco, o que torna sua operação muito fácil. Uma listagem da versão para dois produtos é mostrada no apêndice.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 BALANÇOS DE MASSAS E METALÚRGICO

Como o objetivo central deste estudo é a caracterização do processo de jigagem, é importante uma análise em termos dos balanços de massas e metalúrgico efetuados com os jigues sob consideração, e, em função da confiabilidade destes dados, são mostrados e discutidos em detalhe os diversos resultados do desempenho destes.

Lavador da Mina do Faxinal: Além de ter sido feita a pesagem sistemática dos produtos amostrados, foi prevista a utilização das duas técnicas de fechamento de balanço de massas descritas anteriormente. A tabela III relaciona as tonelagens dos diversos produtos durante o período de amostragem, bem como as respectivas umidades. A tonelagem de finos é calculada por diferença. Para o cálculo dos percentuais de cada produto, é calculado o peso corrigido para uma base de 10% de umidade.

Tabela III: Tonelagens dos produtos do Lavador da Mina do Faxinal.

Produto	Massa t	Umidade (%)	Massa, t Corrigida	Rec., % c/fin.	Rec., % s/fin.
Alimentação	68595,00	10,00	68595,00	100,00	100,00
CE4700	18891,40	18,53	17700,92	25,80	28,43
CE3100	3812,06	10,42	3794,27	5,53	6,09
Interm.	13760,45	11,76	13491,36	19,67	21,67
Rejeito	27823,38	11,76	27279,28	39,77	43,81
Finos	-	-	6329,17	9,23	-

O valor do desvio padrão entre a alimentação recalculada e a alimentação original, calculado pela equação 1 do item 3.2.1.1 foi da ordem de 0.86.

Através das colunas massa(%) da tabela I do apêndice, pode-se calcular o valor das recuperações em percentual dos diversos produtos, (exceto finos pois na análise densimétrica estes foram descartados), pela rotina de minimização do sistema de equações das análises densimétricas. O resultado obtido, usando-se peso 6 para o fechamento é mostrado na tabela IV.

Tabela IV: Balanço de massa por minimização do sistema de equações das análises densimétricas, Lavador da Mina do Faxinal.

Produto	Recuperação %
Alimentação	100,00
CE4700	30,35
CE3100	2,92
Interm.	13,34
Rejeito	53,39

O valor do desvio padrão entre a alimentação recalculada e a alimentação original, calculado pela equação 1, foi da ordem de 0.262.

A tabela V, mostra os teores de diversos componentes analisados em cada produto. Estas análises foram feitas com o intuito de aplicação da técnica de minimização da função objetivo. Os componentes analisados foram cinzas, enxofre, matéria volátil, bem como o poder calorífico que, para este fim, pode ser considerado como se fosse um componente dos fluxos.

Tabela V: Análise imediata dos diversos produtos, Lavador da Mina do Faxinal. (Base seca)

Produto	% Cz	M.Vol. %	P.Cal. cal/g	% S	Massa, t
Alimentação	59,03	20,06	2706	1,64	68595,00
CE 4700	40,74	27,27	4322	1,13	17700,92
CE 3100	44,59	26,99	4061	1,12	3794,27
Interm.	60,32	15,96	1983	1,00	13491,36
Rejeito	69,61	16,36	2024	1,36	27279,28
Finos	40,86	28,00	4371	1,46	6329,17
Alim.Rec.	58,07	20,76	2938	1,23	68595,00
Erro %	1,63	0,96	8,58	25,26	-

Os valores de Erro % são calculados pela razão entre o teor analisado e o teor calculado da alimentação.

Às massas foi atribuído alto grau de confiabilidade ($K_i = 0,0001\%$), exceto para os finos, os quais foram calculados por diferença ($K_i = 0,1\%$). Aos teores foi atribuído $K_i = \text{Erro } \%$.

Na Tabela VI, estão relacionados os valores ajustados dos fluxos dados, bem como os teores e poder calorífico ajustados, após o uso da rotina de minimização da função objetivo (BAMAC).

Tabela VI: Análise imediata ajustada dos produtos, Lavador da Mina do Faxinal

Produto	% Cz.	M.Vol. %	P.Cal. cal/g	% S	Massa, t
Alimentação	58,25	20,80	2879	1,28	68594,99
CE 4700	40,81	27,34	4186	1,17	17700,92
CE 3100	44,60	27,00	4038	1,12	3794,27
Interm.	69,47	15,97	1963	1,02	13491,36
Rejeito	69,95	16,40	1986	1,45	27279,28
Finos	40,88	28,02	4327	1,48	6329,16
Alim.Rec.	58,25	20,80	2879	1,28	68595,00
Erro %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Devido ao nível de confiabilidade alto atribuído às toneladas de fluxo, não houve alteração de valores significativas nes

tes dados. Para efeitos de cálculo e modelamento da curva de partição, será utilizado o balanço de massas dado pela pesagem sistemática dos produtos, visto que este método está menos sujeito a erros. O balanço dado pela minimização do sistema de equações das análises densimétricas é descartado, apesar de apresentar um menor desvio padrão em relação à alimentação original.

Lavador da Mina do Recreio: Neste caso foi realizada a pesagem sistemática durante o período de amostragem. Foi analisado somente o teor de cinzas de cada fração densimétrica, podendo-se calcular então o teor de cinzas de cada fluxo. O teor de cinzas da alimentação foi recalculado. Este procedimento inviabiliza o uso de qualquer técnica de balanço de massas, ficando o balanço via pesagem sem nenhum dado para a sua avaliação. O resultado da pesagem sistemática no Lavador da Mina do Recreio é mostrado na tabela VII.

Tabela VII: Balanço de massas e metalúrgico, Lavador da Mina do Recreio.

Produto	% Cz.	Rec. c/finos %	Rec. s/finos %
Alimentação	58,88	100,00	100,00
Lavado	34,35	33,90	37,54
Interm.	69,51	19,00	21,04
Rejeito	75,72	37,40	41,42
Finos	58,86	9,70	-

Lavador da Mina São Roque: Neste caso não foi realizada a pesagem sistemática, ficando o balanço de massas na dependência das técnicas de balanço descritas anteriormente. Para tanto, além dos diversos produtos de jigagem, exceto finos, foi amostrada a alimentação do jig. Foi feita a análise densimétrica da alimentação, bem como dos produtos, e analisado os teores de cinzas de cada faixa densimétrica. Este procedimento permite a minimização do sistema de equações das análises densimétricas. A minimização da função objetivo pode ser usada no fechamento do balanço metalúrgico, após terem sido encontradas estimativas no balanço de massas. Antes disso, esta técnica é inviável pois não há como estabelecer-se pesos a possíveis estimativas do balanço de massas.

As colunas massa (%) da tabela III do apêndice, mostram os dados para o cálculo das recuperações percentuais de cada produto. O resultado obtido, usando-se peso 6 para o fechamento foi o seguinte:

Tabela VIII: Balanço de massas por minimização do sistema de equações das análises densimétricas, Lavador da Mina de São Roque.

Produto	Recuperação %
Alimentação	100,00
Lavado	28,88
R3	17,57
R2	9,77
R1	43,78

O valor do desvio padrão da alimentação recalculada em relação à alimentação medida, calculado pela equação 1, foi da ordem de 2.53.

Para o fechamento do balanço metalúrgico, utiliza-se a rotina de minimização da função objetivo (BAMAC), com os dados de teor de cinzas de cada produto calculados através da recomposição dos teores de cinzas das faixas densimétricas para cada produto, e os valores das recuperações dadas na tabela VIII, atribuindo-se a estas um alto nível de confiabilidade ($K_i = 0.0001\%$). Para os teores de cinzas recompostos, $K_i = 2\%$, desde que este é o limite de erro admissível para teores de cinzas recompostos. O resultado do balanço de cinzas é mostrado na tabela IX.

Tabela IX: Balanço de cinzas por minimização da função objetivo, Lavador da Mina de São Roque.

Produto	% Cinzas
Alimentação	62,35
Lavado	35,35
R3	76,68
R2	83,68
R1	69,87
Erro %	0,15

Lavador Mina Verdinho: O balanço de massas e metalúrgico seguiu os mesmos critérios do balanço do Lavador da Mina São Roque. Os dados utilizados agora são correspondentes à tabela IV do apêndice. Na tabela X são mostrados os resultados:

Tabela X: Balanço de massas e de cinzas, Lavador da Mina do Verdinho

Produto	Recuperação %	Cinzas %
Alimentação	100,00	60,61
Lavado	37,83	31,05
R3	17,47	72,59
R2	21,05	81,63
R1	23,55	80,02
Erro %	-	0,23

O valor do desvio padrão da alimentação recalculada em relação à alimentação medida, calculado pela equação 1, foi da ordem de 0.57.

Lavador Mina A (Sangão): Neste caso também foram seguidos os mesmos critérios dos dois lavadores anteriores. Os dados utilizados agora correspondem à tabela V do apêndice. Os resultados são mostrados na tabela XI.

Tabela XI: Balanço de massas e de cinzas, Lavador da Mina A, Sangão.

Produto	Recuperação %	Cinzas %
Alimentação	100,00	65,50
Lavado	28,82	31,96
R2	65,68	79,08
R1	5,50	79,73
Erro %	-	0.05

O valor do desvio padrão da alimentação recalculada em relação à alimentação medida, calculado pela equação 1, foi da ordem de 1.455.

4.2 CURVAS DE PARTIÇÃO

Em função dos resultados dos balanços descritos anteriormente e conhecidas as curvas de distribuição densimétrica dos produtos dos diversos jigues em estudo, é possível calcular os coeficientes de partição correspondentes aos jigues e a cada corte ou compartimento envolvido. Os resultados são mostrados nas figuras 17 a 21, onde estão representadas todas as curvas de partição envolvidas. Os coeficientes de partição correspondentes a estas curvas são mostrados nas tabelas VI a X do apêndice.

A principal característica destas figuras é o comportamento caótico que se observa nas curvas de partição aqui apresentadas, principalmente nas faixas de alta densidade, com exceção do segundo corte do jigue do Lavador da Mina A, Sangão. Neste jigue, também se observa que a curva de partição do primeiro corte praticamente não está caracterizada, sendo que a curva da soma dos cortes, total, é muito similar a do segundo corte. Uma análise mais detalhada destes fenômenos será feita mais adiante na discussão geral.

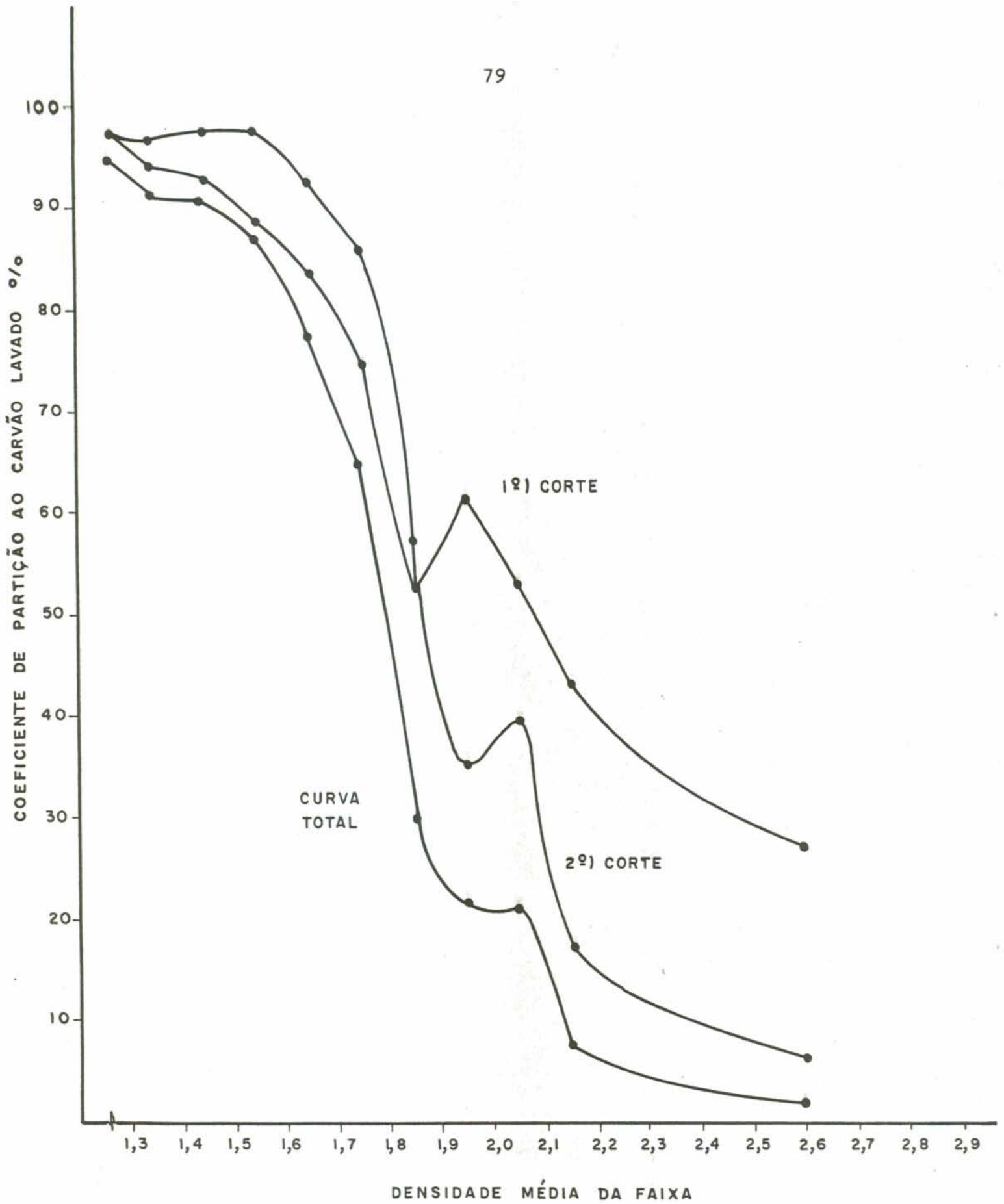


Figura 17: Curvas de Partição do Jigue do Lavador da Mina do Faxinal.

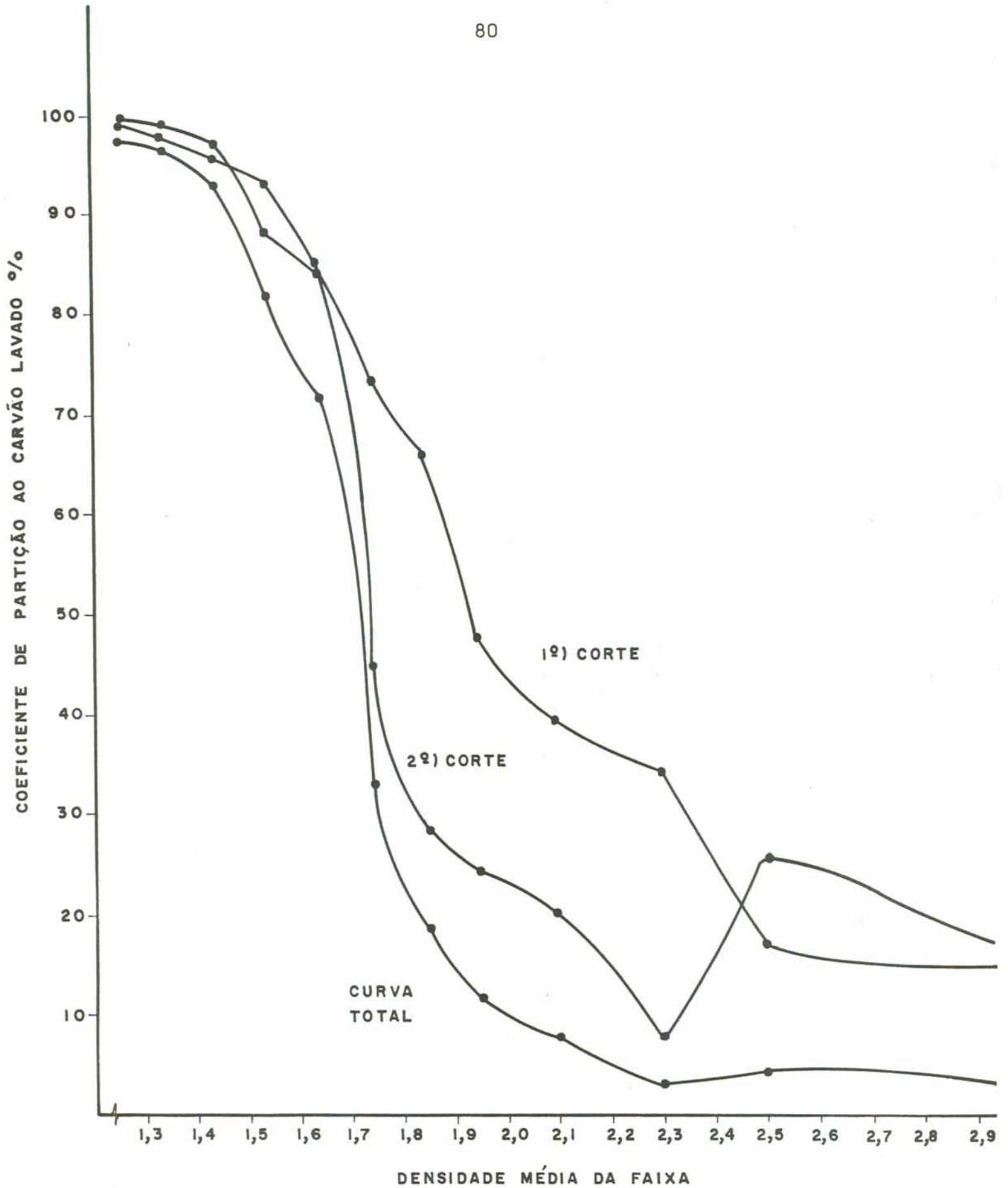


Figura 18: Curvas de Partição do Jigue do Lavador da Mina do Recreio.

