

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

**ESTUDO PARA A UTILIZAÇÃO DE ESPIRAIS DE REICHERT LD 9 NO
CIRCUITO DE FINOS DO LAVADOR DO RECREIO, COPELMI**

por

LUIS AUGUSTO COLEMBERGUE KLUJSZO

Engenheiro de Minas

**Trabalho realizado no Laboratório de Processamento de
Minerais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e dos Materiais - LAPROM, PPGEMM, UFRGS.**

Porto Alegre, 1993.

**ESTUDO PARA A UTILIZAÇÃO DE ESPIRAIS DE REICHERT LD 9 NO
CIRCUITO DE FINOS DO LAVADOR DO RECREIO, COPELMI**

DISSERTAÇÃO

**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

LUIS AUGUSTO COLEMBERGUE KLUJSZO - Engenheiro de Minas

1993

Esta Dissertação foi julgada adequada para a 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 em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais da UFRGS.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio
Departamento de Engenharia Metalúrgica - UFRGS

Banca Examinadora:

Eng. Alexandre Grigorieff
Gerente de Beneficiamento - COPELMI

Prof. Dr. André Jablonski
Departamento de Engenharia de Minas - UFRGS

Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio
Departamento de Engenharia Metalúrgica - UFRGS

Dr. Jan Papée
ICON - Industrial Conventos - Criciúma

Coordenador do PPGEMM

Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio
Doutor em Engenharia

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio, orientador, por todo seu esforço e dedicação para que a realização deste trabalho se concretizasse. Prof. Sampaio vem por longo tempo, desde os tempos da graduação, quer ministrando disciplinas, quer como orientador de bolsa de iniciação científica, mostrando toda sua capacidade de proferir ensinamentos de grande valia a pessoas que, como eu, pretendem prosseguir com a difícil carreira acadêmica.

Ao Eng. Alexandre Grigorieff, Gerente de Beneficiamento da Companhia de Pesquisas e Lavras Minerais e colega de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais, por todo seu apoio na realização deste trabalho, sem o qual, este se tornaria inviável. Ao Eng. Alexandre também são atribuídas diversas sugestões técnicas que tomaram parte neste trabalho.

À Companhia de Pesquisas e Lavras Minerais, COPELMI, pelo apoio financeiro e "logístico", quando da realização deste trabalho/dissertação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo suporte financeiro (bolsa de Mestrado).

Ao pessoal do Laboratório da Mina do Recreio e de Charqueadas pela ajuda na amostragem e nas análises químicas.

Ao Eng. M.Sc. Júlio César de Souza pela sua ajuda nos estudos econômicos que são mostrados neste trabalho.

Ao Eng. M.Sc. Luís Marcelo Marques Tavares, doutorando no "Comminution Center" da Universidade de Utah, pelo desenvolvimento do "software" que foi extremamente útil na realização dos estudos de simulação.

Ao Eng. Gérson Farion Cavalcante, mestrando do LAPROM/PPGEMM/UFRGS, pela indispensável ajuda nos Estudos de Avaliação do Lavador do Recreio, que se tornou um capítulo desta dissertação.

Aos Bolsistas de Iniciação Científica Luís Fernando Marcos Fagundes, Marco Aurélio Nunes Parisi e Marcos Cardoso da Cunha pela ajuda na parte experimental deste trabalho.

À Química Núbia Martins Oliveira pelas análises químicas realizadas.

Aos "técnicos" (Engenheiros de Minas, Metalúrgicos, Químicos, Geólogos) do Laboratório de Processamento de Minerais, LAPROM, e "visitantes" do mesmo, pelas inúmeras discussões científicas realizadas durante este meu período de Mestrado. Entre estes, posso citar os Engenheiros de Minas Sérgio Luiz Klein, Leandro Fagundes, Júlio César de Souza, Rubens Müller Kautzmann e Gérson Farion Cavalcante, o Engenheiro Metalúrgico Alfredo Romero Quispe, o Químico Erny Lauro Meinhardt Júnior e os Geólogos Gérson Miltzarek, João César Simch da Silva, Mônica Baldauf, Rogério Aguirre Dias e Carlos Alberto Pires. Deve, também, ser incluído nesta lista o Prof. Dr. André Jablonski.

Ao Dr. Jan Papée, pela sua disposição em participar da banca examinadora desta Dissertação.

À nossa sempre eficientíssima secretária Ezelina, aos demais bolsistas de iniciação científica e aperfeiçoamento e aos professores pelo excelente convívio neste tempo.

À MEUS PAIS, MINHAS IRMÃS E, ESPECIALMENTE, À ANGELA.

SUMÁRIO

Índice das Figuras	xi
Índice das Tabelas	xiv
Resumo	xvii
Abstract	xviii
1. Introdução	001
2. Revisão Bibliográfica	003
2.1. A Companhia de Pesquisas e Lavras Minerais	003
2.1.1. Minas do Recreio e Butiá-Leste	003
2.1.1.1. Geologia Regional	003
2.1.1.2. Geologia Local	005
2.1.1.3. Algumas Características Tecnológicas	005
2.1.1.4. Lavra	007
2.1.1.5. Beneficiamento	007
2.1.1.5.1. Recebedoria	007
2.1.1.5.2. Cominuição	007
2.1.1.5.3. Lavador	008
2.1.1.5.4. Produtos Obtidos	008
2.2. Espirais Concentradoras	010
2.2.1. Histórico	010
2.2.2. Princípio de Funcionamento	011
2.2.2.1. Mecanismos de Separação	011
2.2.2.2. Modelamento Matemático	013
2.2.3. Operação das Espirais	016
2.2.3.1. Parâmetros de Projeto	017
2.2.3.1.1. Passo	017
2.2.3.1.2. Perfil	018
2.2.3.1.3. Raio e Comprimento	019
2.2.3.2. Parâmetros Operacionais	020
2.2.3.2.1. Taxa de Alimentação	020
2.2.3.2.2. Concentração de Sólidos	021
2.2.3.2.3. Tamanho de Partícula	021
2.2.4. Tipos de Espirais	022
2.2.4.1. Espirais com Vários Extratores	022
2.2.4.1.1. Espirais de Humphreys	022
2.2.4.1.2. Espirais Concentradoras GEC	023

2.2.4.1.3. Espirais de Reichert	023
2.2.4.1.3.1. Mark 2	024
2.2.4.1.3.2. Mark 3	024
2.2.4.1.3.3. WW 6	024
2.2.4.1.4. Espirais Vickers	025
2.2.4.2. Espirais com Número Limitado de Extratores	025
2.2.4.2.1. Espirais de Reichert	025
2.2.4.2.1.1. LG e HG7	025
2.2.4.2.1.2. LD 9	026
2.2.4.2.1.3. LD 10	026
2.2.4.2.2. Espirais Vickers	027
2.2.4.2.3. "Cyclo-Spiral"	027
2.2.4.2.3.1. Mark I	027
2.2.4.2.3.2. Mark V	027
2.2.5. Aplicações	028
2.3. A Espiral de Reichert LD 9	029
2.3.1. Introdução	029
2.3.2. Descrição Geral	029
2.3.3. Operação	029
2.3.3.1. Preparação da Alimentação	029
2.3.3.1.1. Granulometria	029
2.3.3.1.2. Conteúdo de Lamas	030
2.3.3.2. Preparação da Espiral	030
2.3.3.2.1. Sistema de Distribuição da Alimentação	030
2.3.3.2.2. Sistema de Coleção dos Produtos	030
2.3.3.3. Variáveis Operacionais	030
2.3.3.3.1. Granulometria	030
2.3.3.3.2. Taxa de Alimentação	031
2.3.3.3.3. Concentração de Sólidos	031
2.3.3.3.4. Posicionamento dos Desviadores	031
2.3.3.4. Indicadores Visuais da Operação	031
2.3.3.4.1. Granulometria	031
2.3.3.4.2. Conteúdo de Lamas	032
2.3.3.4.3. Alimentação/Concentração de Sólidos ...	032
3. Avaliação do Lavador	033
3.1. Introdução	033
3.2. Metodologia, Experimental e Equipamentos	033
3.2.1. Metodologia	033

3.2.2. Experimental	034
3.2.3. Equipamentos	035
3.3. Resultados e Discussões	035
4. Simulação	048
4.1. Introdução	048
4.2. Metodologia e Experimental	048
4.2.1. Metodologia	048
4.2.2. Experimental	049
4.3. Resultados e Discussões	051
5. Análise Econômica	057
5.1. Introdução	057
5.2. Metodologia	057
5.3. Situação do Circuito Atual	058
5.4. Caracterização dos Circuitos Alternativos	058
5.5. Avaliação Econômica dos Circuitos Alternativos	059
5.5.1. Espirais Concentradoras	059
5.5.2. Mesas Concentradoras	060
5.5.3. Ciclones Autógenos	062
6. Utilização de Espirais no Circuito de Finos	064
6.1. Introdução	064
6.2. Metodologia, Experimental e Equipamentos	064
6.2.1. Metodologia	064
6.2.2. Experimental	065
6.2.3. Equipamentos	066
6.3. Resultados e Discussões	066
7. Algumas Considerações sobre Economicidade das Espirais .	090
7.1. Introdução	090
7.2. Estimativa dos Rendimentos	090
7.3. Estimativa dos Custos	093
7.4. Rendimento Líquido e Resultados Econômicos	093
8. Conclusões	095
9. Bibliografia	099

10. Anexos102

ÍNDICE DAS FIGURAS

Figura 01a	- Mapa Geológico da Bacia do Paraná	004
Figura 01b	- Localização da Jazida Butiá-Leão	006
Figura 01c	- Fluxograma do Lavador do Recreio	009
Figura 02	- Curvas de Lavabilidade - Carvão 1ª Riocell (-50+1 mm)	036
Figura 03	- Curvas de Lavabilidade - Carvão 1ª Butiá- Leste (-50+1 mm)	036
Figura 04	- Separação Primária - 1ª Riocell - Modelo de Heurístico	037
Figura 05	- Separação Secundária - 1ª Riocell - Modelo de Heurístico	037
Figura 06	- Separação Total - 1ª Riocell - Modelo de Heurístico	038
Figura 07	- Separação Primária - 1ª Butiá-Leste - Modelo de Heurístico	038
Figura 08	- Separação Secundária - 1ª Butiá-Leste - Mo- delo de Heurístico	039
Figura 09	- Separação Total - 1ª Butiá-Leste - Modelo de Heurístico	039
Figura 10	- Corte Granulométrico - 1ª Riocell - Modelo de Rong	046
Figura 11	- Corte Granulométrico - 1ª Butiá-Leste - Mo- delo de Rong	046
Figura 12	- Curvas de Lavabilidade - Carvão 1ª Riocell (-1+0,074 mm)	050
Figura 13	- Curvas de Lavabilidade - Carvão 1ª Butiá- Leste (-1+0,074 mm)	050
Figura 14	- Recuperação em massa da fração -0,15 mm - Carvão 1ª Camada Butiá-Leste	068
Figura 15	- Recuperação em massa da fração -0,15 mm - Carvão 2ª Camada Butiá-Leste	068

Figura 16	- Recuperação em massa da fração -0,15 mm - Carvão 1ª Camada Charrua Sul	069
Figura 17	- Recuperação em massa da fração -0,15 mm - Carvão 2ª Camada Charrua Sul	069
Figura 18	- Recuperação em massa da fração -0,15 mm - Carvão 1ª Camada Riocell	070
Figura 19	- Recuperação em massa da fração -0,15 mm - Carvão Riocell Camada B	070
Figura 20	- Recuperação em massa da fração -0,15 mm - Carvão Riocell Camada A e Busato	071
Figura 21	- Teores de enxofre total na fração -1+0,15 mm Carvão 1ª Camada Butiá-Leste	073
Figura 22	- Teores de enxofre total na fração -1+0,15 mm Carvão 2ª Camada Butiá-Leste	073
Figura 23	- Teores de enxofre total na fração -1+0,15 mm Carvão 1ª Camada Charrua Sul	074
Figura 24	- Teores de enxofre total na fração -1+0,15 mm Carvão 2ª Camada Charrua Sul	074
Figura 25	- Teores de enxofre total na fração -1+0,15 mm Carvão 1ª Camada Riocell	075
Figura 26	- Teores de enxofre total na fração -1+0,15 mm Carvão Riocell Camada B	075
Figura 27	- Teores de enxofre total na fração -1+0,15 mm Carvão Riocell Camada A e Busato	076
Figura 28	- Curvas de Lavabilidade - 1ª Camada Riocell (-1+0,15 mm)	081
Figura 29	- Curvas de Lavabilidade - 1ª Camada Butiá- Leste (-1+0,15 mm)	081
Figura 30	- Curvas de Lavabilidade - Camada B Riocell (-1+0,15 mm)	082
Figura 31	- Separação Primária - 1ª Riocell - Modelo de Heurístico	082

Figura 32	- Separação Secundária - 1ª Riocell - Modelo da Tangente Hiperbólica Modificado	083
Figura 33	- Separação Total - 1ª Riocell - Modelo de Heurístico	083
Figura 34	- Separação Primária - 1ª Butiá-Leste - Modelo da Tangente Hiperbólica Modificado	084
Figura 35	- Separação Secundária - 1ª Butiá-Leste - Modelo da Tangente Hiperbólica Modificado	084
Figura 36	- Separação Total - 1ª Butiá-Leste - Modelo da Tangente Hiperbólica Modificado	085
Figura 37	- Separação Primária - Riocell Camada B - Modelo do Argumento do Seno Hiperbólico	085
Figura 38	- Separação Secundária - Riocell Camada B - Modelo da Tangente Hiperbólica Modificado ..	086
Figura 39	- Separação Total - Camada B Riocell - Modelo da Tangente Hiperbólica Modificado	086
Figura 40	- Cinzas x Recuperação - Carvão Lavado	091
Figura 41	- Cinzas x Recuperação - Carvão Blendado	091
Figura 42	- Rendimentos Médios Horários (X= 13,34 US\$/h)	092
Figura 43	- Rendimentos Médios Horários (X= 16,87 US\$/h)	092
Figura 44	- Fluxograma Proposto para o Circuito de Finos do Lavador do Recreio	098

ÍNDICE DAS TABELAS

Tabela 01	- Balanço de Massas dos Testes Realizados para Avaliação do Lavador do Recreio	034
Tabela 02	- Dados de Lavabilidade da Fração -50+1 mm para os Carvões do Recreio e Butiá-Leste	040
Tabela 03	- Coeficientes de Partição Densimétricos para os Testes com os Carvões do Recreio e Butiá-Leste	040
Tabela 04	- Ensaaios Densimétricos dos Produtos da Jigagem quando Processando Carvões do Recreio e Butiá-Leste	041
Tabela 05	- Distribuição Granulométrica e Respectivos Teores de Cinzas Base Seca dos Rejeitos 1 e 2 dos carvões do Recreio e Butiá-Leste	043
Tabela 06	- Análise Densimétrica da Fração -1+0,074 mm dos Rejeitos 1 e 2 dos Carvões do Recreio e Butiá-Leste	043
Tabela 07	- Distribuição Granulométrica dos Pontos do Circuito de Finos para os Carvões do Recreio e Butiá-Leste	044
Tabela 08	- Coeficientes de Partição Granulométricos para os Testes com os Carvões do Recreio e Butiá-Leste	045
Tabela 09	- Perdas Ocorridas no Lavador do Recreio	048
Tabela 10	- Dados de Lavabilidade da Fração -1+0,074 mm para os Carvões do Recreio e Butiá-Leste ...	049
Tabela 11	- Resultados de Simulação da Fração -50+1 mm do Carvão do Recreio	051
Tabela 12	- Resultados de Simulação da Fração -50+1 mm do Carvão do Butiá-Leste	052
Tabela 13	- Comparação entre a Simulação e os Testes Realizados	053
Tabela 14	- Resultados de Simulação da Fração -1+0,074 mm do Carvão do Recreio	054

Tabela 15	- Resultados de Simulação da Fração -1+0,074 mm do Carvão do Butiá-Leste	055
Tabela 16	- Produção Atual do Lavador do Recreio	058
Tabela 17	- Melhores Opções de Beneficiamento Obtidas por Simulação para as Espirais	059
Tabela 18	- Resultados de Produção para as Espirais	059
Tabela 19	- Balanço de Massas, Metalúrgico e Rendimentos do Circuito de Espirais Concentradoras	103
Tabela 20	- Melhores Opções de Beneficiamento Obtidas por Simulação para as Mesas	060
Tabela 21	- Resultados de Produção para as Mesas	061
Tabela 22	- Balanço de Massas, Metalúrgico e Rendimentos do Circuito de Mesas Concentradoras	104
Tabela 23	- Melhores Opções de Beneficiamento Obtidas por Simulação para os Ciclones	062
Tabela 24	- Resultados de Produção para os Ciclones	062
Tabela 25	- Balanço de Massas, Metalúrgico e Rendimentos do Circuito de Ciclones Autógenos	105
Tabela 26	- Resumo dos Critérios de Decisão	063
Tabela 27	- Modelos Utilizados para Interpolação das Curvas de Partição da Espiral	106
Tabela 28	- Diversos Testes Realizados com a Espiral de Reichert LD 9 e com os Diversos Carvões das Minas do Recreio e Butiá-Leste	107
Tabela 29	- Resultados dos Diversos Testes Realizados com a Espiral de Reichert LD 9	119
Tabela 30	- Vazão no "Underflow" dos Hidrociclones	078
Tabela 31	- Distribuição Granulométrica no "Underflow" dos Hidrociclones	079
Tabela 32	- Tabela de Lavabilidade (Fração -1+0,15 mm) dos Carvões da 1ª Camada Riocell, 1ª Camada Butiá-Leste e Riocell Camada B	080

Tabela 33	- Coeficientes de Partição Densimétricos para os Testes com os Carvões da 1ª Camada Riocell, 1ª Camada Butiá-Leste e Riocell Camada B	080
Tabela 34	- Condições de Alimentação dos Testes	080
Tabela 35	- Modelos Utilizados para Interpolação das Curvas de Partição da Espiral	087
Tabela 36	- Parâmetros dos Modelos Ajustados	087
Tabela 37	- Índices Dependentes e Independentes de Avaliação de Desempenho para a Espiral	088
Tabela 38	- Parâmetros Ajustados dos Modelos Utilizados para Interpolação das Curvas de Partição com seus Respetivos Desvios - 1ª Camada Riocell	120
Tabela 39	- Parâmetros Ajustados dos Modelos Utilizados para Interpolação das Curvas de Partição com seus Respetivos Desvios - 1ª Camada Butiá-Leste	121
Tabela 40	- Parâmetros Ajustados dos Modelos Utilizados para Interpolação das Curvas de Partição com seus Respetivos Desvios - Riocell Camada B	122
Tabela 41	- Preços de Venda do Carvão Mineral	090
Tabela 42	- Resultados Econômicos para o Circuito de Fios Proposto	094

RECHERT

**ESTUDO PARA A UTILIZAÇÃO DE ESPIRAIS DE REICHERT LD 9 NO
CIRCUITO DE FINOS DO LAVADOR DO RECREIO, COPELMI**

RESUMO

Preliminarmente, estudos de avaliação do Lavador do Recreio, pertencente à Companhia de Pesquisas e Lavras Minerais, COPELMI, foram realizados. Basicamente, estes estudos se referiram ao circuito de grossos (jigue) e finos (hidrociclones e peneira desaguadora do produto fino final). Ensaio densimétricos nos produtos do jigue (rejeito 1, rejeito 2 e carvão lavado) foram feitos para determinação das curvas de lavabilidade e partição bem como ensaios granulométricos nos pontos do circuito de finos (alimentação, "underflow" e "overflow" dos hidrociclones, ladrão do tanque de alimentação dos hidrociclones, "undersize" e "oversize" da peneira desaguadora do produto fino final) para determinar possíveis perdas. Concluiu-se que o ponto onde as perdas foram demasiadas e mudanças seriam necessárias é o "undersize" da peneira desaguadora do produto fino final.

Então, partiu-se para estudos de simulação com os dados de lavabilidade do circuito de finos. Foram simulados três equipamentos muito utilizados no beneficiamento de finos de carvão: mesas concentradoras, espirais concentradoras e ciclones autógenos. A partir destes estudos foram determinados os balanços de massas e metalúrgicos que suportaram estudos econômicos comparativos entre estas três alternativas.

Do estudo econômico verificou-se que a melhor opção por apresentar melhor relação custo x benefício seria a inserção de espirais concentradoras no circuito de finos.

Finalmente, partiu-se para estudos em escala-piloto com espiral de Reichert LD 9, a qual foi desenvolvida para beneficiar carvões com alto teor de cinzas, a fim de avaliar o comportamento deste equipamento quando beneficiando diversos carvões da Mina do Recreio e Butiá-Leste. Com estes resultados, estudos de viabilidade econômica das espirais foram ainda realizados.

ABSTRACT

First of all, evaluation studies on the Recreio Coal Preparation Plant, belonging to "Companhia de Pesquisas e Lavras Minerais - COPELMI", were done. Basically, these studies referred to the coarse (Baum jig) and fine (hydrocyclones and dewatering screen of the final fine product) circuits. Sink-float analyses were carried out on the products of the jig (reject 1, reject 2 and clean coal) in order to determine the washability and Tromp curves as well as particle size analyses on the points of the fine circuit (feed, underflow and overflow of the hydrocyclones, scape of the hydrocyclones feed sump, undersize and oversize of the dewatering screen of the final fine product) in order to determine possible waste. It was concluded that the point in which there was too much waste and changes would be necessary is the undersize of the dewatering screen of the final fine product.

So, simulation studies were done through washability data of the fine circuit. Three pieces of equipment much used in cleaning coal fines were simulated: shaking tables, spirals and autogenous cyclones. From these studies, the mass and metallurgical balances that supported comparative economic studies among these three options were determined.

From the economic study, it was verified that the best option would be the inserction of spirals in the fine circuit for their presenting the best cost x benefit relation.

Finally, scale-up tests with Reichert LD 9 spiral which was developed to process high ash coals were also carried out with the goal of evaluating the behaviour of this piece of equipment when cleaning coals from the Recreio and Butia-Leste Mines. In addition, from these results, economic viability studies on the spirals were still done.

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente disputa pelo mercado de comercialização (venda) de carvão mineral e outros combustíveis entre as diversas companhias produtoras no Brasil e exterior e devido a uma concepção antiga de beneficiamento de carvão no Lavador do Recreio, na qual a fração fina é praticamente descartada, os técnicos da Companhia de Pesquisas e Lavras Minerais - COPELMI concluíram que estudos criteriosos e detalhados no referido Lavador deveriam ser feitos a fim de que rendimentos fossem maximizados e, conseqüentemente, custos reduzidos com as possíveis mudanças sugeridas.

Então, este trabalho é uma seqüência de estudos que foram realizados para melhorar operacionalmente as atividades do Lavador. Dentre estes estudos, podem ser citados:

- Avaliação do Lavador;
- Estudos de Simulação;
- Avaliação Econômica;
- Testes em escala-piloto;
- Considerações sobre a Economicidade das Espirais.

Na avaliação do Lavador, diversos estudos foram feitos visando a determinação de pontos nos quais perdas poderiam estar ocorrendo e onde mudanças poderiam ser necessárias. Além disto, foi possível se ter idéia a respeito do funcionamento da planta como um todo.

A partir da determinação dos pontos de perda, estudos de simulação foram realizados para obtenção dos balanços de massas e metalúrgicos, os quais suportaram estudos econômicos comparativos entre alternativas de mudança.

Determinada a melhor opção, partiu-se, então, para testes em escala-piloto com a finalidade de obter dados reais de beneficiamento.

Como conseqüência destes estudos, foi por nós sugerido a inserção de um estágio de beneficiamento

gravítico de finos e posterior deslame e deságue e, talvez, secagem, por questões estritamente de mercado. Para tal, é indicado o uso de um banco de espirais de Reichert LD 9, hidrociclones para deslamar o produto vendável das espirais e, ainda, peneiras vibratórias. Com isto é tecnicamente viável a obtenção de carvão com baixo teor de cinzas, umidade e enxofre.

Por fim, com os resultados dos testes em escala piloto e para o circuito de finos acima proposto para tomar parte no Lavador do Recreio, algumas considerações sobre a economicidade deste foram feitas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A COMPANHIA DE PESQUISAS E LAVRAS MINERAIS

2.1.1. MINAS DO RECREIO E BUTIÁ-LESTE

2.1.1.1. Geologia Regional

As bacias de carvão no Estado do Rio Grande do Sul estão inseridas em uma grande sinéclise com forma elíptica, situada na Plataforma Sul-Americana, chamada Bacia Intracratônica do Paraná (figura 01a, a seguir). Esta bacia foi preenchida principalmente por sedimentos paleozóicos e vulcanismo mesozóico associado. Não há evidências de movimentos orogênicos, mas a sedimentação é controlada por zonas aulacógenas no embasamento (NW-SE), as quais influenciam a variação faciológica das unidades sedimentares.

As camadas de carvão ocorrem na Formação Rio Bonito, Grupo Guatá, Supergrupo Tubarão. Tal Formação apresenta espessura média em torno de 150 m, sendo suas litologias condicionadas por fácies sedimentares nas quais as camadas de carvão estão inseridas. O carvão ocorre associado tanto a depósitos deltáicos quanto a depósitos de ilha de barreira. As litologias predominantes na fácies pelítica são siltitos, folhelhos, argilitos e arenitos no topo (característica de ilha de barreira com depósitos de "washover"). Usualmente existem conglomerados, argilitos e arenitos imaturos na base da Formação. Na fácies arenítica (fluvio-lacustre), predominam litologias imaturas resultantes de altos gradientes no início da deposição.

Os ambientes deposicionais da Formação Rio Bonito, Permiano da Bacia do Paraná (Artinskiano-Kunguriano) variam de fluvio-deltáico associado com transgressões e regressões marinhas para lacustre-lagunar e ilha de barreira.

Os depósitos de carvão geralmente aparecem como bacias estruturais controladas por paleoelevações de origem

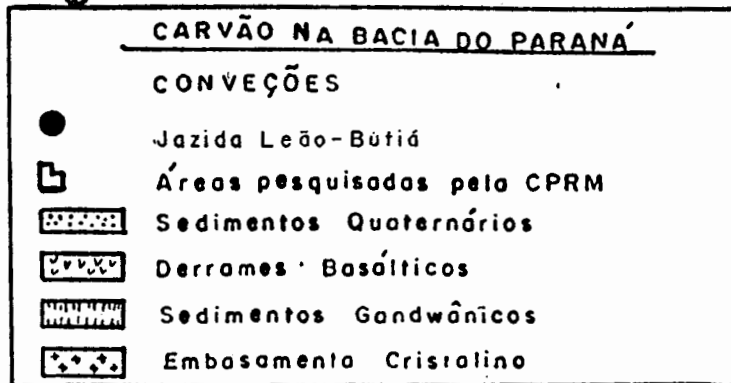
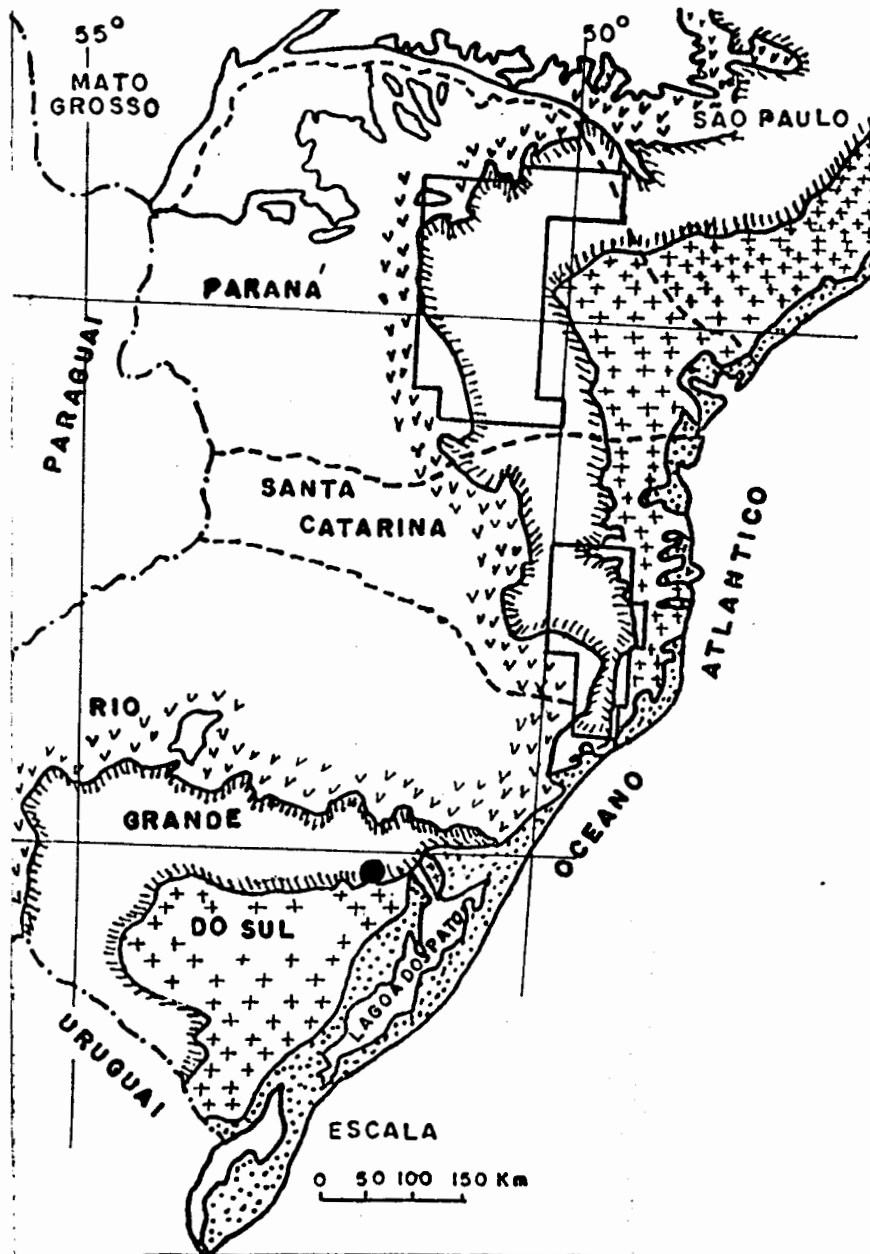


Figura 01a - Mapa Geológico da Bacia do Paraná

tectônica ou não. Falhas normais são comuns nestes depósitos.