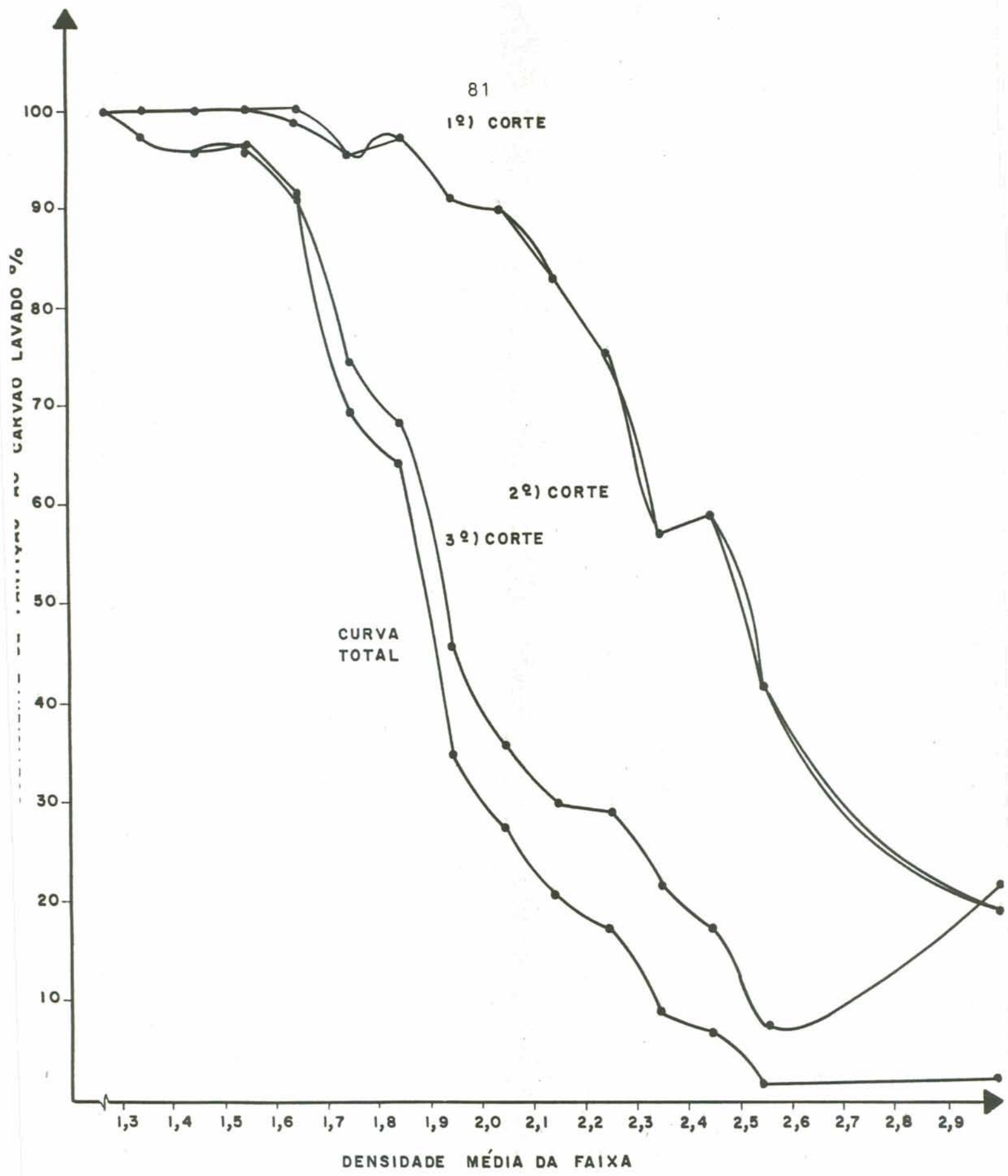


Figura 19: Curvas de Partição do Jigue do Lavador da Mina de São Roque.

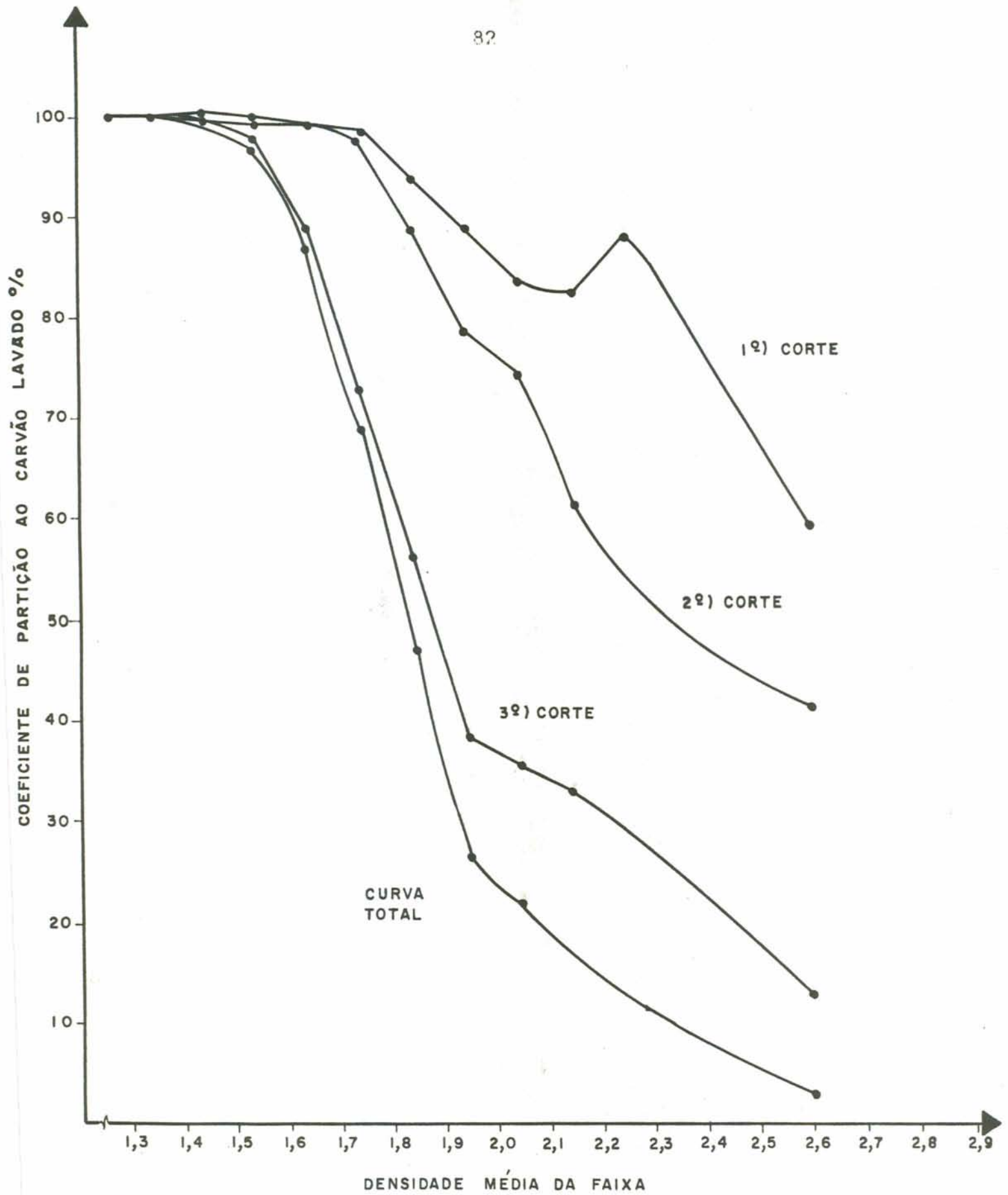


Figura 20: Curvas de Partição do Jigue do Lavador da Mina do Verdinho.

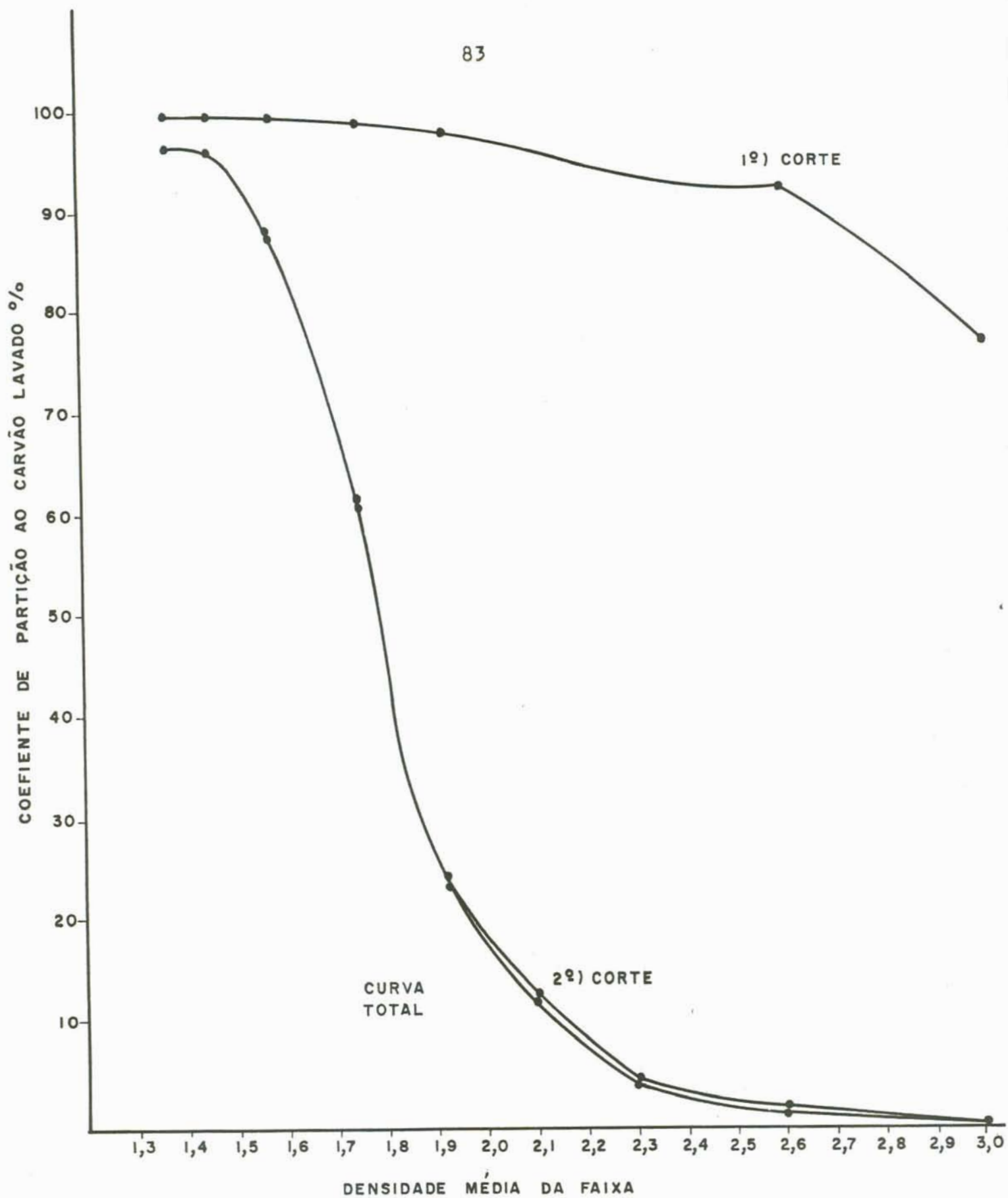


Figura 21: Curvas de Partição do Jigue do Lavador da Mina A, Sangão.

4.3 AVALIAÇÃO DE PERFORMANCE

Conhecidas as curvas de partição correspondentes à cada aparelho em estudo, bem como os balanços de massas e as análises densimétricas de cada produto, descritos anteriormente, na tabela XII são mostradas as condições operacionais dos jigues de três produtos e, subseqüentemente, nas tabelas XIII e XIV são apresentados os resultados do cálculo dos critérios de avaliação dependentes e independentes. Da mesma forma, nas tabelas XV, XVI e XVII são mostrados os resultados para os jigues de quatro produtos.

Tabela XII: Resumo das condições operacionais
Jigues de três produtos

	Faxinal	Recreio	Sangão
Taxa de alimentação, tph	200	400	600
Recuperação, %			
Carvão lavado	34,52	37,54	28,82
Rejeito 1	43,81	42,42	5,50
Rejeito 2	21,67	21,04	65,68
Teores de Cinzas, %			
Alimentação	58,25	58,88	65,50
Carvão lavado	41,48	34,35	31,96
Rejeito 1	69,95	69,51	79,73
Rejeito 2	69,47	75,72	79,08

Tabela XIII: Desempenho dos jigues de três produtos
Critérios dependentes

Parâmetro	Faxinal	Recreio	Sangão
Cortes 1 e 2			
Eficiência orgânica, %	78,4	86,1	90,8
NGM, %	14,3	7,7	6,3
MD (total), %	14,0	8,9	7,8
MD R/L %	22,9	13,3	15,1
MD L/R %	9,3	6,3	4,9
Corte 1			
Eficiência orgânica, %	76,7	93,8	103,3
NGM, %	18,3	11,9	-
MD (total), %	28,8	23,4	-
MD R/L %	24,8	30,4	-
MD L/R %	33,9	13,4	-
Corte 2			
Eficiência orgânica, %	90,6	90,8	86,5
NGM, %	17,2	9,7	6,6
MD (total), %	15,5	12,0	8,2
MD R/L %	16,8	12,1	14,9
MD L/R %	13,3	11,9	5,2

Tabela XIV: Desempenho dos jigues de três produtos
Critérios independentes

Parâmetro	Faxinal	Recreio	Sangão
Cortes 1 e 2			
D50	1,79	1,70	1,80
Imperfeição	0,15	0,13	0,17
EPM	0,12	0,09	0,13
Área de erro	98,1	87,2	96,8
Área > D50	53,0	55,1	56,4
Área < D50	45,1	32,2	40,4
Corte 1			
D50	2,08	1,94	-
Imperfeição	0,31	0,36	-
EPM	0,33	0,34	-
Área de erro	190,2	191,8	-
Área > D50	94,9	137,7	-
Área < D50	95,3	54,2	-
Corte 2			
D50	1,88	1,74	1,80
Imperfeição	0,19	0,19	0,16
EPM	0,16	0,13	0,13
Área de erro	107,1	162,4	97,9
Área > D50	74,0	136,1	57,6
Área < D50	33,1	26,3	40,3

Tabela XV: Resumo das condições operacionais
Jigues de quatro produtos

	São Roque	Verdinho
Taxa de alimentação, tph	250	600
Recuperação, %		
Carvão lavado	28,88	37,83
Rejeito 1	43,78	23,60
Rejeito 2	9,77	21,05
Rejeito 3	17,57	17,47
Teores de Cinzas, %		
Alimentação	62,35	60,61
Carvão lavado	35,35	31,05
Rejeito 1	69,87	80,02
Rejeito 2	83,68	81,63
Rejeito 3	76,68	72,59

Tabela XVI: Desempenho dos jigues de quatro produtos
Critérios dependentes

Parâmetro	São Roque	Verdinho
Cortes 1, 2 e 3		
Eficiência orgânica, %	87,5	89,6
NGM, %	6,3	5,6
MD (total), %	7,3	11,5
MD R/L %	14,1	11,9
MD L/R %	4,5	11,2
Corte 1		
Eficiência orgânica, %	91,6	94,9
NGM, %	23,0	-
MD (total), %	21,2	-
MD R/L %	27,4	-
MD L/R %	13,3	-
Corte 2		
Eficiência orgânica, %	96,3	93,8
NGM, %	-	-
MD (total), %	-	-
MD R/L %	-	-
MD L/R %	-	-
Corte 3		
Eficiência orgânica	88,1	82,8
NGM, %	8,0	6,7
MD (total), %	14,5	17,5
MD R/L %	13,3	10,3
MD L/R %	16,4	33,0

Tabela XVII: Desempenho dos jigues de quatro produtos
Critérios independentes

Parâmetro	São Roque	Verdinho
Cortes 1, 2 e 3		
D50	1,90	1,83
Imperfeição	0,20	0,16
EPM	0,18	0,13
Área de erro	110,9	100,1
Área > D50	66,3	66,1
Área < D50	44,6	34,0
Corte 1		
D50	2,5	-
Imperfeição	0,17	-
EPM	0,25	-
Área de erro	157,2	-
Área > D50	79,4	-
Área < D50	77,8	-
Corte 2		
	-	-
Corte 3		
D50	1,93	1,89
Imperfeição	0,30	0,17
EPM	0,28	0,15
Área de erro	233,8	154,3
Área > D50	187,3	114,4
Área < D50	46,5	39,9

Quanto à confiabilidade dos resultados obtidos, cabe determinar-se qual a influência dos balanços de massas sobre os critérios de avaliação de performance. Com este objetivo, foi escolhido arbitrariamente o jigue do lavador da Mina A, Sangão, para uma comparação direta entre os resultados de dois balanços distintos. A tabela XVIII mostra esta comparação considerando-se os seguintes balanços:

	Balanço 1	Balanço 2
Recuperação rejeito 1 %	5,50	8,23
Recuperação rejeito 2 %	65,68	65,92
Recuperação lavado %	28,82	25,85
Desvio padrão	1,46	1,66

Tabela XVIII: Critérios de avaliação de performance para dois balanços de massa distintos

Critério	Balanço 1	Balanço 2
Cortes 1 e 2		
Eficiência orgânica, %	90,76	81,41
NGM, %	6,34	6,45
MD (total), %	7,82	7,49
MD R/L %	15,09	15,99
MD L/R %	4,88	4,53
D50	1,7997	1,7862
Imperfeição	0,1654	0,1695
EPM	0,1323	0,1333
Área de erro	96,79	94,79
Área > D50	56,35	54,38
Área < D50	40,43	40,41

Como se observa na tabela XVIII, erros cometidos na avaliação dos balanços de massas levam à diferenças significativas na avaliação da eficiência orgânica. Por outro lado, os outros parâmetros não sofrem variações importantes.

4.4 DISCUSSÃO GERAL

Os diversos resultados obtidos neste estudo permitem estabelecer as seguintes considerações gerais:

1. Os valores de NGM só tem significado prático quando analisados para cada corte independentemente. O NGM da soma de vários cortes subsequentes não tem validade por que a densidade de corte neste caso é hipotética, não acontecendo na prática. Portanto, os valores de NGM total não tem qualquer valor comparativo em termos de performance global de equipamentos com mais de um compartimento. Neste trabalho, de um modo geral, os valores de NGM encontrados para os diversos compartimentos foram baixos, caracterizando carvões de fácil beneficiamento. As exceções a esta regra são o lavador da Mina do Faxinal e o primeiro corte do Lavador de São Roque. No caso do lavador da Mina do Faxinal, isto se deve ao baixo nível de liberação do carvão para a granulometria da alimentação em uso. Este baixo nível de liberação é facilmente detectado quando se analisa o histograma de distribuição de massas deste carvão, figura 22. No caso do Lavador de São Roque, ocorre um alto valor de NGM no primeiro corte porque a densidade de corte nesta etapa é bastante alta, caindo numa faixa de alta concentração de matéria mineral.

2. Os valores de material deslocado são altos em todos os casos considerados. Quando analisados separadamente em cada compartimento, ocorrem valores de MD R/L maiores que MD L/R mais frequentemente do que valores de MD L/R maiores que MD R/L. Isto é confirmado pelos valores de MD R/L e MD L/R da soma dos diversos cortes. Pode-se considerar portanto, que está ocorrendo, de um modo geral, uma grande contaminação do carvão lavador por material de rejeito, o que caracteriza uma baixa precisão de separação nas densidades mais altas.

3. Os valores de área de erro são, sem exceção, muito altos. Isto caracteriza condições operacionais desfavoráveis ao processo de jigagem, desde que este critério não depende do carvão da alimentação. Além disso, observa-se que os valores de área de erro à direita de D50 (Área > D50) são sempre maiores que os valores de área de erro à esquerda de D50, exceto no primeiro corte do jigue do lavador da Mina do Faxinal. Novamente, fica caracterizada uma baixa precisão de separação nas densidades mais altas.

4. Os critérios independentes Erro Provável e Imperfeição são normais quando comparados a valores obtidos em outros países, onde têm sido caracterizados os mesmos tipos de jigues (vide tabela XIX). Entretanto, em função dos valores de área de erro obtidos, pode-se concluir que estes critérios não são de qualquer valor na avaliação do desvio da curva de partição em relação à curva de separação perfeita. Isto ocorre porque estes valores só consideram a porção média da curva de partição, não detectando portanto erros nas faixas extremas de densidade.

Em reforço aos itens anteriores, cabe aqui uma análise visual das curvas de partição de todos os jigues em estudo, figuras 17 a 21. Estas curvas mostram uma distribuição caótica de massas principalmente nas altas densidades, com exceção do jigue do Lavador da Mina A, Sangão. Isto significa que existem condições operacionais distorcendo o caráter probabilístico do processo de jigagem, pois a curva de partição nada mais é que uma gaussiana acumulada com respeito à densidade. Se a distribuição é caótica, significa que há um fator aleatório influenciando na distribuição das massas dentro dos jigues estudados. Este fator de aleatoriedade pode ser conseqüência de pelo menos três fenômenos:

1. Existiria um acúmulo de partículas finas em certas faixas de densidade as quais seriam, eventualmente, aprisionadas pelas partículas grosseiras ou arrastadas com água de lavagem, causando uma distribuição aleatória destas partículas aos diversos produtos.

2. Existiria uma proporção maior de partículas planares em determinadas faixas de densidade, o que originaria uma diminuição da velocidade de sedimentação comparativamente a partículas de outras faixas densimétricas com maior grau de esfericidade.

3. A proporção de material de rejeito dos nossos carvões é tão elevada que, nas condições operacionais das usinas, provoca sérias dificuldades na mobilidade do leito e problemas na velocidade de extração deste material. Este fenômeno também teria um caráter aleatório.

Das três hipóteses sugeridas, a última parece ter caráter incontestável. A argumentação neste sentido baseia-se nos seguintes fatos:

1. Os jigues nacionais são operados normalmente, com raras exceções, nas mesmas condições que os jigues estrangeiros quanto à frequência de impulsos, modelo de onda, taxa de alimentação, etc.

2. Os jigues utilizados no nosso país foram dimensionados para carvões com massas e teores reduzidos de cinzas. De fato, os rejeitos dos jigues americanos possuem os mesmos teores de cinzas de nosso carvão ROM. Estas diferenças podem ser claramente observadas quando comparamos histogramas de distribuição de massas de carvões americanos, figuras 27 e 28, com os histogramas de distribuição de massas dos carvões analisados neste trabalho, figuras 22 a 26. Estes histogramas mostram que a proporção de material de alta densidade nos carvões brasileiros é muito maior que nos carvões americanos. Como forma de comparação entre a performance dos jigues que beneficiam carvões nacionais e jigues que beneficiam carvões americanos, na tabela XIX é mostrado um resumo comparativo do desempenho de jigues similares, onde ficam caracterizadas menores eficiências, maiores taxas de material deslocado, bem como maiores áreas de erro para os jigues que beneficiam carvões nacionais.

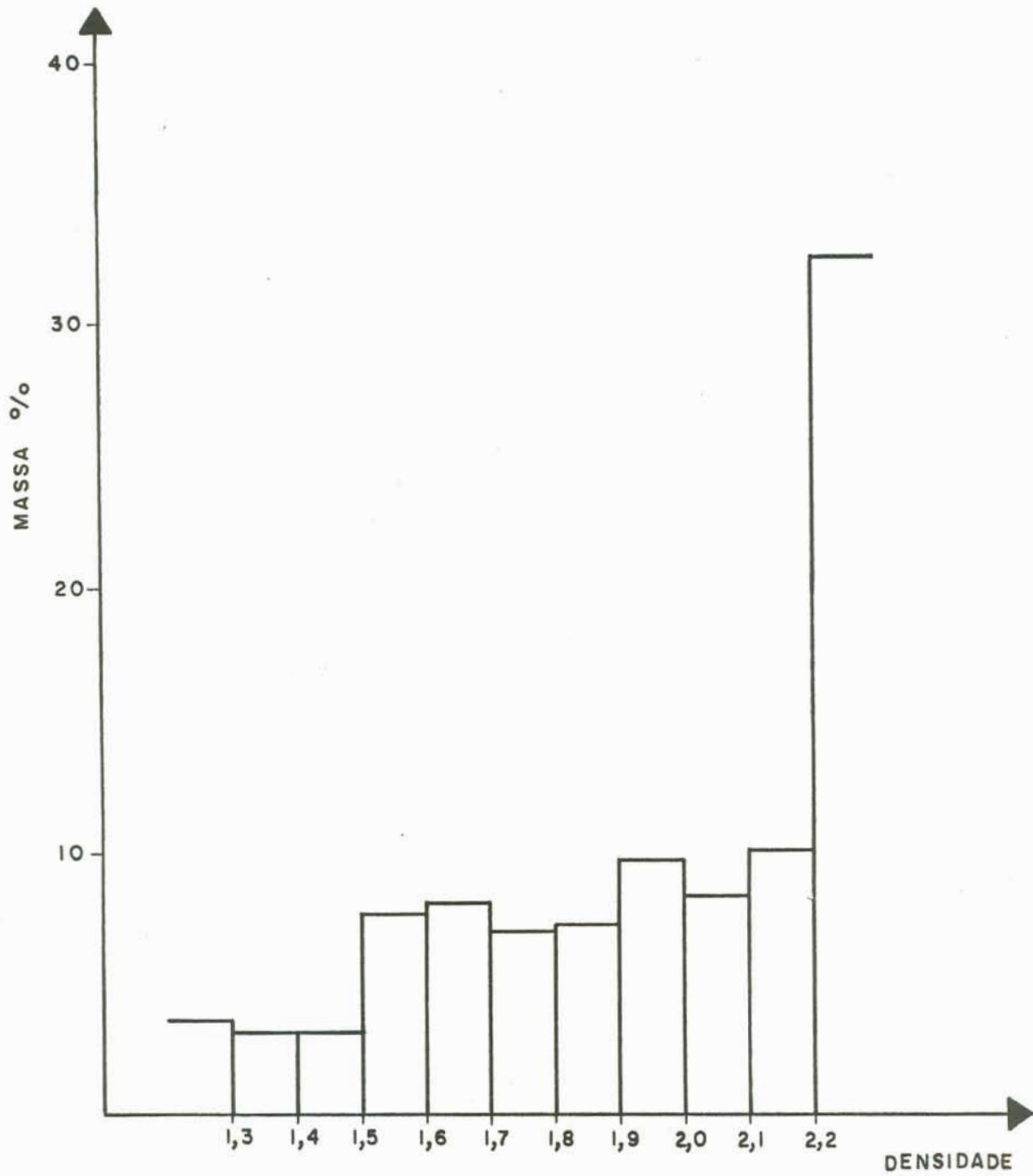


Figura 22: Histograma de distribuição de massas da alimentação do jigue do Lavador da Mina do Faxinal.

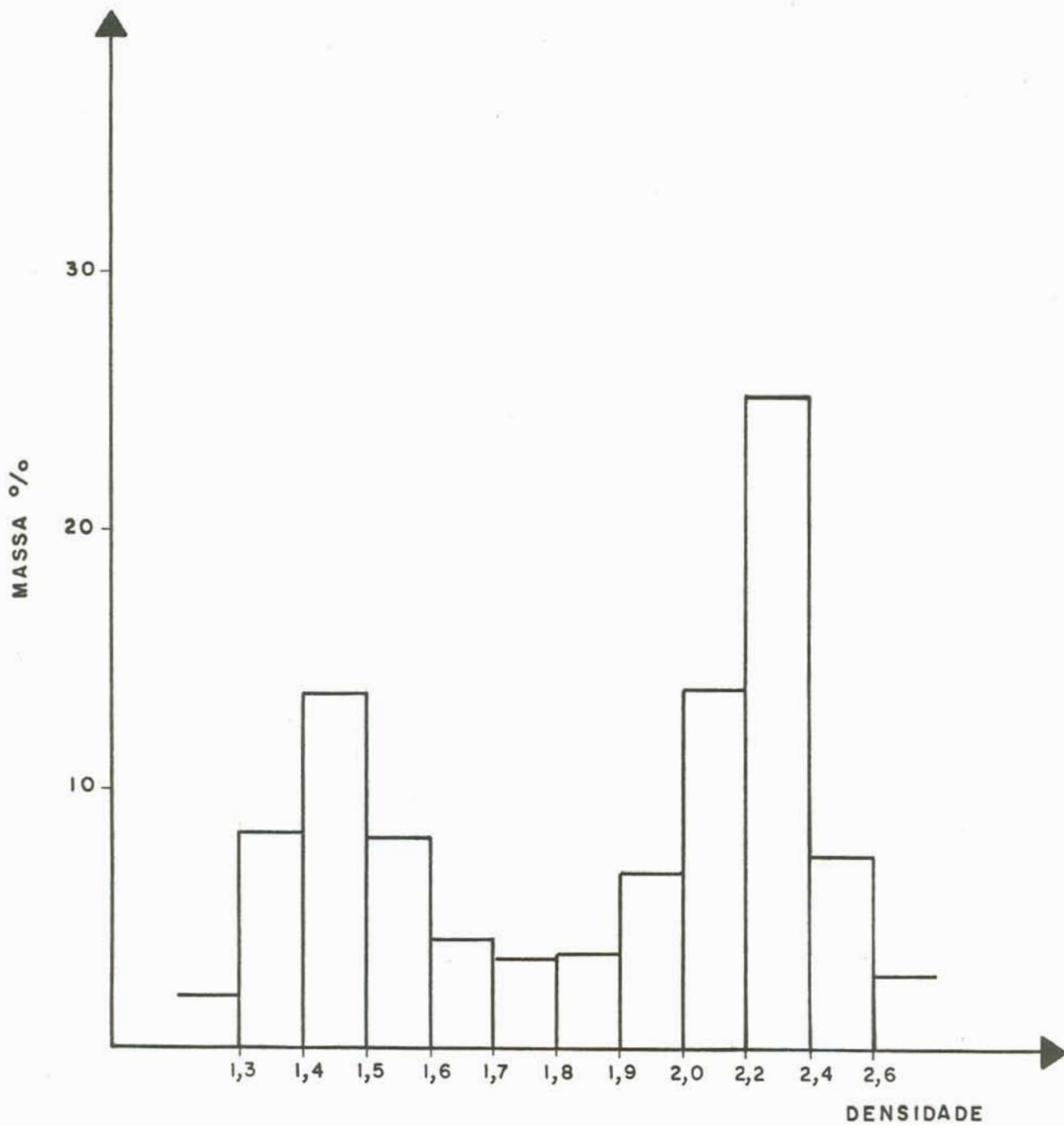


Figura 23: Histograma de distribuição de massas da alimentação do jigue do Lavador da Mina do Recreio.

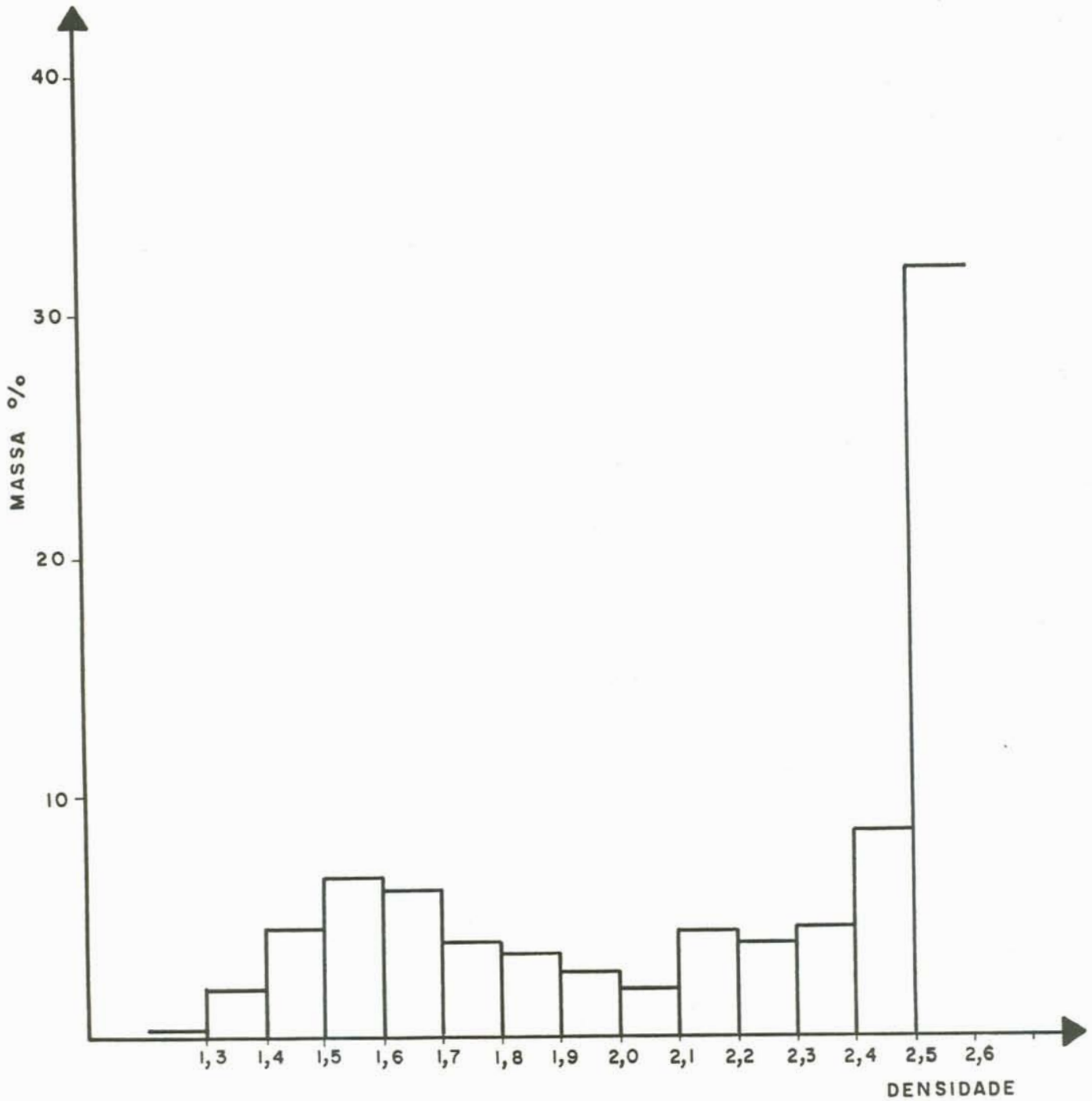


Figura 24: Histograma de distribuição de massas da alimentação do jige do Lavador da Mina de São Roque.

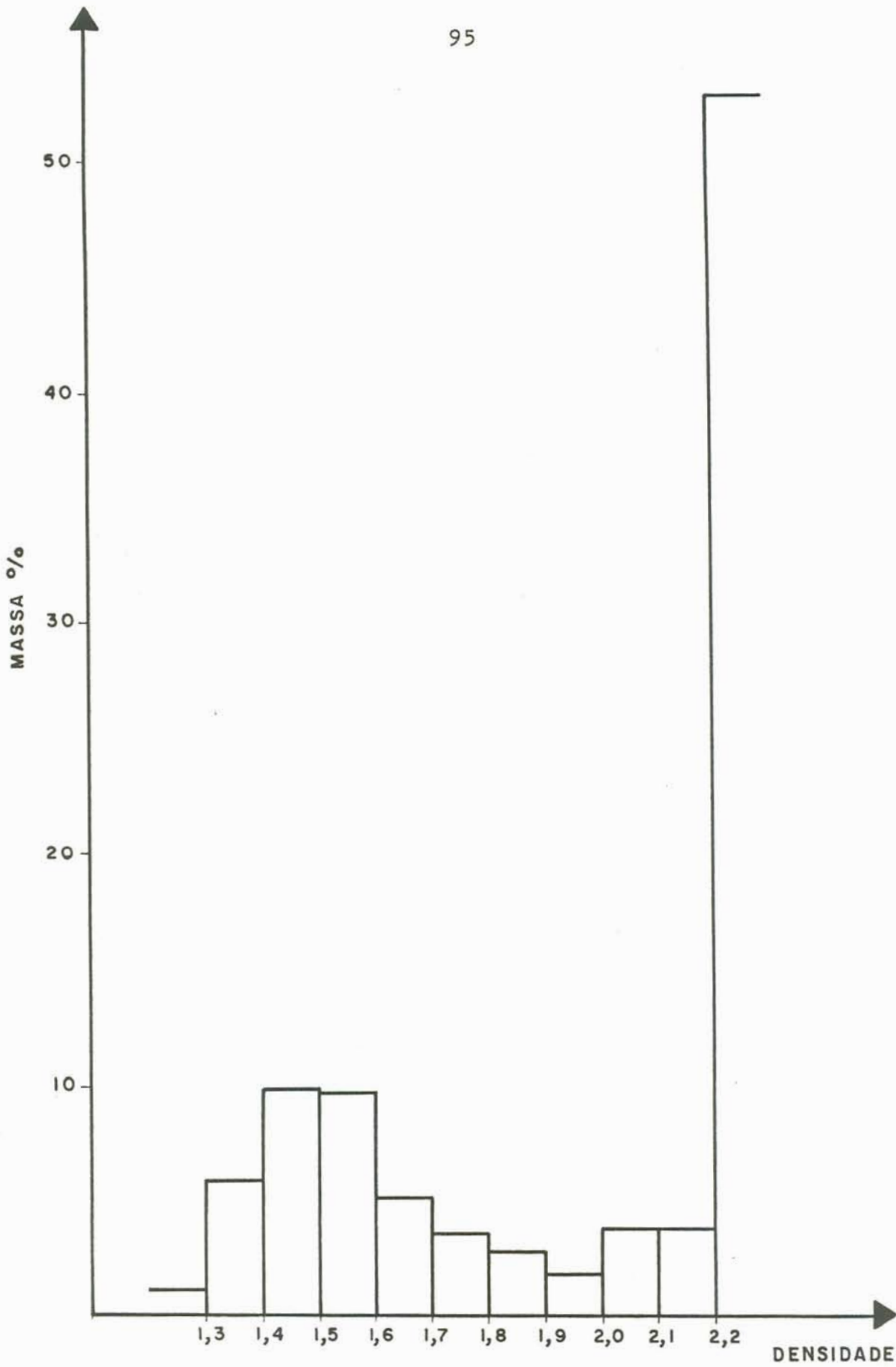


Figura 25: Histograma de distribuição de massas da alimentação do jigue do Lavador da Mina do Verdinho.