A flora original que gerou o carvão é aquela característica do Hemisfério Sul, incluindo Pteridófitas associadas com Gimnospermas e algas.¹

2.1.1.2. Geologia Local

A Jazida do Butiá-Leão compreende o sul da planície do rio Jacuí, 70 km a oeste do município de Porto Alegre, capital do Estado do Rio Grande do Sul, sul do Brasil (figura 01b, a seguir). É dividida em dois blocos: Butiá com cobertura máxima de 90 m e Leão com cobertura máxima de 450 m, separados pela falha do Leão (N41°E). A área ocupada por esta jazida é de aproximadamente 1.070 km², aprofundando-se de 1° a 4° de norte para noroeste. Os limites são definidos por elevações estruturais que causam o adelgaçamento das camadas.

Até sete camadas aparecem, sendo que a principal possui 2 m de espessura.

O ambiente deposicional compreende canais meandrantos com camadas de carvão de origem lacustre associadas com um espesso pacote pelítico no topo. Posteriormente, a bacia foi recoberta por sedimentos marinhos.¹

2.1.1.3. Algumas Características Tecnológicas

O carvão da jazida Butiá-Leão é classificado como betuminoso alto volátil C, segundo o "rank" (grau de carbonificação), pela norma ASTM.

Petrograficamente, o carvão da jazida Butiá-Leão é caracterizado por poder refletor (%) de 0,48, vitrinita (%) 41, exinita (%) 15, inertinita (%) 28 e minerais (%) 16.

A análise imediata do carvão da principal camada da jazida mostra os seguintes resultados (base seca): umidade (%) 5,5, cinzas (%) 45,7, matéria volátil (%) 24,3, carbono fixo (%) 30,0 e poder calorífico (kcal/kg) 3381, e a análise elementar (isenta de cinzas), estes: carbono (%) 72,6,

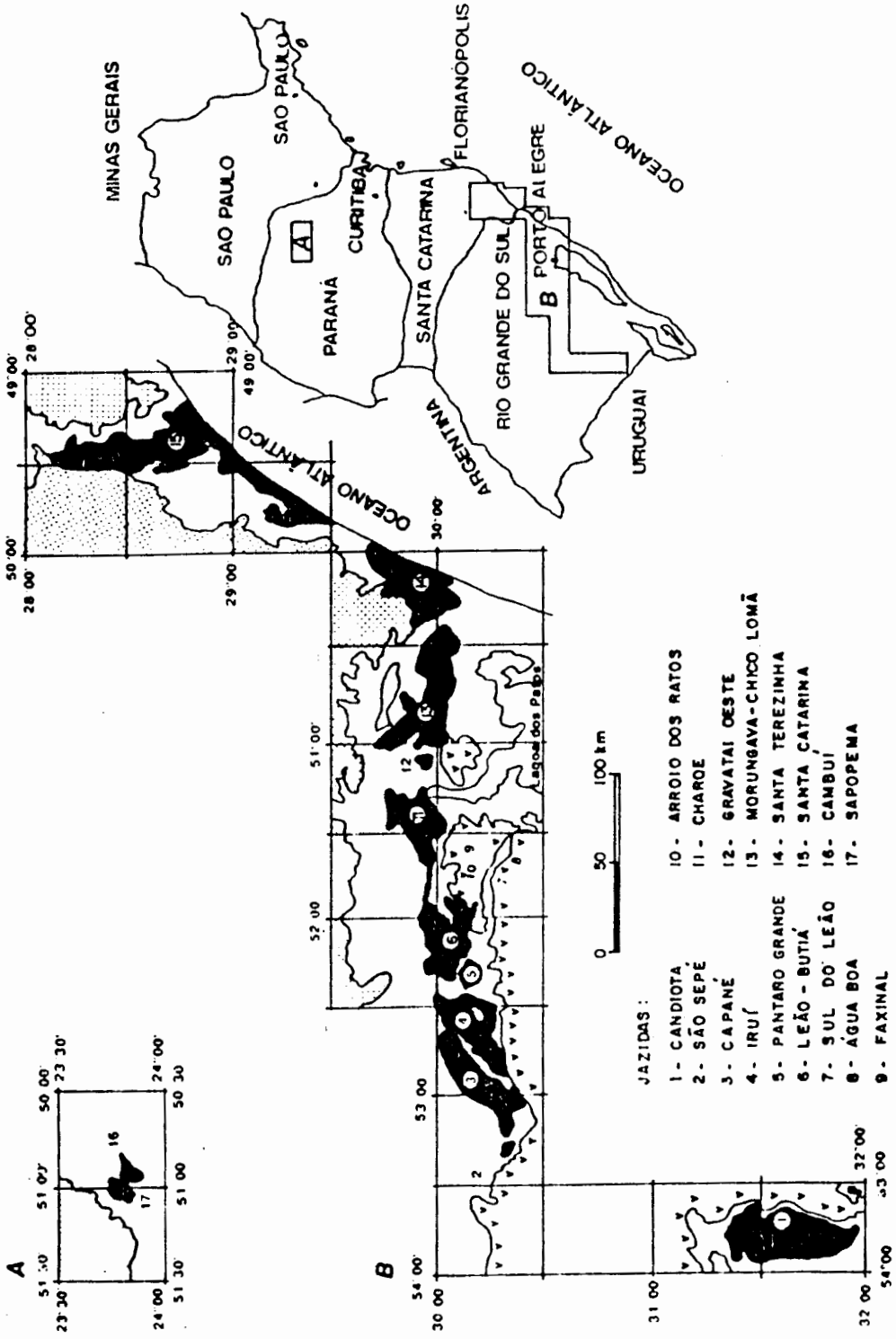


Figura 01b - Localização da Jazida Butiá-Leão

hidrogênio (%) 5,4, enxofre (%) 4,9, oxigênio (%) 16,0 e nitrogênio (%) 1,1. Adicionalmente, o FSI é 0.1¹⁻²

2.1.1.4. Lavra

A produção anual das duas minas em operação na jazida (Mina do Recreio e Mina do Butiá-Leste, 8 km distante uma da outra) é de 1.700.000 toneladas.

Os métodos de lavra empregados são aqueles clássicos para minas a céu-aberto: "strip mining" and "scraper haulback". Dependendo da frente de lavra, a descobertura é feita por "motoscraeper", "shovel" ou "dragline". Quanto às intercalações mais consistentes, siltitos são escarificados e arenitos eventuais, detonados. Finalmente, o carvão é detonado e o carregamento para os caminhões feito por pás carregadeiras.

Atualmente, várias frentes de lavra estão em operação em ambas as minas. Na Mina do Recreio, existem três zonas: Riocell, onde até quatro camadas são mineradas (Camadas A e B, 1ª e 2ª Camadas), Charrua Sul, onde duas camadas são mineradas (1ª e 2ª Camadas) e Busato, onde apenas uma camada é aproveitada, enquanto que na Mina do Butiá-Leste existem duas: Zona Leste e Zona Oeste, onde duas camadas são explotadas (1ª e 2ª Camadas).³⁻⁴

2.1.1.5. Beneficiamento

2.1.1.5.1. Recebedoria

O transporte das frentes de lavra é feito por intermédio de caminhões até uma moega de ROM dotada de um impactor pneumático. Através de um alimentador recíproco, é alimentada uma correia de 48" com fluxo mássico de 500 tph que vai em direção ao sistema de cominuição.³

2.1.1.5.2. Cominuição

O carvão é, então, classificado em uma peneira fixa com abertura de 100 mm. A fração retida em 100 mm é

cominuída em um britador de rolo simples com abertura de 100 mm e a passante segue para uma correia de 42" que, juntamente com o material britado, alimenta duas peneiras vibratórias com abertura de 50 mm. A fração -100+50 mm é novamente britada em britador de duplo rolo com abertura de 50 mm e a fração -50 mm segue para uma correia de 42" que, com o material britado anteriormente, constitui a pilha da alimentação do Lavador.³

2.1.1.5.3. Lavador

Da pilha de britado, através de um alimentador recíproco dosado, é alimentada uma correia de 36" com um fluxo mássico de aproximadamente 300 tph, a qual alimentará um jigue Baum de dois compartimentos e seis células (duas e quatro, respectivamente). Assim, três produtos são gerados: rejeito 1, retirado no elevador do 1º compartimento, enriquecido em pirita, rejeito 2, retirado no 2º compartimento, enriquecido em siltito e folhelho, e carvão lavado (concentrado). Este último, por sua vez, é peneirado em peneira curva fixa seguida de peneira vibratória, ambas com abertura de 1 mm, resultando em duas frações distintas. A fração -50+1 mm, por intermédio de uma correia de 36", é levada a dois silos de 100 ton cada e constitui o produto grosso final. A fração -1 mm segue para um coletor de resíduos de onde é bombeada para uma bateria de quatro hidrociclones, dispostos em paralelo. O "overflow" dos hidrociclones é aproveitado como água de processo e o "underflow" é novamente peneirado, em peneira vibratória com abertura de 0,5 mm. A fração -1+0,5 mm ("oversize") é levada a um silo de 125 ton por meio de uma correia de 20" e constitui o produto fino final. A fração -0,5 mm é descartada e segue para a bacia de decantação (figura 01c, a seguir).³

2.1.1.5.4. Produtos Obtidos

Diferentes produtos são obtidos devido a grande diferença de qualidade dos carvões beneficiados. Com os

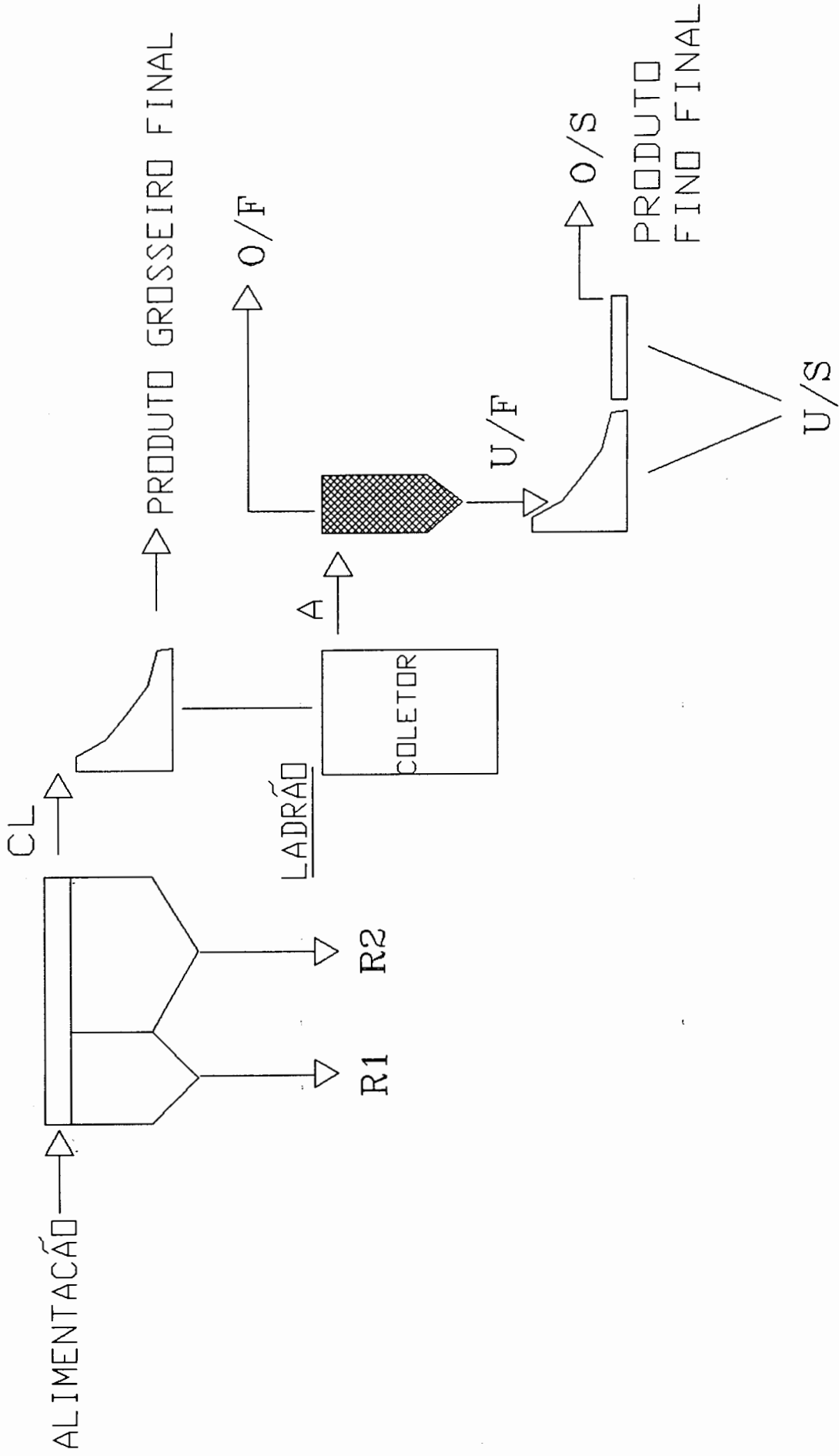


Figura 01c - Fluxograma do Lavador do Recreio 9

carvões provenientes da Mina do Recreio, o beneficiamento é dirigido para carvões lavados com 35% e 47% de cinzas (produtos CE 4700 e CE 3700). Já com os carvões provenientes da Mina do Butiá-Leste, carvões lavados com 26%, 35% e 47% são obtidos (CE 5500, CE 4700 e CE 3700). A produção total do Lavador é estimada em 1.100.000 toneladas/ano com os diversos produtos.³

2.2. ESPIRAIS CONCENTRADORAS

2.2.1. HISTÓRICO

As espirais concentradoras foram criadas por Ira Boyd Humphreys Jr, vice-presidente da "Humphreys Gold Corporation", em 1941, no estado de Colorado, para concentrar ouro, utilizando para tal pneus velhos de caminhão e folhas de chumbo. Este novo equipamento foi concebido a partir de dois concentradores existentes: o separador espiral de Frank Pardee (composto de quatro calhas helicoidais entrelaçadas) e o concentrador de Walter L. Hawley (uma calha plana riflada e semicircular). A aplicação pioneira, em escala de usina, se deu em Bandon, Oregon, em maio de 1943, no qual espirais de ferro fundido, pesando aproximadamente 1 ton cada, beneficiavam minério de cromo e, em seguida, em 1944, na "Florida Mineral Sands Industry" (Jacksonville) para tratar areias de praia. Após, em 1946, em Utah, as espirais foram utilizadas para beneficiar rejeito de chumbo e zinco proveniente de jiques e mesas e, na Mina de Harding, Novo México, para beneficiar tântalo. Em 1948, foi instalada a primeira usina com mais de 1000 espirais, na "E. I. Du Pont de Nemours", em Tail Ridge, Flórida.

O primeiro uso para carvão tomou lugar nos Estados Unidos ("Hudson Coal Co."), em 1947 e, posteriormente, no oeste do Canadá. Também em 1947, a indústria australiana introduziu em suas usinas de beneficiamento espirais concentradoras confeccionadas em concreto reforçadas com fibras de asbesto, para concentração de rutilo e zircão. Neste mesmo país, na metade da década de 50, surgiram os

primeiros modelos confeccionados em fibra de vidro, desenvolvidos por Ernst Reichert e que permitiu a confecção de hélices contínuas, evitando-se as juntas dos segmentos que distorciam a geometria das hélices, acarretando problemas ao fluxo de polpa. De lá para cá, muitos modelos têm sido desenvolvidos, porém, estudos realizados na Austrália, no fim da década de 70 e início da década de 80, são os responsáveis pelo "design" das espirais atualmente disponíveis no mercado.⁵⁻⁹

2.2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

2.2.2.1. Mecanismos de Separação

A espiral concentradora consiste, fundamentalmente, de uma caixa de alimentação, uma calha helicoidal (espiral propriamente dita) resultante de uma seção semicircular modificada na qual ocorre a separação das partículas de acordo com suas densidades, e um meio de coleção destas, que pode estar localizado ao longo da calha ou no final do helicóide⁶⁻⁷. Além disso, água de lavagem (jatos d'água, distribuídos ao longo do caminho curvo da espiral, para retirar as partículas leves da superfície do leito estratificado na porção central e devolvê-las à parte externa da calha) pode ou não estar presente, dependendo do modelo que se dispõe e do uso a que ele é destinado.

A alimentação entra no canal da espiral via caixa de alimentação, em forma de uma polpa homogênea. Como a polpa flui através da hélice, a estratificação ocorre em um plano vertical, fazendo com que as partículas pesadas (com maior densidade) tomem lugar na zona de baixa velocidade, próxima à coluna central, ao contrário das leves (com menor densidade) que se posicionam em direção à parte externa, afastadas da coluna central. A aplicação generalizada de fundamentos teóricos para explicar o mecanismo desta separação acima referida é praticamente impossível de ser feita para todas as partículas do sistema, face a ampla distribuição granulométrica destas, variações de espiral para espiral na forma, altura, perfil da calha, etc., porém,

em termos fenomenológicos, existe consenso a respeito de alguns processos que ali ocorrem:

A separação dos componentes é efetivada pela combinação da ação gravitacional, força centrífuga juntamente com escoamento laminar (escoamento em película d'água), aos quais a polpa é submetida durante a trajetória da descida helicoidal¹⁰. Estes componentes, de conteúdos minerais diversos, fluem em diferentes profundidades, encontram diferentes obstáculos e, como resultado disto, assumem diferentes velocidades no fluxo, desde zero junto à lâmina basal, próximo à coluna central, até um valor máximo na interface fluido/ar. Assim, no decorrer do perfil da calha, teremos uma distribuição de regimes hidrodinâmicos passando de laminar, perto da coluna central, a turbulento na região mais afastada¹¹.

O filme de pesados tem a sua velocidade reduzida pela resistência hidrodinâmica e pelo atrito das partículas com a superfície da calha, implicando num escoamento mais lento. Como o movimento do filme de pesados é pouco afetado pela força centrífuga, este se localiza próximo à coluna central. Já os componentes minerais leves, desimpedidos do atrito com a superfície da espiral, desenvolvem uma velocidade superior à dos pesados e, devido a ativação da força centrífuga, são empurrados na direção da borda externa da calha.

Como conseqüência das diferentes forças centrífugas que agem nos componentes, são geradas correntes rotacionais num plano transversal ao fluxo descendente da polpa na espiral. A parcela da corrente próxima a interface fluido/ar move-se na direção externa da calha, alcançando o ponto de máxima velocidade do fluxo. Neste ponto, esta corrente inicia uma descida, escoando próxima à superfície da calha e seguindo paralelamente ao fundo do canal, até atingir a margem externa do fluxo. Esta rotação no plano transversal ao fluxo da polpa que desce o canal serve para transportar as partículas pesadas para o lado interno da calha. As partículas leves, que têm alta velocidade e baixa taxa de sedimentação, se afastam, neste movimento rotacional, da borda interna da calha e retornam para a margem externa do

canal. Os componentes leves e pesados da corrente são transportados lateralmente em direções opostas, se separando uns dos outros, ocorrendo assim o efeito da concentração na espiral. Devido a estas correntes rotacionais surgem altas taxas de cisalhamento e, conseqüentemente, forças friccionais ("drag force") que geram as forças de Bagnold, as quais têm relevante importância no erguimento das partículas leves até a zona de alta velocidade no filme. Considera-se que as espirais concentradoras funcionam devido a três processos interdependentes e coexistentes na separação mineral^{5,8}:

- sedimentação impedida e consolidação intersticial, que classificam as partículas minerais de acordo com as suas taxas de sedimentação;
- escoamento laminar, no qual as partículas se classificam de acordo com suas capacidades em se reunirem e permanecerem em um filme fluido;
- corrente rotacional na seção reta do fluxo de polpa, a qual separa os componentes devido a diferentes forças centrífugas que atuam neles. Este mecanismo torna a espiral única como um equipamento auto-compensador.

Pode-se concluir que o fluxo, durante o seu trajeto na espiral, experimenta dois gradientes de velocidades, um no plano vertical e outro no plano radial e que quanto maior a diferença de densidade dos componentes a serem separados, melhor será o efeito da separação.

2.2.2.2. Modelamento Matemático

Algumas das forças que agem nas partículas, nas direções radial e tangencial, podem ser matematicamente expressas pelas equações abaixo apresentadas^{5,12-13}:

Direção Radial

$$F_r = m \cdot a_r \quad (\text{Lei de Newton})$$

$$F_c - G_l = m_p \cdot a_r ; G_l = F_{cr} + F_r$$

$$\frac{\rho \cdot D^3}{6 \cdot R} (d_p \cdot v_p^2 - d_l \cdot v_l^2) - (F_{cr} + F_r) = \frac{\rho \cdot D^3}{6} d_p \cdot a_r$$

Direção Tangencial

$$F_t = m \cdot a_t \quad (\text{Lei de Newton})$$

$$P \cdot \cos\theta - F_f = m_p \cdot a_t$$

$$\frac{\rho \cdot D^3}{6} (d_p - d_l) g \cdot \cos\theta - (F_{ct} + F_t) = \frac{\rho \cdot D^3}{6} d_p \cdot a_t$$

Para tal equacionamento, as partículas foram consideradas como sendo esféricas.

onde:

F_r, F_t : força resultante na direção radial e tangencial;

F_c : força centrífuga;

G_l : gradiente de pressão do líquido em movimento;

$P \cos\theta$: componente do peso na direção tangencial;

F_f : força de flutuabilidade na direção tangencial;

F_{cr}, F_{ct} : força cisalhante radial e tangencial;

F_r, F_t : radial e tangencial "drag force" (Stokes ou Newton);

D : diâmetro de partícula;

d_p, d_l : densidade de partícula e líquido;

v_p, v_l : velocidade de partícula e líquido;

R : raio de curvatura das partícula e do líquido;

a_r, a_t : aceleração radial e tangencial das partículas.

F_r, F_t, F_{cr}, F_{ct} dependem da concentração de sólidos, densidade e tamanho de partícula, densidade e viscosidade do líquido e taxa de cisalhamento.

A resultante de F_{cr} e F_{ct} pode assumir duas expressões dependendo das condições existentes na espiral ("grain inertial" ou "viscous").

A força reativa cisalhante tangencial produzirá uma força dispersiva (Força de Bagnold), a qual é contrária ao peso aparente das partículas. Em condições "grain inertial", a força de Bagnold erguerá os grosseiros leves para a zona de alta velocidade do filme enquanto que em condições "viscous" serão erguidas as partículas finas leves. A seguir, um raciocínio matemático deste fenômeno é apresentado:

$$N = \frac{\dot{\gamma}^{0,5} \cdot d_p \cdot D^2}{\mu} \frac{du}{dy} \quad \text{para } \dot{\gamma} < 14$$

onde:

N: número de Bagnold;

μ : viscosidade do líquido;

du/dy : razão de cisalhamento;

d_p : densidade da partícula;

D: diâmetro da partícula;

$\dot{\gamma}$: concentração linear;

$$\dot{\gamma} = 1 / [(C_{\text{máx}} / C)^{0,33} - 1]$$

C: concentração de sólidos em volume.

Se $N > 450$ ou $N < 40$, condições "grain inertial" ou "viscous", como definido por Bagnold, existem.

Na região "grain inertial", a pressão dispersiva de Bagnold sobre a partícula é dada por:

$$P = 0,04 \cdot d_p \cdot (\dot{\gamma} D)^2 \cdot (du/dy)^2$$

O efeito desta pressão dispersiva é para contrapor o peso aparente (P_a) da partícula.

$$P_a = \frac{\eta \cdot D^3 \cdot (d_p - d_l) / 6}{\eta \cdot D^2 / 4} = 2/3 \cdot D \cdot (d_p - d_l)$$

Logo:

$$P/P_a = \frac{K.D.(du/dy)^2}{1 - (d_l/d_p)} \quad K \text{ é constante}$$

Se duas partículas de diâmetros D_1 e D_2 ($D_2 > D_1$) são consideradas:

$$(P/P_a)D_2 > (P/P_a)D_1$$

Portanto, D_2 localizar-se-á na posição de alta velocidade no filme.

Similarmente, se duas partículas de densidades d_A e d_B ($d_A > d_B$) são consideradas:

$$(P/P_a)d_A < (P/P_a)d_B$$

Portanto, d_B localizar-se-á na posição de alta velocidade no filme.

Sob condições "viscous", a pressão dispersiva de Bagnold sobre a partícula é dada como a seguir:

$$P = 2,93 \cdot \dot{\gamma}^{1,5} \cdot \mu \cdot (du/dy)$$

Seguindo a mesma linha de raciocínio acima, pode ser visto que somente partículas pequenas e leves serão levadas a posições de alta velocidade no filme, em contraste com o que ocorre em condições "grain inertial", onde as partículas, leves e grosseiras serão preferencialmente erguidas.

2.2.3. OPERAÇÃO DAS ESPIRAIS

A espiral é um equipamento relativamente simples. Uma vez escolhido o modelo de espiral para uma dada condição, há pouco o que possa ser feito, exceto assegurar a máxima homogeneidade da alimentação (taxa e concentração de sólidos) e a certificação da operação mecânica satisfatória da unidade.

Um fator muito importante é o conhecimento do efeito, se pequeno ou grande, da variação nas características da polpa alimentada. O conhecimento da tolerância da espiral para tais variações determinará o quão constante devem ser mantidas as características da alimentação. Para tal, um sistema de controle operacional, tão sofisticado quanto possível, é necessário.

Logo, para uma perfeita operação das espirais, é importante que se leve em conta os parâmetros relacionados a geometria do equipamento (parâmetros de projeto) e, também, àqueles relacionados com as características da polpa alimentada (parâmetros operacionais).^{6,7}

2.2.3.1. Parâmetros de Projeto

O desenvolvimento de um novo modelo de espiral é um processo longo e custoso. É um processo evolucionário onde um grande número de protótipos são constantemente modificados e testados em todos estágios até se conseguir um padrão otimizado. A cooperação com o usuário final é indispensável durante o estágio de desenvolvimento e, isto, resulta, muitas vezes, em modificações no projeto original da espiral para atender um usuário específico.

Os principais fatores relacionados à geometria do equipamento e que alteram significativamente as características da separação, de um modelo para outro, são o passo do helicóide, o perfil da calha e o comprimento e o raio da espiral. Todos estes parâmetros são iterativos e mudanças em qualquer um deles significa efeito na performance. Obviamente, também importantes são os materiais e os métodos de confecção disponíveis.^{6,7}

2.2.3.1.1. Passo

O passo da espiral pode ser definido como a distância vertical entre pontos similares nas sucessivas voltas da hélice. Exerce influência direta sobre a velocidade de escoamento da polpa (tempo de residência das partículas, onde estas estão sujeitas a ação de todos os

mecanismos envolvidos na separação gravítica; quanto maior a diferença de densidade entre os componentes a separar, maior poderá ser o passo utilizado; o inverso, analogamente, é verdadeiro) e, conseqüentemente, sobre a capacidade da espiral. Em geral, quanto maior a quantidade de minerais pesados alimentados à espiral, maior será o passo indicado para tal separação. Tipicamente, o passo de uma espiral padrão de 600 mm de diâmetro varia entre 380 mm e 450 mm para minérios de baixo e alto teor, respectivamente. No caso de espirais para carvão, onde mais baixas densidades relativas de separação são requeridas, valores similares de passo são usados. Idealmente, um passo adequado para uma alimentação particular é aquele que assegura a fluidez das partículas necessária a uma completa separação.^{6,7}

2.2.3.1.2. Perfil

Um básico perfil de uma espiral consiste de uma área interna para o transporte de minerais pesados separados, uma seção achatada e larga onde os minerais pesados são continuamente separados e migram em direção ao centro (coluna central) e uma área externa transacional a qual termina em uma parede vertical que retém a água. Um importante fator relacionado ao projeto da calha é o número de extratores e o método de extração dos produtos. Nas espirais atuais, as frações removidas nas primeiras voltas da hélice são transportadas em um canal aberto que é parte integrante da parte interna do equipamento. O projeto dos desviadores usados para separar o fluxo é, da mesma forma, de grande importância.

Dentre os diversos estudos realizados com o intuito de otimizar os perfis, foi concluído que o perfil ideal da seção transversal da espiral aproxima-se a uma semi-elipse com relação entre diâmetros de 2:1. Tem-se como consenso que as espirais com perfil continuamente curvo são indicadas para o beneficiamento de areias mineralizadas e carvões com alto conteúdo de cinzas. Por outro lado, as espirais que possuem perfil composto são indicadas para minérios com

baixo teor de minerais pesados e carvões com baixo conteúdo de cinzas.^{6,7}

2.2.3.1.3. Comprimento e Raio

Os projetos mais modernos de espirais utilizam cinco ou sete voltas de comprimento. Como parte dos esforços de pesquisa e desenvolvimento de tecnologia de ponta, o comprimento da espiral foi estudado em profundidade e tornou-se óbvio que ele é interdependente com o passo e com o perfil.

Em relação ao raio da espiral, quanto maior for, tanto menor poderão ser as partículas processadas. Existem, ainda, espirais com raio variável utilizadas para processar faixas granulométricas amplas.

Além destes, existem outros fatores que possuem importância secundária, tais como a cor da superfície da calha (a correta escolha permite o acompanhamento visual da operação), o material de confecção e revestimento, a rugosidade e a continuidade da superfície; os acessórios como caixa de alimentação e descarga, distribuidores, etc., a estabilidade mecânica dos desviadores e o sistema de água de lavagem, se existir.

Um importante fator que deve ser considerado à parte é o uso ou não de água de lavagem. Como consideração operacional, um dos maiores objetivos dos estudos atualmente realizados é a eliminação da água de lavagem. Modelos sem água de lavagem para alimentações com baixo e médio teor apresentam poucos problemas e operam com sucesso na indústria há algum tempo. Por outro lado, espirais com água de lavagem, com exceção de alguns modelos utilizados para tratar areias de praia, apresentam consideráveis dificuldades de fluxo. Consideráveis benefícios devido, principalmente, a recuperação de minerais finos ocorrem com a eliminação da água de lavagem, elevando, assim, a recuperação em massa e o teor do produto pesado.^{6,7}

2.2.3.2. Parâmetros Operacionais

Os parâmetros relacionados à alimentação, que podem afetar de maneira mais contundente a separação são a taxa de alimentação, a percentagem de sólidos e o tamanho de partícula.

2.2.3.2.1. Taxa de Alimentação

Um apropriado carregamento da espiral, em termos de fluxo de sólidos e fluido, resulta em uma máxima capacidade de produção para uma dada operação. Dentre os equipamentos de beneficiamento gravítico, a espiral é o equipamento que é mais afetado, em termos de performance, pela taxa de alimentação. Variações acentuadas na taxa de alimentação se refletem, principalmente na recuperação dos produtos, na densidade de corte e na eficiência da separação. Assume-se que, quanto maior for a taxa de alimentação a uma percentagem de sólidos constante, maior será a velocidade de escoamento e o volume de polpa, acarretando uma maior força centrífuga que tende a levar as partículas finas para o fluxo mais turbulento, afastado da coluna central, diminuindo a recuperação do produto pesado, enriquecendo seu teor e aumentando a densidade de corte. Por outro lado, baixas taxas de alimentação resultam em insuficientes forças centrífugas para forçar os finos para fora do produto pesado, gerando uma maior recuperação em massa, porém reduzindo o teor deste e a densidade de corte.