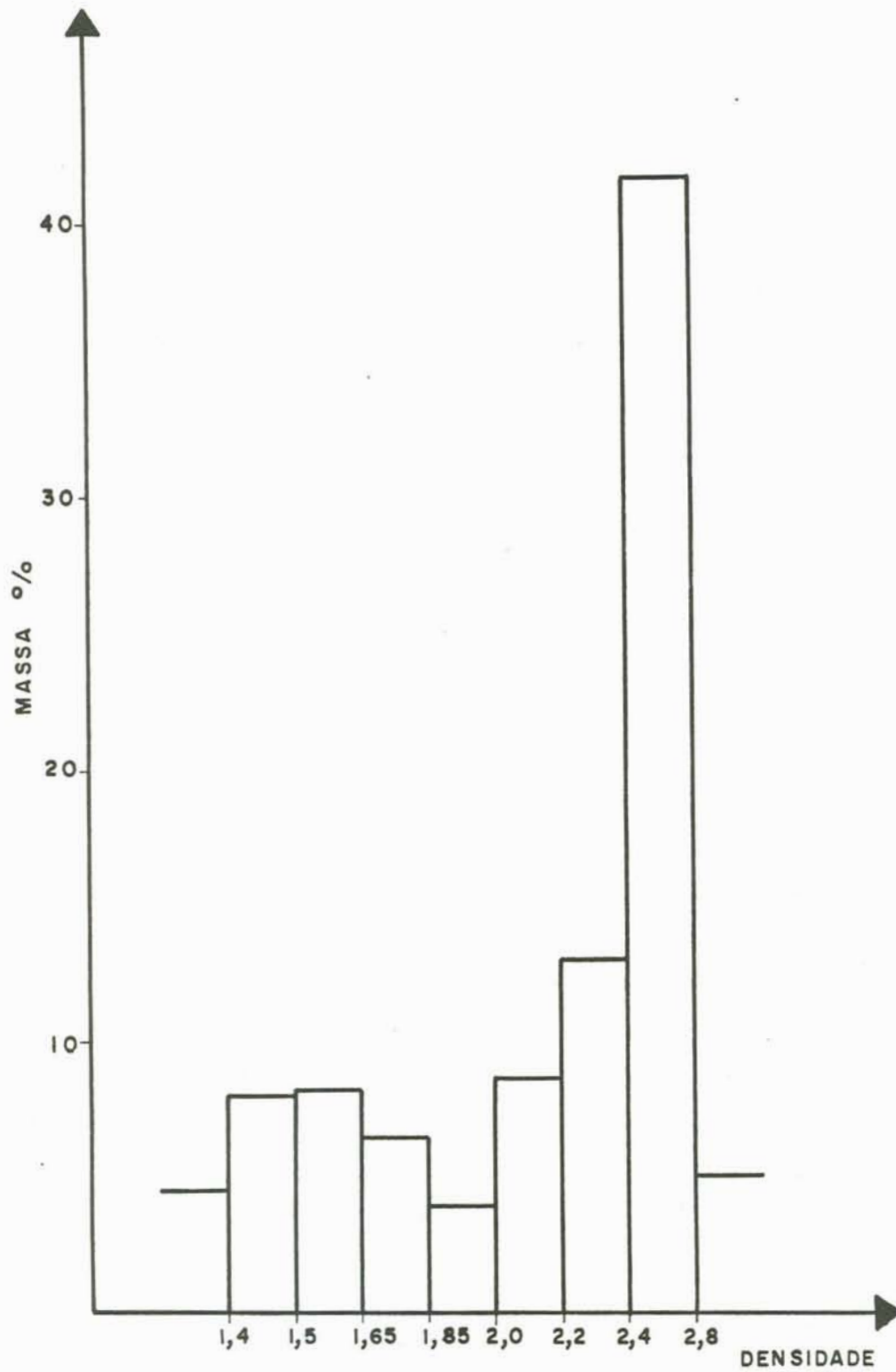


Figura 26: Histograma de distribuição de massas da alimentação do jigue do Lavador da Mina A, Sangão.

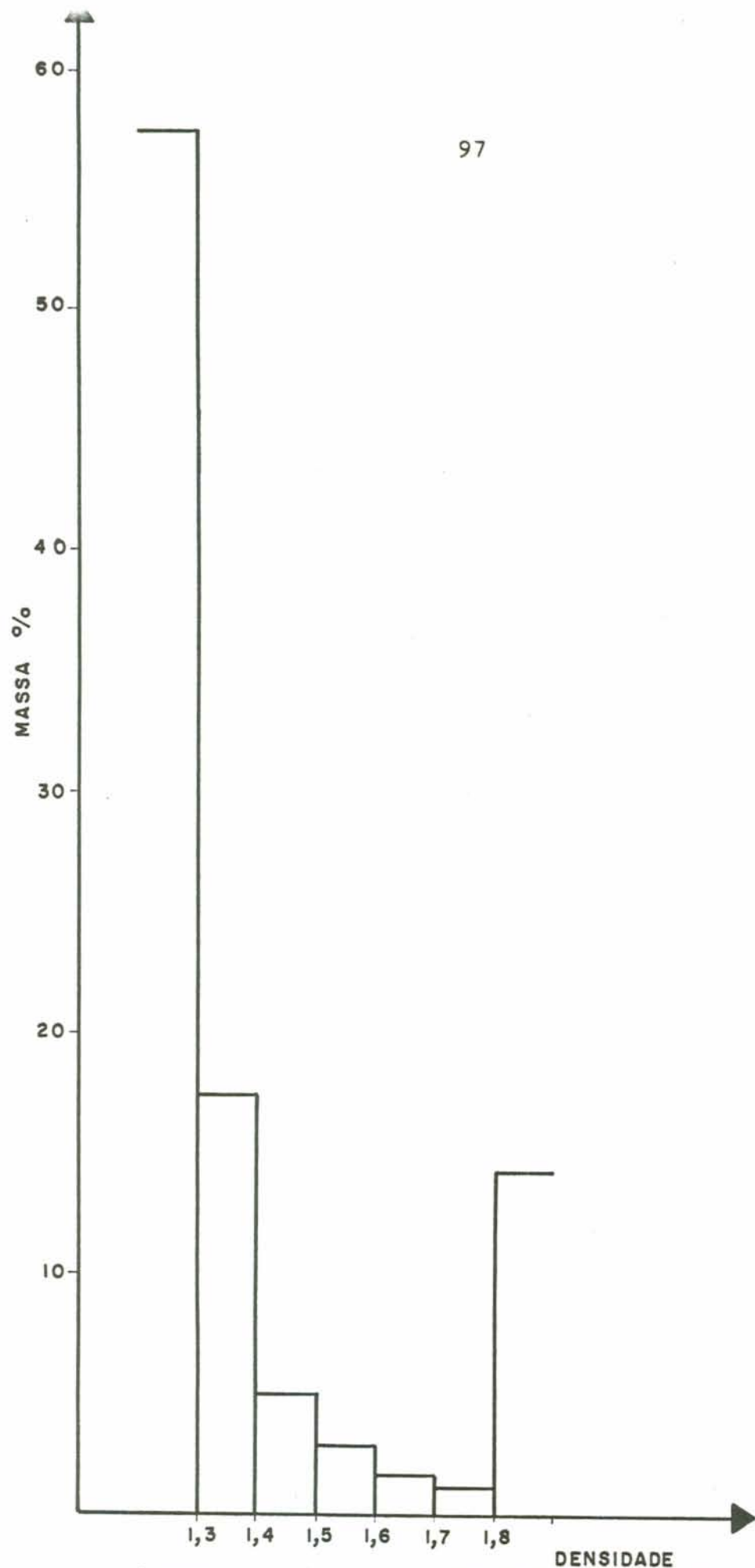


Figura 27: Histograma de distribuição de massas da alimentação do jigue Baum 3; Carvão Norte-Americano.

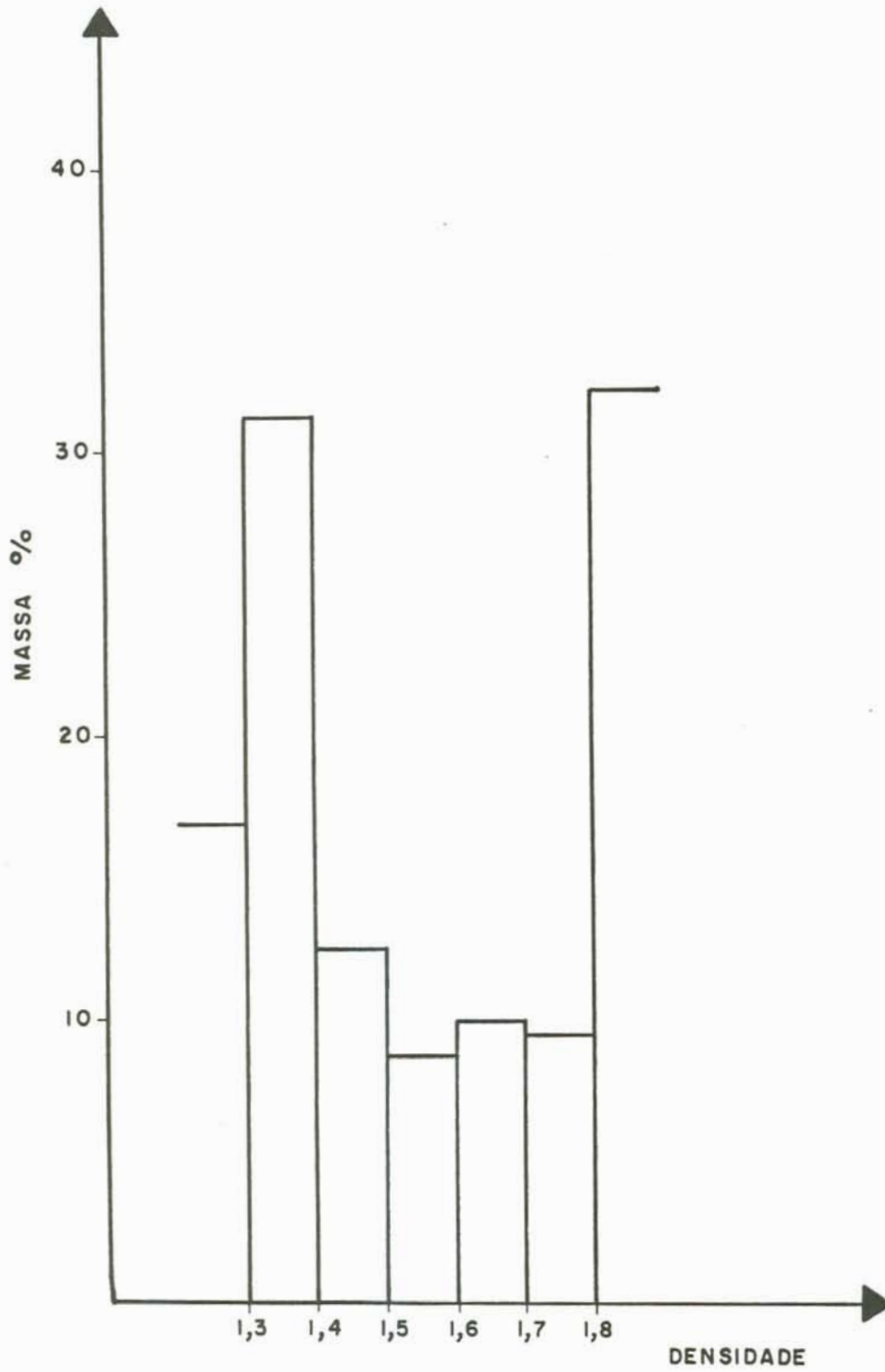


Figura 28: Histograma de distribuição de massas da alimentação do Jigue Baum 4; Carvão Norte-Americano.

Tabela XIX: Resumo comparativo do desempenho de vários jigues ¹

Lavador	Critérios dependentes				Critérios independentes			
	Gran.	Efic.	MD	NGM	D50	I	EPM	Á.Erro
Faxinal	3"x0	74,8	14,0	14,3	1,79	0,15	0,12	98
Recreio	4"x0	86,1	8,9	7,7	1,70	0,13	0,09	87
São Roque	3/2"x0	87,9	7,3	6,3	1,90	0,20	0,18	111
Verdinho	1"x.5mm	89,6	11,9	5,6	1,83	0,16	0,13	100
Sangão	2"x0	90,8	7,8	6,3	1,80	0,17	0,13	97
Baum 1	4"x.074mm	88,5	6,5	20,8	1,49	0,22	0,11	73
Baum 2	6"x.074mm	94,4	3,2	9,6	1,49	0,25	0,12	75
Baum 3	6"x1/4"	97,2	4,0	6,7	1,59	0,14	0,09	63
Baum 4	4"x1/4"	90,1	6,5	5,0	1,58	0,16	0,09	73
Batac 1	3/4"x.595mm	98,7	2,2	2,1	1,74	0,16	0,12	70
Batac 2	1/8"x.595mm	99,1	1,6	1,2	1,76	0,14	0,10	81

Obs.: Os jigues descritos como Baum 1, 2, 3 e 4 e Batac 1 e 2 correspondem a lavadores que beneficiam carvões americanos(26).

3. A tabela XX mostra dados comparativos de diversos parâmetros mostrando características de distribuição e processamento dos rejeitos em dois jigues americanos tipo Baum e os jigues estudados neste trabalho. Esta tabela mostra que as recuperações de rejeito são significativamente maiores no caso brasileiro, \pm 2,5 vezes, bem como as razões em tph/m². Como os extratores de rejeito são dimensionados para vazões de massa menores, certamente o processo de eliminação deste material nos jigues nacionais encontra-se prejudicado para estas taxas de alimentação. Além disso, a maior quantidade de material de rejeito implica em um peso maior do leito. Se a área de jigagem é mantida, isto se reflete em uma baixa mobilidade do mesmo, prejudicando o processo de estratificação dentro do jigue, se o mesmo modelo de ondas é mantido. Estes fatos explicam os altos valores de material deslocado encontrados. As partículas de rejeito se dirigem ao carvão lavado devido à ineficiência do processo de extração, e as perdas de carvão lavado se devem principalmente à baixa mobilidade do leito, o qual aprisiona as partículas leves.

¹ Deve ser considerada a granulometria da alimentação ao comparar os critérios independentes de cada jigue.

Finalmente, a conjunção de todos estes fenômenos, leva a uma baixa eficiência orgânica. Desde que nos lavadores brasileiros o beneficiamento objetiva um produto de baixa qualidade em relação aos lavadores de outros países, pode-se considerar a etapa de jigagem como uma etapa rougher ou beneficiamento primário. Sendo assim, espera-se altos valores de eficiência quando comparadas às eficiências dos jigues em outros países. Porém, foram encontrados valores de eficiência que não condizem com esta premissa (vide tabela XIX).

O jigue do Lavador da Mina A, Sangão, não se constitui de uma exceção em face de que todos os parâmetros de avaliação de desempenho, critérios dependentes e independentes, são similares aos dos jigues dos outros lavadores, podendo-se concluir que este jigue, também sofre sobrecarga e, conseqüentemente, baixa mobilidade do leito.

Tabela XX: Características operacionais de jigues em relação ao material de rejeito.

Jigue	Capacidade Nominal, tph	Recuperação de Rejeito, %	Vazão Rejeito, tph	Área Jigagem, m ²	Razão* tph/m ²
Baum 3	600	22	132	27,87	4,74
Baum 4	600	41	246	27,87	8,83
Faxinal	200	65	130	11,28	11,52
Recreio	400	62	248	11,10	22,34
São Roque	250	71	177	16,49	10,73
Verdinho	600	62	372	24,00	15,50
Sangão	600	71	426	21,60	19,72

* Vazão de rejeito sobre área de jigagem.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

1. A ineficiência no desempenho geral dos jigues nacionais, decorre fundamentalmente do seu alto teor de matéria mineral. Estes altos teores de rejeito, desproporcionalmente maiores que os que serviram de base para o dimensionamento geométrico e do sistema de pulsação dos jigues em uso no Brasil, prejudicam a mobilidade do leito. Como resultado deste fato, a curva de partição característica destes jigues, mostra anomalias nos coeficientes de distribuição. Estes coeficientes que deveriam refletir o caráter probabilístico do processo de jigagem, passam a apresentar caráter aleatório especialmente nas altas densidades. Assim, a proporção de material deslocado nos diversos produtos dos jigues é excessiva no Brasil.

2. Como forma de melhorar a performance atual dos jigues nacionais, são sugeridas as seguintes alternativas:

a. Uma forma de minorar o problema da baixa eficiência dos jigues consiste em otimizar, para nossos carvões, aspectos construtivos como área de jigagem, inclinação da grelha, e mecanismos de extração. Estas medidas visariam uma melhora da mobilidade do leito e da capacidade de extração dos jigues. Da mesma forma, a otimização de alguns fatores operacionais, tais como taxa de alimentação, modelo e frequência de impulsos, volume de água e ar, levariam a uma melhora na eficiência destes equipamentos.

b. As duas dimensões envolvidas no parâmetro área de jigagem, largura e comprimento, interagem de forma diferenciada no processo de jigagem. O comprimento está relacionado ao tempo de residência do carvão no leito. Quanto maior for o tempo de residência, maior a probabilidade de ocorrer estratificação diferencial, levando a uma melhor eficiência. No entanto, se não houver uma boa mobilidade ao longo deste comprimento, um maior tempo de residência não se refletirá em uma estratificação significativamente mais nítida. A largura está relacionada à mobilidade do leito e à capacidade de extração. Quanto mais largo for o jigue, pa

ra uma mesma taxa de alimentação, maior será a mobilidade do leito. Da mesma forma, haverá maior espaço físico para a extração do rejeito, aumentando a capacidade de extração. Em função destes argumentos, os jigues do tipo BATAAC, devido a seus aspectos construtivos, tornam-se mais favoráveis ao processo de jigagem de carvões com altas proporções de rejeito.

c. A alteração mais premente visando uma melhora de eficiência no caso dos jigues já instalados e em operação, é uma diminuição da taxa de alimentação, levando a uma maior mobilidade do leito.

d. Nos processos de aquisição de novos jigues, deve-se passar a exigir dos fabricantes níveis de área de erro dentro dos padrões internacionais. A imperfeição e o erro provável, critérios que tem sido usados para aceitação de equipamentos pelas companhias, não traduzem de forma satisfatória a nitidez de separação dos jigues nacionais.

e. As empresas de mineração deveriam realizar trabalhos sistemáticos de avaliação de desempenho dos seus processos e de caracterização de seus carvões em vista da sua importância e de seu baixo custo. Uma avaliação desta natureza pode detectar erros operacionais, bem como determinar problemas relacionados às características do carvão, como por exemplo, liberação, dificuldade de lavagem, friabilidade, etc.

f. Em decorrência dos resultados obtidos neste estudo, conclui-se que é urgente a realização de estudos sistemáticos sobre a otimização do processo de jigagem de carvões no Brasil. Neste sentido faz-se fundamental a realização de estudos a nível de laboratório da influência da concentração de matéria mineral na estratificação do leitos dos jigues, bem como a determinação de um modelo de ondas mais eficaz para este caso, em face de que, no Brasil, tem-se usado tão somente o modelo de ondas simétrico, não tendo sido explorados mecanismos de estratificação específicos para o beneficiamento de carvões nacionais. Estes estudos serão vitais como subsídio para o aprimoramento das modificações técnicas que são sugeridas.

3. Os programas para microcomputadores desenvolvidos para cálculo de coeficientes de partição, modelamento da curva de partição e cálculo dos critérios de avaliação de performance se mos

traram eficientes e práticos. Outro aspecto vantajoso da utilização destes programas é a manutenção de um banco de dados em disco, tornando possível a manipulação destes dados com a maior rapidez e a menor margem de erro possível.

4. Os programas para microcomputadores desenvolvidos para o cálculo e ajuste dos balanços de massas e metalúrgico são poderosas ferramentas na avaliação da precisão da amostragem e análise dos materiais envolvidos. Nestes programas também se utiliza banco de dados em disco.

5. Os programas para microcomputadores desenvolvidos para o cálculo dos parâmetros de modelos que interpolam os pontos das curvas de partição são funcionais, constituindo-se em futuras ferramentas úteis na caracterização e simulação de processos de jigagem, desde que os diversos problemas operacionais existentes a nível de jigagem de carvões brasileiros sejam solucionados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Informativo Anual da Indústria Carbonífera. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. Brasília, Ano VII, 1985, Maio 1986.
2. Kelly, E.G. & Spottiswood. Introduction to Mineral Processing. John Wiley & Sons, Inc. (1982).
3. Burt, O.R. Gravity Concentration Technology. Elsevier Science Publishing Co. Inc. N.Y. (1984), 605.
4. Concha, F. & Almendra, E.R. Settling Velocities of Particulate Systems, 1. Settling Velocities of Individual Spherical Particles. *Internacional Journal of Mineral Processing*, 5 (1979), 349-67.
5. Gaudin, A.M. Jigging. In Principles of Mineral Dressing. 1st Ed. McGraw-Hill Books Co. Inc. N.Y. (1939), 258.
6. Palowitch, E.R., Deurbrouck, A.W., Lovell, H.L., Luckie, P.T. & Kindig, J.K. wet Concentration of Coarse Coal. In Coal Preparation, 4th Edition, Leonard, J.W. Editor, Cap. 9 (1979).
7. Yoshida, T. Operating Products of the Tacub Jig. *Gluckauf*, 95 (1959), 348-51.
8. Zimmerman, R.E. Batac Jig. An Improved Baum Type for Cleaning Coarse and Fine Sizes of Coal. *Mining Congress Journal*, 57 (1974), 43-9.
9. Mayer, F.W. Fundamentals of a Potential Theory of the Jigging Process. Proceedings VII Int. Min. Process. Congress, paper 83, Pittsburg, Penn. (1966).
10. Sawada, Y., Jinnouchi, Y. & Kawashima, S. Teoretical Analysis on Air-Pulsated Jigs With New Pulsation Mechanism. Proceedings IX International Coal Preparation Congress, New Delhi, (1982), 11.
11. Peng, F.F., Walters, A.D., Geer, M.W. & Leonard, J.W. Evaluation and Prediction of Optimum Clearing Results. In Coal Preparation, 4th Edition, Leonard, J.W. Editor, Cap. 18 (1979).
12. Tromp, K.F. New Methods of Computing the Washability of Coals. *Gluckauf*, 37 (1937), 125-31, 151-6. Exerpts in *Colliery Guardian*, 154 (1937), 955-9, 1009.
13. Erasmus, T.C. Predicting the Performance of a Coal Washer with the Aid of a Mathematical Model. Proceedings 7th International Coal Preparation Congress 61, Sidney (1976).

14. Gottfried, B.S. A Generalization of Distribution Data for Characterizing the Performance of Float-Sink Coal cleaning Devices. *International Journal of Mineral Processing*, 5 (1978), 1-20.
15. Reid, K.J., Maixi, L. & Shenggui, Z. Coal-Cleaning Distribution Curve Simulation: Fitting Six Different Models By Microcomputer. *International Journal of Mineral Processing*, 14 (1985), 291-9.
16. Broyden, G.C. A Class of Methods for Solving Non-Linear Simultaneous Equations. *Math. Compu.*, 19 (1965), 557-93.
17. Draper, N.R. & Smith, H. *Applied Regression Analysis*. John Willey and Sons Inc. New York, N.Y. (1966), 407.
18. Reid, K.J., Maixi, L. & Shenggui, Z. Computer Reliability Analysis of Coal-Cleaning Distribution Curves. *International Journal of Mineral Processing*, 14 (1985), 301-12.
19. Schneider, C.L. & Rubio, J. Microcomputação em Beneficiamento de Carvão II. Aplicação de Curvas de Partição. *Anais do II Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral*, 1 (1987), 582-600.
20. Caracterização e Beneficiamento de Carvões no Brasil. Otimização de Funcionamento de Jigues. Convênio PME/DNPM-CETEM. Relatório Interno.
21. Relatório de Posta em Marcha do Lavador da UM II. Industrial Conventos, KOPEX. Relatório Interno.
22. Tarjan, G. *Mineral Processing*. Akademiai Kiado, 1 (1981), Budapest.
23. Powell, M.J.D. An Efficient Method of Finding the Minimum of a Function of Several Variables Without Calculating Derivatives. *Computer Journal*, 7 (1969), 303.
24. Nielson, W.H. & Diaz, L.S. Techniques for Increasing Accuracy in Mill Performance Calculations. *AIME Transactions*, 252 (1972), 136.
25. Solari, J.A., Casali, A. & Girardi, S. Técnicas computacionais de balanço de massa em plantas de beneficiamento de carvão. *Mineração Metalurgia*, 47 (450), Dez 83/Jan 84, 30-33.
26. Tsai, S.C. *Fundamentals of Coals Beneficiation and Utilization*. Coal Science and Technology, 2 (1982), 375. Anderson, L.L. Editor. Elsevier Science Publishing Co. Inc. N.Y.

7. APÉNDICE

7.1 TABELAS

Tabela I: Análise densimétrica da alimentação e produtos do Jigue da Mina do Faxinal.

Dens.	Aliment.		R1		R2		Finos		CE3100		CE4700	
	Massa %	Cinza %	Massa %	Cinza %	Massa %	Cinza %	Massa %	Cinza %	Massa %	Cinza %	Massa %	Cinza %
-1.3	3,5	3,93	0,2	2,32	0,4	3,36	1,6	3,17	0,6	2,63	11,3	3,14
1.3-1.4	3,1	13,95	0,3	9,48	0,3	10,84	15,8	11,16	0,8	15,56	7,1	12,57
1.4-1.5	3,1	25,29	0,5	23,70	0,3	22,39	15,11	15,34	5,7	28,21	8,7	24,80
1.5-1.6	7,7	34,88	2,2	31,55	0,8	35,75	10,5	40,80	32,9	36,68	19,4	37,32
1.6-1.7	8,1	41,33	3,0	40,19	2,3	41,07	15,8	45,41	29,6	44,92	15,8	43,22
1.7-1.8	7,0	49,87	4,5	48,86	3,8	49,78	6,4	38,97	16,0	50,70	14,7	51,00
1.8-1.9	7,2	54,31	7,0	56,02	6,7	55,23	4,2	50,65	6,6	56,62	5,5	56,75
1.9-2.0	9,7	60,63	8,9	60,71	18,9	60,62	22,6	58,06	6,0	59,66	6,6	59,06
2.0-2.1	8,3	68,66	9,1	68,78	12,7	69,89	8,3	63,07	0,7	64,62	6,3	65,94
2.1-2.2	10,1	73,82	14,0	73,76	17,9	75,44	2,9	63,66	0,8	72,23	2,7	72,03
+2.2	32,2	78,45	50,3	77,21	35,9	79,32	7,8	77,52	0,3	73,55	1,8	80,39
Total	100	59,09	100	69,00	100	69,25	100	40,07	100	43,79	100	39,55

Tabela II: Análise densimétrica dos produtos do Jigue do Lavador Mina do Recreio

Dens.	R1		R2		Lavado	
	Massa	Cinza	Massa	Cinza	Massa	Cinza
	%	%	%	%	%	%
-1.3	0,03	14,2	0,06	12,9	5,27	16,1
1.3-1.4	0,43	18,0	0,38	19,8	21,45	19,7
1.4-1.5	1,39	28,5	1,82	31,1	33,92	27,2
1.5-1.6	1,34	35,7	4,33	37,3	17,92	43,1
1.6-1.7	1,51	47,8	2,71	42,5	8,12	46,8
1.7-1.8	2,19	53,8	6,57	49,2	3,03	50,0
1.8-1.9	3,01	58,4	8,33	57,4	1,86	54,1
1.9-2.0	8,66	66,3	11,84	63,9	2,15	59,6
2.0-2.2	20,30	74,6	20,70	71,1	2,97	67,8
2.2-2.4	40,09	83,7	37,00	83,4	2,25	80,1
2.4-2.6	15,05	86,7	4,57	85,4	0,88	85,8
+2.6	6,0	60,2	1,69	60,5	0,18	83,1
Total	100,0	75,72	100,0	69,51	100,0	34,35

Tabela III: Análise densimétrica da alimentação e produtos do Jigue do Lavador São Roque

Dens.	Alimentação		R1		R2		R3		Lavado	
	Massa	Cinza	Massa	Cinza	Massa	Cinza	Massa	Cinza	Massa	Cinza
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
-1.3	0,29	3,9							1,64	4,0
1.3-1.4	2,10	2,8					0,52	11,3	10,16	13,1
1.4-1.5	4,61	21,0					1,01	21,3	14,94	20,4
1.5-1.6	6,68	26,8					1,57	26,9	23,81	26,3
1.6-1.7	6,18	32,4			0,93	30,3	3,00	33,8	21,48	34,0
1.7-1.8	3,93	41,8	0,38	30,2	0,95	47,8	4,39	42,5	8,00	42,5
1.8-1.9	3,43	48,0	0,17	47,0	1,06	51,9	4,52	49,8	5,90	49,4
1.9-2.0	2,90	48,4	0,41	53,4	3,11	58,3	4,66	56,1	2,43	56,8
2.0-2.1	1,94	62,3	0,47	63,6	2,79	57,8	5,64	62,2	1,95	63,1
2.1-2.2	4,43	66,0	0,79	67,3	2,86	68,1	5,61	68,1	1,47	69,1
2.2-2.3	4,01	75,3	1,19	73,8	3,346	75,4	5,01	73,5	1,28	74,0
2.3-2.4	4,63	80,3	3,70	77,5	6,37	79,1	6,88	78,6	1,18	79,2
2.4-2.5	8,47	84,2	6,22	83,8	12,95	83,8	12,58	84,3	1,65	84,5
2.5-2.6	14,52	88,7	30,51	89,5	42,02	90,5	28,79	89,7	1,41	89,3
+2.6	31,88	84,6	56,16	75,2	23,50	84,0	15,82	90,1	2,70	91,3
Total	100,0	67,58	100,0	79,74	100,0	82,93	100,0	75,54	100,0	34,95

Tabela IV: Análise densimétrica da alimentação e produtos do Jigue do Lavador Mina do Verdinho

Dens.	Alimentação		R1		R2		R3		Lavado	
	Massa	Cinza	Massa	Cinza	Massa	Cinza	Massa	Cinza	Massa	Cinza
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
-1.3	1,03	4,3							3,20	4,9
1.3-1.4	5,86	3,3							14,75	14,1
1.4-1.5	9,90	21,5	0,25	19,9			0,30	21,4	26,42	22,2
1.5-1.6	9,83	28,6	0,37	31,6	0,23	23,7	1,21	30,3	25,37	29,8
1.6-1.7	5,13	36,8	0,26	37,7	0,22	38,5	3,34	37,6	11,84	37,5
1.7-1.8	3,48	44,2	0,29	44,8	0,45	44,5	4,62	43,0	5,71	44,7
1.8-1.9	2,67	50,6	0,59	50,2	1,12	52,1	4,52	49,8	2,70	52,2
1.9-2.0	1,77	56,9	1,51	56,7	2,88	59,9	7,73	57,1	2,22	56,8
2.0-2.1	3,77	63,7	2,07	65,1	3,02	63,4	6,78	62,9	1,73	62,4
2.1-2.2	3,72	66,8	2,59	68,7	5,26	69,9	6,74	66,7	1,53	68,7
+2.2	52,84	82,9	92,07	82,0	86,82	84,7	64,76	83,0	4,53	81,4
Total	100,0	60,2	100,0	80,2	100,0	81,8	100,0	72,8	100,0	31,1

Tabela V: Análise densimétrica da alimentação e produtos do Jigue do Lavador Mina A (Sangão)

Densidade	Alimentação		R1		R2		Lavado	
	Massa %	Cinza %	Massa %	Cinza %	Massa %	Cinza %	Massa %	Cinza %
-1.40	4,53	9,46	0,16	11,53	0,23	11,80	15,81	11,30
1.40-1.50	8,08	21,72	0,27	22,45	0,58	22,48	33,79	22,82
1.50-1.65	8,21	31,32	0,53	21,65	1,51	33,46	25,36	32,12
1.65-1.85	6,71	44,90	0,88	46,10	3,77	47,68	13,29	45,49
1.85-2.00	3,94	56,18	1,34	53,34	5,15	57,31	3,81	56,87
2.00-2.20	8,66	65,72	4,98	68,70	8,89	66,72	3,06	65,84
2.20-2.40	13,03	79,12	12,78	77,99	14,62	78,20	1,73	76,53
2.40-2.80	42,65	87,72	60,33	88,53	60,00	88,12	3,11	87,93
+2.80	5,19	61,12	18,63	61,90	5,25	62,09	0,04	73,25
Total	100,0	65,69	100,0	79,72	100,0	78,91	100,0	31,96

Tabela VI: Coeficientes de partição do jigge do Lavador da Mina do Faxinal

Densidade	Corte 1	Corte 2	Cortes 1 e 2
- 1.30	97,44	97,40	94,91
1.30 - 1.40	94,27	96,99	91,43
1.40 - 1.50	92,94	97,75	90,85
1.50 - 1.60	88,86	97,75	86,86
1.60 - 1.70	83,79	92,66	77,64
1.70 - 1.80	75,20	86,22	64,84
1.80 - 1.90	52,69	57,50	30,30
1.90 - 2.00	61,90	35,36	21,89
2.00 - 2.10	53,49	39,98	21,38
2.10 - 2.20	43,35	17,36	7,52
+ 2.20	27,39	6,40	1,75

Tabela VII: Coeficiente de partição do jigge do Lavador da Mina do Recreio

Densidade	Corte 1	Corte 2	Cortes 1 e 2
- 1.30	99,38	99,37	98,75
1.30 - 1.40	97,86	99,02	96,89
1.40 - 1.50	95,80	97,08	93,00
1.50 - 1.60	93,23	88,07	82,11
1.60 - 1.70	85,26	84,24	71,83
1.70 - 1.80	73,53	45,14	33,19
1.80 - 1.90	66,28	28,49	18,88
1.90 - 2.00	47,90	24,47	11,72
2.00 - 2.10	39,42	20,38	8,03
2.20 - 2.40	34,20	9,79	3,35
2.40 - 2.60	17,17	25,57	4,39
+ 2.60	14,55	15,97	2,32

Tabela VIII: Coeficientes de partição do jigue do Lavador da Mina de São Roque

Densidade	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Cortes 1,2,3
- 1.30	100,00	100,00	100,00	100,00
1.30 - 1.40	100,00	100,00	96,98	96,98
1.40 - 1.50	100,00	100,00	96,05	96,05
1.50 - 1.60	100,00	100,00	96,14	96,14
1.60 - 1.70	100,00	98,67	92,17	90,94
1.70 - 1.80	95,02	97,08	74,97	69,15
1.80 - 1.90	97,22	96,02	68,21	63,67
1.90 - 2.00	91,04	83,35	46,15	35,02
2.00 - 2.10	89,88	85,08	36,24	27,71
2.10 - 2.20	83,01	83,46	30,10	20,86
2.20 - 2.30	75,30	78,71	29,57	17,53
2.30 - 2.40	57,28	71,35	21,99	8,99
2.40 - 2.50	59,21	67,99	17,74	7,14
2.50 - 2.60	41,74	57,11	7,45	1,78
+ 2.60	19,23	60,79	21,91	2,56

Tabela IX: Coeficientes de partição do jigue do Lavador da Mina do Verdinho

Densidade	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Cortes 1,2,3
- 1.30	100,00	100,00	100,00	100,00
1.30 - 1.40	100,00	100,00	100,00	100,00
1.40 - 1.50	99,41	100,00	99,48	98,90
1.50 - 1.60	99,12	99,51	97,84	96,51
1.60 - 1.70	98,81	99,09	88,47	86,63
1.70 - 1.80	97,81	96,91	72,79	68,99
1.80 - 1.90	93,61	88,48	56,39	46,71
1.90 - 2.00	88,67	78,32	38,34	26,62
2.00 - 2.10	83,48	74,31	35,58	22,07
2.10 - 2.20	82,37	61,33	32,95	16,65
+ 2.20	58,97	41,62	13,15	3,23

Tabela X: Coeficientes de partição do jigue do Lavador da Mina A, Sangão.