As espirais têm a capacidade de realizar eficientes separações sobre uma larga variação na taxa de alimentação: taxas de alimentação entre 0,5 tph e 4 tph por hélice com bom desempenho metalúrgico. Alguns dos modelos mais recentes foram projetados para tratar maiores taxas. Existem espirais de Reichert que, por exemplo, podem ser alimentadas com até 5 tph por hélice, enquanto espirais de maior diâmetro, desenvolvidas na CEI, tratam até 8 tph. A taxa de alimentação para qualquer aplicação não pode, no entanto, variar dentro de tais limites. Uma vez que a taxa de alimentação ótima for determinada, variações maiores que 10%

do ótimo requererão alterações nos demais parâmetros operacionais.^{6,7}

2.2.3.2.2. Concentração de Sólidos

A concentração de sólidos é o parâmetro operacional que menos afeta o desempenho da espiral. A ótima concentração de sólidos depende do material que está sendo tratado, mas o intervalo adequado situa-se entre 15% e 40%. Concentrações inferiores acarretam perda do efeito da classificação. Por outro lado, concentrações de sólidos muito altas resultam em distúrbios no fluxo normal, ocorrendo a transição do regime de sedimentação impedida para classificação reversa, com queda na performance do equipamento.

Via de regra, o aumento na densidade da polpa por aumento no fluxo de sólidos, mantendo-se o fluxo de fluido constante, causa uma leve redução na recuperação dos pesados, com seu teor sendo apenas marginalmente afetado. Já o aumento na densidade da polpa por decréscimo do fluxo de fluido, mantendo-se o fluxo de sólidos constante, causa um significativo aumento na recuperação dos pesados, com uma leve queda no seu teor.^{6,7}

2.2.3.2.3. Tamanho de Partícula

Quanto mais estreita a distribuição do material alimentado, tanto melhor será o desempenho da espiral. O limite granulométrico superior para ótima separação é 1 mm, embora material com até 3 mm possa ser beneficiado. Sendo um equipamento que concentra parcialmente pelo mecanismo de sedimentação impedida, a espiral pode tolerar um comparativamente largo intervalo granulométrico, especialmente quando separando minerais liberados. No entanto, como qualquer outro equipamento de beneficiamento gravítico, o tratamento de mais problemáticas alimentações, incluindo aquelas com partículas não liberadas, é melhorado por mais cuidadosa preparação da alimentação, preferivelmente por peneiramento ao invés de separadores

hidráulicos como hidrociclones, devido a maior imperfeição destes. Por outro lado é recomendada a separação do limite inferior da alimentação (separações eficientes podem ser realizadas tão finas quanto 50 micra) através de deslamagem em hidrociclones.

Ao contrário do que ocorre com os outros equipamentos de beneficiamento de finos, onde as partículas mais finas são separadas em maiores densidades de corte, na espiral exatamente o contrário ocorre (há uma leve tendência de queda na densidade de corte com o decréscimo na granulometria da alimentação).

Outro fator importante é a forma das partículas. Quando existe uma marcada diferença na forma das partículas, a espiral é capaz de eficientes separações. Um exemplo disto é a separação da mica do quartzo e feldspato. A mica é levada em direção à parte externa da calha no fluxo de alta velocidade, enquanto que o quartzo e o feldspato tendem a se localizar na parte interna da calha, próximo à coluna central.^{6,7}

2.2.4. TIPOS DE ESPIRAIS

As espirais podem ser subdivididas em dois grupos^{6-8,10}:

- Com vários extratores de concentrado ("multi-offtake") por todo o caminho curvo da espiral, tal como a unidade original desenvolvida por Humphreys;
- Com número limitado de extratores de concentrado ("limited-offtake"), as quais foram largamente desenvolvidas ultimamente.

2.2.4.1. Espirais com Vários Extratores

2.2.4.1.1. Espirais de Humphreys

Foi a primeira a ser desenvolvida e permaneceu única por vários anos. Fundamentalmente, são de dois tipos:

- configuração original (espiral padrão para minérios) com cinco voltas completas;

- configuração para carvão com seis voltas completas e um passo ligeiramente menor para aumentar o tempo de residência da polpa na espiral, já que é pequena a diferença de densidade entre a matéria orgânica e a matéria mineral.

A espiral consiste essencialmente de uma calha helicoidal envolta em uma coluna central, a qual também age como um tubo de descarga para a coleta de concentrado. Dentro da coluna central, também, está o canal de água de lavagem, do qual flui água para pontos pré-determinados da espiral. Na parte inferior da calha se encontram os extratores finais, que fazem a separação do rejeito, através de desviadores ajustáveis.

Cada espiral é confeccionada em segmentos idênticos de 120°. Três segmentos perfazem uma volta completa. Os materiais utilizados na confecção são ferro fundido com ou sem revestimento de borracha, ou fibra de vidro com revestimento de borracha. O passo padrão é de 342 mm, embora diferentes passos existam.

Espirais duplas (duas espirais dispostas em torno de uma única coluna central, defasadas de 180°) também são confeccionadas a fim de aumentar a capacidade de processamento por unidade de área.

2.2.4.1.2. Espiral Concentradora GEC

Originalmente manufaturada sob licença da Humphreys, porém, atualmente, algumas mudanças no perfil da calha foram introduzidas. A espiral simples é similar a espiral de Humphreys no passo e no diâmetro, mas o passo da espiral dupla é de 445 mm, permitindo uma melhor visualização do processo. Além disso, esta espiral requer menos água de lavagem.

2.2.4.1.3. Espirais de Reichert

Vários modelos com vários extratores de concentrado estão em uso, bem como com extratores únicos na porção inferior da calha. Todos os modelos são confeccionados em fibra de vidro com revestimento de poliuretano. O

equipamento é moldado em um segmento único, fato este que favorece o escoamento da polpa, pois evita as juntas de segmento que provocam descontinuidades no fluxo.

Basicamente, existem quatro tipos de espirais de Reichert com vários extratores de concentrado:

2.2.4.1.3.1. Mark 2

A seção transversal da Mark 2 é similar à da espiral de Humphreys e da GEC (as diferenças principais estão na condução e aplicação da água de lavagem e no desenho dos desviadores e da coluna central), e a diferença entre a 2A e 2B é o posicionamento dos extratores. Na Mark 2A os extratores estão mais próximos 26 mm da linha central do que na Mark 2B, acarretando uma maior seletividade e uma menor recuperação de concentrado (pesados). É indicada para circuitos onde a alimentação da espiral contém uma grande proporção de pesados, mas boa seletividade é requerida, ou, por outro lado, onde apenas uma pequena quantidade de pesados liberados ocorre na alimentação da espiral.

2.2.4.1.3.2. Mark 3

Tem o mesmo passo da Mark 2, mas tem o perfil mais achatado e um posicionamento dos desviadores diferente. A melhor performance metalúrgica e a maior capacidade desta espiral são devidos a seu perfil redesenhado. É mais indicada para minérios com teores de até 40% de minerais pesados ou com densidade superior a $2,9 \text{ g/cm}^3$. É contraindicada para minérios com alta proporção de finos.

A capacidade da Mark 3 é consideravelmente mais alta, isto é, 2,5 tph em comparação com a Mark 2, que é 1,5 tph. Atualmente, a reposição da Mark 2 é feita com Mark 3.

2.2.4.1.3.3. WW 6

Tem um perfil semelhante àquele empregado na Mark 3, mas dispõe de uma coluna central com diâmetro menor, um passo reduzido (368 mm contra 387 mm) e um posicionamento

dos desviadores mais próximos à linha central da espiral. Este modelo de espiral é seletiva entre minerais com pequenas diferenças de densidade e é usada para tratamento de minerais finamente divididos. A concentração de sólidos ideal da polpa alimentada é entre 25% a 45% em peso. Uma especialidade desta espiral é o canal para água de lavagem, que é aberto com válvulas ajustáveis em posições fixas.

2.2.4.1.4. Espirais Vickers

A espiral Vickers Xatal VXS é similar, em perfil, ao projeto das espirais de Humphreys, mas é confeccionada em um segmento único, em fibra de vidro. O sistema de água de lavagem para a espiral VXS incorpora um duto para cada ponto de extração. As recentes espirais CC, no entanto, converteram o duto de água de lavagem para transportar concentrado. O concentrado é desviado para o interior deste duto por desviadores de borracha ajustáveis.

2.2.4.2. Espirais com Número Limitado de Extratores

A tecnologia recente das espirais está apoiando-se em unidades com somente um ponto de coleta de produtos, ao contrário do modelo padrão de Humphreys. Várias unidades foram desenvolvidas com desviadores somente na parte terminal da calha.

Outra área de desenvolvimento é a redução ou remoção da água de lavagem.

2.2.4.2.1. Espirais de Reichert

Nada menos do que quatro modelos existem:

2.2.4.2.1.1. LG e LH 7

O perfil das espirais LG e HG 7 são compostos, com a seção interna tendo um declive menos agudo do que a seção externa. O ponto de intersecção destas seções move-se radialmente para fora da coluna central, do topo para parte

inferior da calha. O passo também não é uniforme, sendo menor no início do que no final da calha, onde é de 406 mm.

A espiral LG 7 é equipada com desviadores no ponto de descarga, sendo coletados separadamente concentrado, mistos, rejeito e água.

A espiral HG 7 é similar na maioria dos aspectos à LG 7, mas pode ter um ou dois desviadores localizados a uma certa distância do ponto final de descarga, para evitar sobrecarga (entupimento) nos coletores finais.

A espiral LG 7 foi desenvolvida para o tratamento de minérios de baixo teor enquanto a HG 7 para minérios de teores mais altos.

Estas espirais não possuem água suplementar de lavagem e são capazes de processar polpas com altas percentagens de sólidos (até 60% em peso), além de serem disponíveis em forma tripla (três espirais sob uma mesma coluna central).

2.2.4.2.1.2. LD 9

O perfil da espiral Mark 9 é continuamente curvado com um grande mas variável raio de curvatura, um grande diâmetro externo (696 mm) e um diminuto passo (297 mm), sendo ideal para tratar minérios de baixa densidade como o carvão. Não possui água de lavagem e a hélice conta com 6,25 voltas. Os desviadores são localizados no ponto de descarga da calha. Concentrado (leves), mistos e rejeito são produzidos. É indicada para carvões com teores de cinzas compreendido entre 35% e 60%, e com teor de enxofre qualquer, pois a pirita é facilmente separada.

2.2.4.2.1.3. LD 10

Também é indicada para carvão, porém com teores de cinzas mais baixos. O perfil é menos curvado e é composto de uma parte reta mais curta no início (voltas iniciais), alongando-se nas voltas inferiores, resultando numa seletividade maior. O diâmetro externo é de 750 mm e o passo de 273 mm. Não possui água de lavagem e os desviadores são

dispostos na parte inferior da calha, produzindo concentrado (leves), mistos e rejeito.

2.2.4.2.2. Espirais Vickers

Foram desenvolvidas duas séries desta espiral: FGL para minérios de baixo teor e FGH para minérios de alto teor. Estas espirais foram projetadas para que flutuações na alimentação (teor, tonelagem e densidade) afetassem minimamente os produtos. Logo, os extratores são fixos e não requerem mudanças após serem estabelecidos.

2.2.4.2.3. "Cyclo-Spiral"

Estas espirais foram desenvolvidas pela Wright da Austrália e manufaturadas neste próprio país e na África do Sul, sob licença.

Dois tipos básicos são disponíveis:

2.2.4.2.3.1. Mark I

É indicada para minérios de baixo teor, possui um perfil achatado na parte inferior com o passo do percurso externo permanecendo constante, mas com o passo interno decrescendo gradualmente com a altura da espiral. Esta característica diminui a velocidade das partículas pesadas próximas à coluna central, melhorando a recuperação de concentrado. Concentrado (pesados), mistos e rejeito são removidos por desviadores ajustáveis na parte final da calha.

2.2.4.2.3.2. Mark V

É indicada para minérios de alto teor e mantém passo e perfil constantes para todo o comprimento da hélice. O sistema de coleta de produtos difere dos demais modelos; quatro pontos de descarga são alocados na superfície da calha em intervalos de 180° nas últimas voltas da espiral. Estes pontos de descarga são em forma de ranhuras

transversais com uma comporta corrediça para controlar a largura da abertura.

2.2.5. APLICAÇÕES

Dentre os equipamentos de beneficiamento gravítico, a espiral é o que tem se mostrado mais versátil. Os modelos de última geração possuem pronta aceitação em tradicionais áreas de beneficiamento e estão proporcionando novas soluções para a indústria mineral. Algumas destas aplicações podem ser relacionadas abaixo^{6,9}:

- Espirais na recuperação de ouro a partir de rochas duras (em concentração primária ou recuperação de ouro grosseiro em circuito de moagem), aluviões e retratamento de rejeitos de outros equipamentos de beneficiamento gravítico;
- Espirais na separação de sulfetos, principalmente na remoção de sílica e/ou outros componentes leves de concentrados polissulfetados. Devido a densidades similares dos compostos sulfetados, a separação diferencial torna-se difícil, a menos que algum componente esteja enriquecido com algum mineral mais pesado;
- Espirais na concentração de estanho, tântalo e tungstênio a partir de rochas duras (em pré-concentração ou para fechar circuito de moagem, juntamente com hidrociclones), aluviões e retratamento de rejeitos de outros equipamentos de beneficiamento gravítico;
- Espirais no beneficiamento de areias com minerais pesados, tais como: ilmenita, rutilo, zircão, monazita, etc... em um ou mais estágios;
- Espirais no beneficiamento de areias para a confecção de vidro e cerâmica com o intuito de retirar elementos prejudiciais como óxidos de ferro, cromo, titânio, alumínio e zircônio, entre outros;
- Espirais para tratar minério de ferro;
- Espirais para tratar cromita;
- Espirais para beneficiar carvão;
- Espirais para retirar contaminantes (leves ou pesados) de solos.

2.3. A ESPIRAL DE REICHERT LD 9

2.3.1. INTRODUÇÃO

A espiral de Reichert LD 9 foi designada para a concentração de carvão com granulometria compreendida entre 2 e 0,075 mm.

As características que tornam a espiral LD 9 diferente das demais espirais de Reichert são a ausência de água de lavagem e o desenho específico para beneficiar carvões com alto teor de cinzas (superior a 30-40%).

2.3.2. DESCRIÇÃO GERAL

A espiral de Reichert LD 9 tem um perfil "dish shape", tornando-a uma unidade com performance flexível capaz de tratar alimentações com teores de cinzas variados e sob diversas condições de alimentação.

Outra característica marcante é a presença de apenas um "set" de desviadores na porção final da calha, sendo gerados, então, três produtos: rejeito, mistos e carvão lavado.

2.3.3. OPERAÇÃO

2.3.3.1. Preparação da Alimentação

2.3.3.1.1. Granulometria

O "top size" indicado para estas espirais é de 2 mm. A separação será mais efetiva se o material da alimentação sofrer uma deslamagem prévia. Quanto menor a diferença entre as densidades dos minerais, mais essencial será algum tipo de deslame. Qualquer material fibroso ou com granulometria superior ao "top size" deve ser removido. Usualmente, um peneiramento anterior à espiral deve ser feito.

2.3.3.1.2. Conteúdo de Lamas

A concentração de sólidos indicada para a espiral está entre 35-55%, em peso. Uma proporção de material $-0,075$ mm pode ser tolerada, a qual tende a reportar ao carvão lavado juntamente com a água. Em muitos casos, um ou dois estágios de hidrociclones são empregados para limitar a quantidade de material $-0,075$ mm na alimentação da espiral a níveis compatíveis.

2.3.3.2. Preparação da Espiral

2.3.3.2.1. Sistema de Distribuição da Alimentação

As espirais são normalmente instaladas em bancos com 2 a 8 espirais, simples ou duplas. Para assegurar uma performance consistente de todas as espirais, uma alimentação homogênea é requerida. Basicamente, existem dois tipos de distribuição da alimentação: por gravidade e sob pressão. Quando um número de bancos são instalados em paralelo, um distribuidor primário que assegure uma mesma alimentação entre os bancos deve ser usado.

2.3.3.2.2. Sistema de Coleção de Produtos

A fim de coletar os produtos de cada espiral e prepará-las para processamento posterior, um sistema de coleção pode ser conveniente.

2.3.3.3. Variáveis Operacionais

2.3.3.3.1. Granulometria

A faixa granulométrica ideal é $-2+0,075$ mm, embora a zona de separação ótima esteja compreendida entre $-1+0,3$ mm. É essencial que o material $+2$ mm e $-0,075$ mm estejam ausentes ao máximo da alimentação da espiral. Para uma ótima performance, sistemas de peneiramento e deslame necessitam ser alocados antes da espiral.

2.3.3.3.2. Taxa de Alimentação

As taxas normais de alimentação podem variar de 1 tph até 3 tph por espiral, dependendo do carvão a ser beneficiado. Uma vez determinado o intervalo ótimo da taxa de alimentação através de testes prévios, devem ser mantidas taxas dentro destes limites.

2.3.3.3.3. Concentração de Sólidos

A ótima concentração de sólidos deve ser também determinada por intermédio de testes prévios. Usualmente, a espiral pode suportar amplas variações no que diz respeito a concentração de sólidos, sem interferência na performance. Na planta, as variações devem ser minimizadas para prevenir desbalanceamento de polpa e para assegurar um volume máximo de 7,5 m³/h por cada espiral. O intervalo normal de operação da espiral de Reichert LD 9 é de 30-45% em peso.

2.3.3.3.4. Posicionamento dos Desviadores

Os desviadores podem ser ajustados, segundo um eixo vertical, através de braços de controle localizados abaixo da caixa dos produtos. O posicionamento destes determinará a recuperação em massa e o teor de cinzas de cada produto, ou seja, o balanço de massas e metalúrgico.

2.3.3.4. Indicadores Visuais de Operação

2.3.3.4.1. Granulometria

O material acima da granulometria indicada pode ser facilmente visto, pois o controle visual é facilitado pelo desenho do equipamento. Este material pode provocar acumulações nos desviadores, as quais prejudicarão bastante o processo. Estas devem ser removidas imediatamente e a causa da presença das partículas acima do "top size" determinadas.

2.3.3.4.2. Conteúdo de Lamas

Lama em excesso torna a polpa viscosa em excesso e altera a sedimentação das partículas. Visualmente, o fluxo de polpa torna-se lento quando a lama está excessiva. Se esta condição for encontrada, será necessário melhorar a performance do deslame anterior.

2.3.3.4.3. Alimentação/Concentração de Sólidos

Problemas com estas duas variáveis podem ser vistos facilmente. Quando a taxa de alimentação está muito alta e a concentração de sólidos muito baixa, verifica-se um transbordamento da polpa em relação ao limite lateral da calha da espiral. Por outro lado, se a taxa de alimentação está muito baixa e a concentração de sólidos muito alta, toda polpa flui próxima da coluna central.¹⁴

3. AVALIAÇÃO DO LAVADOR

3.1. INTRODUÇÃO

O objetivo desta parte do trabalho foi analisar a performance de toda a planta, detectar pontos tecnicamente falhos e determinar onde mudanças poderiam ser necessárias. Para tal, foram realizados dois testes ("check up") quando estava o Lavador beneficiando os dois carvões mais representativos de toda a concessão da COPELMI: 1ª Camada Riocell da Mina do Recreio e 1ª Camada Butiá-Leste da Mina do Butiá-Leste^{15,16}.

3.2. METODOLOGIA, EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS

3.2.1. METODOLOGIA

Foi realizada uma amostragem sistemática, durante aproximadamente 5 horas com tomadas de incremento a cada 15 minutos, dos principais pontos do circuito de grossos e finos do Lavador do Recreio, quais sejam, carvão lavado, rejeito 1 e rejeito 2 do jigue, alimentação, "underflow" e "overflow" dos hidrociclones, ladrão do tanque de alimentação dos hidrociclones e "undersize" e "oversize" da peneira desaguadora do produto fino final (ver figura 01c, na revisão bibliográfica).

Todas as amostras obtidas foram convenientemente quarteadas até a obtenção das massas necessárias para cada ensaio (segundo NBR 8292).

Os balanços de massas dos testes realizados são mostrados na tabela 01, a seguir.

Tabela 01 - Balanço de Massas dos Testes Realizados para Avaliação do Lavador do Recreio

CIRCUITO DE GROSSOS

	Recreio	Butiá-Leste
Produtos	Recuperação(%)	Recuperação(%)
C. Lavado	55,5	54,7
Rejeito 1	20,6	43,3
Rejeito 2	23,9	2,0

CIRCUITO DE FINOS

	Recreio	Butiá-Leste
Produtos	Recuperação(tph)	Recuperação(tph)
Ladrão	2,4	1,2
Alimentação	42,1	51,7
"Underflow"	21,3	28,1
"Overflow"	20,8	23,5
"Undersize"	12,1	14,8
"Oversize"	9,2	13,3

3.2.2. EXPERIMENTAL

Sobre os seis pontos do circuito de finos foram realizadas análises granulométricas nas malhas 0,84 mm, 0,50 mm, 0,297 mm, 0,149 mm e 0,074 mm. Também foram realizados cortes granulométricos em 1 mm nos rejeitos da jigagem, sendo as frações passantes, ainda deslamadas em 0,074 mm, antes de sofrerem análise densimétrica.

Nos três produtos da jigagem (fração -50+1 mm) foram realizados ensaios de afunda-flutua nas densidades 1,3, 1,4, 1,5, 1,6, 1,7, 1,8, 1,9, 2,0, 2,2 e 2,4 g/cm³. A fração -1+0,074 mm dos rejeitos também sofreu cortes densimétricos nas densidades 1,6, 1,8 e 2,0 g/cm³.

Todas as faixas geradas nos ensaios, quer granulométricos, quer densimétricos, foram submetidas a

análise de umidade (segundo NBR 8293) e cinzas (segundo NBR 8289).

Para as curvas de lavabilidade, foi reconstituída a alimentação do circuito de grossos (jigue) através de seus produtos e balanço de massas (tabela 01). Em relação às curvas de partição densimétricas, foi utilizado o modelo de Heurístico e para as curvas de partição granulométricas, o modelo de Rong.

3.2.3. EQUIPAMENTOS

Os testes de análise granulométrica foram feitos com os seguintes equipamentos:

- agitador de peneiras, marca MERCU (obtenção da fração -1 mm dos rejeitos da jigagem).

- agitador de peneiras, marca BERTEL (adaptado para peneiramento a úmido).

- jogo de peneiras Tyler nas malhas referidas acima.

Os ensaios densimétricos, na fração -1+0,074 mm, foram realizados em "beckers" de 500 ml e 1000 ml e pêra de separação, enquanto que reservatórios de aço inox, foram utilizados para a fração -50+1 mm. Para acerto das densidades foram utilizados densímetros nos intervalos 1,3 a 1,9 g/cm³, 2,0 a 2,2 g/cm³ e 2,2 a 2,4 g/cm³. Os líquidos densos utilizados foram misturas de xilol, percloroetileno e bromofórmio.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para uma completa caracterização dos carvões estudados e do circuito de grossos, análises densimétricas dos produtos do jigue foram realizadas para determinação das características de lavabilidade dos carvões alimentados, através da reconstituição das alimentações (tabela 02 e figuras 02 e 03, a seguir) e, também, para determinação das tabelas e curvas de partição densimétricas, através dos dados densimétricos e da recuperação em massa de cada produto (tabela 03 e figuras 04 a 09, a seguir). Os

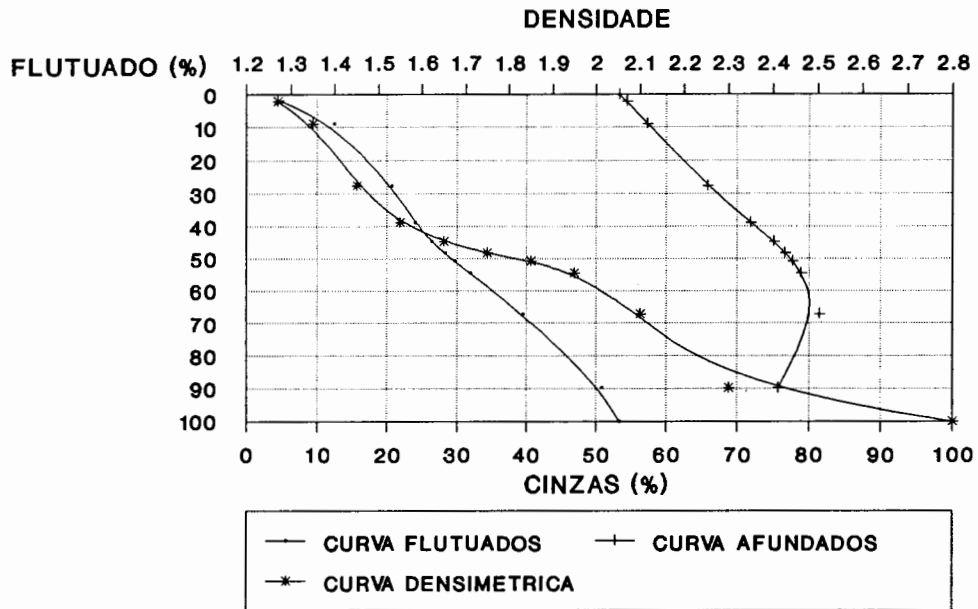


Figura 02 - Curvas de Lavabilidade
Carvão 1a Riocell (-50 +1 mm)

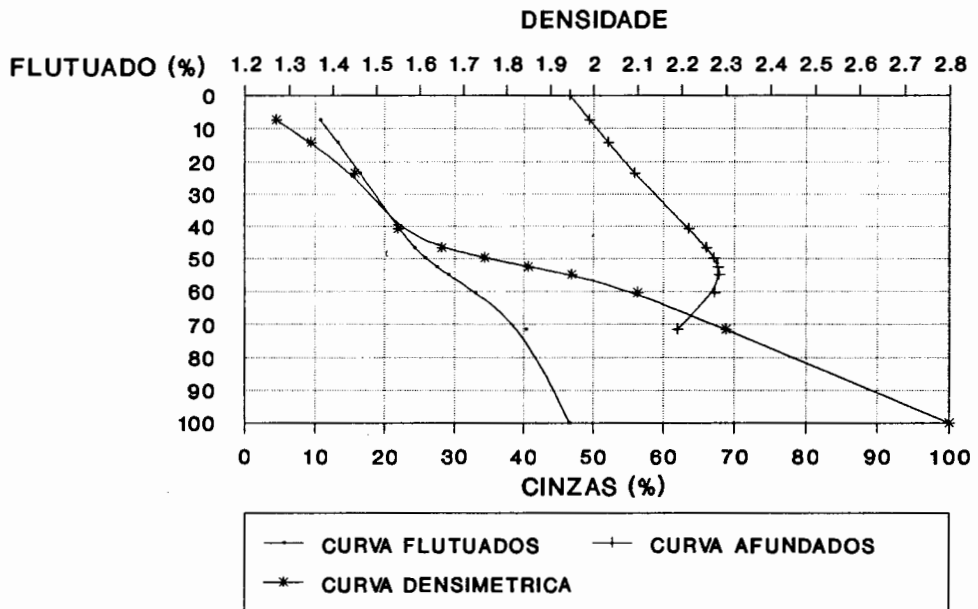


Figura 03 - Curvas de Lavabilidade
Carvão 1a Butiá-Leste (-50 +1 mm)