Densidade	Corte 1	Corte 2	Cortes 1 e 2
- 1.40	99,81	96,79	96,61
1.40 - 1.50	99,80	96,23	96,04
1.50 - 1.65	99,65	88,05	87,74
1.65 - 1.85	99,24	60,73	60,73
1.85 - 2.00	93,38	24,50	24,11
2.00 - 2.20	96,08	13,12	12,61
2.20 - 2.40	93,49	4,94	4,61
2.40 - 2.80	92,39	2,22	2,05
+ 2.80	77,14	0,33	0,26

7.2 F I G U R A S

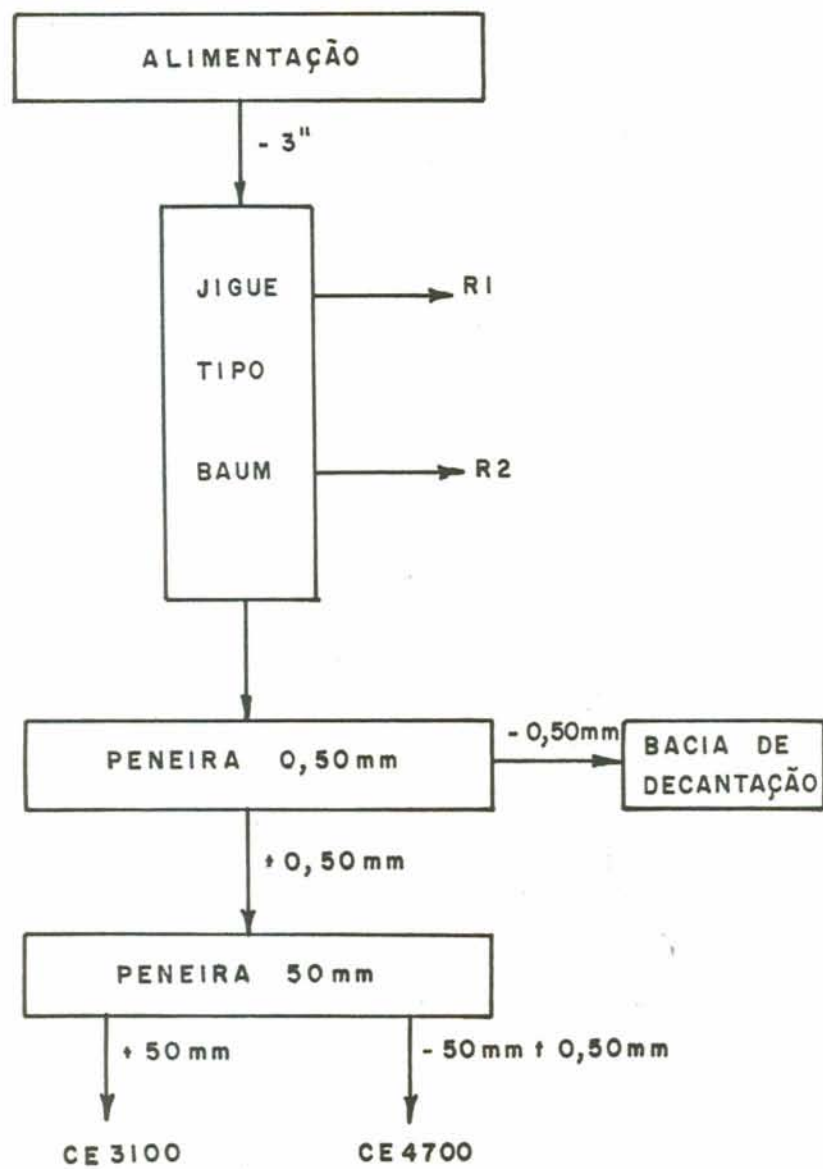


Figura 1: Fluxograma simplificado do Lavador da Mina do Faxinal.

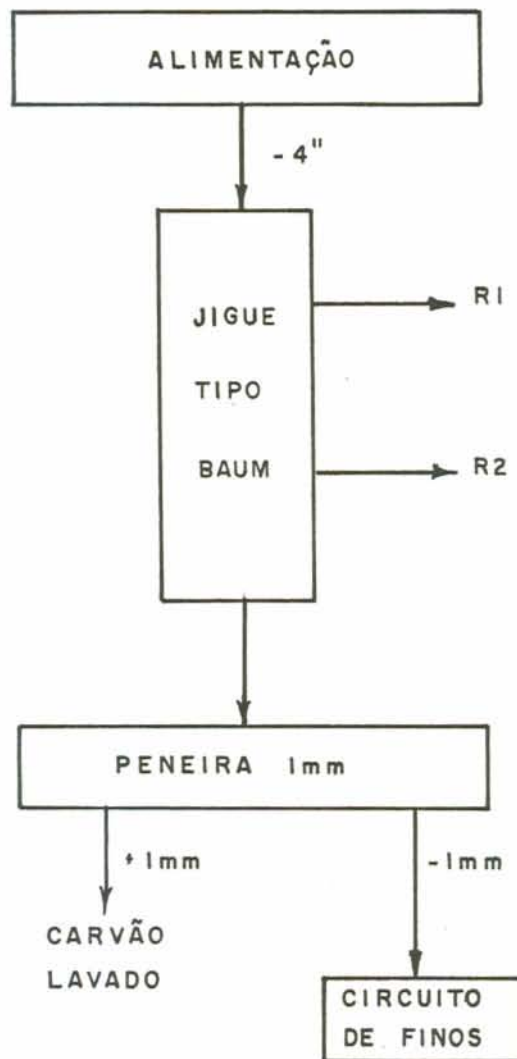


Figura 2: Fluxograma simplificado do Lavador da Mina do Recreio.

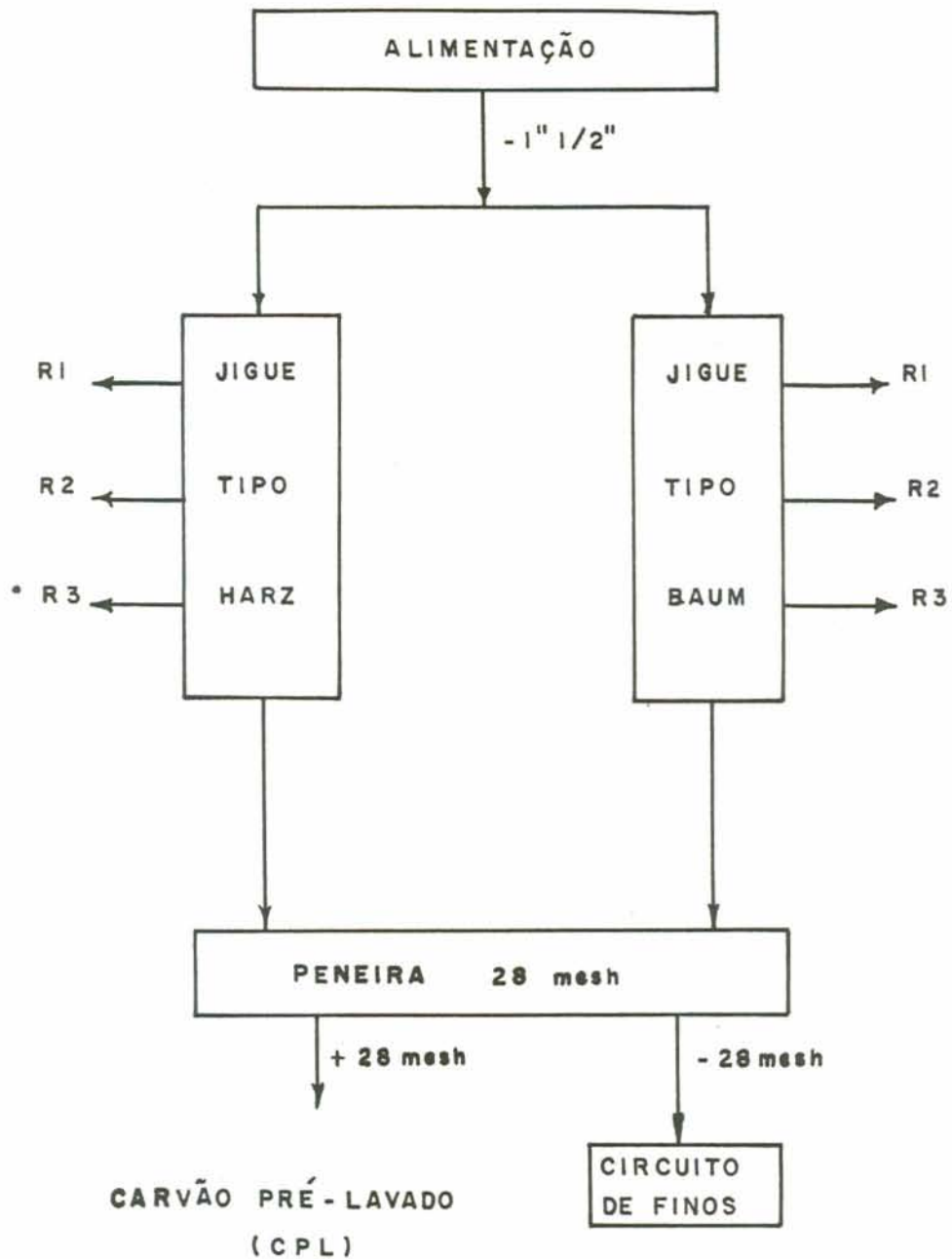


Figura 3: Fluxograma simplificado do Lavador da Mina de São Roque.

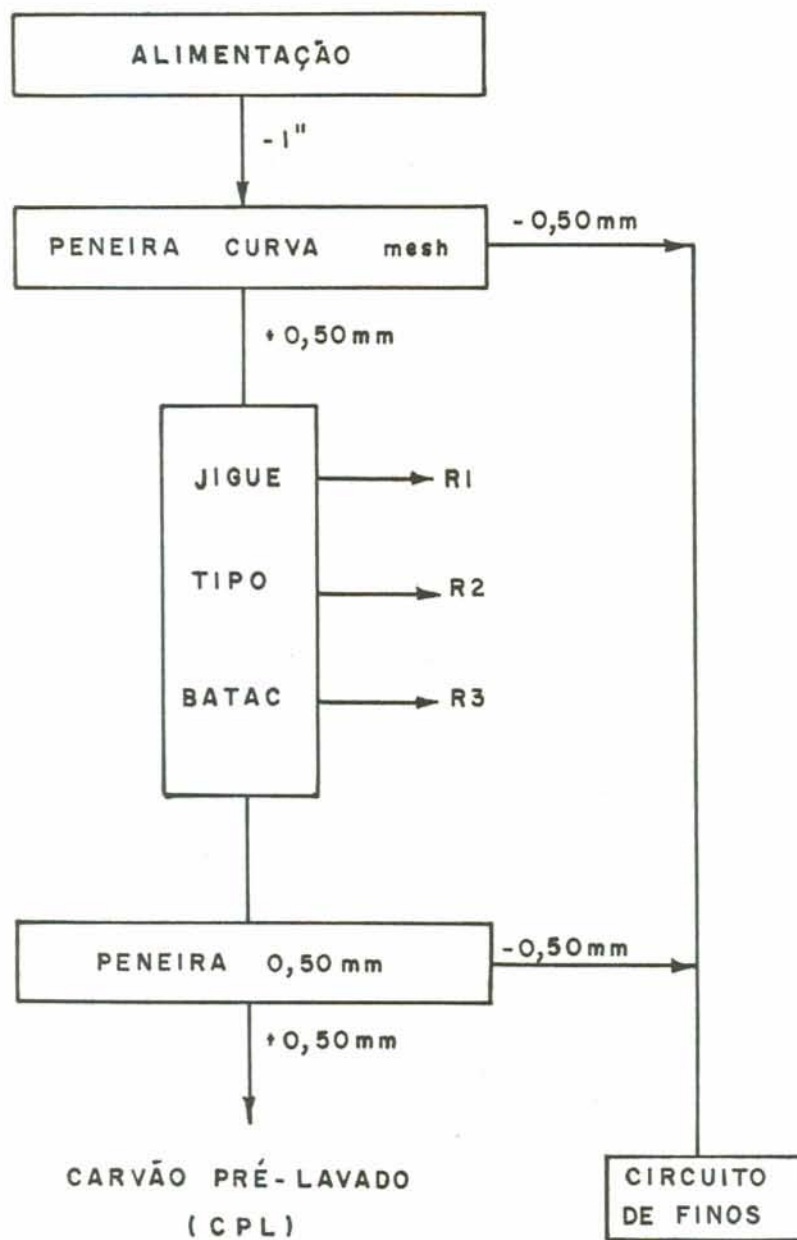


Figura 4: Fluxograma Simplificado do Lavador da Mina do Verdinho.

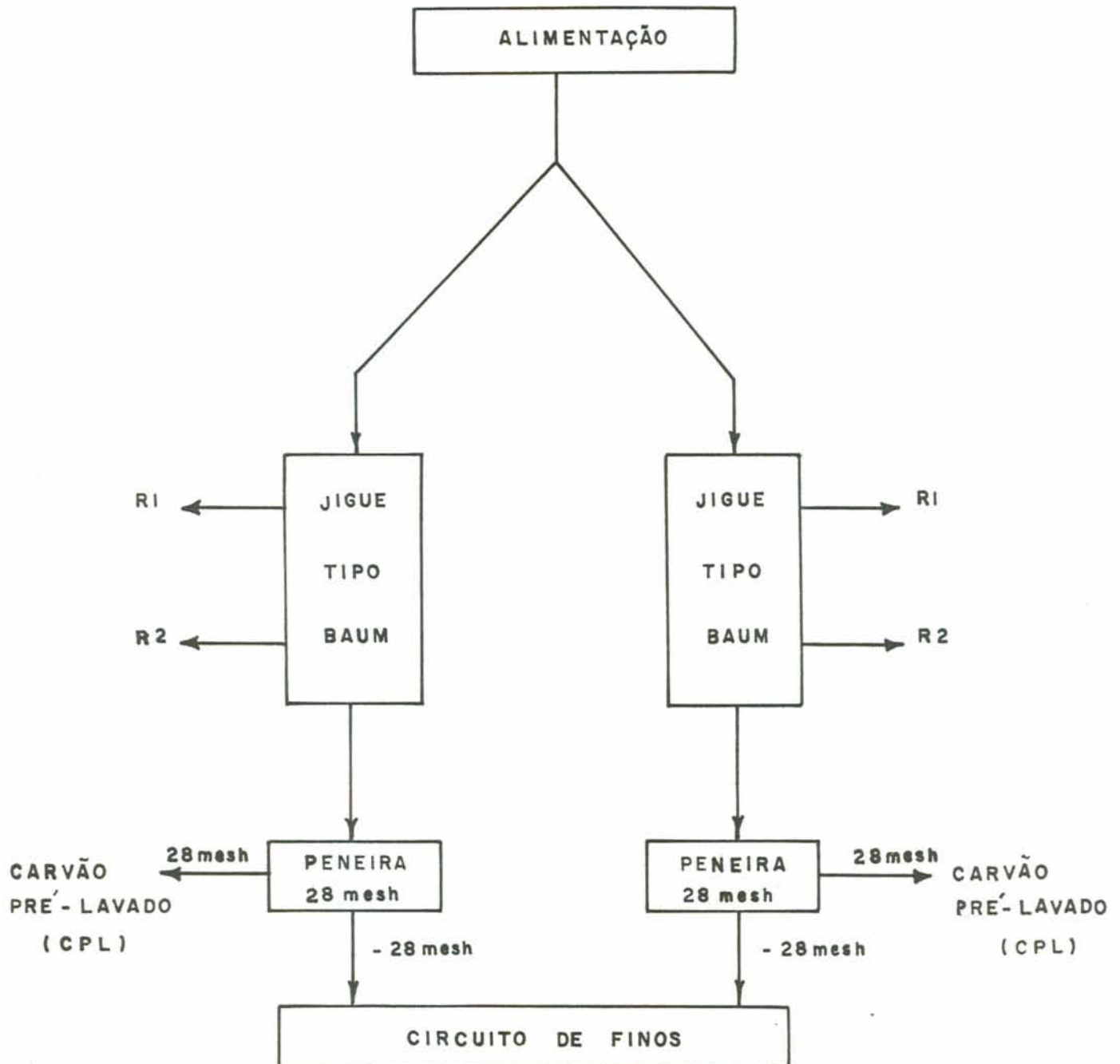


Figura 5: Fluorograma simplificado do Lavador da Mina A, (Sangão).

7.3. LISTAGENS DE PROGRAMAS

Listagem do programa para cálculo dos parâmetros do modelo de Erasmus.

BASIC - Apple II Plus

```

10 HOME
20 REM INICIO DO PROGRAMA ERASMUS
30 CLEAR
40 REM ENTRADA DE DADOS
50 PRINT : PRINT
60 DATA 10,1.35,1.45,1.55,1.65,1.75,1.85,1.95,2.05,2.15,2.6,100
,99.48,97.84,88.47,72.79,56.39,38.34,35.58,32.95,13.15
70 READ NI
80 DIM CP(NI),DE(NI)
90 FOR I = 1 TO NI: READ DE(I): NEXT : REM DENSIDADES MEDIAS
100 FOR I = 1 TO NI: READ CP(I): NEXT : REM COEFICIENTES DE PART
ICAO
110 GOTO 150
150 PRINT "INICIO DO SETOR DE INTERP. DOS DADOS"
160 DIM R(NI),C(NI),M(4,5),V(4),MR(NI)
170 FOR I = 1 TO NI
180 R(I) = DE(I)
190 NEXT I
200 FOR I = 1 TO NI:C(I) = CP(I): NEXT : REM COEFICIENTES DE PA
RTICAO(%)
210 PRINT : PRINT "ENTRE COM AS ESTIMATIVAS": INPUT "T1= ";T1: I
NPUT "T2= ";T2: INPUT "K= ";K: INPUT "C= ";C
215 PR# 1
220 PRINT : PRINT "ESTIMATIVAS INICIAIS:": PRINT "T1= ";T1;" T2=
";T2;" K= ";K;" C= ";C: PRINT
225 PR# 0
230 PP = PP + 1: GOTO 380
240 T2 = T2 - V(1):T1 = T1 - V(2):K = K - V(3):C = C - V(4)
250 IF PP < = 15 GOTO 230
260 PH = 5E - 3: IF ABS (V(1)) > PH OR ABS (V(2)) > PH OR ABS
(V(3)) > PH OR ABS (V(4)) > PH THEN GOTO 230
280 FOR I = 1 TO NI:MR(I) = 100 * (T1 - T2) * (T2 - ATN (K * (R
(I) - C))): NEXT
290 FOR I = 1 TO NI:E = E + (MR(I) - C(I)) ^ 2: NEXT :E = (E / (
NI - 1)) ^ .5
305 PR# 1
310 PRINT " T1= ";T1;" T2= ";T2;" K= ";K;" C= ";C
320 PRINT : PRINT "DESVIO PADRAO= ";E: PRINT
330 FOR I = 1 TO NI
340 PRINT " D= ";R(I);: PRINT TAB( 15)" R= ";C(I);: PRINT TAB(
30)" RC= ";MRC(I)
350 NEXT
360 PRINT
365 PR# 0
370 PRINT "*****FIM DO PROGRAMA*****": END
380 PRINT " ITERACAO ";PP
390 PRINT "T1= ";T1,"T2= ";T2,"K= ";K,"C= ";C
400 REM INICIO DA SUBROTINA
410 FOR I = 1 TO NI
420 BL = K * (R(I) - C)
430 BN = (R(I) - C) / (1 + BL ^ 2)
440 BM = K / (1 + BL ^ 2)
450 FF = (C(I) + 100 * T2 ^ 2 - 100 * T1 * T2 - 100 * T2 * ATN (
BL) + 100 * T1 * ATN (BL))

```

```

460 F2 = - 100 * T1 + 200 * T2 - 100 * ATN (BL)
470 F1 = - 100 * T2 + 100 * ATN (BL)
480 FK = - 100 * T2 * BN + 100 * T1 * BN
490 FC = - 100 * T1 * BM + 100 * T2 * BM
500 KK = - 200 * T1 * K * (BN ^ 2) * (R(I) - C) + 200 * T2 * K *
  (BN ^ 2) * (R(I) - C)
510 CK = - 200 * T2 * BN * BM * BL + 100 * T2 / (1 + BL ^ 2) + 2
00 * T1 * BN * BM * BL - 100 * T1 / (1 + BL ^ 2)
520 KC = CK
530 CC = - 200 * T1 * BN * BM * K ^ 2 + 200 * T2 * BN * BM * K ^
  2
540 M(1,5) = M(1,5) + FF * F2
550 M(2,5) = M(2,5) + FF * F1
560 M(3,5) = M(3,5) + FF * FK
570 M(4,5) = M(4,5) + FF * FC
580 M(1,1) = M(1,1) + F2 ^ 2 + 200 * FF
590 M(1,2) = M(1,2) + F1 * F2 - 100 * FF
600 M(1,3) = M(1,3) + FK * F2 - FF * 100 * BN
610 M(1,4) = M(1,4) + FC * F2 + FF * 100 * BM
630 M(2,2) = M(2,2) + F1 ^ 2
640 M(2,3) = M(2,3) + FK * F1 + FF * 100 * BN
650 M(2,4) = M(2,4) + FC * F1 - FF * 100 * BM
680 M(3,3) = M(3,3) + FK ^ 2 + FF * KK
690 M(3,4) = M(3,4) + FC * FK + FF * KC
730 M(4,4) = M(4,4) + FC ^ 2 + FF * CC
735 M(2,1) = M(1,2):M(3,1) = M(1,3):M(3,2) = M(2,3):M(4,1) = M(1,
  4):M(4,2) = M(2,4):M(4,3) = M(3,4)
740 NEXT
750 AL = 4:AC = 5:AP = 3
760 FOR P = 1 TO AP:A = 0
770 FOR I = P TO AL:A = A + 1:V(A) = M(I,P): NEXT :A = AL - P +
  1
780 FOR I = 2 TO A: IF ABS (V(1)) < ABS (V(I)) THEN V(1) = V(I)
  )
790 NEXT
800 FOR I = P TO AL: IF V(1) = M(I,P) THEN A = I
810 NEXT
820 FOR I = P TO AC:B = M(P,I):M(P,I) = M(A,I):M(A,I) = B: NEXT
  :A = P + 1
830 FOR I = A TO AL:M(I,P) = - M(I,P) / M(P,P): NEXT
840 FOR I = A TO AL: FOR J = A TO AC:M(I,J) = M(I,P) * M(P,J) +
  M(I,J): NEXT : NEXT : NEXT
850 FOR I = 1 TO AL:V(I) = 0: NEXT :AK = AC
860 FOR I = 1 TO AL:AK = AK - 1:S = 0
870 FOR J = 1 TO AL:S = S + V(J) * M(AK,J): NEXT
880 V(AK) = (M(AK,AC) - S) / M(AK,AK): NEXT
890 FOR I = 1 TO AL: FOR J = 1 TO AC:M(I,J) = 0: NEXT : NEXT
900 GOTO 240

```

Listagem do programa para cálculo dos parâmetros do modelo da
Tangente Hiperbólica.

BASIC - Apple II Plus


```

10 HOME
20 REM INICIO DO PROGRAMA TANGENTE HIPERBOLICA
30 CLEAR
40 REM ENTRADA DE DADOS
50 PRINT : PRINT
60 DATA 11,1.27,1.35,1.45,1.55,1.65,1.75,1.85,1.95,2.05,2.15,2.
6,94.91,91.43,90.85,86.86,77.64,64.84,30.3,21.89,21.38,7.52,1.75
70 READ NI
80 PRINT "INICIO DO SETOR DE INTERPOLACAO DE DADOS"
90 DIM R(30),C(30),M(4,5),V(4),MR(30)
100 FOR I = 1 TO NI: READ R(I): NEXT
110 FOR I = 1 TO NI: READ C(I): NEXT
120 DEF FN TH(X) = ((1 - EXP (- 2 * X)) / (1 + EXP (- 2 * X
)))
130 DEF FN SH(X) = (2 / ( EXP (X) + EXP (- X)))
140 PRINT : PRINT "ENTRE COM AS ESTIMATIVAS": INPUT "C=";C: INPU
T "A=";A: INPUT "K=";K: INPUT "X0=";X0
150 PR# 1: PRINT : PRINT "ESTIMATIVAS INICIAIS": PRINT " C = ";C
;" A = ";A;" K = ";K;" X0 = ";X0: PR# 0
160 PP = PP + 1: GOSUB 310
170 A = A - V(1):C = C - V(2):K = K - V(4):X0 = X0 - V(3)
180 IF PP < = 8 THEN GOTO 160
190 PH = 5E - 6: IF ABS (V(1)) > PH OR ABS (V(2)) > PH OR ABS
(V(3)) > PH OR ABS (V(4)) > PH THEN GOTO 160
200 FOR I = 1 TO NI:MR(I) = 100 * (A + C * FN TH(K * (X0 - R(I)
))): NEXT
210 FOR I = 1 TO NI:E = E + (MR(I) - C(I)) ^ 2: NEXT :E = (E / (
NI - 1)) ^ .5
220 PR# 1: PRINT
230 FOR I = 1 TO NI
240 PRINT " DE = ";R(I);: PRINT TAB( 15)" CP = ";C(I);: PRINT
TAB( 30)" MCP = ";MR(I)
250 NEXT
260 PRINT : PRINT " ITERACOES = ";PP: PRINT
270 PRINT " C = ";C;" A = ";A;" K = ";K;" X0 = ";X0: PRINT
280 PRINT "DESVIO PADRAO = ";E: PRINT
290 PR# 0
300 END
310 PRINT "INTERACAO";PP
320 PRINT "C=";C,"A=";A,"K=";K,"X0=";X0
330 REM INICIO DA SUBROTINA
340 FOR I = 1 TO NI
350 PI = K * (X0 - R(I))
360 Q = (X0 - R(I))
370 TH = FN TH(PI)
380 T2 = TH ^ 2
390 SH = FN SH(PI)
400 S2 = SH ^ 2
410 F = 100 * A + 100 * C * TH - C(I)
420 QQ = 2 * F - 100 * A + C(I)
430 G = TH * F
440 K2 = C * Q * S2 * F
450 H = C * K * S2 * F
460 FC = 100 * TH

```

```

470 FK = 100 * C * Q * S2
480 FX = 100 * C * K * S2
490 GC = 100 * T2
500 GK = Q * S2 * QQ
510 GX = K * S2 * QQ
520 KK = C * Q ^ 2 * TH * S2 * (- 2 * F + 100 * C * S2 / TH)
530 HK = C * S2 * (TH * (K * Q * (- 2 * F) + 100 * C) + (100 * A
+ 100 * C * K * Q * S2 - C(I)))
540 HX = C * K ^ 2 * TH * S2 * (- 2 * F) + 100 * (C * K * S2) ^
2
550 M(1,5) = M(1,5) + F
560 M(2,5) = M(2,5) + G
570 M(3,5) = M(3,5) + H
580 M(4,5) = M(4,5) + K2
590 M(1,2) = M(1,2) + FC
600 M(1,3) = M(1,3) + FX
610 M(1,4) = M(1,4) + FK
620 M(2,2) = M(2,2) + GC
630 M(2,3) = M(2,3) + GX
640 M(2,4) = M(2,4) + GK
650 M(3,3) = M(3,3) + HX
660 M(3,4) = M(3,4) + HK
670 M(4,4) = M(4,4) + KK
680 NEXT
690 M(2,1) = M(1,2):M(3,1) = M(1,3):M(3,2) = M(2,3):M(4,1) = M(1,
4):M(4,2) = M(2,4):M(4,3) = M(3,4)
700 M(1,1) = 100 * NI
710 AL = 4:AC = 5:AP = 3
720 FOR P = 1 TO AP:AA = 0
730 FOR I = P TO AL:AA = AA + 1:V(AA) = M(I,P): NEXT :AA = AL -
P + 1
740 FOR I = 2 TO AA: IF ABS (V(1)) < ABS (V(I)) THEN V(1) = V(
I)
750 NEXT
760 FOR I = P TO AL: IF V(1) = M(I,P) THEN AA = I
770 NEXT
780 FOR I = P TO AC:B = M(P,I):M(P,I) = M(AA,I):M(AA,I) = B: NEX
T :AA = P + 1
790 FOR I = AA TO AL:M(I,P) = - M(I,P) / M(P,P): NEXT
800 FOR I = AA TO AL: FOR J = AA TO AC:M(I,J) = M(I,P) * M(P,J)
+ M(I,J): NEXT : NEXT : NEXT
810 FOR I = 1 TO AL:V(I) = 0: NEXT
820 TA = AC
830 FOR I = 1 TO AL:TA = TA - 1:S = 0
840 FOR J = 1 TO AL:S = S + V(J) * M(TA,J): NEXT
850 V(TA) = (M(TA,AC) - S) / M(TA,TA): NEXT
860 FOR I = 1 TO AL: FOR J = 1 TO AC:M(I,J) = 0: NEXT : NEXT
870 RETURN

```

Listagem do programa para cálculo dos parâmetros do modelo da
Tangente Hiperbólica Modificado.
BASIC - Apple II Plus

```

10 HOME
20 REM INICIO DO PROGRAMA TANGENTE HIPERBOLICA
30 CLEAR
40 REM ENTRADA DE DADOS
50 PRINT : PRINT
60 DATA 11,1.27,1.35,1.45,1.55,1.65,1.75,1.85,1.95,2.05,2.15,2.
6,94.91,91.43,90.85,86.86,77.64,64.84,30.3,21.89,21.38,7.52,1.75
70 READ NI
80 PRINT "INICIO DO SETOR DE INTERPOLACAO DE DADOS"
90 DIM R(NI),C(NI),M(5,6),V(5),MR(NI)
100 FOR I = 1 TO NI: READ R(I): NEXT
110 FOR I = 1 TO NI: READ C(I): NEXT
120 DEF FN TH(X) = ((1 - EXP (- 2 * X)) / (1 + EXP (- 2 * X
)))
130 DEF FN SH(X) = (2 / ( EXP (X) + EXP (- X)))
140 PRINT : PRINT "ENTRE COM AS ESTIMATIVAS": INPUT "C=";C: INPU
T "A=";A: INPUT "K=";K: INPUT "X0=";X0: INPUT "B=";B: PRINT
150 PR# 1: PRINT : PRINT "ESTIMATIVAS INICIAIS : ": PRINT " C =
";C;" A = ";A;" K = ";K;" X0 = ";X0;" B = ";B: PRINT
: PR# 0
160 PP = PP + 1: GOSUB 300
170 A = A - V(1):C = C - V(2):K = K - V(4):X0 = X0 - V(3):B = B -
V(5)
180 IF PP < = 15 THEN GOTO 160
190 PH = 5E - 3: IF ABS (V(1)) > PH OR ABS (V(2)) > PH OR ABS
(V(3)) > PH OR ABS (V(4)) > PH OR ABS (V(5)) > PH THEN GOTO 16
0
200 FOR I = 1 TO NI:MR(I) = 100 * (A + C * FN TH(K * (X0 - R(I)
)) + B * R(I)): NEXT
210 FOR I = 1 TO NI:E = E + (MR(I) - C(I)) ^ 2: NEXT :E = (E / (
NI - 1)) ^ .5
220 PR# 1
230 FOR I = 1 TO NI
240 PRINT " DE = ";R(I); TAB( 20)" C = ";C(I); TAB( 35)" MC = ";
MR(I)
250 NEXT
260 PRINT : PRINT " C = ";C;" A = ";A;" K = ";K;" X0 = ";X0;" B
= ";B
270 PRINT : PRINT "NUMERO DE ITERACOES = ";PP: PRINT
280 PRINT "DESVIO PADRAO = ";E: PRINT
290 END
300 PRINT "INTERACAO";PP
310 PRINT "C=";C,"A=";A,"K=";K,"X0=";X0,"B=";B
320 REM INICIO DA SUBROTINA
330 FOR I = 1 TO NI
340 PI = K * (X0 - R(I))
350 Q = (X0 - R(I))
360 TH = FN TH(PI)
370 T2 = TH ^ 2
380 SH = FN SH(PI)
390 S2 = SH ^ 2
400 QQ = 100 * A + 200 * C * TH - C(I) + 100 * B * R(I)
410 F = QQ - 100 * C * TH
420 G = TH * F

```



```

430 K2 = C * 0 * S2 * F
440 H = C * K * S2 * F
450 B2 = R(I) * F
460 FC = 100 * TH
470 FK = 100 * C * 0 * S2
480 FX = 100 * C * K * S2
490 FB = 100 * R(I)
500 GC = 100 * T2
510 GK = 0 * S2 * 00
520 GX = K * S2 * 00
530 GB = 100 * TH * R(I)
540 KK = C * 0 ^ 2 * TH * S2 * (100 * C * S2 / TH - 2 * F)
550 KX = C * TH * S2 * 0 * K * (- 2 * F) + C * S2 * (00 - 100 *
C * TH + 100 * C * K * 0 * S2)
560 KB = 100 * C * 0 * S2 * R(I)
570 HX = C * K ^ 2 * TH * S2 * (200 * B * R(I) - 2 * F) + 100 * C
^ 2 * K ^ 2 * S2 ^ 2 - K ^ 2 * S2 * TH * B * C * R(I) * 200
580 HB = 100 * C * K * S2 * R(I)
590 BR = 100 * R(I) ^ 2
600 M(1,6) = M(1,6) + F
610 M(2,6) = M(2,6) + G
620 M(3,6) = M(3,6) + H
630 M(4,6) = M(4,6) + K2
640 M(5,6) = M(5,6) + B2
650 M(1,2) = M(1,2) + FC
660 M(1,3) = M(1,3) + FX
670 M(1,4) = M(1,4) + FK
680 M(1,5) = M(1,5) + FB
690 M(2,2) = M(2,2) + GC
700 M(2,3) = M(2,3) + GX
710 M(2,4) = M(2,4) + GK
720 M(2,5) = M(2,5) + GB
730 M(3,3) = M(3,3) + HX
740 M(3,5) = M(3,5) + HB
750 M(4,3) = M(4,3) + KX
760 M(4,4) = M(4,4) + KK
770 M(4,5) = M(4,5) + KB
780 M(5,5) = M(5,5) + BB: NEXT
790 M(2,1) = M(1,2):M(3,1) = M(1,3):M(3,2) = M(2,3):M(3,4) = M(4,
3):M(4,1) = M(1,4):M(4,2) = M(2,4):M(5,1) = M(1,5):M(5,2) = M(2,5
):M(5,3) = M(3,5):M(5,4) = M(4,5)
800 M(1,1) = 100 * NI
810 AL = 5:AC = 6:AP = 4
820 FOR P = 1 TO AP:AA = 0
830 FOR I = P TO AL:AA = AA + 1:V(AA) = M(I,P): NEXT :AA = AL -
P + 1
840 FOR I = 2 TO AA: IF ABS (V(I)) < ABS (V(I)) THEN V(I) = V(
I)
850 NEXT
860 FOR I = P TO AL: IF V(I) = M(I,P) THEN AA = I
870 NEXT
880 FOR I = P TO AC:ME = M(P,I):M(P,I) = M(AA,I):M(AA,I) = ME: N
EXT :AA = P + 1
890 FOR I = AA TO AL:M(I,P) = - M(I,P) / M(P,P): NEXT
900 FOR I = AA TO AL: FOR J = AA TO AC:M(I,J) = M(I,P) * M(P,J)
+ M(I,J): NEXT : NEXT
910 FOR I = 1 TO AL:V(I) = 0: NEXT
920 TA = AC
930 FOR I = 1 TO AL:TA = TA - 1:S = 0
940 FOR J = 1 TO AL:S = S + V(J) * M(TA,J): NEXT

```

```
950 V(TA) = (M(TA,AC) - S) / M(TA,TA): NEXT  
960 FOR I = 1 TO AL: FOR J = 1 TO AC:M(I,J) = 0: NEXT : NEXT  
970 RETURN
```

Listagem do programa para minimização do sistema de equações das análises densimétricas. Cálculo de balanços de massas.
BASIC - CP300

```

10 CLS
20 REM INICIO DO PROGRAMA SOSIEL
30 INPUT"QUAL O NUMERO DE INCOGNITAS DE SEU SISTEMA ";N
40 CLS:INPUT"QUAL O NUMERO DE EQUACOES DO SEU SISTEMA ";NE
50 M=N+1
60 DIMME(NE,M),V(N),M(N,M)
70 PRINT"SEU SISTEMA DE EQUACOES DEVE ESTAR EM FORMA MATRICIAL":P
RINT
80 PRINT"DIGITE OS COEFICIENTES DA COLUNA 1 , SEGUIDA PELA COLUNA
2, ETC."
90 FORJ=1TOM:FORI=1TONE:PRINT"M(";I;",";J;) = ";:INPUTME(I,J):NE
XT:NEXT
100 PRINT:PRINT"QUER FAZER CORRECOES (S ou N) ?"
110 R$=INKEY$:IFR$=""THEN110
120 IFR$="S"THENINPUT"LINHA,COLUNA,DADO CORRETO";I,J,ME(I,J):ONER
RORGOTO450 :PRINT:PRINT"M(";I;",";J;) = ";ME(I,J):GOTO100
130 IFR$="N"THEN150
140 GOTO100
150 CLS:' INICIO MINIMIZACAO
155 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT"
AGUARDE"
160 FOR I=1 TO N
170 FOR J=1 TO N
180 IF I=J THEN GOTO 210
190 FOR K=1 TO NE : M(I,J)=M(I,J)+ME(K,J)*ME(K,I) : NEXT
200 GOTO 220
210 FOR K=1 TO NE : M(I,J) = M(I,J) + ME(K,J)[2 : NEXT
220 NEXT
230 NEXT
240 FOR I=1 TO N
250 FOR K=1 TO NE
260 M(I,M)=M(I,M)+ME(K,I)*ME(K,M)
270 NEXT
280 NEXT
290 NP=N-1
300 FORP=1TONP:A=0
310 FORI=PTON:A=A+1:V(A)=M(I,P):NEXT
320 A=N-P+1
330 FORI=2TOA:IFABS(V(1))<ABS(V(I))THENV(1)=V(I)ELSENEXT
340 FORI=PTON:IFV(1)=M(I,P)THENA=IELSENEXT
350 FORI=PTOM:B=M(P,I):M(P,I)=M(A,I):M(A,I)=B:NEXT
360 A=P+1
370 FORI=ATON:M(I,P)=-M(I,P)/M(P,P):NEXT
380 FORI=ATON:FORJ=ATOM:M(I,J)=M(I,P)*M(P,J)+M(I,J):NEXT:NEXT
390 NEXT
400 FORI=1TON:V(I)=0:NEXT
410 T=M
420 FORI=1TON:T=T-1:S=0:FORJ=1TON:S=S+V(J)*M(T,J):NEXT:V(T)=(M(T,
M)-S)/M(T,T):NEXT
430 FORI=1TON:PRINT:PRINT"X(";I;") = ";V(I);:NEXT
440 END
450 I=1:J=1
460 PRINT:RESUME100

```


Listagem do programa para cálculo de balanços de massas por
fórmula de Grumbrecht.