CURVA DE PARTICAO DO JIGUE

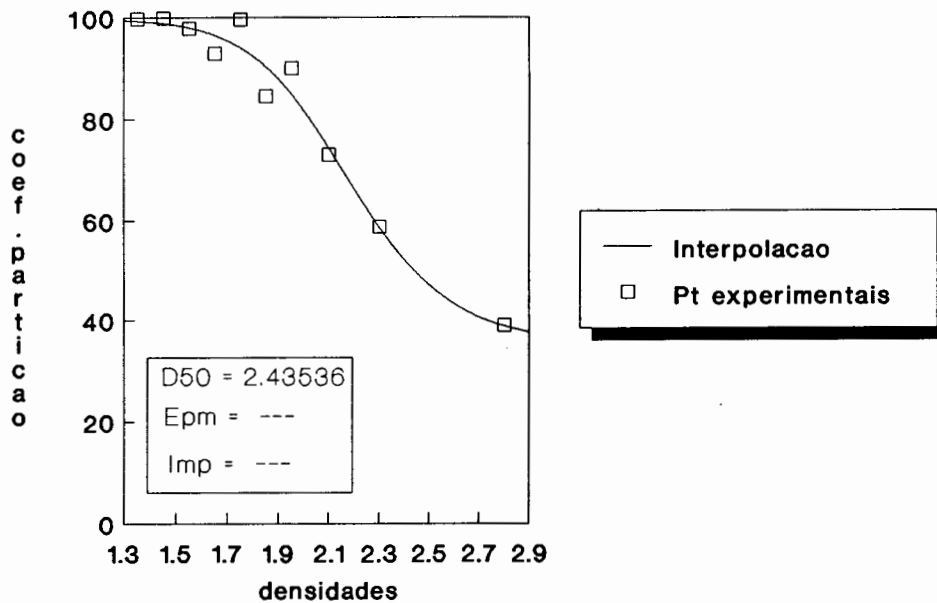


Figura 04 - Separacao Primaria
1a Riocell - modelo de Heuristico

CURVA DE PARTICAO DO JIGUE

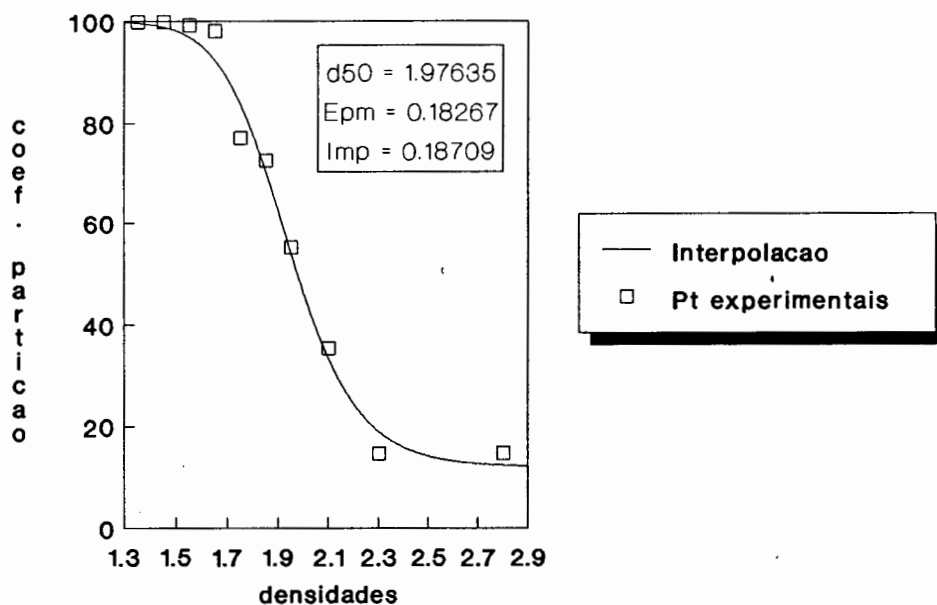


Figura 05 - Separacao Secundaria
1a Riocell - modelo de Heuristico

CURVA DE PARTICAO DO JIGUE

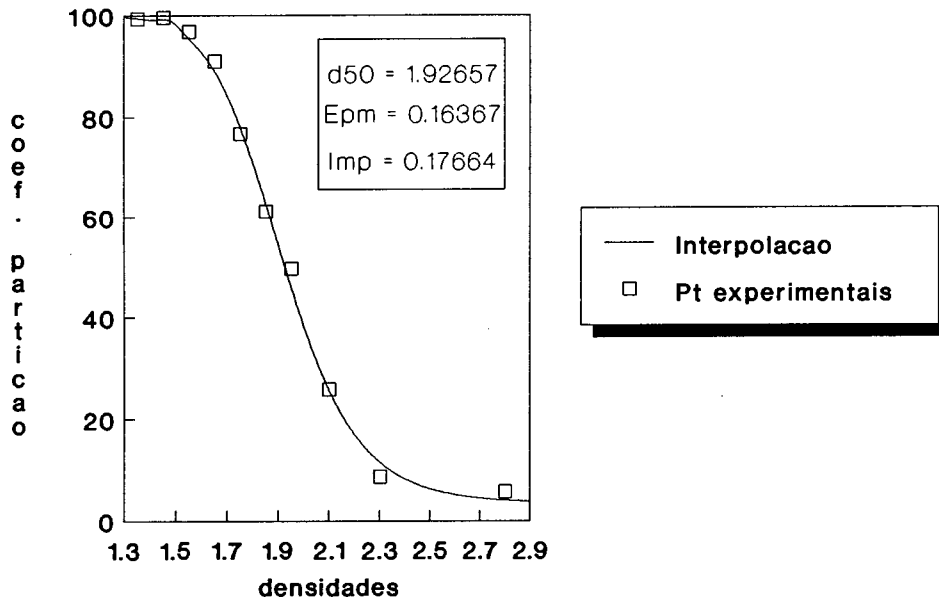


Figura 06 - Separacao Total - 1a Riocell
modelo de Heuristico

CURVA DE PARTICAO DO JIGUE

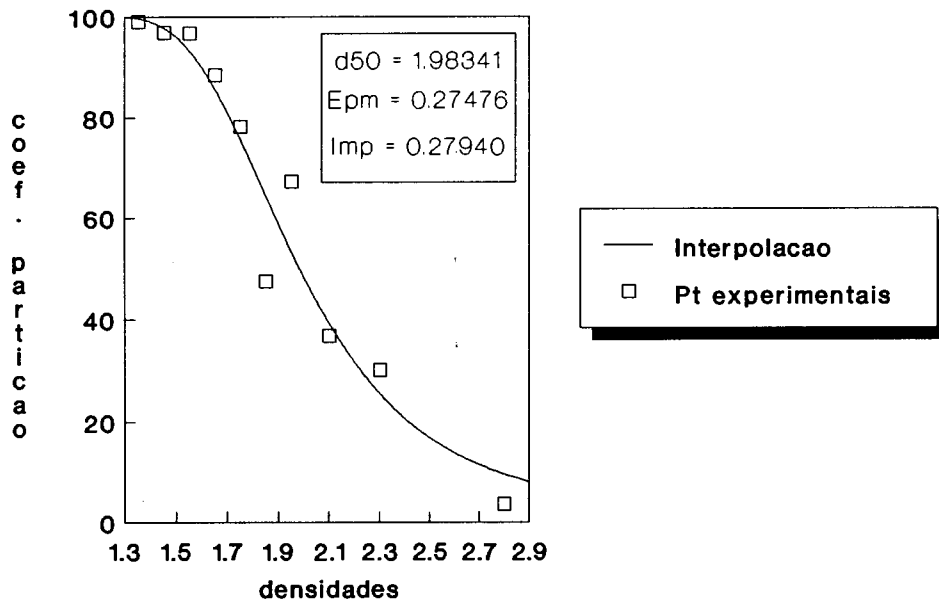


Figura 07 - Separacao Primaria
1a Butia-Leste - modelo de Heuristico

CURVA DE PARTICAO DO JIGUE

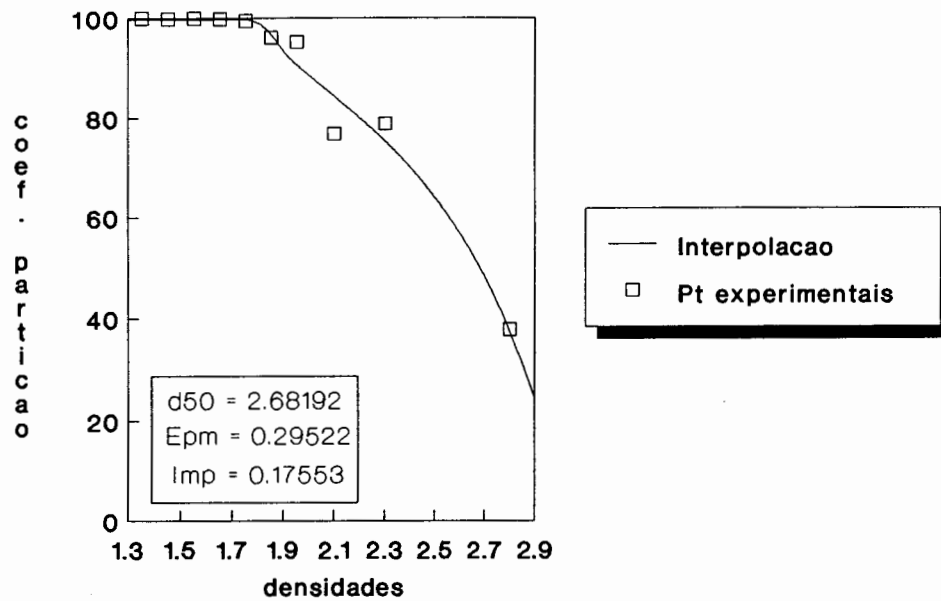


Figura 08 - Separacao Secundaria
1a Butia-Leste - modelo de Heuristico

CURVA DE PARTICAO DO JIGUE

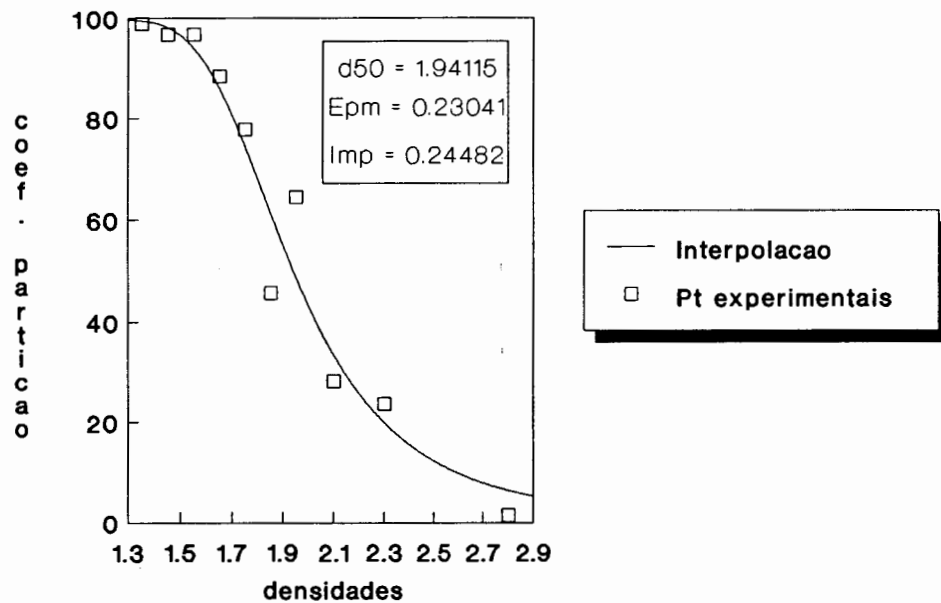


Figura 09 - Separacao Total
1a Butia-Leste - modelo de Heuristico

resultados dos ensaios densimétricos por produto, da mesma forma, são mostrados na tabela 04, a seguir.

Tabela 02 - Dados de Lavabilidade da Fração -50+1 mm para os Carvões do Recreio e Butiá-Leste

Densidade	CARVÃO DO RECREIO				CARVÃO DO BUTIÁ-LESTE			
	%MF1	CzF1	%MAf	CzAf	%MF1	CzF1	%MAf	CzAf
- 1,3	2,14	5,03	100,00	53,30	7,35	10,70	100,00	46,56
1,3 - 1,4	8,88	12,42	97,86	54,36	14,18	13,24	92,65	49,40
1,4 - 1,5	27,69	20,67	91,12	57,28	23,61	16,48	85,82	52,07
1,5 - 1,6	38,78	24,01	72,31	65,80	40,76	22,00	76,39	55,86
1,6 - 1,7	44,73	26,43	61,22	71,86	46,59	24,25	59,24	63,46
1,7 - 1,8	48,28	28,30	55,27	75,05	49,77	25,85	53,41	66,02
1,8 - 1,9	50,81	29,68	51,72	76,64	52,47	27,50	50,23	67,08
1,9 - 2,0	54,48	31,93	49,19	77,70	54,89	29,09	47,53	67,60
2,0 - 2,2	67,14	39,50	45,52	78,88	60,30	33,01	45,11	67,81
2,2 - 2,4	89,84	50,77	32,86	81,51	71,47	40,40	39,70	67,14
+ 2,4	100,00	53,30	10,16	75,67	100,00	46,56	28,53	61,98

Tabela 03 - Coeficientes de Partição Densimétricos para os Testes com os Carvões do Recreio e Butiá-Leste

Densidade	RECREIO			BUTIÁ-LESTE		
	CP 1	CP 2	CP T	CP 1	CP 2	CP T
-1,3	99,90	99,56	99,46	100,00	99,99	99,99
1,3 - 1,4	99,57	99,68	99,25	98,92	99,84	98,76
1,4 - 1,5	99,76	99,75	99,50	96,86	99,70	96,59
1,5 - 1,6	97,68	99,03	96,73	96,67	99,89	96,56
1,6 - 1,7	92,73	97,92	90,81	88,49	99,68	88,20
1,7 - 1,8	99,42	76,99	76,55	78,11	99,40	77,64
1,8 - 1,9	84,36	72,33	61,01	47,41	96,11	45,57
1,9 - 2,0	89,90	54,97	49,42	67,04	95,11	64,27
2,0 - 2,2	72,87	35,21	25,65	36,66	76,72	28,12
2,2 - 2,4	58,60	14,56	8,53	29,90	78,70	23,56
+ 2,4	38,80	14,63	5,68	3,51	37,65	1,32

Carvão do Recreio:

- taxa de alimentação: 287 tph

- parâmetros do modelo (Heurístico):

Corte 1: $a = 0,35040$; $c = 0,00227$; $k = 15,00725$; $x_0 = 2,43536$; $b = -0,80968$

Corte 2: $a = 0,11949$, $c = 0$; $k = 12,47412$; $x_0 = 1,97635$; $b = 0,29392$

Corte T: $a = 0,03326$; $c = 0$; $k = 9,78606$; $x_0 = 1,92657$; $b = 0,53729$

Carvão do Butiá-Leste:

- taxa de alimentação: 294 tph

- parâmetros do modelo (Heurístico):

Corte 1: $a = 0$; $c = 0$; $k = 2,98053$; $x_0 = 1,98341$; $b = 1,25461$

Corte 2: $a = 1,15095$; $c = 0,00145$; $k = 0,35983$; $x_0 = 2,68192$; $b = 1,83636$

Corte T: $a = 0$; $c = 0,00397$; $k = 3,26054$; $x_0 = 1,94115$; $b = 1,27291$

Tabela 04 - Ensaio Densimétricos dos Produtos da Jigagem quando Processando Carvões do Recreio e Butiá-Leste

Densidade	CARVÃO DO RECREIO						CARVÃO DO BUTIÁ-LESTE					
	CARVÃO LAVADO		REJEITO 2		REJEITO 1		CARVÃO LAVADO		REJEITO 2		REJEITO 1	
	% M	% Cz	% M	% Cz	% M	% Cz	% M	% Cz	% M	% Cz	% M	% Cz
- 1,3	3,83	5,03	0,04	5,20	0,01	4,17	13,44	10,72	0,03	2,04	0,00	--
1,3 - 1,4	12,06	14,88	0,09	9,78	0,14	8,09	12,34	16,57	0,55	6,33	0,17	4,09
1,4 - 1,5	33,72	24,63	0,20	19,68	0,22	17,80	16,66	21,76	1,36	20,48	0,68	13,06
1,5 - 1,6	19,32	32,53	0,44	30,97	1,25	29,89	30,27	29,73	0,94	31,23	1,32	25,23
1,6 - 1,7	9,74	42,29	0,48	40,97	2,10	42,05	9,40	40,81	0,83	40,88	1,55	34,85
1,7 - 1,8	4,90	50,55	3,40	54,08	0,10	46,38	4,52	49,98	0,74	48,58	1,61	47,55
1,8 - 1,9	2,78	55,01	2,47	56,40	1,92	57,13	2,25	56,78	2,49	58,34	3,28	58,32
1,9 - 2,0	3,27	61,33	6,22	63,75	1,80	63,58	2,84	62,01	3,34	65,20	1,84	64,30
2,0 - 2,2	5,85	69,94	25,00	71,05	16,67	74,41	2,78	73,08	23,07	73,38	7,91	70,68
2,2 - 2,4	3,49	80,52	47,57	84,42	45,59	84,09	4,81	74,71	35,40	80,59	18,08	81,30
+ 2,4	1,04	82,95	14,09	80,70	30,20	73,08	0,69	79,88	31,25	66,86	63,56	59,39
TOTAL	100,00	34,45	100,00	76,88	100,00	76,41	100,00	31,42	100,00	71,29	100,00	62,87

A partir das curvas de lavabilidade e partição é possível o cálculo dos índices de avaliação de desempenho do jigue (critérios independentes: densidade de corte, imperfeição e erro provável médio) e do processo (critério dependente: eficiência orgânica)^{17,18}.

Os valores de densidade de corte são ajustados conforme os produtos que se deseja obter. Geralmente, a densidade do 1º corte (1º compartimento) é superior àquela

do 2º corte (2º compartimento); a menor delas é para o corte total (separação do carvão lavado dos rejeitos).

Para o carvão do Recreio (1ª Camada Riocell), as densidades de corte foram 2,44 g/cm³ para o corte 1, 1,98 g/cm³ para o corte 2 e 1,93 g/cm³ para o corte total, gerando um concentrado com 34,45% de cinzas e recuperação em massa de 55,5%. Por outro lado, para o carvão do Butiá-Leste (1ª Camada Butiá-Leste), as densidades foram 1,98, 2,68 e 1,94 g/cm³ para o corte 1, 2 e total, respectivamente, gerando um concentrado com 31,42% de cinzas e recuperação de 54,7% em massa. O valor mais alto da densidade para a separação secundária se deve a uma baixa recuperação do rejeito 2 (2,0% em massa), retirado no 2º compartimento. Outro fato notado é que para um concentrado com teor de cinzas menor em relação ao concentrado obtido com o carvão da 1ª Camada Riocell, o carvão da 1ª Camada Butiá-Leste requer densidades de corte maiores para a separação total. Quanto maior a densidade de corte requerida para um mesmo dado teor de cinzas, maior será a recuperação em massa. Isto denota a melhor qualidade deste carvão em relação ao outro, em termos de conteúdo de matéria orgânica (carbono).

Quanto aos demais índices calculados, os valores de imperfeição e erro provável médio se encontram dentro do intervalo normal de operação do equipamento¹¹ (para a separação total, carvão da 1ª Camada Riocell: $I = 0,18$, $E_p = 0,16$; carvão da 1ª Camada Butiá-Leste: $I = 0,24$, $E_p = 0,23$). Já os valores de eficiência orgânica do processo podem ser considerados bastante bons (1ª Camada Riocell $EO = 94,5\%$, 1ª Camada Butiá-Leste: $EO = 94,1\%$) se comparados ao desempenho do mesmo jigge beneficiando os mesmos carvões, em testes realizados anteriormente¹⁸.

Para a quantificação das perdas que porventura poderiam estar ocorrendo nos rejeitos da jigagem, por não haver um corte granulométrico em 1-2 mm anterior ao jigge, a tabela 05, a seguir, mostra a distribuição em massas por faixa granulométrica com os respectivos teores de cinzas destes rejeitos para ambos os carvões, da Mina do Recreio e da Mina do Butiá-Leste.

Tabela 05 - Distribuição Granulométrica e Respetivos Teores de Cinzas Base Seca dos Rejeitos 1 e 2 dos Carvões do Recreio e Butiá-Leste

Produto	CARVÃO DO RECREIO						CARVÃO DO BUTIÁ-LESTE					
	(-50+1 mm)		(-1+0,074 mm)		(-0,074 mm)		(-50+1 mm)		(-1+0,074 mm)		(-0,074 mm)	
	% M	% Cz	% M	% Cz	% M	% Cz	% M	% Cz	% M	% Cz	% M	% Cz
Rejeito 2	97,05	76,88	1,69	73,15	1,26	79,19	93,06	71,29	5,65	70,78	1,29	74,86
Rejeito 1	96,35	76,41	2,40	73,43	1,25	79,42	97,48	62,87	1,72	60,61	0,80	70,74

A tabela 06, a seguir, foi constituída a partir de um breve estudo densimétrico dos produtos acima citados na fração -1+0,074 mm (fração passível de recuperação, se houvesse peneiramento anterior ao jigüe), onde é apresentada a recuperação em massa com os teores de cinzas associados a cada densidade.

Tabela 06 - Análise Densimétrica da Fração -1+0,074 mm dos Rejeitos 1 e 2 dos Carvões do Recreio e Butiá-Leste

Densidade	CARVÃO DO RECREIO				CARVÃO DO BUTIÁ-LESTE			
	REJEITO 1		REJEITO 2		REJEITO 1		REJEITO 2	
	% M	% Cz	% M	% Cz	% M	% Cz	% M	% Cz
- 1,6	6,00	13,91	7,99	13,65	16,62	11,51	5,72	15,79
1,6 - 1,8	2,76	37,02	2,76	32,55	7,43	34,87	5,23	38,84
1,8 - 2,0	3,38	52,73	4,03	49,84	3,88	52,39	4,55	54,84
+ 2,0	87,86	73,43	85,22	81,15	72,07	75,03	84,50	77,34

Analisando-se as tabelas 05 e 06 nota-se que, para o carvão da Mina do Recreio, as massas flutuadas acumuladas na densidade 2,0 g/cm³ são 12,14% para o rejeito 1 e 14,78% para o rejeito 2, com cinzas ponderadas de 29,97% e 27,05%, respectivamente. Essas massas correspondem a 0,29% e 0,25% dos percentuais de massa na faixa -1+0,074 mm. Levando-se em conta as recuperações destes produtos no Lavador, chega-se a uma perda total de 0,12% com 28,51% de cinzas. Para o carvão da Mina do Butiá-Leste, as massas flutuadas acumuladas na densidade 2,0 g/cm³ são 27,93% para o rejeito 1 e 15,50%

para o rejeito 2, com cinzas ponderadas de 23,40% e 35,03%, respectivamente. Essas massas correspondem a 0,48% e 0,88% dos percentuais de massa na faixa -1+0,074 mm. Levando-se em conta as recuperações destes produtos no Lavador, chega-se a uma perda total de 0,23% com 24,29% de cinzas. Logo, as perdas ocorridas por não haver um peneiramento anterior e conseqüente beneficiamento destes finos em um equipamento mais indicado que o jigue são bastante baixas, conforme quantificação acima.

Os pontos do circuito de finos amostrados apresentaram as seguintes características de distribuição granulométrica (tabela 07, a seguir).

Tabela 07 - Distribuição Granulométrica dos Pontos do Circuito de Finos para os Carvões do Recreio e Butiá-Leste

CARVÃO DO RECREIO

Granulometria (mm)	LADRÃO		ALIMENTAÇÃO		"UNDERFLOW"		"OVERFLOW"		"UNDERSIZE"		"OVERSIZE"	
	% M	Cz	% M	% Cz	% M	% Cz	% M	% Cz	% M	% Cz	% M	% Cz
-1,000 +0,840	0,63	23,52	11,25	44,14	19,56	48,61	0,23	48,25	1,59	34,69	45,85	36,88
-0,840 +0,500	0,80	26,88	6,92	43,98	20,64	38,10	0,15	49,13	9,11	35,94	30,25	36,90
-0,500 +0,297	0,71	29,47	2,93	49,79	8,98	43,59	0,20	52,74	9,67	43,24	9,02	40,91
-0,297 +0,149	1,63	33,61	4,23	50,68	14,54	47,37	0,52	19,45	15,15	48,83	6,43	47,27
-0,149 +0,074	2,90	31,63	3,28	41,76	8,65	56,90	1,43	14,88	11,51	54,36	2,24	54,89
-0,074 +0,000	93,31	73,25	71,39	73,51	27,63	75,94	97,47	71,96	52,97	75,57	6,21	75,03
-1,000 +0,074	100,00	70,39	100,00	65,46	100,00	54,08	100,00	70,74	100,00	61,69	100,00	39,78

CARVÃO DO BUTIÁ-LESTE

Granulometria (mm)	LADRÃO		ALIMENTAÇÃO		"UNDERFLOW"		"OVERFLOW"		"UNDERSIZE"		"OVERSIZE"	
	% M	Cz	% M	% Cz	% M	% Cz	% M	% Cz	% M	% Cz	% M	% Cz
-1,000 +0,840	11,16	29,24	22,44	35,98	31,93	27,08	0,21	44,74	2,94	24,61	59,18	25,93
-0,840 +0,500	2,21	25,19	10,89	29,98	19,90	25,90	0,14	48,23	12,89	24,89	24,55	22,20
-0,500 +0,297	3,16	31,05	5,84	35,09	9,97	30,64	0,08	41,60	9,64	27,93	7,11	26,11
-0,297 +0,149	1,62	36,81	6,77	41,36	13,12	38,47	0,45	17,63	16,48	32,84	5,36	34,17
-0,149 +0,074	3,83	27,20	5,09	38,05	8,11	48,27	2,42	13,14	12,09	41,71	1,52	45,22
-0,074 +0,000	78,02	61,33	48,97	61,89	16,97	67,06	96,70	63,44	45,96	65,65	2,28	62,81
-1,000 +0,074	100,00	54,29	100,00	48,43	100,00	37,20	100,00	61,94	100,00	47,25	100,00	26,60

É importante salientar que, a partir dos dados de distribuição granulométrica do "underflow" e "overflow" dos

hidrociclones mais a distribuição de massas entre ambos, torna-se possível a obtenção dos coeficientes de partição (tabela 08, a seguir) e, por conseguinte, das curvas de partição destes (figuras 10 e 11, a seguir) para ambas condições de alimentação quando processando carvão do Recreio e Butiá-Leste.

Tabela 08 - Coeficientes de Partição Granulométricos para os Testes com os Carvões do Recreio e Butiá-Leste

Granulom.(mm)	RECREIO			BUTIÁ-LESTE		
	"Overflow"	"Underflow"	CP	"Overflow"	"Underflow"	CP
-1,000 +0,840	0,23%	19,56%	99,11	0,21%	31,93%	99,32
-0,840 +0,500	0,15%	20,64%	99,45	0,14%	19,90%	99,28
-0,500 +0,297	0,20%	8,98%	98,33	0,08%	9,97%	99,18
-0,297 +0,149	0,52%	14,54%	97,34	0,45%	13,12%	96,57
-0,149 +0,074	1,43%	8,65%	88,71	2,42%	8,11%	75,97
-0,074 +0,000	97,47%	27,63%	23,76	96,70%	16,97%	8,16

Carvão do Recreio:

- taxa de alimentação: 10,5 tph por hidrociclone
- pressão de alimentação: 1,0 kg/cm³
- concentração da alimentação: 4,4%
- parâmetros do modelo: a = 0; c = 0,01049; k = 3,16414; x0 = 0,05323

Carvão do Butiá-Leste:

- taxa de alimentação: 12,9 tph por hidrociclone
- pressão de alimentação: 1,0 kg/cm³
- concentração da alimentação: 5,5%
- parâmetros do modelo: a = 0; c = 0,00620; k = 3,44189; x0 = 0,07460

Nota-se que, devido a grandes quantidades de ultrafinos (-0,074 mm) presentes na alimentação dos hidrociclones, os valores de diâmetro de corte foram bastante baixos e os de imperfeição, por outro lado, altos^{19,20} (0,0536 mm e 0,0749 mm para diâmetros de corte e

CURVA DE PARTICAO DOS HIDROCICLONES

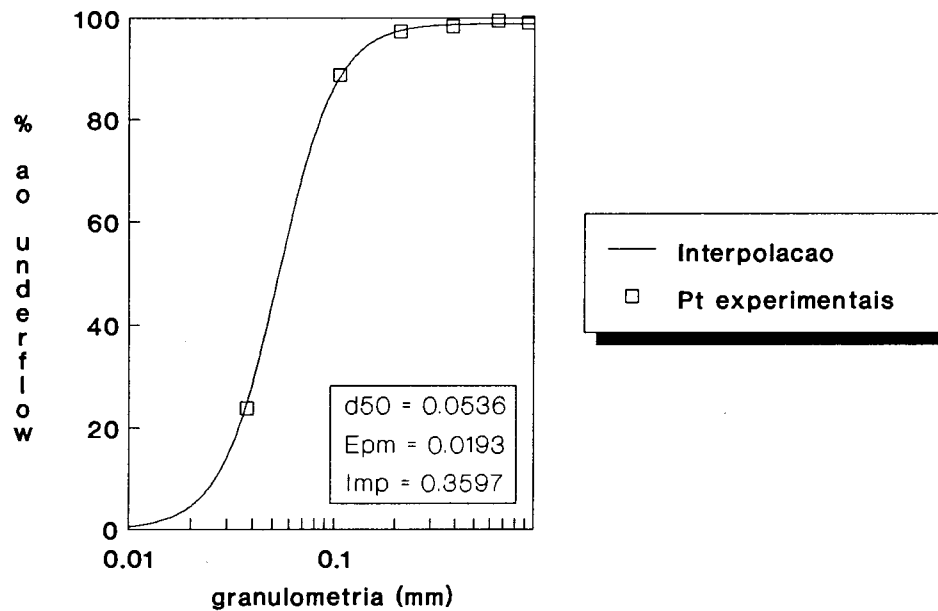


Figura 10 - Corte Granulometrico
1a Riocell - Modelo de Rong

CURVA DE PARTICAO DOS HIDROCICLONES

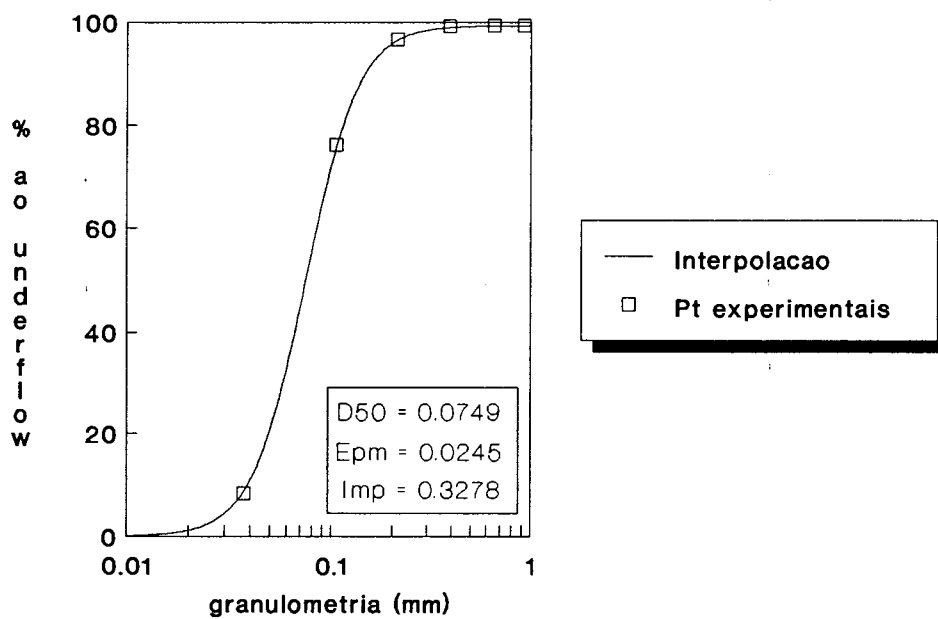


Figura 11 - Corte Granulometrico
1a Butia-Leste - Modelo de Rong

0,360 e 0,328 para imperfeição, para os testes com o carvão do Recreio e do Butiá-Leste, respectivamente). Fazendo uma comparação entre as curvas, o menor valor de diâmetro de corte e maior de imperfeição do teste com o carvão do Recreio se deve a uma maior participação em massa da fração -0,074 mm neste carvão (71,39% em massa, da alimentação contra 48,97% do Butiá-Leste). Como consequência destas altas participações de ultrafinos, existe uma boa quantidade destes remanescentes no "underflow" dos hidrociclones (27,63% para o carvão do Recreio e 16,97% para o carvão do Butiá-Leste). Este fato acarretará problemas de contaminação no produto fino final, já que esta fração possui teores elevados de cinzas.