BASIC - CP300

```

10 CLS: ' INICIO DO PROGRAMA GRUBRECHT
20 CLEAR2000:CLS
30 CLS:A$="DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS":Y=1:GOSUB300 :A$
=STRING$(64,CHR$(140)):Y=2:GOSUB300 :A$="==> FORMULA DE GRUMBRE
CHT (=="":Y=3:GOSUB300 :POKE16916,3:D$=STRING$(63," ")
40 PRINT:PRINT:GOTO320
50 CLS:NP$=NM$:GOTO430
60 CLS:DIMAR(NI),CR(NI),MR(NI),M(NI),C(NI)
70 FORI=1TONI
80 AR(I)=WP(I,1)-CP#(I,1):CR(I)=CP#(I,4)-CP#(I,1):MR(I)=CP#(I,2)-
CP#(I,1):M(I)=(CP#(I,2)-CP#(I,1))[2]:C(I)=(CP#(I,4)-CP#(I,1))[2
90 NEXT
100 FORI=1TONI
110 S1=S1+AR(I)*CR(I):S2=S2+M(I):S3=S3+AR(I)*MR(I):S4=S4+CR(I)*MR
(I):S5=S5+C(I):S6=S6+M(I)
120 NEXT
130 VC=(S1*S2-S3*S4)/(S5*S6-(S4)[2]:VM=(S3*S5-S1*S4)/(S5*S6-(S4)[
2]:VR=1-VC-VM
140 VC=VC*100:VM=VM*100:VR=VR*100
150 CLS
160 PRINT"REC.R1","REC.R2","REC.CL"
170 PRINT VR,VM,VC
180 A$="QUER CORRIGIR O ARQUIVO DE PARTICAO (S/N)?:Y=7:X=0:GOSUB
310
190 E$=INKEY$:IFE$="N"THEN POKE16916,0:CLS:END ELSE IFE$="S"TH
EN GOTO200 ELSE GOTO190
200 RC#=VC:R2#=VM:R1#=VR
210 KILL NP$
220 OPEN"R",1,NP$,40
230 FORI=1TONI
240 FIELD 1,8 AS B$(1),8 AS B$(2),8 AS B$(3),8 AS B$(4),8 AS B$(5
)
250 LSET B$(1)=MKD$(DE#(I)):LSET B$(2)=MKD$(CP#(I,1)):LSET B$(3)=
MKD$(CP#(I,2)):LSET B$(4)=MKD$(CP#(I,4))
260 IFI=1 THEN LSETB$(5)=MKD$(RC#) ELSE IFI=2 LSETB$(5)=MKD$(R
1#) ELSE IF I=3 THEN LSETB$(5)=MKD$(R2#)
270 PUT1,I
280 NEXT
290 CLOSE 1:POKE16916,0:CLS:END
300 H%=(64*(Y-1)+(64-LEN(A$))/2):PRINT@H%,A$;:RETURN
310 H%=(64*(Y-1)+X):PRINT@H%,A$;:RETURN
320 A$="DIGITE O NOME DO ARQUIVO DE PARTICAO :":Y=10:GOSUB310 :
LINEINPUTNM$
330 OPEN"R",1,NM$,40
340 FIELD 1,8 AS B$(1),8 AS B$(2),8 AS B$(3),8 AS B$(4),8 AS B$(5
)
350 NI=LOF(1)
360 DIM DE#(NI):DIMCP#(NI,10)
370 FORI=1TONI
380 GET 1,I
390 DE#(I)=CVD(B$(1)):CP#(I,1)=CVD(B$(2)):CP#(I,2)=CVD(B$(3)):CP#
(I,4)=CVD(B$(4))
400 IF I=1 THEN RC#=CVD(B$(5)) ELSE IF I=2 THEN R1#=CVD(B$(5)) EL
SE IF I=3 THEN R2#=CVD(B$(5))
410 NEXTI
420 CLOSE 1:GOTO50
430 A$="DIGITE O NOME DO ARQUIVO DE LAVABILIDADE :":Y=10:GOSUB310
:LINEINPUTNM$
440 OPEN"R",1,NM$,26
450 FIELD 1, 10 AS E$(1),8 AS B$(2),8 AS B$(3)
460 NP=LOF(1):DIMDP(NP):DIMWP(NP,3):DIMCZ(NP)
470 FORI=1TONP
480 GET1,I

```

```
490 DP(I)=CVD(B$(1)):WP(I,1)=CVD(B$(2)):CZ(I)=CVD(B$(3))
500 NEXT I
510 CLOSE 1:CLS:GOTO60
```

Listagem do programa para cálculo de coeficientes de partição e dos critérios independentes (Modelo de Lagrange). Aparelhos de dois produtos.

BASIC - CP300


```

10 CLS: ' INICIO DO PROG. TROMP2PL
20 CLEAR2000:CLS
30 CLS:A$="DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS":Y=1:GOSUB630 :A$
=STRING$(64,CHR$(140)):Y=2:GOSUB630 :A$="==> CURVAS DE PARTICAO
<==":Y=3:GOSUB630 :POKE16916,3:D$=STRING$(63," ")
40 PRINT:PRINT
50 GOSUB 1630
60 GOSUB1600
70 E$=INKEY$:IFE$="3"THENCLS:GOTO1190 ELSEIFE$="1"THENCLS:GOTO138
0 ELSE IFE$="2"THENGOSUB80 :GOTO180 ELSE GOTO70
80 CLS:INPUT"RECUPERACAO DO CARVAO LAVADO (%)" ;RC#
90 INPUT"RECUPERACAO DO REJEITO (%)" ;RR#
100 INPUT"NUMERO DE INTERVALOS (%)" ;NI
110 DIMDE#(NI),CP#(NI,10)
120 FORI=1TONI
130 PRINT"INTRODUSA A DENSIDADE " ;I:INPUTDE#(I)
140 PRINT"INTRODUSA A MASSA DE FLUTUADO " ;I:INPUTCP#(I,1)
150 PRINT "INTRODUSA A MASSA DE AFUNDADO " ;I:INPUTCP#(I,4):CLS
160 NEXT
170 RETURN
180 CLS:PRINT:PRINT"DENSIDADE","CARVAO LAVADO","REJEITO"
190 PRINT:FORI=1TONI
200 IFI=1THENPRINT" -";DE#(I),CP#(I,1),CP#(I,4):GOTO230
210 IFI=NITHENPRINT" +" ;DE#(I-1),CP#(I,1),CP#(I,4):GOTO230
220 PRINTDE#(I-1)"-DE#(I),CP#(I,1),CP#(I,4)
230 NEXT
240 A$="PARA CONTINUAR DIGITE QQ TECLA":Y=16:GOSUB630
250 E$=INKEY$:IFE$=""THEN250
260 CLS:A$="==> REALIZANDO OS CALCULOS <==":Y=13:GOSUB630
270 FORI=1TONI 'CALCULOS *****
280 TC#=TC#+CP#(I,1):TR#=TR#+CP#(I,4):NEXT
290 FORI=1TONI
300 CP#(I,2)=CP#(I,1)*RC#/100
310 CP#(I,5)=CP#(I,4)*RR#/100
320 CP#(I,7)=CP#(I,2)+CP#(I,5):CP#(I,3)=CP#(I,2)/CP#(I,7)*100
330 CP#(I,6)=CP#(I,5)/CP#(I,7)*100:CP#(I,8)=CP#(I,3)+CP#(I,6)
340 FORJ=1TO8:T#(J)=T#(J)+CP#(I,J):NEXT
350 NEXT
360 CLS:A$="QUER IMPRESSAO DA TABELA DE PARTICAO (S/N)? " :Y=7:X=0
:GOSUB640
370 E$=INKEY$:IFE$="S"THEN CLS:GOTO390 ELSE IF E$="N" CLS:GOTO
610 ELSE GOTO370
380 IF R$="N"GOTO 610
390 CLS:A$="POSICIONE O PAPEL NA IMPRESORA-DIGITE QQ TECLA":Y=14:
GOSUB630
400 E$=INKEY$:IFE$=""THEN400
410 CLS:PRINT"IMPRIMINDO RESULTADOS DA CURVA DE PARTICAO"
420 REM **IMPRESSAO**
430 LPRINTCHR$(27)CHR$(20):LPRINTTAB(25);STRING$(25,CHR$(140)):LP
RINTTAB(25);"*** CURVA DE PARTICAO ***":LPRINTTAB(25);STRING$(25,
CHR$(140)):LPRINT:LPRINT
440 LPRINTTAB(10);NM$:LPRINT:LPRINT
450 LPRINTTAB(10);"CARVAO LAVADO - YC : ";USING"###.##";RC#;:LPRI
NT" %";:LPRINTTAB(55);USING"REJEITO - YR : ##.##";RR#;:LPRINT" %
"
460 LPRINTSTRING$(80,"-"):LPRINT"DENSIDADE";TAB(11);"M (%)":TAB(1
8)"M(%)*YC"TAB(26)"C.P.CL"TAB(34)"M (%)"TAB(41)"M(%)*YR"TAB(49)"C
.P.R"TAB(57)"ALIM.REC."TAB(67)"COEF.PART.":LPRINTSTRING$(80,"-")
470 FORI=1TONI
480 IFI=1THENLPRINT"-";:LPRINTUSING"###.##";DE#(I);
490 IFI=NITHENLPRINT"+";:LPRINTUSING"###.##";DE#(I-1);
500 IFI>1 AND I<NI THEN LPRINTUSING"###.##"; DE#(I-1);:LPRINT"-";:L
PRINTUSING"###.##";DE#(I);

```

```

510 LPRINTTAB(11);USING"###.##";CP#(I,1);
520 LPRINTTAB(18);USING"###.##";CP#(I,2);
530 LPRINTTAB(26);USING"###.##";CP#(I,3);
540 LPRINTTAB(33);USING"###.##";CP#(I,4);
550 LPRINTTAB(41);USING"###.##";CP#(I,5);
560 LPRINTTAB(49);USING"###.##";CP#(I,6);
570 LPRINTTAB(57);USING"###.##";CP#(I,7);
580 LPRINTTAB(67);USING"###.##";CP#(I,8)
590 IFI=NITHENLPRINTSTRING$(80,"=")
600 NEXT
610 I=NI
620 CLS:GOTO650
630 H%=(64*(Y-1)+(64-LEN(A$))/2):PRINT@H%,A$;:RETURN
640 H%=(64*(Y-1)+X):PRINT@H%,A$;:RETURN
650 REM INICIO DO PROGRAMA TROMP
660 CLS
670 DEFDBLB-E:DEFDBLM-V:DEFDBLX-Y:DEFSNGP
680 N=I
690 DIMR(N+2):DIMC(N+2)
700 A$="===)REALIZANDO OS CALCULOS(===":Y=13:GOSUB630
710 FORI=1TON
720 IFI=1THENR(I)=DE#(I)-.03:GOTO750
730 IFI=NTHENR(I)=DE#(I-1)+.4:GOTO750 'DENSIDADES MEDIAS
740 R(I)=(DE#(I)+DE#(I-1))/2
750 NEXTI
760 FORI=1TON:C(I)=CP#(I,3):NEXT 'COEFICIENTES DE PARTICAO (%)
770 FORI=NT01STEP-1:R(I+1)=R(I):C(I+1)=C(I):NEXT
780 R(1)=1:R(N+2)=4:C(1)=100:C(N+2)=0 'AJUSTE DOS ESTREMOS
790 N=N+2
800 CP=50:GOSUB1100
810 D5=DP:DP=0
820 CP=75:GOSUB1100
830 D7=DP:DP=0
840 CP=25:GOSUB1100
850 D2=DP:DP=0
860 FORI=1TON
870 IFPA<>0THENGOTO890
880 IFD5<R(I)THEN PA=I
890 NEXT
900 DIMRR(N+1),CC(N+1)
910 FORI=1TON+1
920 IFI<PA THENRR(I)=R(I):CC(I)=C(I)
930 IFI>PA THENRR(I)=R(I-1):CC(I)=C(I-1)
940 NEXT
950 RR(PA)=D5:CC(PA)=50:NA=N+1:RE=PA-2:RD=NA-PA-1
960 IFRE<=0THENGOTO990
970 FORI=1TORE:AR=AR+(RR(I+2)-RR(I+1))*(100-CC(I+1))*5:AT=AT+(RR(I+2)-RR(I+1))*(CC(I+1)-CC(I+2))*2.5:NEXT
980 M1=AR+AT:AR=0:AT=0
990 IFRD<=0THENGOTO1020
1000 FORI=1TORD:AR=AR+(RR(PA+I)-RR(PA+I-1))*CC(PA+I)*5:AT=AT+(RR(PA+I)-RR(PA+I-1))*(CC(PA+I-1)-CC(PA+I))*2.5:NEXT
1010 M2=AR+AT:AR=0:AT=0:AE=M1+M2
1020 CLS:A$="QUER IMPRESSAO DOS INDICES (S/N)?:Y=7:X=0:GOSUB640

1030 E$=INKEY$:IF E$="S"THEN CLS:GOTO 1040 ELSE IF E$="N" THEN C
LS:GOTO1090 ELSE GOTO1030
1040 EPM=(D2-D7)/2:XM=(D2-D7)/(2*(D5-1))
1050 LPRINT" D75=";D7:LPRINT" D50=";D5:LPRINT" D25=";D2
1060 LPRINT" EPM=";EPM:LPRINT" IMP=";XM
1070 LPRINT"AREA DE ERRO : ":LPRINT" AE ( D50 = ";M1:LPRINT"
AE ) D50 = ";M2:LPRINT" AE TOTAL = ";AE
1080 LPRINTSTRING$(80,"=")

```



```

1090 PRINT:PRINT"*****FIM*****"
*****":POKE16916,0:END
1100 'DETERMINACAO DE DENSIDADES
1110 IFCP>C(1)THENDP=R(1):RETURN
1120 IFCP<C(NI)THENDP=R(NI):RETURN
1130 FORI=1TON
1140 IFC(I)<CPTHENNM=I:I=N
1150 NEXT
1160 NA=NM-1
1170 DP=(CP-C(NM))/(C(NA)-C(NM))*R(NA)+(CP-C(NA))/(C(NM)-C(NA))*R
(NM)
1180 RETURN
1190 GOSUB 1780
1200 A$="DIGITE O NOME DO ARQUIVO DE DADOS :":Y=10:GOSUB640 :LI
NEINPUTNM$
1210 IF LEFT$(NM$,5)<>"ARQ2P"THEN GOTO 1200
1220 FORI=1TOZZ
1230 IF NM$ = LEFT$(NM$(I),LEN(NM$)) THEN CT=1
1240 NEXT
1250 IF CT=0 THEN GOTO 1200
1260 CT=0
1270 OPEN"R",1,NM$,32
1280 FIELD 1,8 AS B$(1),8 AS B$(2),8 AS B$(3),8 AS B$(4)
1290 NI=LOF(1)
1300 DIM DE$(NI):DIMCP$(NI,10)
1310 FORI=1TONI
1320 GET 1,I
1330 DE$(I)=CVD(B$(1)):CP$(I,1)=CVD(B$(2)):CP$(I,4)=CVD(B$(3))
1340 IF I=1 THEN RC#=CVD(B$(4))
1350 IFI=2 THEN RR#=CVD(B$(4))
1360 NEXTI
1370 CLOSE 1:GOTO180
1380 GOSUB 1780
1390 A$="DIGITE O NOME DO ARQUIVO DOS DADOS A ARMAZENAR :":X=0:Y
=10:GOSUB640 :LINEINPUTNM$
1400 IF LEFT$(NM$,5)<>"ARQ2P"THEN GOTO1390
1410 GOSUB80
1420 OPEN "R",1,NM$,32
1430 FORI=1TONI
1440 FIELD 1,8 AS B$(1),8 AS B$(2),8 AS B$(3),8 AS B$(4)
1450 LSET B$(1)=MKD$(DE$(I)):LSET B$(2)=MKD$(CP$(I,1)):LSETB$(3)=
MKD$(CP$(I,4))
1460 IFI<>1 GOTO 1480
1470 LSET B$(4)=MKD$(RC#)
1480 IF I<>2 GOTO 1500
1490 LSET B$(4)=MKD$(RR#)
1500 PUT 1,I
1510 NEXT
1520 CLOSE 1
1530 NQ$="ARQARQ"
1540 OPEN"R",1,NQ$,12
1550 FIELD 1,12 AS NA$
1560 I=LOF(1):I=I+1
1570 LSET NA$=NM$
1580 PUT 1,I
1590 CLOSE 1:GOTO 180
1600 CLS
1610 A$="VOCE DESEJA :
(1) - ENTRAR C/DADOS C/ARQUIVO
(2) - ENTRAR C/DADOS S/ARQUIVO
(3) - DADOS JA ARMAZENADOS":Y=7:X=0:GOSUB640
1620 RETURN
1630 'SUBROTINA LE ARQARQ

```

```
1640 NQ$="ARQARQ"  
1650 CLS:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT"INSIRA DISCO DE DADOS E DIGITE Q  
Q TECLA"  
1660 E$=INKEY$:IF E$(">)" GOTO 1670 ELSE GOTO 1660  
1670 OPEN"R",1,NQ$,12  
1680 FIELD 1,12 AS NA$  
1690 GET 1,1:IF NA$="TENDE OUTRO "THEN CLOSE 1:GOTO 10  
1700 ZZ=LOF(1)  
1710 DIM NM$(ZZ)  
1720 FOR I=1 TO ZZ  
1730 GET 1,I  
1740 NM$(I)=NA$  
1750 NEXT  
1760 CLOSE 1  
1770 RETURN  
1780 'SUBROTINA ESCRIVE PARTICAO  
1790 FOR I=1 TO ZZ  
1800 IF LEFT$(NM$(I),5)="ARQ2P" THEN PRINT NM$(I),  
1810 NEXT  
1820 RETURN
```