Uma análise da tabela 07, acima, leva a crer, ainda, que o ponto no qual as perdas são demasiadas e onde alterações são necessárias devido ao grande desperdício é o "undersize" da peneira desaguadora do produto fino final. Para o teste com o carvão do Recreio as perdas foram de 5,70 tph com 46,06% de cinzas na fração -1+0,074 mm, correspondendo a aproximadamente 1,99% da alimentação do Lavador (no caso, 287 tph). Nos demais pontos que poderiam estar ocorrendo perdas, estas não se verificaram de forma acentuada ("overflow" dos hidrociclones: 0,524 tph com 23,88% de cinzas, ou 0,18% da alimentação do Lavador; ladrão do tanque de alimentação dos hidrociclones: 0,167 tph com 30,46% de cinzas, ou 0,06% da alimentação do Lavador). Para o teste com o carvão do Butiá-Leste, o mesmo comportamento se verificou, porém as perdas foram mais acentuadas devido a melhor qualidade do carvão; no ponto mais problemático, "undersize" da peneira desaguadora do produto fino final, na fração -1+0,074 mm, as perdas foram de 7,97 tph com 31,60% de cinzas, correspondendo a aproximadamente 2,71% da alimentação do Lavador (no caso, 294 tph). Igualmente, nos demais pontos, as perdas verificadas foram pequenas ("overflow" dos hidrociclones: 0,777 tph com 17,94% de cinzas, ou 0,26% da alimentação do Lavador; ladrão do tanque de alimentação dos hidrociclones: 0,264 tph com 29,30% de cinzas, ou 0,05% da alimentação do Lavador).

4. SIMULAÇÃO

4.1. INTRODUÇÃO

A tabela 09, a seguir, resume as perdas ocorridas no Lavador do Recreio.

Tabela 09 - Perdas Ocorridas no Lavador do Recreio

Ponto	CARVÃO DO RECREIO			CARVÃO DO BUTIÁ-LESTE		
	tph	% Alim	% Cz	tph	% Alim	% Cz
Rejeitos	0,34	0,12	28,51	0,68	0,23	24,29
"Undersize"	5,70	1,99	46,06	7,97	2,71	31,60
Ladrão	0,17	0,06	30,46	0,26	0,09	29,30
"Overflow"	0,52	0,18	23,88	0,78	0,26	17,94
Total	6,73	2,35	43,07	9,69	3,26	29,95

Com as perdas detectadas, partiu-se, então, nesta parte do trabalho, para estudos de simulação no circuito de finos e, também, no circuito de grossos do Lavador com o intuito de comparar os rendimentos do circuito atual com os outros circuitos alternativos, predizer a cerca de possíveis mudanças que deveriam ser feitas e decidir qual a melhor opção²¹.

4.2. METODOLOGIA E EXPERIMENTAL

4.2.1. METODOLOGIA

Para o circuito de grossos, foram realizados estudos de simulação em jigue Batac e Baum para obtenção de carvão lavado com teores máximos de cinzas de 25, 30, 35, 40 e 47% e os resultados comparados aos do jigue Baum atual. Para o circuito de finos, os equipamentos simulados foram os usualmente utilizados para beneficiar finos de carvão²² (mesas concentradoras, espirais concentradoras e ciclones

autógenos), visando a obtenção de carvão lavado com no máximo 20, 25, 30 e 35% de cinzas.

Os carvões utilizados (dados de lavabilidade, fração grossa e fina, tabelas 02 e 10 a seguir, e figuras 02, 03, 12 e 13, a seguir) neste estudo foram os provenientes da 1ª Camada Riocell e 1ª Camada Butiá-Leste.

Tabela 10 - Dados de Lavabilidade da Fração -1+0,074 mm para os Carvões do Recreio e Butiá-Leste

Densidade	CARVÃO DO RECREIO				CARVÃO DO BUTIÁ-LESTE			
	%MFl	CzFl	%MAf	CzAf	%MFl	CzFl	%MAf	CzAf
- 1,5	29,67	8,97	100,00	41,95	36,36	9,75	100,00	32,96
1,5 - 1,6	41,42	12,82	70,33	55,86	53,79	13,99	63,64	46,22
1,6 - 1,7	49,52	16,89	58,58	62,55	70,26	18,87	46,21	55,04
1,7 - 1,8	54,93	19,54	50,48	66,53	74,54	20,28	29,74	66,24
1,8 - 1,9	62,28	23,27	45,07	69,26	78,07	21,62	25,46	70,10
1,9 - 2,0	67,59	26,04	37,72	72,78	80,27	22,52	21,93	73,33
2,0 - 2,2	82,86	33,64	32,41	75,12	85,63	25,21	19,73	75,42
2,2 - 2,4	92,13	38,16	17,14	82,12	90,87	28,29	14,37	79,15
+ 2,4	100,00	41,95	7,87	86,26	100,00	32,96	9,13	79,48

O processo de simulação foi conduzido no "software" SIBECAR 2.0 desenvolvido no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM/PPGEMM/UFRGS), o qual usa interpolação pelo método de Akima para os dados de lavabilidade do carvão da alimentação e o modelo de Erasmus para modelar as curvas de partição. Este programa permite a maximização da recuperação de um dado produto com teor de cinza máximo especificado, através de sucessivas iterações que se utilizam de curvas de partição normalizadas em densidades de corte dentro do intervalo normal de operação de cada equipamento²³.

4.2.2. EXPERIMENTAL

Amostras da alimentação do circuito de finos, "underflow" dos hidrociclones (carvão do Recreio e Butiá-Leste), foram submetidas a ensaios densimétricos nas densidades 1,5, 1,6, 1,7, 1,8, 1,9, 2,0, 2,2 e 2,4 g/cm³ (as faixas geradas foram analisadas para cinzas base seca), para

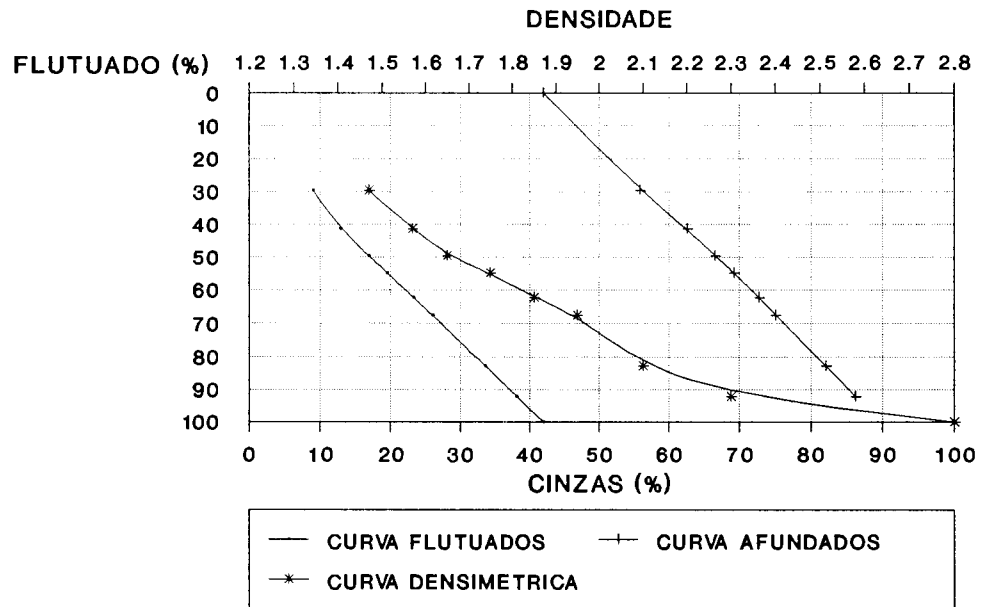


Figura 12 - Curvas de Lavabilidade
Carvão 1a Riocell (-1 +0,074 mm)

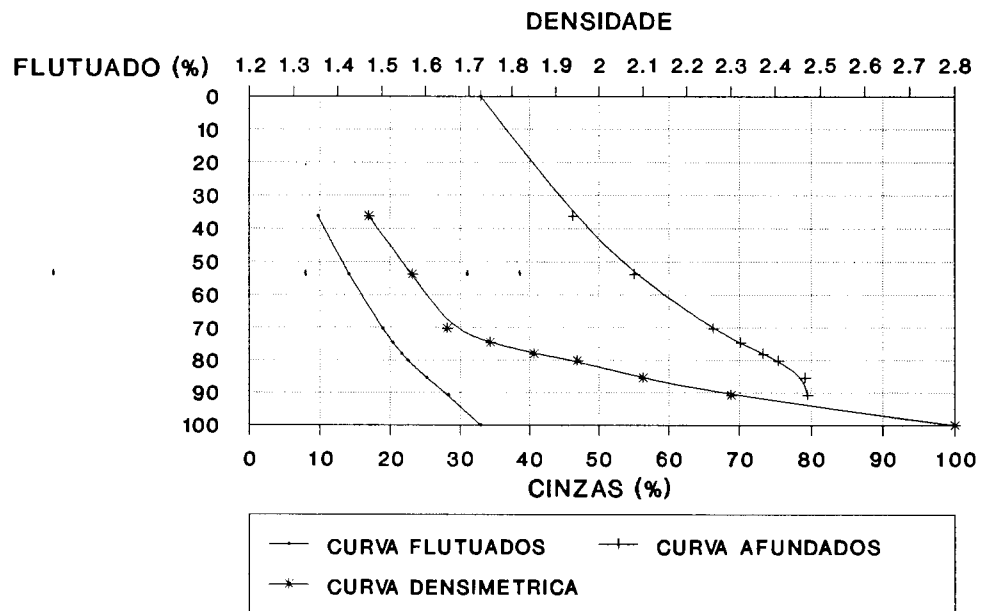


Figura 13 - Curvas de Lavabilidade
Carvão 1a Butiá-Leste (-1 +0,074 mm)

determinação de suas características de lavabilidade, que serviram de base aos estudos de simulação. Para a fração grossa, os dados utilizados foram aqueles obtidos pela reconstituição da alimentação do jigue.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de quantificar o aumento na recuperação em massa advindo da substituição do atual jigue Baum do Lavador do Recreio por um jigue Batac, a tabela 11, a seguir, apresenta os resultados da simulação da fração -50+1 mm do carvão do Recreio.

Tabela 11 - Resultados de Simulação da Fração -50+1 mm do Carvão do Recreio

Produto	JIGUE BAUM		JIGUE BATAc	
	Rec. (%)	% Cz	Rec. (%)	% Cz
Rejeito 1	56,53	65,75	54,81	65,78
Rejeito 2	18,42	51,56	21,18	52,42
C. Lavado	25,05	26,49	24,01	25,48
Rejeito 1	39,90	73,26	36,80	74,66
Rejeito 2	17,28	65,09	18,54	67,20
C. Lavado	42,82	29,95	44,66	29,94
Rejeito 1	28,38	76,91	20,96	77,86
Rejeito 2	15,93	75,46	23,14	75,28
C. Lavado	55,69	34,94	55,90	34,99
Rejeito 1	21,67	77,80	17,78	77,89
Rejeito 2	13,23	78,84	16,98	78,76
C. lavado	65,10	39,95	65,24	39,98
Rejeito 1	18,22	77,90	16,42	77,84
Rejeito 2	6,04	79,59	6,57	79,67
C. Lavado	75,74	45,29	77,01	45,82

A diferença entre o beneficiamento em jigue Baum e Batac não é significativa para todos os produtos visados, sendo mais marcante nas mais baixas densidades (produtos com menor teor de cinzas). Assim, para um produto com 30% de cinzas, obtém-se uma recuperação de 1,84% em massa maior

para o beneficiamento em jigue Batac do que em jigue Baum. Para produtos com 35% e 40% de cinzas, praticamente não existe diferença. É importante salientar que o produto com 35% de cinzas é, atualmente, o que tem melhor colocação no mercado do sul do país.

Pelas características de lavabilidade do carvão utilizado para simulação não se conseguiu obter produtos lavados com 25% de cinzas em ambos equipamentos simulados. Com a utilização de jigue Batac pode ser obtido produto com 25,48% de cinzas enquanto que para o jigue Baum, o menor teor de cinzas obtido foi de 26,49%.

Na obtenção de produtos com 26% de cinzas, o rejeito secundário mostra um teor de cinzas compatível com o produto CE 3100-3300 (51-52%), largamente empregado em usinas termelétricas. Porém, o uso deste produto torna-se inviável pelo seu alto teor de enxofre.

A tabela 12, a seguir, apresenta os resultados da simulação da fração -50+1 mm do carvão do Butiá-Leste.

Tabela 12 - Resultados de Simulação da Fração -50+1 mm do Carvão do Butiá-Leste

Produto	JIGUE BAUM		JIGUE BATAc	
	Rec. (%)	% Cz	Rec. (%)	% Cz
Rejeito 1	46,71	62,01	43,87	62,80
Rejeito 2	15,66	52,35	16,03	55,82
C. Lavado	37,63	24,97	40,10	25,09
Rejeito 1	32,85	65,13	31,87	65,25
Rejeito 2	13,49	67,39	14,15	67,72
C. Lavado	53,66	29,96	53,98	29,98
Rejeito 1	28,44	64,65	27,75	64,61
Rejeito 2	9,04	69,52	9,88	68,90
C. Lavado	62,52	35,01	62,37	34,99
Rejeito	28,02	64,56	26,87	64,41
C. Lavado	71,98	39,55	73,13	40,00

Da mesma forma que para o carvão do Recreio, a diferença mais significativa entre o beneficiamento em um

jigue e no outro está na obtenção de produtos com mais baixa cinza (no caso, 25% de cinzas). O jigue Batac apresenta uma recuperação mássica 2,47% superior ao jigue Baum. Já para produtos com 30% e 35% de cinzas, a diferença é praticamente inexistente, voltando a aparecer para produtos com 40% de cinzas (1,15% em massa).

A recuperação mássica na obtenção do produto com 40% de cinzas é cerca de 33-34% superior a do produto com 25% de cinzas. Para obtenção de carvão lavado com 40% de cinzas é necessário apenas um corte densimétrico, ao passo que para obtenção de produtos com menores teores de cinzas, dois cortes são necessários.

Para os carvões estudados, a diferença em termos de recuperação em massa é insuficiente para justificar uma mudança de um equipamento para outro. É aconselhável, também, dirigir a produção de carvão lavado para teores de cinzas superiores a 35%, pois assim, as perdas de matéria carbonosa no rejeito serão menores, acarretando maiores eficiências. Das tabelas acima pode-se notar que quanto menor o teor de cinzas do carvão lavado, tanto menor será o teor do rejeito e vice-versa.

Em relação a comparação da simulação com os testes realizados, a tabela 13, a seguir, sumariza os resultados obtidos.

Tabela 13 - Comparação entre a Simulação e os Testes Realizados

	RECREIO		BUTIÁ-LESTE	
	Rec. (%)	% Cz	Rec. (%)	% Cz
Simulação Baum	55,70	34,94	53,66	29,96
Simulação Batac	55,89	34,99	53,98	29,98
Teste Baum	55,50	34,45	54,70	31,42

Pelos valores tabelados, observa-se que o jigue do Lavador do Recreio, nos testes realizados, está operando em condições ótimas de funcionamento (os resultados dos testes e da simulação são muito parecidos). Logo, não existem

problemas no circuito de grossos e as perdas causadas neste ponto são bastante baixas, conforme tabela 09.

A tabela 09 também mostra as altas perdas que ocorrem no circuito de finos, principalmente no "undersize" da peneira desaguadora do produto fino final. Então, partiu-se para estudos de simulação de um estágio de beneficiamento gravítico para estes finos. Os resultados obtidos com o carvão do Recreio são mostrados na tabela 14, a seguir.

Tabela 14 - Resultados de Simulação da Fração -1+0,074 mm do Carvão do Recreio

Produto	MESAS CONC.		ESPIRAIS		CICLONES AUT.	
	Rec. (%)	% Cz	Rec. (%)	% Cz	Rec. (%)	% Cz
C. Lavado	39,35	20,81	41,08	20,28	----	----
Rejeito	60,65	55,66	58,92	57,60	----	----
C. Lavado	59,77	24,98	54,37	24,62	42,71	26,91
Rejeito	40,23	67,16	45,63	62,60	57,29	53,16
C. Lavado	71,87	29,82	67,04	29,66	59,46	29,95
Rejeito	28,13	72,94	32,96	66,94	40,54	59,55
C. Lavado	84,04	34,96	80,17	34,78	74,70	34,78
Rejeito	15,96	78,72	19,83	70,79	25,30	63,13

A obtenção de carvão lavado com 20% de cinzas só é possível com a utilização de mesas concentradoras e espirais, sendo que as mesas apresentam uma recuperação em massa 1,73% menor.

Para carvão lavado com 25% de cinzas, as recuperações em massa foram 59,77% para as mesas e 54,37% para as espirais enquanto que para ciclones autógenos só foi possível a obtenção de carvão lavado com 27% de cinzas e recuperação de 43%.

Para carvão lavado com 30% de cinzas, as recuperações em massa variaram entre 71,87% e 67,04% para mesas e espirais, respectivamente. Já os ciclones autógenos mostraram recuperação de 59,46%.

Para carvão lavado com 35% de cinzas, as recuperações foram de 84,04% para mesas, 80,17% para espirais e 74,70% para ciclones autógenos.

Da mesma forma que para os jigues, é aconselhável direcionar a produção para obtenção de carvões lavados com 30-35% de cinzas pela alta recuperação de matéria carbonosa.

A tabela 15, a seguir, apresenta os resultados da simulação para os finos do carvão do Butiá-Leste.

Tabela 15 - Resultados da Simulação da Fração -1+0,074 mm do Carvão do Butiá-Leste

Produto	MESAS CONC.		ESPIRAIS		CICLONES AUT.	
	Rec. (%)	% Cz	Rec. (%)	% Cz	Rec. (%)	% Cz
C. Lavado	54,82	19,95	55,49	19,99	----	----
Rejeito	45,18	48,76	44,51	49,14	----	----
C. Lavado	84,02	24,99	78,62	24,92	70,21	24,98
Rejeito	15,98	74,90	21,38	62,53	29,79	51,78
C. Lavado	90,41	28,09	86,40	27,52	82,65	27,99
Rejeito	9,59	78,91	13,60	67,53	17,35	56,62

Igualmente, a obtenção de carvão lavado com 20% de cinzas só é possível com a utilização de mesas concentradoras e espirais, sendo que as mesas apresentam uma recuperação em massa 0,67% menor.

Para carvão lavado com 25% de cinzas, as recuperações em massa variaram entre 84,02% e 78,62% para mesas concentradoras e espirais, respectivamente. Para ciclones autógenos, a recuperação foi bem menor (70,21%).

Para carvão lavado com 30% de cinzas, a recuperação em massa para as mesas foi de 90,41%, para as espirais de 86,40% e para os ciclones autógenos de 82,65%.

Comparando-se os equipamentos simulados, conclui-se que os melhores resultados foram obtidos com o uso de mesas concentradoras. Apesar disso, face ao elevado custo de aquisição, instalação e operação, quando comparados aos das espirais e ciclones autógenos, de custo bem mais reduzido,

não se pode concluir com certeza, sem estudo econômico prévio, que as mesas concentradoras sejam os equipamentos mais apropriados para o beneficiamento dos finos do Lavador do Recreio.

5. ANÁLISE ECONÔMICA

5.1. INTRODUÇÃO

Nesta parte do trabalho são apresentadas as conclusões referentes a análise técnica e econômica realizada sobre uma proposta de modificação no circuito atual de processamento dos finos beneficiados no Lavador do Recreio.

A referida modificação consiste fundamentalmente na inserção de um estágio de concentração gravítica (mesas concentradoras, espirais concentradoras ou ciclones autógenos), para processar o "underflow" da bateria de hidrociclones e substituição da malha das peneiras desaguadoras do circuito atual de 0,5 para 0,15 mm²⁴.

5.2. METODOLOGIA

Para definição do balanço de massas e metalúrgico de operação dos circuitos propostos, utilizou-se o balanço de massas obtido via simulação da fração -1+0,074 mm (tabela 14 e tabela 15) e uma contaminação do produto final pela fração -0,074 mm de 10% em massa (eficiência de 90% na deslamagem do produto final). Foi definido um regime operacional de 4.000 horas/ano, considerando que a produção total se deve a 80% de participação do carvão do Recreio (3.280 horas/ano) e 20% do carvão do Butiá-Leste (720 horas/ano). A vida útil do circuito de finos foi definida como sendo de no máximo seis anos, devido à exaustão prevista das reservas de carvão disponíveis.

O investimento estimado refere-se aos custos das modificações no circuito atual. Os custos operacionais se referem ao custo adicional em relação aos custos atuais. Dessa forma, a análise econômica realizada se relaciona com os benefícios e despesas incrementais em relação à situação existente no momento.

5.3. SITUAÇÃO DO CIRCUITO ATUAL

A composição da performance atual para a produção do Lavador (tabela 16, a seguir) nos mostra que obtém-se cerca de 40.000 toneladas/ano de carvão que, blendados, apresentam cerca de 37% de cinzas. Considerando um preço de venda diferenciado para cada tipo de produto obtido, chega-se a um rendimento bruto anual de aproximadamente US\$ 1.100.000, ou cerca de US\$ 27,8/ton.

Tabela 16 - Produção Atual do Lavador do Recreio

	Partic. (%)	horas/ano (h/a)	Prod/ano (t/a)	Cinzas (%)	Capacid. (tph)	Preço Venda (US\$/ton)	Rendimento (US\$/ano)	Faturamento (partic. %)
RECREIO	80	3.280	30.000	39,8	9,2	25,0	754.400	67,9
BUTIÁ-LESTE	20	720	9.600	27,9	13,4	37,0	357.000	32,1
TOTAL	100	4.000	39.600	36,9	9,7	27,8	1.111.400	100,0

5.4. CARACTERIZAÇÃO DOS CIRCUITOS ALTERNATIVOS

Para a estimativa do rendimento e teor de cinzas do produto final dos circuitos alternativos, fez-se a composição dos resultados obtidos via simulação da fração -1+0,074 mm com os ultrafinos (-0,074 mm) presentes no "underflow" dos hidrociclones. A percentagem de ultrafinos na alimentação do equipamento gravítico foi estimada a partir dos resultados obtidos nos ensaios granulométricos (tabela 07).

Para o carvão do Recreio, a percentagem da fração ultrafina na alimentação do equipamento gravítico variou entre 27,63% (análise granulométrica do "underflow" dos hidrociclones) e 32,77% (valor obtido via composição das análises granulométricas do "oversize" e "undersize" da peneira do produto fino final). Para o carvão do Butiá-Leste, as percentagens obtidas foram, respectivamente, 16,97% ("underflow") e 25,27% (composição). Na avaliação do rendimento final foi considerado o valor médio obtido entre estas duas aproximações.

5.5. AVALIAÇÃO ECONÔMICA DOS CIRCUITOS ALTERNATIVOS

5.5.1. ESPIRAIS CONCENTRADORAS

A composição das melhores opções obtidas com as duas aproximações usadas e a média dos rendimentos estimados para avaliação econômica das espirais se encontram nas tabelas 17 e 18, a seguir e 19, em anexo.

Tabela 17 - Melhores Opções de Beneficiamento Obtidas por Simulação para as Espirais

	Cz (%) (+0,074 mm)	Cinzas (%)	Produção (ton/ano)	Rendimento (US\$/ano)
RECREIO (27,63% <200#)	29,66	31,90	35.621	1.247.000
RECREIO (32,77% <200#)	29,66	32,49	33.554	1.171.000
MÉDIA (Produto Final)	29,66	32,19	34.602	1.209.000
BUTIÁ (16,97% <200#)	27,52	28,32	14.825	548.000
BUTIÁ (25,27% <200#)	27,52	28,82	13.522	500.000
MÉDIA (Produto Final)	27,52	28,57	14.173	524.000

Tabela 18 - Resultados de Produção para as Espirais

	Cinzas (%)	Produção (ton/ano)	Rendimento (US\$/ano)	Participação	
				% Prod	% Rendim
CARVÃO RECREIO	32,19	34.602	1.209.000	70,9	69,7
CARVÃO BUTIÁ-LESTE	28,57	14.173	524.000	29,1	30,3
PRODUÇÃO ANUAL	31,14	48.775	1.733.000	100,0	100,0
Rendimento Médio/tonelada de Produto Final: US\$ 35,53/ton					

O rendimento incremental em relação ao circuito atual é de US\$ 623.000/ano, ou cerca de US\$ 12,77/ton.

Considerando que o circuito adicional para a instalação das espirais requer poucas modificações no atual, os custos de investimento se referem basicamente ao custo de aquisição, transporte e instalação das mesmas e

tubulações auxiliares para a polpa. O investimento adicional total é estimado entre US\$ 100.000 e 150.000, com uma vida útil de seis anos. O custo anual de capital (taxa de 12% aa) está entre US\$ 25.000 e 37.000/ano, correspondentes a US\$ 0,51 e 0,76/ton. O custo operacional incremental das espirais é baixo e refere-se basicamente ao bombeamento de água para regulagem da percentagem de sólidos da alimentação, transporte de polpa e desgaste dos revestimentos da espiral e tubulações. O custo operacional anual estimado é de US\$ 15.000/ano, o que corresponde a US\$ 0,31/ton. Chega-se a um custo total entre US\$ 40.000 e 52.000/ano, correspondentes a US\$ 0,82 e 1,07/ton.

Levando-se em conta os custos totais de capital e operacional e a atual produção do Lavador do Recreio, tem-se um rendimento líquido entre US\$ 11,95 e 11,70/ton, gerando entre US\$ 583.000 e 571.000/ano. Logo, o "payback" do investimento em espirais está entre 0,17 e 0,26 anos (2 a 3 meses) ou 8.368 e 12.821 toneladas de carvão lavado.

5.5.2. MESAS CONCENTRADORAS

A comparação das melhores opções obtidas com as duas aproximações usadas e a média dos rendimentos estimados para avaliação econômica das mesas se encontram nas tabelas 20 e 21, a seguir e 22, em anexo.

Tabela 20 - Melhores Opções de Beneficiamento Obtidas por Simulação para as Mesas

	Cz (%) (+0,074 mm)	Cinzas (%)	Produção (ton/ano)	Rendimento (US\$/ano)
RECREIO (27,63% <200#)	34,96	36,64	44.313	1.285.000
RECREIO (32,77% <200#)	34,96	37,07	41.623	1.207.000
MÉDIA (Produto Final)	34,96	36,86	42.968	1.246.000
BUTIÁ (16,97% <200#)	24,99	25,82	14.407	562.000
BUTIÁ (25,27% <200#)	24,99	26,33	13.133	512.000
MÉDIA (Produto Final)	24,99	26,08	13.770	537.000

Tabela 21 - Resultados de Produção para as Mesas

	Cinzas (%)	Produção (ton/ano)	Rendimento (US\$/ano)	Participação	
				% Prod	% Rendim
CARVÃO RECREIO	36,86	42.968	1.246.000	75,7	69,9
CARVÃO BUTIÁ-LESTE	26,08	13.770	537.000	24,3	30,1
PRODUÇÃO ANUAL	34,24	56.738	1.783.000	100,0	100,0
Rendimento Médio/tonelada de Produto Final: US\$ 31,43/ton					

O rendimento incremental em relação ao circuito atual é de US\$ 673.000/ano, ou cerca de US\$ 11,86/ton.

Considerando que o circuito adicional para a instalação das mesas concentradoras requer grandes modificações no circuito atual, com necessidades de um prédio separado para as mesas, tubulações, bases para equipamentos e motores, o custo de investimento é bem superior ao das espirais e ciclones autógenos. O investimento adicional total é estimado entre US\$ 400.000 e 600.000, com uma vida útil de seis anos. Considerou-se um valor residual para as mesas igual a 15% do investimento inicial. O custo anual equivalente de capital (taxa 12% aa) está entre US\$ 83.000 e 124.000/ano, correspondentes a US\$ 1,46 e 2,18/ton. O custo operacional incremental das mesas é bem mais elevado que os custos das espirais e ciclones devido às necessidades de energia elétrica para acionamento dos motores das mesas, necessidades de bombeamento de água e polpa, maior supervisão e maior desgaste das partes móveis. O custo operacional estimado é de cerca de US\$ 70.000/ano, o que corresponde a US\$ 1,23/ton. Chega-se a um custo total entre US\$ 153.000 e 194.000/ano, correspondentes a US\$ 2,69 e 3,42/ton.

Levando-se em conta os custos totais de capital e operacional e a atual produção do Lavador do Recreio, tem-se um rendimento líquido entre US\$ 9,17 e 8,44/ton, gerando entre US\$ 520.000 e 479.000/ano, para 4.000 horas de operação/ano. Logo, o "payback" do investimento em mesas

está entre 0,77 e 1,15 anos (9 a 13 meses) ou 43.620 e 71.090 toneladas de carvão lavado.

5.5.3. CICLONES AUTÓGENOS

A composição das melhores opções obtidas com as duas aproximações usadas e a média dos rendimentos estimados para análise econômica dos ciclones se encontram nas tabelas 23 e 24, a seguir e 25, em anexo.

Tabela 23 - Melhores Opções de Beneficiamento Obtidas por Simulação para os Ciclones

	Cz (%) (+0,074 mm)	Cinzas (%)	Produção (ton/ano)	Rendimento (US\$/ano)
RECREIO (27,63% <200#)	34,78	36,58	39.491	1.145.000
RECREIO (32,77% <200#)	34,78	37,05	37.162	1.078.000
MÉDIA (Produto Final)	34,78	36,82	38.326	1.112.000
BUTIÁ (16,97% <200#)	27,99	28,81	14.191	511.000
BUTIÁ (25,27% <200#)	27,99	29,33	12.960	467.000
MÉDIA (Produto Final)	27,99	29,07	13.575	489.000

Tabela 24 - Resultados de Produção para os Ciclones

	Cinzas (%)	Produção (ton/ano)	Rendimento (US\$/ano)	Participação	
				% Prod	% Rendim
CARVÃO RECREIO	36,82	38.326	1.112.000	73,8	69,5
CARVÃO BUTIÁ-LESTE	29,07	13.575	489.000	26,2	30,5
PRODUÇÃO ANUAL	34,79	51.907	1.601.000	100,0	100,0
Rendimento Médio/tonelada de Produto Final: US\$ 30,84/ton					

O rendimento incremental em relação ao circuito atual é de US\$ 491.000/ano, ou cerca de US\$ 9,45/ton.

Considerando que o circuito adicional para instalação dos ciclones exige modificações de médio porte no circuito atual, o mesmo pode ser instalado ao lado do

circuito atual com necessidades de tanques de alimentação, base para ciclones autógenos, motores, bombas e tubulações. O custo do investimento inicial se compõe de aquisição, transporte e instalação dos ciclones e modificações citadas. O investimento adicional total é estimado entre US\$ 40.000 e 60.000, com vida útil de quatro anos. O custo anual equivalente de capital (taxa 12% aa) está entre US\$ 13.000 e 20.000/ano, correspondentes a US\$ 0,25 e 0,39/ton. O custo operacional incremental proporcional dos ciclones é intermediário entre as espirais e mesas e refere-se basicamente ao bombeamento de água para regulagem da percentagem de sólidos da alimentação, transporte de polpa e desgaste dos revestimentos dos ciclones e tubulações. O custo operacional anual estimado é de cerca de US\$ 10.000/ano, o que corresponde a US\$ 0,19/ton. Chega-se a um custo total entre US\$ 23.000 e 30.000/ano, correspondentes a US\$ 0,44 e 0,58/ton.

Levando-se em conta os custos totais de capital e operacional e a atual produção do Lavador do Recreio, tem-se um rendimento líquido entre US\$ 9,01 e 8,87/ton, gerando entre US\$ 468.000 e 461.000/ano, para 4.000 horas de operação/ano. Logo, o "payback" do investimento em ciclones autógenos está entre 0,09 e 0,13 anos (1 a 2 meses) ou 4.440 e 6.764 toneladas de carvão lavado.

Para finalizar este breve estudo econômico, a partir dos resultados obtidos na análise realizada sobre as alternativas de modificação estudadas, elaborou-se a tabela 26, a seguir, onde são apresentados os principais critérios de comparação entre as opções.

Tabela 26 - Resumo dos Critérios de Decisão

	PRODUÇÃO ANUAL				CRITÉRIOS ECONÔMICOS					
	RECREIO ton/a % Cz		BUTIÁ-LESTE ton/a % Cz		RENDIM (US\$/a)	INCREM (\$/ton)	CUSTOS (\$/ton)	INVEST (US\$)	PAYBACK anos ton	PREÇO (\$/ton)
ESPIRAIS	34.602	32,19	14.173	28,57	623.000	12,77	0,95	125.000	0,22 10.594	35,53
MESAS	42.968	36,86	13.770	26,08	673.000	11,86	3,05	500.000	0,96 57.355	31,43
CICLONES	38.326	36,82	13.575	29,07	491.000	9,45	0,51	50.000	0,11 5.602	30,84

6. UTILIZAÇÃO DE ESPIRAIS NO CIRCUITO DE FINOS

6.1. INTRODUÇÃO

Perdas grandes no circuito de finos ("undersize" da peneira do produto fino final) o suficiente para a utilização de um estágio de beneficiamento gravimétrico de finos no circuito atual foram detectadas. Com isto, surgiram as seguintes hipóteses de alteração, com o intuito de reduzi-las ou, até mesmo, eliminá-las: utilização de espirais concentradoras, ciclones autógenos ou mesas concentradoras. Após estudos de simulação e técnico-econômicos de viabilidade, concluiu-se, preliminarmente, que a melhor opção, por apresentar melhor relação custo x benefício, seria a utilização de espirais concentradoras.

Então, o principal objetivo desta parte do trabalho foi a realização de testes em escala piloto visando a otimização do desempenho da espiral concentradora com vistas a sua futura utilização no circuito de finos do Lavador do Recreio. Para tal, variações nos principais parâmetros operacionais (taxa de alimentação, percentagem de sólidos e posicionamento dos desviadores) da espiral foram efetuadas²⁵.

6.2. METODOLOGIA, EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS

6.2.1. METODOLOGIA

A unidade para testes foi instalada de tal modo a receber parte do "underflow" da bateria de hidrociclones, sendo a vazão de alimentação controlada por intermédio de válvulas. Uma válvula adicional controlava a concentração de sólidos através da injeção de água limpa.

Oito carvões provenientes de diferentes zonas ou camadas das Minas do Recreio e Butiá-Leste foram testados. Foram eles: 1ª e 2ª Camadas Butiá-Leste, 1ª e 2ª Camadas Charrua Sul, 1ª Camada Riocell, Riocell Camadas A e B e Busato.

Cada teste transcorreu por aproximadamente três horas, com amostragens sendo efetuadas a cada 5 minutos, em cada produto da espiral (carvão lavado, mistos e rejeito). A cada 30 minutos era efetuada uma tomada de vazão dos produtos. No início dos testes, da mesma forma, uma medição de concentração de sólidos dos produtos era efetuada. Com isto, foi possível a determinação da taxa de alimentação (sólidos e polpa) e da concentração de sólidos do que ora alimentava a espiral.

Adicionalmente, medidas para determinação da vazão mássica do "underflow" dos hidrociclones, com o fim de dimensionar o número de espirais, foram realizadas, através da reconstituição do "undersize" e "oversize" da peneira do produto fino final. O procedimento adotado foi o seguinte: medição da vazão do "undersize", juntamente com duas tomadas de concentração deste ponto e medição da vazão mássica do "oversize" pela pesagem do material depositado no silo de finos (amostras da correia do "oversize" eram coletadas para determinação de umidade com o fim da obtenção de resultados relatados à base seca).

Devido a grande quantidade de material ultrafino na alimentação da espiral, foi realizado, também, um teste com amostragem do "underflow" (a amostragem foi realizada em campanha de 2 horas, sendo coletadas alíquotas a cada 15 minutos) dos quatro hidrociclones (ciclone A, ciclone B, ciclone C e ciclone D) e conseqüente análise granulométrica nas malhas 0,50 mm, 0,25 mm e 0,15 mm.

6.2.2. EXPERIMENTAL

Após serem coletadas, as amostras eram secas e quarteadas. Então, cada um dos produtos, quais sejam, carvão lavado, mistos e rejeito, foi submetido a análise granulométrica em peneiras com abertura de 0,75 mm, 0,50 mm, 0,25 mm e 0,15 mm, gerando, assim, cinco faixas granulométricas. Destas, eram retiradas alíquotas representativas para realização de análises químicas (cinzas base seca e enxofre total, em duas e uma via, respectivamente).

Ensaio densimétricos, nas densidades 1,3, 1,4, 1,5, 1,6, 1,7, 1,8, 1,9, 2,0, 2,2 e 2,4 g/cm³, foram realizados, para determinação das características de lavabilidade dos carvões alimentados à espiral (alimentação reconstituída) e, também, para determinação das curvas de partição da espiral, quando beneficiando três carvões convenientemente escolhidos (1ª Camada Riocell, 1ª Camada Butiá-Leste e Camada B Riocell) sob condições diferentes de alimentação.

Para a interpolação dos coeficientes de partição (modelamento das curvas) foram utilizados nove modelos diferentes (Erasmus, Lynch, Trawinski, Heurístico, Kelly, Tangente Hiperbólica, Tangente Hiperbólica Modificada, Argumento do Seno Hiperbólico e Rong - tabela 27, em anexo), sendo escolhido o que apresentasse menor desvio em relação aos pontos experimentais.

6.2.3. EQUIPAMENTOS

A unidade para testes utilizada foi a espiral de Reichert LD 9, manufaturada na AKW do Brasil, em Atibaia, interior do estado de São Paulo.

As análises granulométricas foram realizadas em peneirador marca BERTEL, adaptado para peneiramento a úmido e um jogo de peneiras Tyler.

Os ensaios densimétricos foram efetuados em "becker" de 1 l, utilizando-se como meio denso misturas de xilol, percloroetileno e bromofórmio.

Para determinação da vazão nos produtos da espiral foram utilizados: balde de 10 l, "becker" de 200 ml e provetas graduadas de 1 l.

Finalmente, para determinação da vazão pelo "undersize" da peneira desaguadora do produto fino final, além de provetas graduadas de 1 l, um tonel de 200 l foi utilizado.

6.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para cada teste, com seus respectivos valores de taxa de alimentação (polpa e

sólidos), concentração de sólidos, posicionamento dos desviadores, teor de cinzas e enxofre total são apresentados na tabela 28, em anexo. Todas as alimentações foram reconstituídas.

Devido a grande quantidade de material ultrafino remanescente no "underflow" dos hidrociclones (alimentação da espiral), os produtos desta apresentaram uma grande contaminação para todos os testes, já que esta fração possui alto teor de cinzas. A distribuição dos ultrafinos ($-0,15$ mm) (matéria orgânica e matéria mineral) se dá de forma aleatória pelos produtos (figuras 14 a 20, a seguir) pois, pelas leis de sedimentação, o efeito da densidade é mascarado pela granulometria nesta faixa. Porém, a maioria destes é carregado juntamente com a água para o carvão (arraste). É sabido que em espirais, pela ação da força centrífuga, o produto que recupera uma maior quantidade é o carvão lavado (produto leve).

Na tabela 29, em anexo, os resultados estão dispostos em duas faixas granulométricas distintas, sendo elas $-1 +0,15$ mm e $-0,15$ mm. Com os valores expostos, torna-se evidente a necessidade de uma deslamagem posterior eficaz.

Analisando-se os dados, verifica-se a possibilidade de obtenção de vários produtos com os vários carvões disponíveis regulando-se apenas os desviadores. Levando-se em conta recuperação e teor de cinzas, os carvões beneficiados apresentam diferentes qualidades, sendo o carvão proveniente da Mina do Butiá-Leste o que apresenta melhor rendimento. Quanto aos carvões provindos da Mina do Recreio, o da 1ª Camada da Riocell e Busato são os que geram melhores produtos para uma mesma recuperação, se comparados aos outros carvões desta mesma mina. Sem dúvidas, os carvões mais problemáticos são os da Camada A e Camada B, não somente pelo baixo rendimento, levando em consideração os teores de cinzas, mas também pelos altos teores de enxofre total. Ainda em relação ao enxofre, outro fato notado foi que carvões sabidamente com alto teor de enxofre pirítico (Mina do Butiá-Leste), com o beneficiamento em espirais, mostram um produto (carvão lavado + mistos) com teores de

1a Camada Butia-Leste

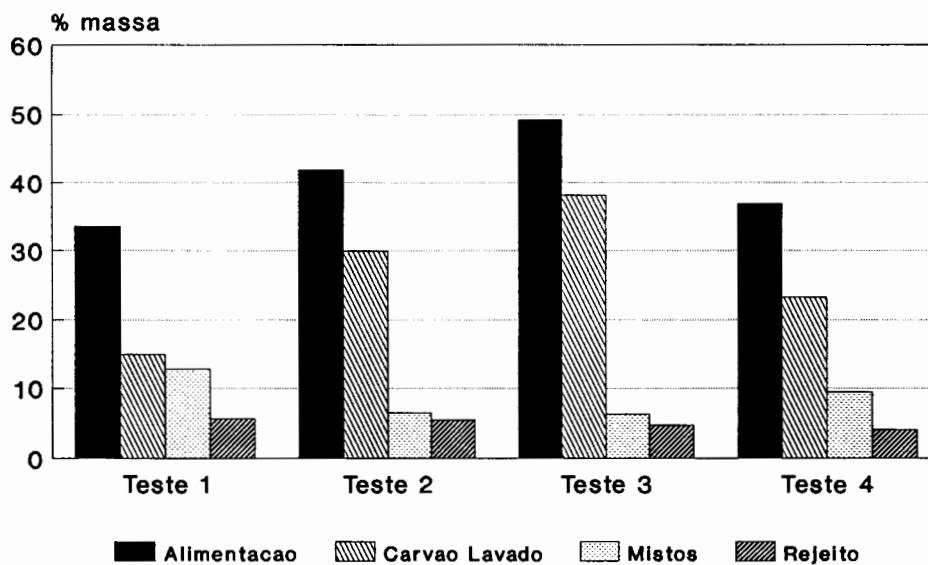


Figura 14 - Recuperacao em massa da fraccao -0,15 mm - Carvao 1a Camada Butia-Leste

2a Camada Butia-Leste

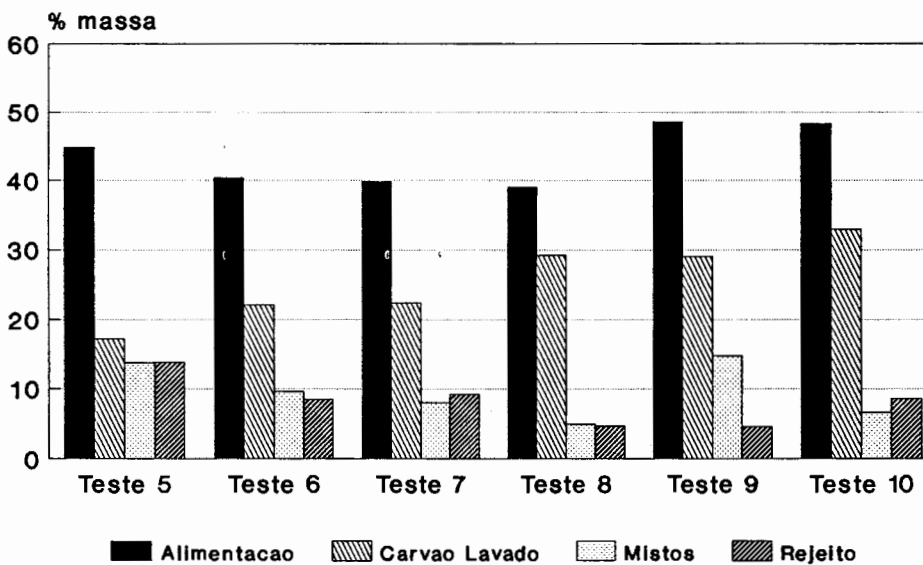


Figura 15 - Recuperacao em massa da fraccao -0,15 mm - Carvao 2a Camada Butia-Leste

1a Camada Charrua Sul

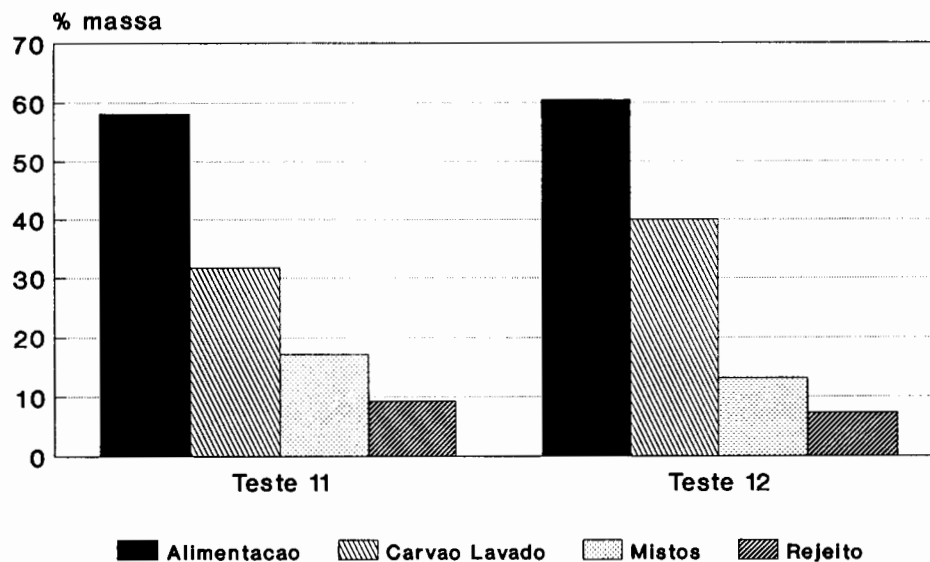


Figura 16 - Recuperação em massa da fração $-0,15$ mm - Carvão 1a Camada Charrua Sul

2a Camada Charrua Sul

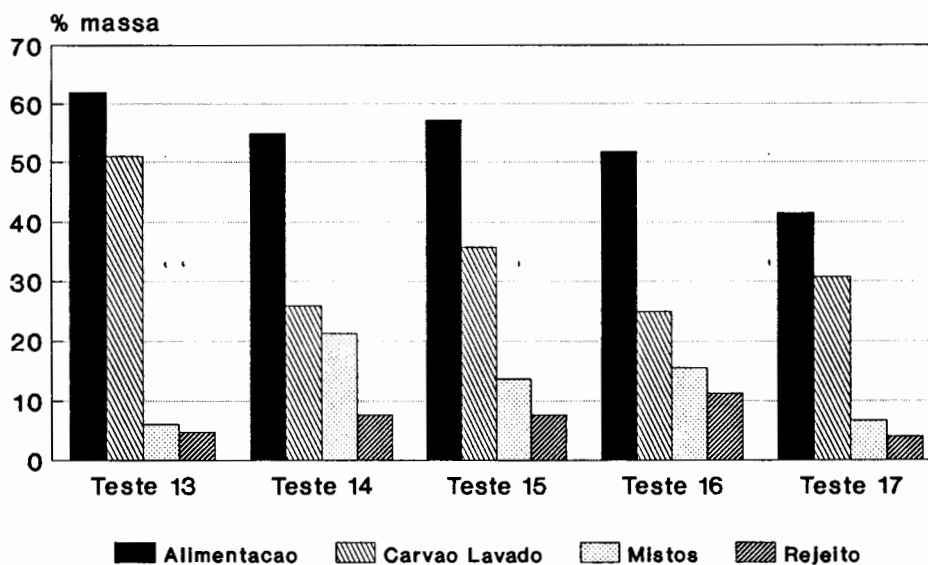


Figura 17 - Recuperação em massa da fração $-0,15$ mm - Carvão 2a Camada Charrua Sul

1a Camada Riocell

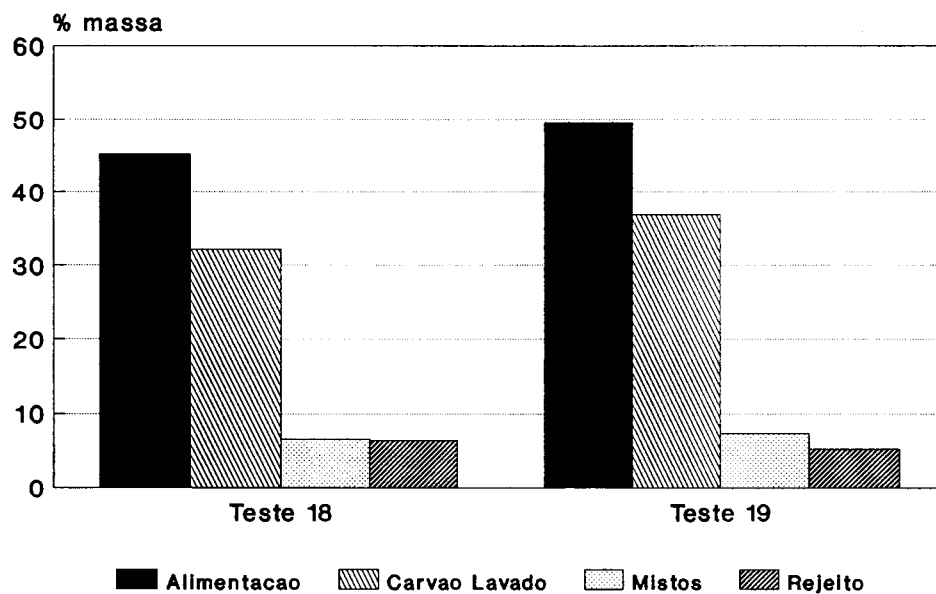


Figura 18 - Recuperacao em massa da fraccao -0,15 mm - Carvao 1a Camada Riocell

Riocell Camada B

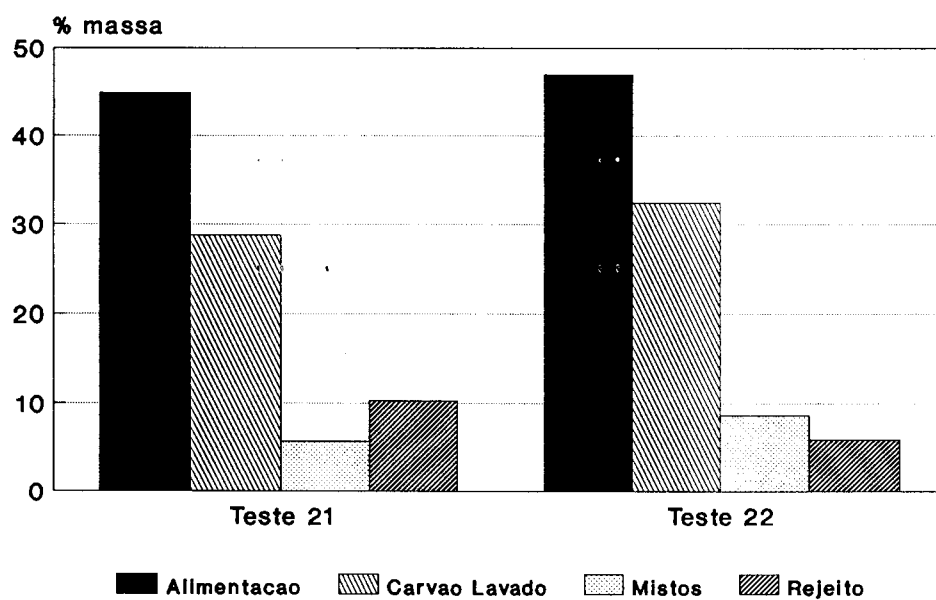
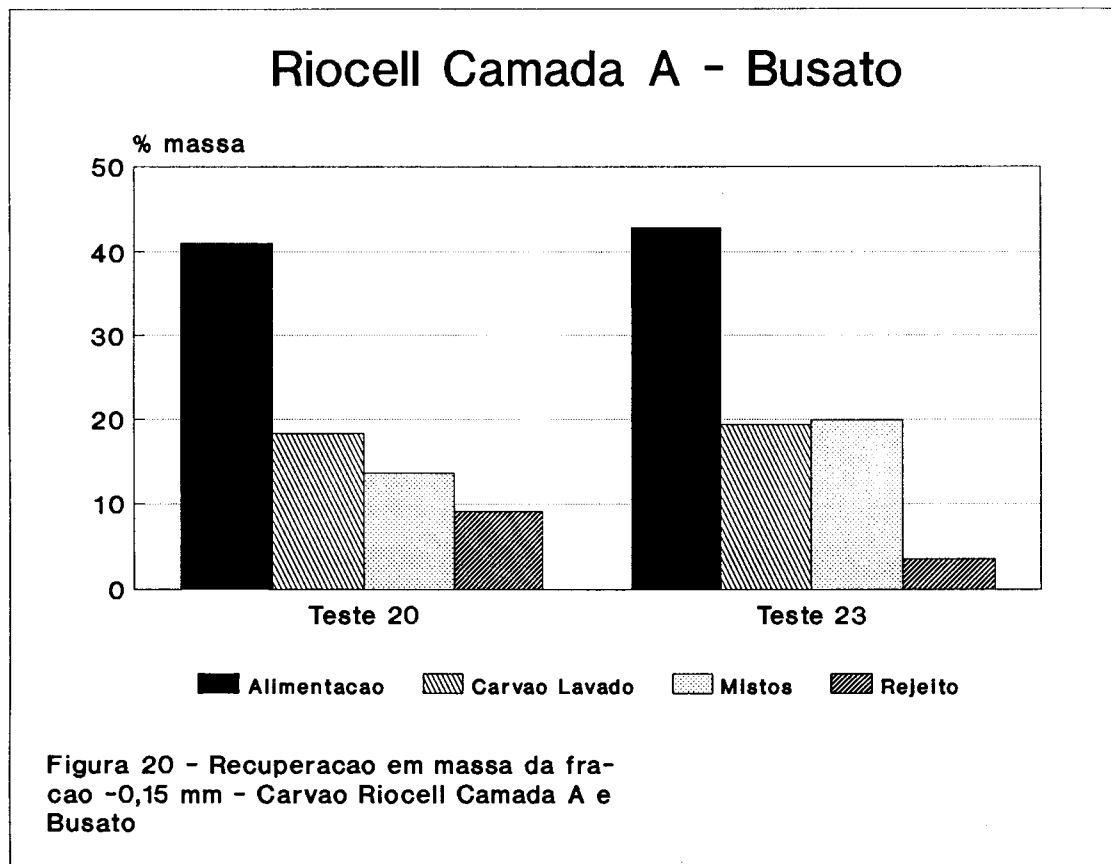


Figura 19 - Recuperacao em massa da fraccao -0,15 mm - Carvao Riocell Camada B



enxofre bastante baixos (figuras 21 a 27, a seguir). Além disso, deve-se salientar que a pirita com granulometria maior é separada no estágio anterior de beneficiamento (jigue).

A faixa granulométrica que está alimentando a espiral (-1 mm) se encontra dentro do indicado. Porém, as partículas do carvão lavado mais próximas de 1 mm, via de regra, possuem teores de cinzas mais baixos, enquanto que as partículas mais finas (próximas a 0,15 mm) mostram teores de cinzas mais altos. Já nos mistos, ocorre fenômeno oposto; partículas próximas a 1 mm possuem teores de cinzas mais altos e as próximas a 0,15 mm, teores de cinzas mais baixos. Isto infere-se a perda de eficiência do equipamento com a diminuição da granulometria. No rejeito, todas as partículas (tanto abaixo quanto acima de 0,15 mm) possuem altos teores de cinzas. Até 0,15 mm, a eficiência da separação não compromete o processo. Em granulometrias menores (-0,15 mm), a separação não ocorre por métodos físicos. Logo, a deslamagem anterior deve ser otimizada. Se, mesmo assim, uma grande percentagem desta fração permanecer na alimentação da espiral, uma deslamagem ulterior deve ser projetada, uma vez que a espiral não tem como função separar por granulometria. Um circuito ideal seria uma deslamagem do produto leve da espiral em novo estágio de hidrociclones, seguido de peneiramento do "underflow" em 0,15 mm, com aproveitamento do "oversize" da peneira. Este produto, após sofrer este processo, permaneceria com uma umidade de aproximadamente 40%. Por questões de mercado, secagem e briquetagem podem ser convenientes. A alimentação deste novo estágio de hidrociclones ficaria em torno de 17-20 tph, sendo necessários para tal 2 hidrociclones de 10 tph.

Em relação aos parâmetros operacionais da espiral, o limite de operação sem interferência na eficiência é bastante grande, para ambos taxas de alimentação e percentagem de sólidos. Nos testes realizados, as taxas de alimentação variaram de 0,432 tph até 1,621 tph enquanto que a percentagem de sólidos variou de 8% a 50%. Por questões econômicas, é recomendada uma maior alimentação possível desde que não altere o funcionamento do equipamento, pois

1a Camada Butia-Leste

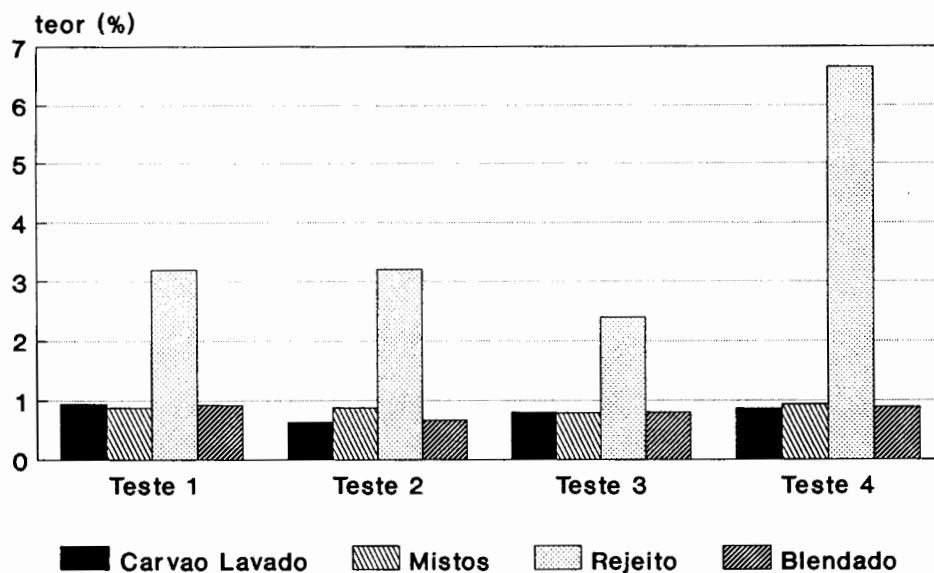


Figura 21 - Teores de enxofre total na fração $-1+0,15$ mm - Carvão 1a Camada Butia-Leste

2a Camada Butia-Leste

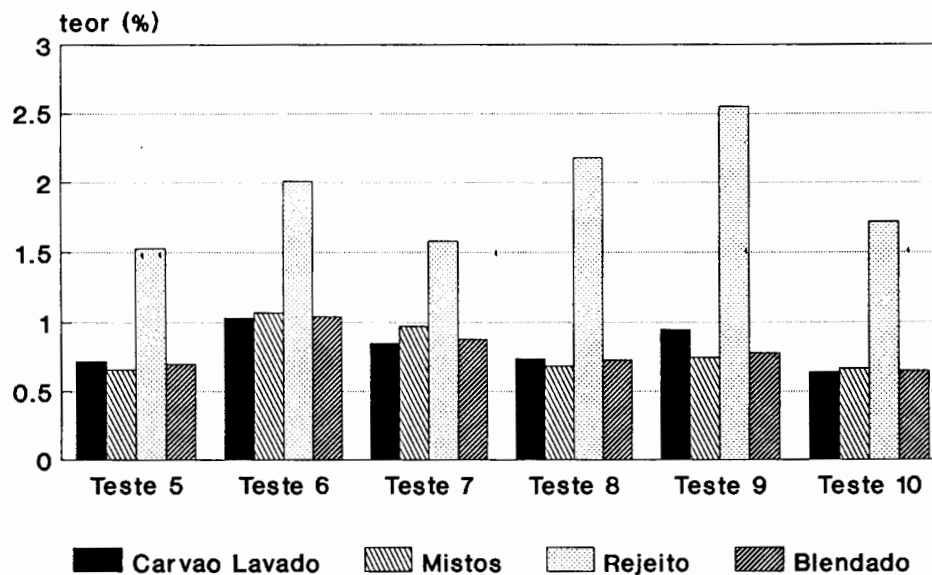


Figura 22 - Teores de enxofre total na fração $-1+0,15$ mm - Carvão 2a Camada Butia-Leste

1a Camada Charrua Sul

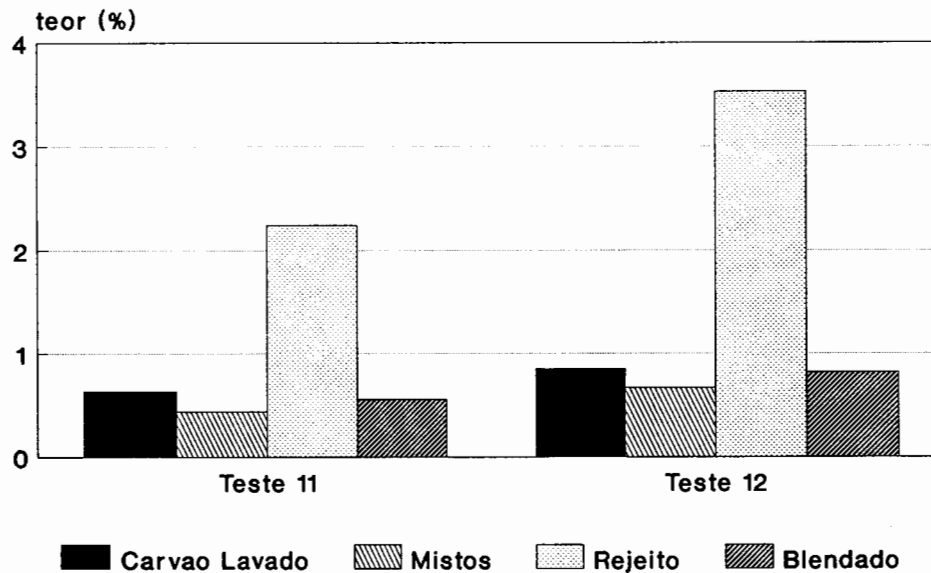


Figura 23 - Teores de enxofre total na fração $-1+0,15$ mm - Carvão 1a Camada Charrua Sul

2a Camada Charrua Sul

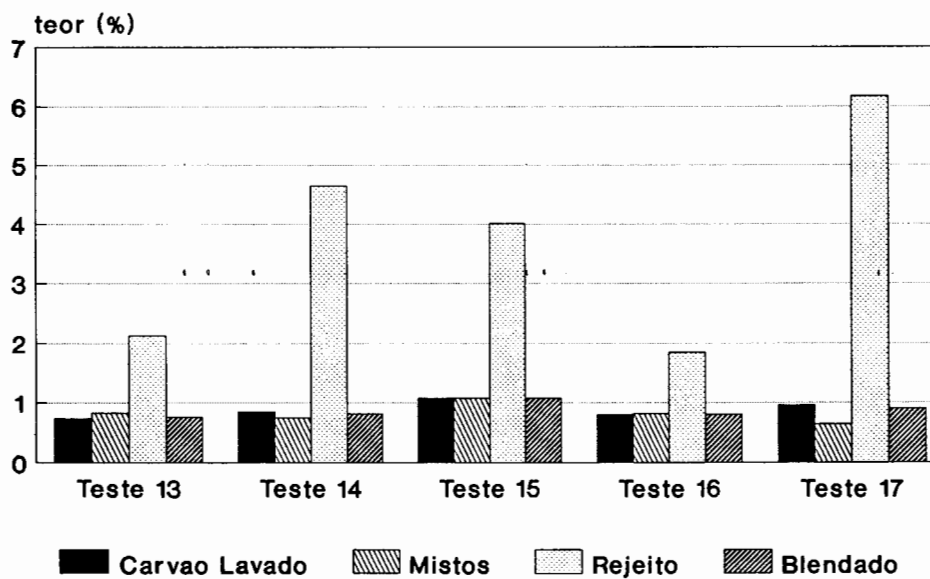


Figura 24 - Teores de enxofre total na fração $-1+0,15$ mm - Carvão 2a Camada Charrua Sul

1a Camada Riocell

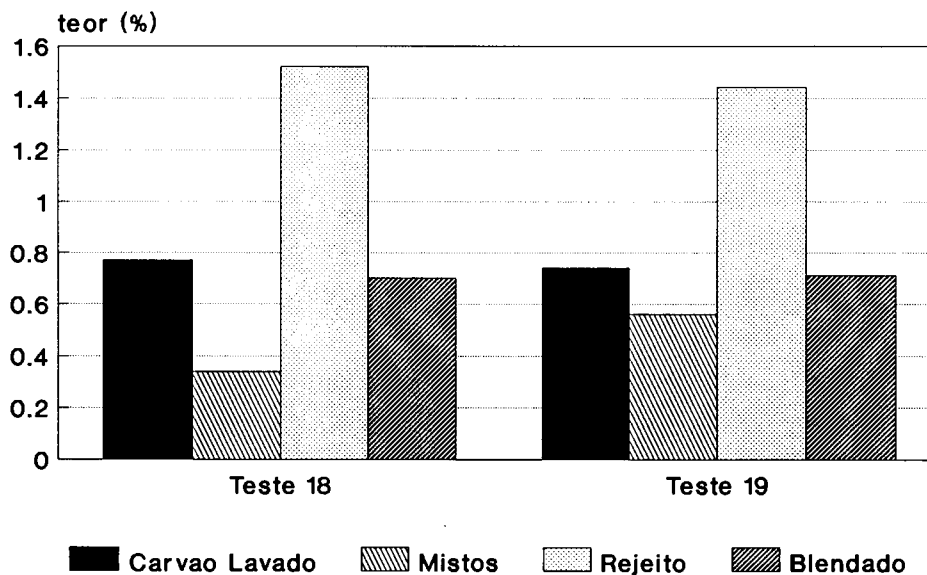


Figura 25 - Teores de enxofre total na fração -1+0,15 mm - Carvão 1a Camada Riocell

Riocell Camada B

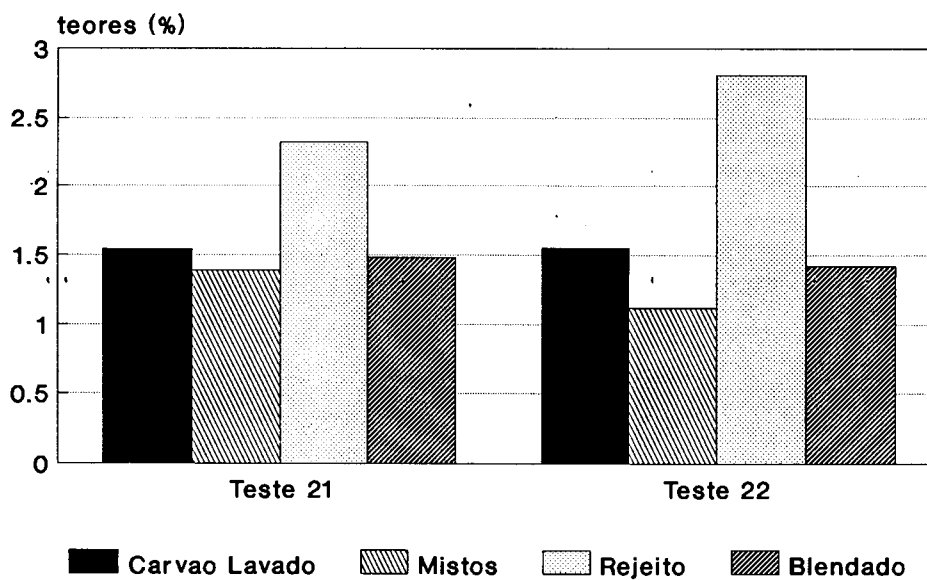
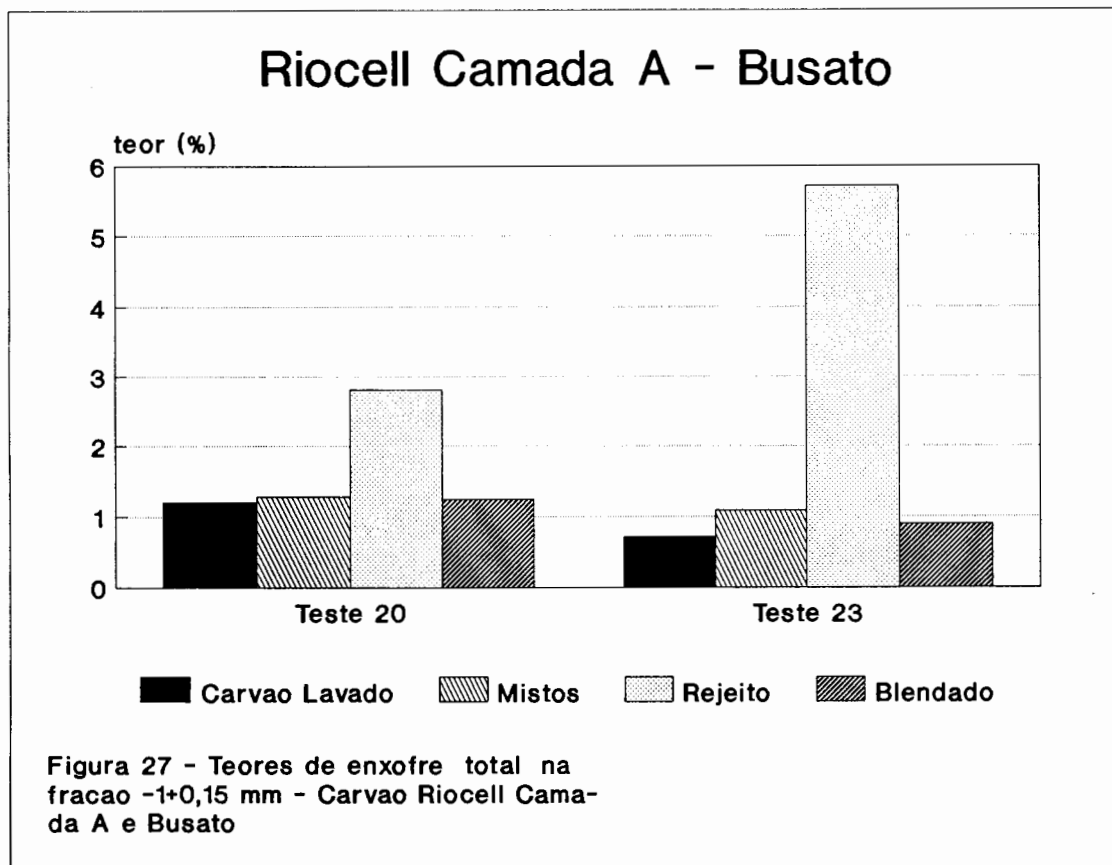


Figura 26 - Teores de enxofre total na fração -1+0,15 mm - Carvão Riocell Camada B



assim, o número de espirais para atender uma mesma alimentação no circuito de finos será menor. Quanto ao teor de cinzas da alimentação, pela grande diferença na qualidade do carvão das diferentes zonas da jazida, a variação se deu de forma bastante acentuada, abrangendo desde 35,06% (1ª Camada Butiá-Leste) até 63,31% (Camada B Riocell). Estes teores são adequados para a espiral de Reichert LD 9, a qual foi projetada para beneficiar carvões com alta cinza.

Um cuidado adicional a ser tomado é o controle minucioso das peneiras de deságue do carvão lavado proveniente do jigge, pois partículas com granulometrias superiores a 3 mm são, impreterivelmente, levadas ao canal do rejeito, independentemente de sua densidade, podendo causar uma obstrução do mesmo. Se isto acontecer, o processo é afetado como um todo, pois o material que estaria saindo pelo rejeito (alto teor de cinzas e enxofre), passará a sair pelo canal dos mistos, contaminando-o.

A distribuição do enxofre pelos produtos seguiu o esperado. Os carvões com teores de enxofre mais altos geraram rejeitos, da mesma forma, com teores de enxofre mais altos. Quanto aos produtos mais leves, carvão lavado e mistos, por a pirita apresentar uma densidade muito maior do que o carvão e do que os silicatos que formam as rochas que se intercalam ao carvão, tais como folhelhos, argilitos, siltitos e arenitos, estes registraram teores de enxofre mais baixos, conforme já salientado. Dentro de um mesmo produto, excetuando-se os rejeitos, houve uma predominância de enxofre na fração granulométrica $-0,15$ mm em relação a fração $-1+0,15$ mm, fato este explicado pela separação feita no jigge anteriormente, o qual incide, preferencialmente, sobre a pirita com granulometria maior. O limite granulométrico de separação da pirita em espirais é menor (pirita com granulometria menor é passível de separação). No rejeito, a concentração da pirita na fração $-1+0,15$ mm se deu de forma mais acentuada, o que é plenamente lógico, pois o canal do rejeito é o mais interno, e é o lugar onde irão se localizar as partículas com maior densidade.

Em relação a quantificação da vazão no "underflow" da bateria de hidrociclones, a qual determinará a

alimentação das espirais, a tabela 30, a seguir, mostra os resultados obtidos:

Tabela 30 - Vazão no "Underflow" dos Hidrociclones

Carvão	"OVERSIZE" tph	"UNDERSIZE" tph	"UNDERFLOW" tph
2ª BL	5,77	10,75	16,52
1ª BL	4,26	12,15	16,41
Camada B	9,37	15,79	25,16
2ª CS	11,83	18,01	29,84
1ª BL	9,85	11,12	20,97

O percentual do "underflow" da bateria de hidrociclones em relação à alimentação do Lavador variou entre 6,3% e 10,9%.

Os resultados da medição da vazão no "underflow" dos hidrociclones mostraram resultados muito variáveis. A vazão medida neste ponto variou entre 16,41 tph e 29,84 tph de sólidos secos. É importante salientar que a maior ou menor geração de finos é muito influenciada por fatores tais como tipo de carvão (friabilidade, quantidade de argilas, manuseio, pontos de descarga), plano de fogo, desgaste do britador entre outros. Logo, para uma alimentação por espiral de 1,65 tph, seriam necessárias 18 espirais simples ou, por motivos de redução de custos e falta de espaço, 9 espirais duplas. Este dimensionamento levou em conta os carvões estudados, 1ª Camada Butiá-Leste, 2ª Camada Butiá-Leste, 2ª Camada Charrua Sul e Camada B Riocell. Portanto, diferentes carvões da jazida, os quais poderiam gerar uma quantidade maior de finos, devem ser ponderados. Com isto, é sugerido uma margem de segurança com a diminuição da taxa de alimentação para 1,5 tph, com fins de dimensionamento, aumentando para 20 espirais simples ou 10 espirais duplas o número de espirais necessárias.

Ainda foi realizado um teste para atestar a enorme quantidade de material com granulometria inferior a 0,15 mm no "underflow" dos hidrociclones.

A distribuição granulométrica nos hidrociclones se apresentou como tal (tabela 31, a seguir):

Tabela 31 - Distribuição Granulométrica no "Underflow" dos Hidrociclones

Malha (mm)	Ciclone A % M	Ciclone B % M	Ciclone C % M	Ciclone D % M
0,50	21,9	41,2	27,1	31,3
0,25	8,3	12,8	16,2	10,5
0,15	5,3	7,4	9,3	7,6
-0,15	64,5	38,7	47,4	50,6

Um entre os quatro hidrociclones (ciclone A) estava operando com uma pressão de alimentação mais baixa (0,8 kgf/cm²), acarretando uma maior quantidade da referida fração no "underflow" (64,5%, em massa). Os três restantes apresentaram uma quantidade variando entre 38,7% e 50,6%, em massa. Estes valores são considerados bastante altos, sugerindo uma otimização no funcionamento destes equipamentos. O ideal, para a atual alimentação, seria a redução pelo processo (hidrociclonagem) de 70% da fração -0,15 mm que alimenta o hidrociclone, devendo o "underflow" ainda ficar com aproximadamente 25% de material abaixo de 0,15 mm. Em relação a performance das espirais, este fato (alta quantidade de -0,15 mm) não acarreta problemas mais sérios, mas em relação a contaminação do produto vendável, o problema é determinante, podendo até inviabilizar a utilização destes equipamentos, desde que deslames posteriores não sejam realizados.

Com os estudos densimétricos, é possível se ter idéia a respeito do funcionamento do equipamento e processo estudados, a partir das características de lavabilidade (tabela 32 e figuras 28 a 30, a seguir) e partição (tabelas 33 e 34 e figuras 31 a 39, a seguir) geradas.

Tabela 32 - Tabela de Lavabilidade (Fração -1+0,15 mm) dos Carvões da 1ª Camada Riocell, 1ª Camada Butiá-Leste e Camada B Riocell

Densidade	1a Camada Riocell					1a Camada Butiá-Leste					Camada B Riocell				
	%MFL	Cz	%MAf	Cz	NGM	%MFL	Cz	%MAf	Cz	NGM	%MFL	Cz	%MAf	Cz	NGM
- 1,3	11,46	4,36	100,00	36,25		7,17	3,65	100,00	26,92		8,94	4,79	100,00	48,94	
1,3 - 1,4	18,79	5,94	88,54	40,38		28,36	5,28	92,83	28,72		16,80	5,95	91,06	53,28	
1,4 - 1,5	33,30	8,46	81,21	43,26	29,23	49,12	8,86	71,64	35,49	36,93	24,59	8,46	83,20	57,62	15,76
1,5 - 1,6	48,02	12,56	66,70	50,12	24,10	65,29	12,25	50,88	44,37	26,07	32,56	12,33	75,41	62,14	14,97
1,6 - 1,7	57,40	15,65	51,98	58,13	17,98	75,19	15,12	34,71	54,52	15,19	39,56	16,21	67,44	66,62	14,14
1,7 - 1,8	66,00	18,75	42,60	64,00	13,16	80,48	16,72	24,81	62,69	7,91	46,70	20,24	60,44	70,36	14,09
1,8 - 1,9	70,56	20,68	34,00	70,22	8,65	83,10	17,67	19,52	69,01	5,13	53,65	24,79	53,30	74,09	13,64
1,9 - 2,0	74,64	22,75	29,44	73,57	9,66	85,61	18,81	16,90	72,44	4,91	60,34	29,31	46,35	76,89	14,23
2,0 - 2,2	85,79	29,06	25,35	76,01		90,41	21,25	14,39	75,21		75,42	38,45	39,66	78,81	
2,2 - 2,4	95,05	34,09	14,21	79,99		93,08	22,78	9,59	80,39		88,42	45,04	24,58	81,12	
+ 2,4	100,00	36,25	4,95	77,64		100,00	26,92	6,92	82,72		100,00	48,94	11,58	78,70	

Tabela 33 - Coeficientes de Partição Densimétricos para os Testes com os Carvões da 1ª Camada Riocell, 1ª Camada Butiá-Leste e Riocell Camada B

Densidade	1a Riocell			1a Butiá-Leste			Camada B		
	CP1	CP2	CPT	CP1	CP2	CPT	CP1	CP2	CPT
- 1,3	100,00	100,00	100,00	100,00	97,21	97,21	100,00	100,00	100,00
1,3 - 1,4	100,00	93,28	93,28	100,00	94,76	94,76	100,00	100,00	100,00
1,4 - 1,5	100,00	96,71	96,71	100,00	94,16	94,16	100,00	92,38	92,38
1,5 - 1,6	100,00	96,99	96,99	100,00	84,95	84,95	100,00	89,81	89,81
1,6 - 1,7	100,00	91,43	91,43	100,00	77,75	77,75	100,00	86,88	86,88
1,7 - 1,8	98,70	89,80	88,63	99,12	71,33	68,10	99,12	77,27	76,59
1,8 - 1,9	97,73	75,18	73,47	99,27	49,09	44,61	99,27	68,03	67,53
1,9 - 2,0	93,14	60,76	56,59	94,69	28,32	21,65	94,69	49,39	46,77
2,0 - 2,2	74,81	41,29	30,89	88,34	43,93	25,79	88,34	48,56	42,90
2,2 - 2,4	52,05	30,90	16,08	75,15	0,00	0,00	75,15	29,64	20,24
+ 2,4	18,64	0,00	0,00	48,21	0,00	0,00	48,21	28,26	13,62

Tabela 34 - Condições de Alimentação dos Testes

	1a Riocell	1a Butiá-Leste	Camada B
Rec. lavado	73,40	74,58	61,20
Rec. interm.	14,83	13,96	27,34
Rec. rejeito	11,77	11,46	11,46
% sólidos	36,00	27,00	31,00
Taxa aliment.	1,164	0,919	1,094
% lamas	49,55	49,21	41,13

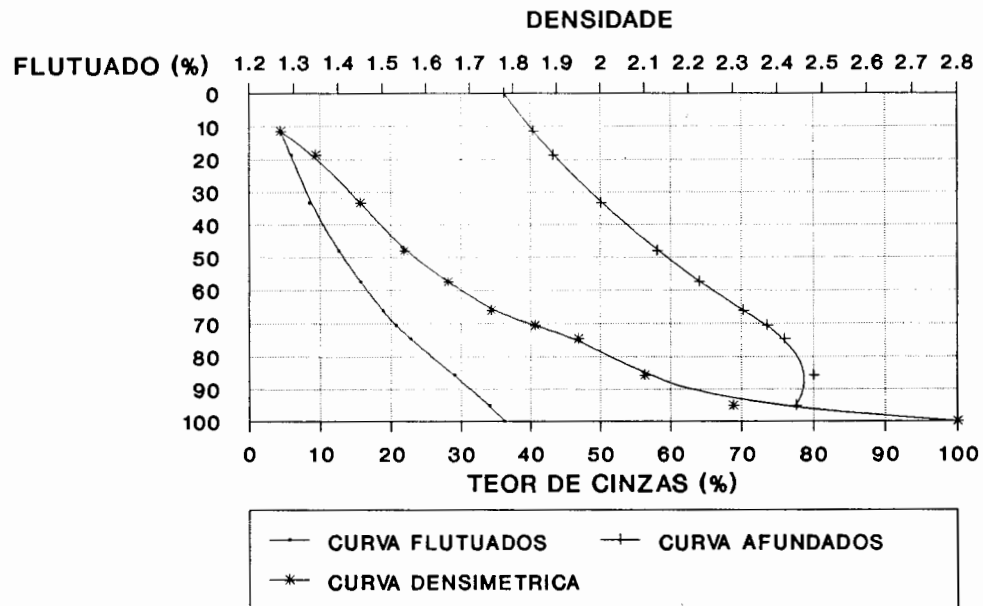


Figura 28 - Curvas de Lavabilidade
1a Camada Riocell (-1+0,15 mm)

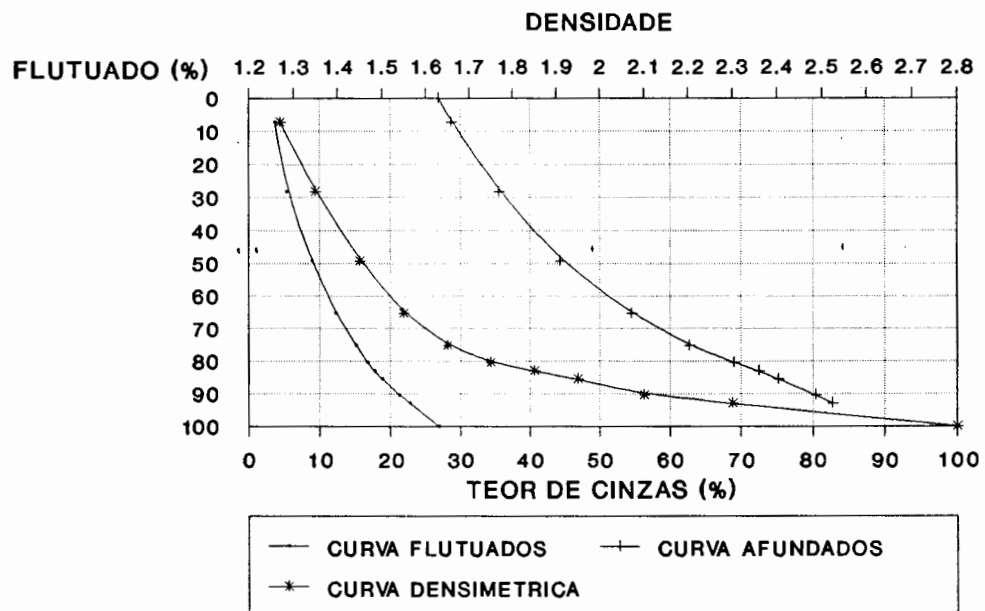


Figura 29 - Curvas de Lavabilidade
1a Camada Butia-Leste (-1+0,15 mm)

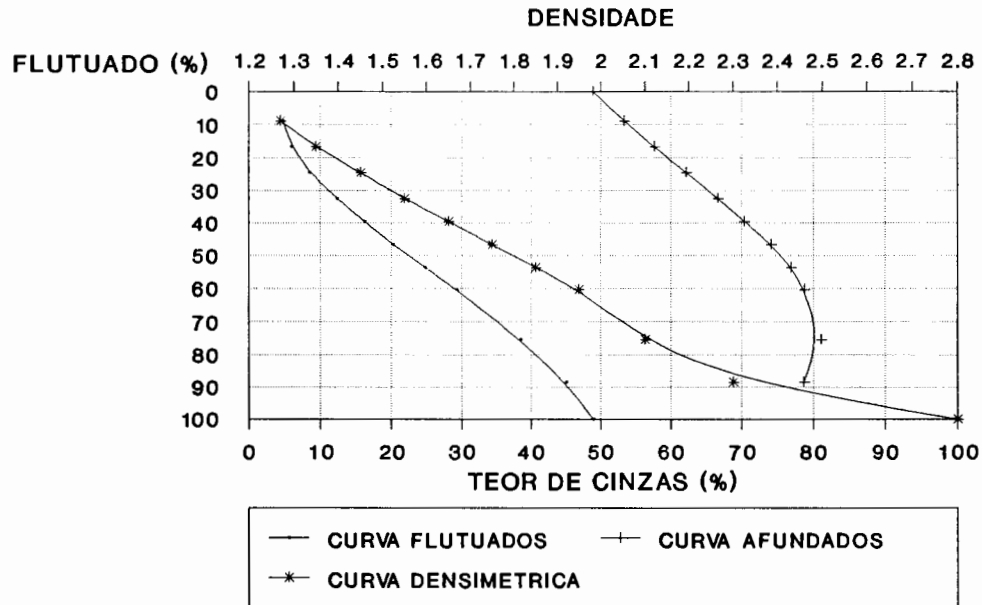


Figura 30 - Curvas de Lavabilidade
Camada B Riocell (-1+0,15 mm)

CURVA DE PARTICAO DA ESPIRAL

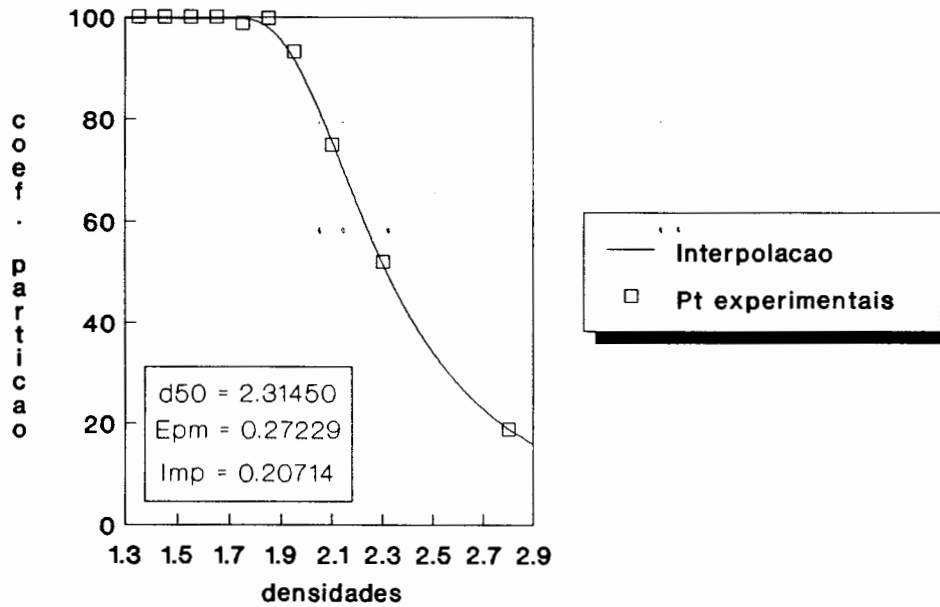


Figura 31 - Separacao Primaria
1a Riocell - modelo de Heuristico

CURVA DE PARTICAO DA ESPIRAL

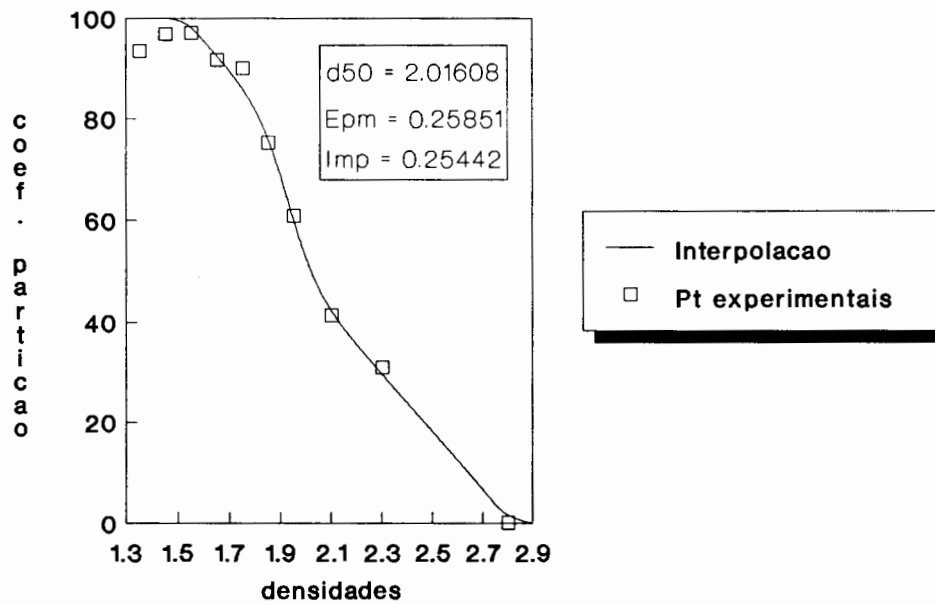


Figura 32 - Separacao Secundaria
1a Riocell - Mod. Tg Hip Modificada

CURVA DE PARTICAO DA ESPIRAL

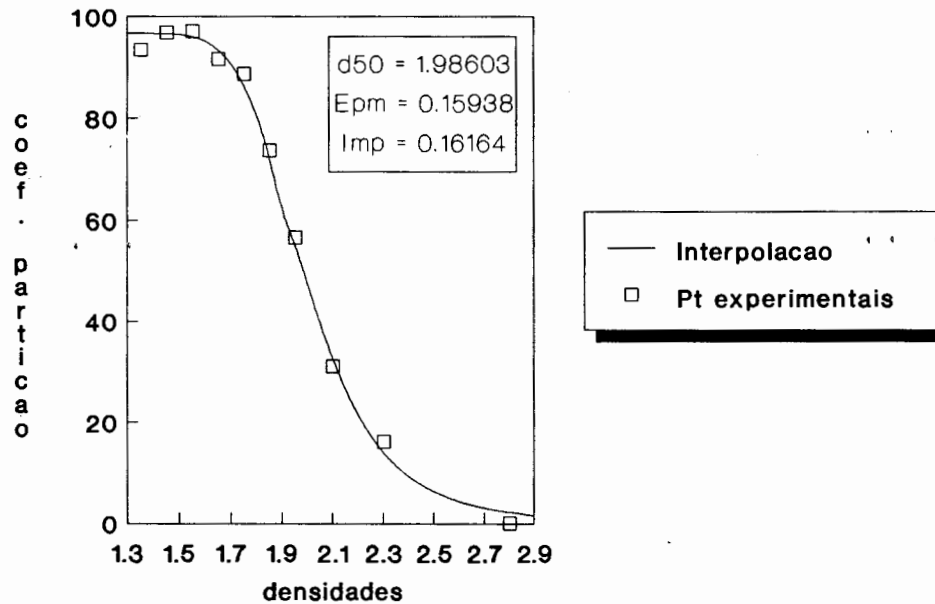


Figura 33 - Separacao Total - 1a Riocell
modelo de Heuristico

CURVA DE PARTICAO DA ESPIRAL

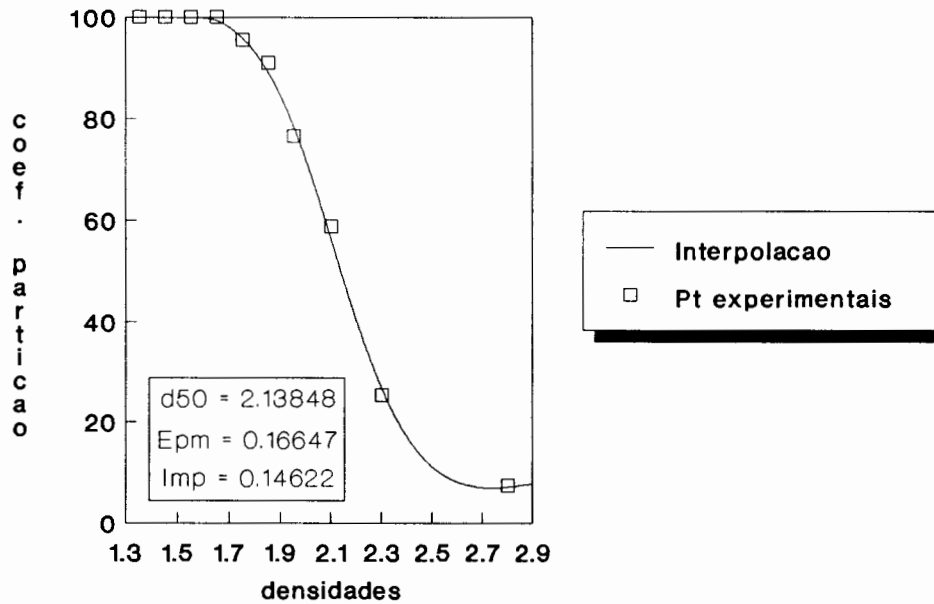


Figura 34 - Separacao Primaria
1a Butia-Leste - Mod. Tg Hip Modificada

CURVA DE PARTICAO DA ESPIRAL

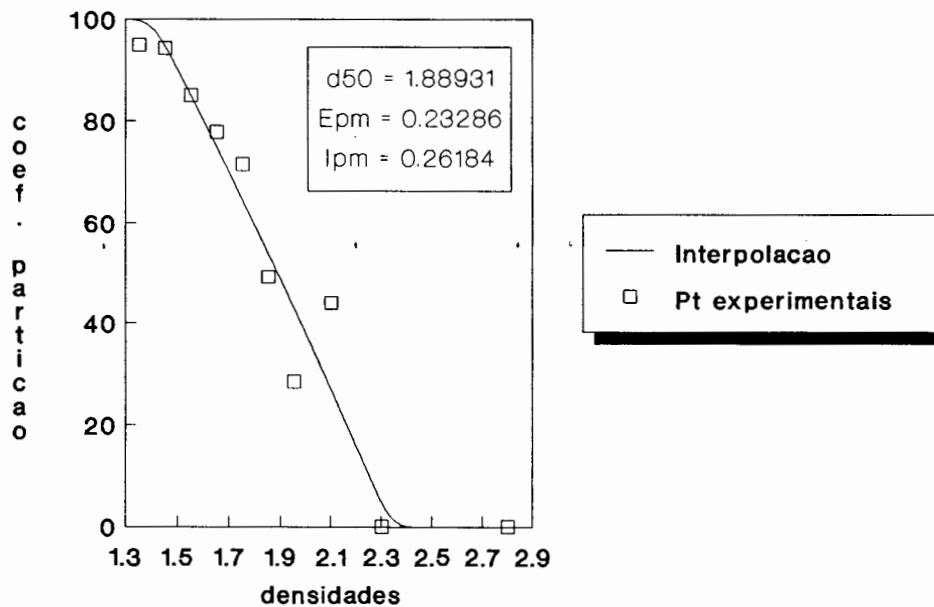


Figura 35 - Separacao Secundaria
1a Butia-Leste - Mod. Tg Hip Modificada

CURVA DE PARTICAO DA ESPIRAL

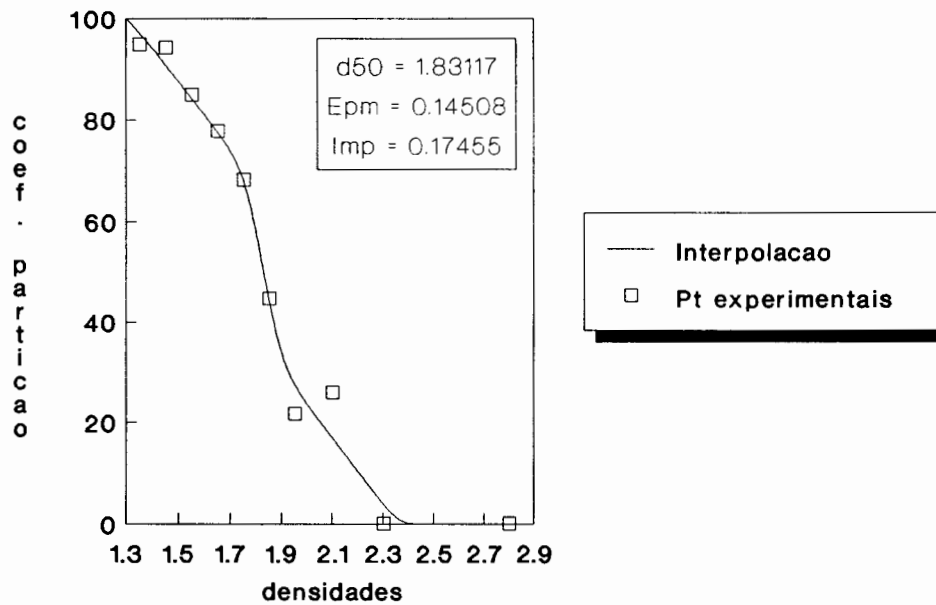


Figura 36 - Separacao Total
1a Butia-Leste - Mod. Tg Hip Modificada

CURVA DE PARTICAO DA ESPIRAL

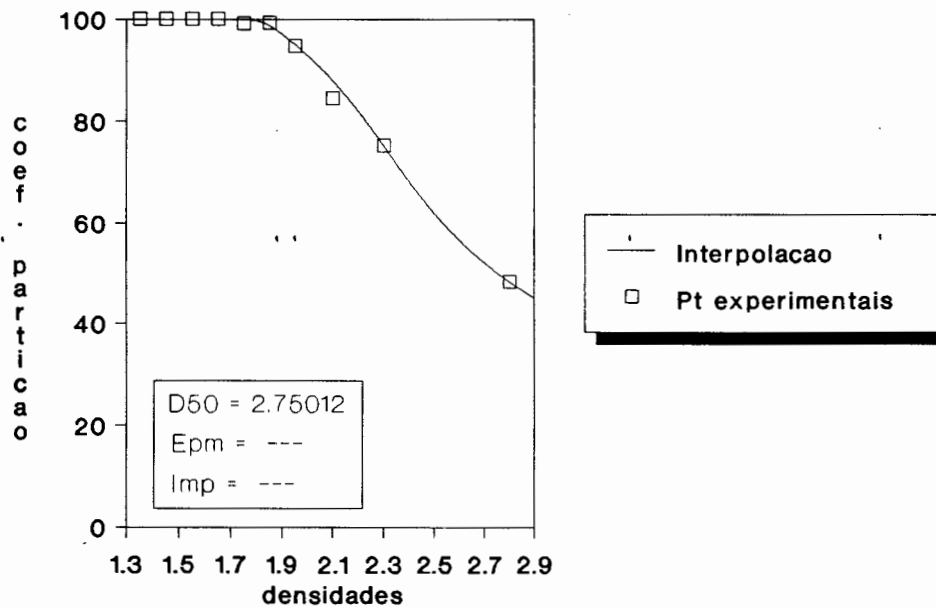


Figura 37 - Separacao Primaria
Riocell Camada B - mod. Arg Seno Hiperb.

CURVA DE PARTICAO DA ESPIRAL

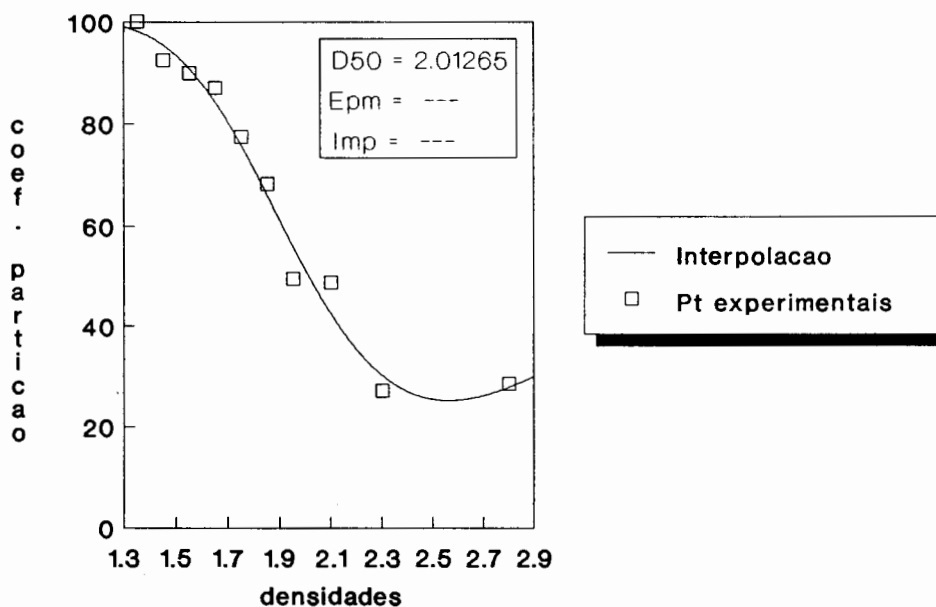


Figura 38 - Separacao Secundaria
Riocell Camada B - Mod. Tg Hip Modific.

CURVA DE PARTICAO DA ESPIRAL

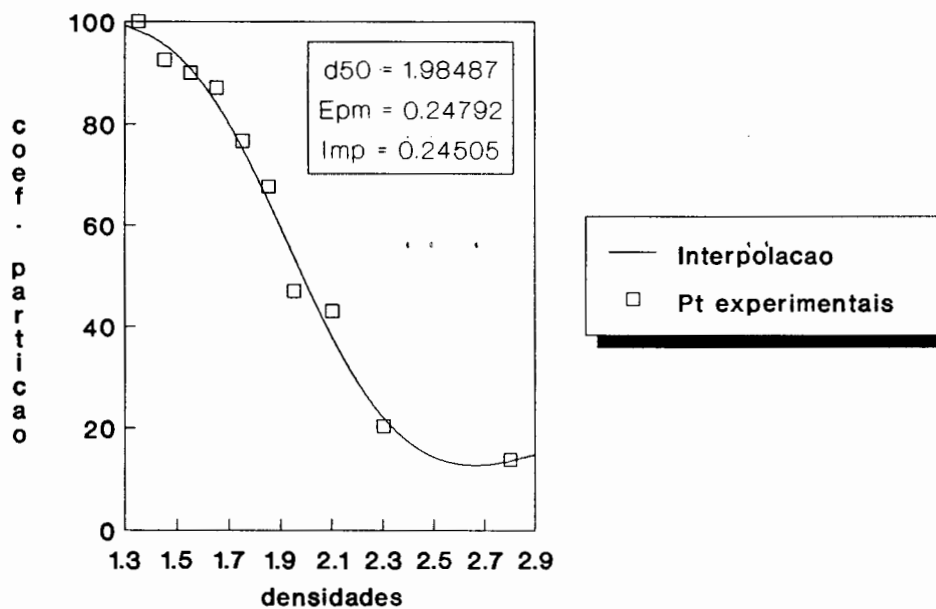


Figura 39 - Separacao Total
Camada B Riocell - Mod. Tg Hip Modific.

Para o ajustamento das curvas de partição, os modelos matemáticos que mais se adaptaram aos pontos experimentais (coeficientes de partição) para cada caso são mostrados na tabela 35, a seguir, bem como os valores dos parâmetros ajustados (tabela 36, a seguir) e os índices de avaliação de desempenho calculados (tabela 37, a seguir). Adicionalmente, as tabelas 38 a 40, em anexo, apresentam os parâmetros ajustados dos nove modelos utilizados e seus respectivos desvios em relação aos pontos experimentais, onde são considerados individualmente os carvões estudados (1ª Camada Riocell, 1ª Camada Butiá-Leste e Riocell Camada B) e os cortes no equipamento (corte 1, corte 2 e corte total). O modelo que se mostrou mais eficiente no ajustamento das curvas de partição da espiral com os carvões estudados foi o da tangente hiperbólica modificada.

Tabela 35 - Modelos Utilizados para Interpolação das Curvas de Partição da Espiral

	1a Riocell	1a Butiá-Leste	Camada B
Corte 1	Heurístico	Tang. Hiperb. Modificada	Argumento Seno Hiperb.
Corte 2	Tang. Hiperb. Modificada	Tang. Hiperb. Modificada	Tang. Hiperb. Modificada
Corte t	Heurístico	Tang. Hiperb. Modificada	Tang. Hiperb. Modificada

Tabela 36 - Parâmetros dos Modelos Ajustados

	1a Riocell			1a Butiá-Leste			Camada B		
	Corte 1	Corte 2	Corte t	Corte 1	Corte 2	Corte t	Corte 1	Corte 2	Corte t
a	0	1,75002	0	0,21729	0,45193	1,70339	0,73743	0	0,00991
c	0,00245	0,12777	0,03374	0,59352	1,91548	0,15703	0,19065	0,68308	0,72263
k	2,32224	-9,79119	4,73650	-3,04617	-0,48201	-17,12497	-3,71291	-1,97978	-1,96297
x0	2,31450	1,93050	1,98603	2,11382	2,35847	1,83030	2,32108	1,88911	1,92988
b	1,76125	-0,57663	1,33135	0,15301	-0,20000	-0,65589	0	0,32982	0,28606
s	0,6084	2,7936	2,0856	1,2588	8,0607	3,9086	0,3466	3,4653	3,2919

Tabela 37 - Índices Dependentes e Independentes de Avaliação de Desempenho para a Espiral

	1a Riocell			1a Butiá-Leste			Camada B		
	Corte 1	Corte 2	Corte t	Corte 1	Corte 2	Corte t	Corte 1	Corte 2	Corte t
d50	2,31450	2,01608	1,98603	2,13848	1,88931	1,83117	2,75019	2,01265	1,98487
Epm	0,27229	0,25851	0,15938	0,16647	0,23286	0,14508	---	---	0,24792
Imp	0,20714	0,25441	0,16164	0,14622	0,26184	0,17455	---	---	0,25173
EO			95,1%			93,4%			92,4%

Para determinação das curvas de partição e dos critérios de desempenho delas provenientes (densidade de corte, imperfeição e erro provável médio), a separação na espiral foi considerada como sendo um processo em duplo estágio²⁶. Na separação primária (corte 1), apenas o rejeito é separado do intermediário e do carvão lavado. Assim sendo, o produto final deste corte é a blendagem do intermediário com o carvão lavado (muitas vezes, o produto final vendável é obtido de uma composição entre estes). Na separação secundária (corte 2), o intermediário é separado do carvão lavado. Para tal, o rejeito eliminado no estágio anterior, não é considerado. Por último, a separação total (corte total) é onde o carvão lavado é separado do intermediário e do rejeito.

Ainda foi notado que, no intervalo de densidades onde a separação total está ocorrendo (tabela 32, acima), os valores de "near gravity material", (NGM), dos carvões da 1ª Camada Riocell e 1ª Camada Butiá-Leste são baixos (NGM < 10), denotando um fácil beneficiamento destes. Já para o carvão da Camada B, o mesmo não ocorre. Isto implicará em um beneficiamento não tão fácil, um material deslocado maior e, igualmente, valores de imperfeição e erro provável médio maiores (tabela 37, acima). Adicionalmente, a participação da fração -0,15 mm na alimentação da espiral é bastante alta, entre 40% e 50% (tabela 34, acima). Mesmo assim, para os três testes, os valores dos índices calculados se encontram dentro do intervalo normal de operação do equipamento^{11,27-29}.

Os valores de densidade de corte são altos devido aos altos teores de cinzas dos carvões. Entre os cortes, a separação primária apresenta um valor maior de densidade de corte e a separação total, um valor menor. Em função disto, os menores valores de imperfeição e erro provável médio são os da separação total (tabela 37, acima). Como era de se esperar, os maiores desvios para ajustamento se deram com a separação secundária (tabela 36, 38, 39, 40, acima). Quanto à eficiência orgânica do processo, a menor foi para o carvão da Camada B (tabela 37, acima). Contudo, os valores encontrados podem ser considerados bons (acima de 92% para os três testes realizados)^{11,27-29}.

7. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE A ECONOMICIDADE DAS ESPIRAIS

7.1. INTRODUÇÃO

Com os resultados obtidos nos testes em escala piloto, com a espiral de Reichert LD 9, breves estudos econômicos para determinar os rendimentos advindos da utilização destes equipamentos no circuito de finos do Lavador do Recreio foram realizados, sendo este o principal objetivo desta parte final do trabalho.

7.2. ESTIMATIVA DOS RENDIMENTOS

A partir da tabela 29, nota-se que a obtenção de três diferentes produtos blendados (carvão lavado + mistos), de acordo com a procedência do carvão, ou seja, a camada, é totalmente possível, sendo eles:

- carvão com teor de cinzas entre 20-30% com as camadas 1ª e 2ª Butiá-Leste;
- carvão com teores de cinzas entre 30-35% com as camadas 1ª e 2ª Charrua Sul, 1ª Riocell e Busato;
- carvão com teores de cinzas entre 40-45% com as camadas Riocell A e B, os quais serviriam apenas para blendagem.

Para cálculo dos rendimentos médios horários, foi multiplicado o valor da recuperação em massa de cada produto pelas respectivas vazões processadas nos testes e, ainda, pelo preço de venda estimado em função do teor de cinzas (tabela 41 e figuras 40 a 43, a seguir).

Tabela 41 - Preços de Venda do Carvão Mineral

Teor de Cinzas (%)	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	>35
Preço de Venda (US\$/ton)	45,0	42,0	38,0	35,0	32,0	25,0

Carvao Lavado

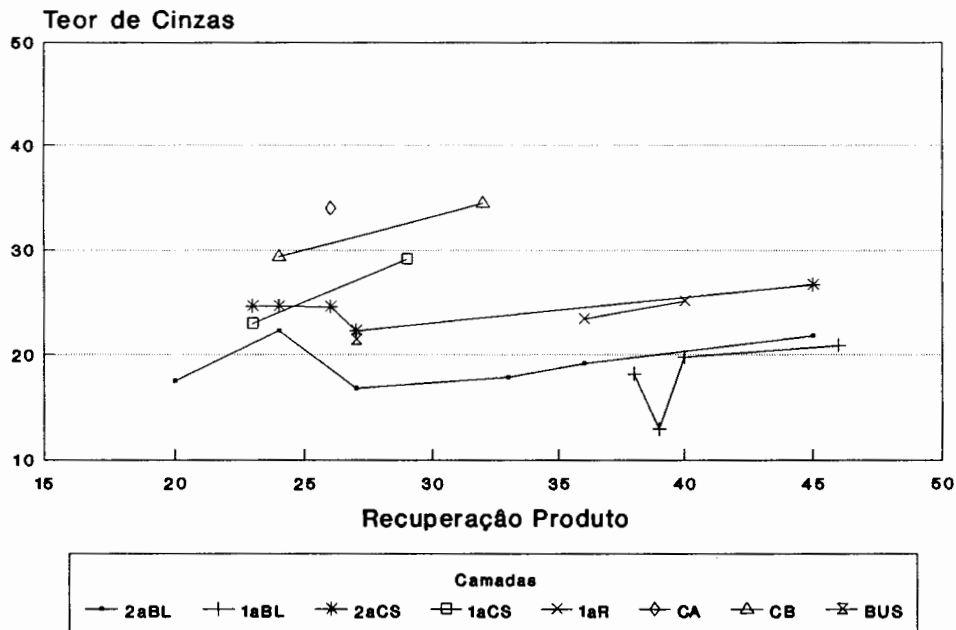


Figura 40 - Cinzas x Recuperaçao Carvao Lavado

Carvao Blendado

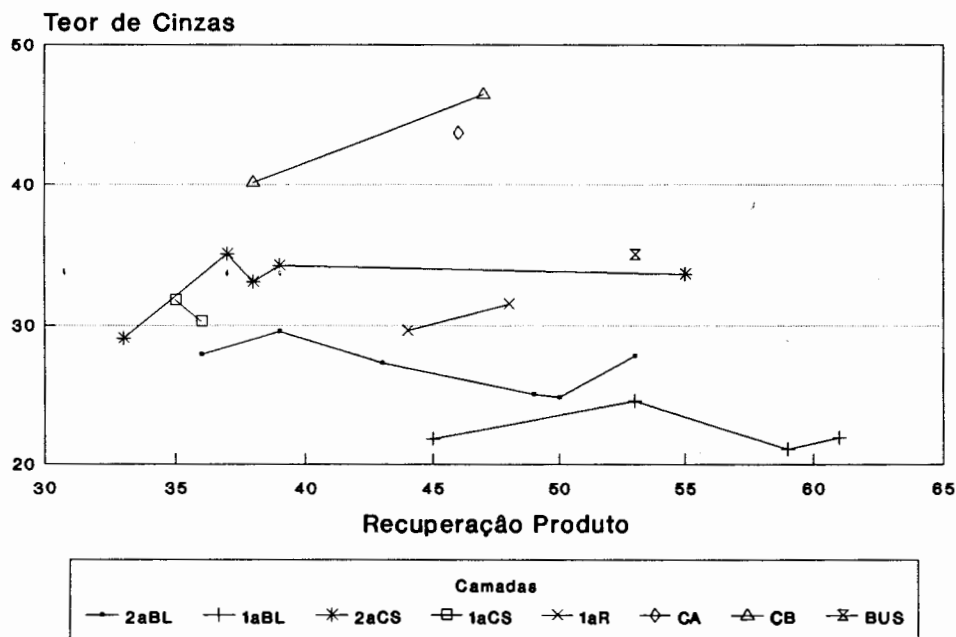


Figura 41 - Cinzas x Recuperaçao Carvao Blendado

Carvao Lavado

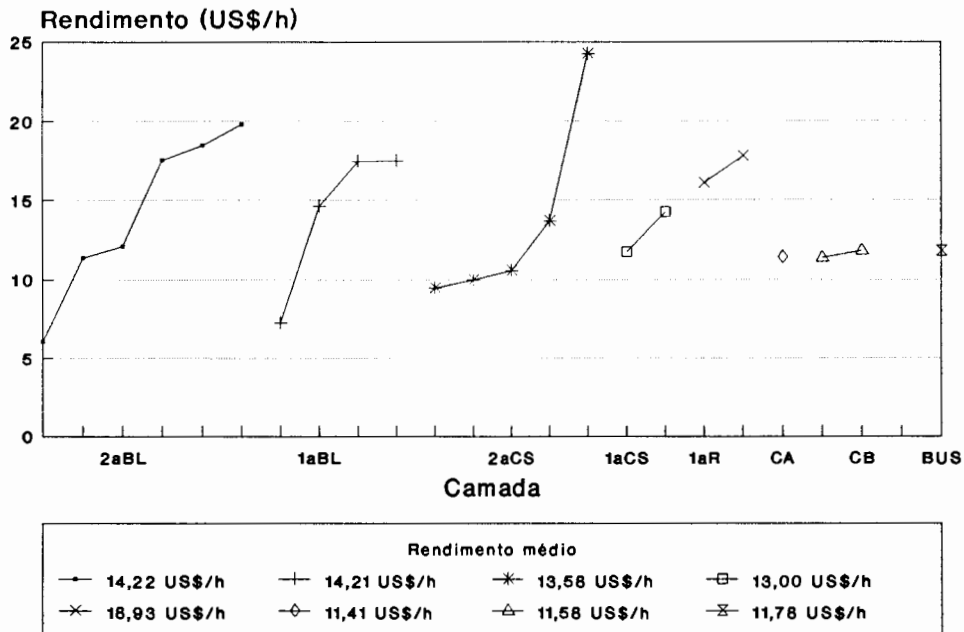


Figura 42 - Rendimentos Medios
Horarios (X = 13,34 US\$/h)

Carvao Blendado

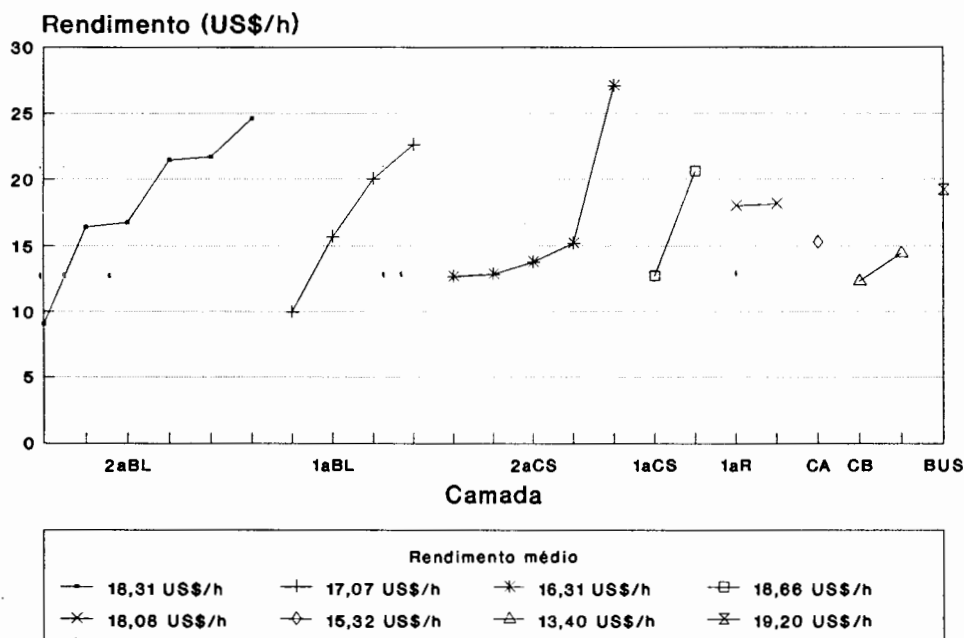


Figura 43 - Rendimentos Medios
Horarios (X = 16,87 US\$/h)

De acordo com a camada que está sendo processada, rendimentos médios da ordem de US\$ 13 a 19/hora podem ser esperados.

Considerando um rendimento médio de US\$ 16,87/hora, para um regime operacional de Lavador do Recreio de 4.000 horas/ano, conforme definido anteriormente, tem-se um rendimento de US\$ 67.480/ano/espíral. Já que para processar a vazão no circuito de finos são necessárias 20 espírais simples (ou 10 duplas), para o circuito total tem-se um rendimento de US\$ 1.349.600/ano.

7.3. ESTIMATIVA DOS CUSTOS

O circuito de finos prevê, além das espírais, a inclusão de mais uma bateria de hidrociclones, peneiras e um secador para redução da umidade do produto final. Os custos de investimento inicial são, então, estimados em US\$ 240.000. Por outro lado, os custos operacionais para este mesmo circuito são estimados em US\$ 66.000.

Ainda, considerando o investimento inicial e a depreciação anual de US\$ 34.000/ano (6 anos, valor residual de 15%), tem-se, para o regime operacional determinado, um custo referente à depreciação do investimento fixo de:

$$(US\$ 34.000/\text{ano}) / (4.000 \text{ horas/ano}) = \text{US\$ } 8,5/\text{hora}$$

O custo horário operacional, para o mesmo regime, é de:

$$(US\$ 66.000/\text{ano}) / (4.000 \text{ horas/ano}) = \text{US\$ } 16,5/\text{hora}$$

Então, o custo médio de produção do circuito, levando em consideração o custo operacional mais o custo de depreciação do rendimento fixo é de **US\$ 25,0/hora**.

7.4. RENDIMENTO LÍQUIDO E CRITÉRIOS ECONÔMICOS

O rendimento horário médio das espírais é igual ao rendimento médio de uma espíral (US\$ 16,87/hora)

multiplicado pelo número total de espirais. Com isto, o rendimento horário calculado é de **US\$ 337,4/hora**.

Foi considerada uma vazão de 30 tph na alimentação da espiral, a qual é uma condição extrema. Testes realizados para medição de vazão já detectaram valores desta ordem e, se a empresa resolver aumentar a granulometria de corte para o deságue do carvão lavado do jigge, digamos para 1,5 mm, este valor se torna ainda mais real.

A partir destes dados pode ser afirmado que o custo máximo para as atividades de lavra + beneficiamento para o produto fino é de:

$$(US\$ 337,4/hora - US\$ 25/hora)/30 \text{ tph} = \text{US\$ } 10,4/\text{ton}$$

Estimando-se um custo de lavra + beneficiamento de US\$ 8,83/ton, tem-se um rendimento líquido para o circuito de espirais de:

$$US\$ 337,4/hora - (US\$ 8,8/\text{ton} * 30 \text{ tph}) = \text{US\$ } 72,4/\text{h}$$

A tabela 42, a seguir, mostra os resultados econômicos para o circuito de finos proposto para tomar parte do Lavador do Recreio, para um regime operacional de 4.000 horas/ano.

Tabela 42 - Resultados Econômicos para o Circuito de Finos Proposto

<p>Rendimento Líquido (4.000 * 72,4) = US\$ 289.600/ano Rendimento Vida Útil (6 anos) = US\$ 1.737.600 "Payback" = 240.000 / (72,4 + 8,5) = 2.967 horas, 9 meses</p>
--

8. CONCLUSÕES

A performance do jigue do Recreio, beneficiando o carvão da 1ª Camada Riocell e 1ª Camada Butiá-Leste, foi considerada satisfatória pelos critérios calculados (imperfeição, erro provável médio e eficiência orgânica) e frente a comparação com os possíveis resultados encontrados pela simulação da fração grossa em jigue Batac. Portanto, nada necessita ser feito além de um bom controle da operação do jigue.

Existem sérios problemas com o circuito de finos atual. Enormes perdas se verificaram, principalmente no "undersize" da peneira desaguadora do produto fino final. Nos outros pontos em que perdas poderiam estar ocorrendo, "overflow" dos hidrociclones e ladrão do tanque de alimentação dos hidrociclones, estas são muito pequenas. Conseqüentemente, mudanças não são necessárias nestes dois pontos. É aconselhável a inserção de um estágio de beneficiamento gravítico no circuito de finos atual, o qual seria alimentado pelo "underflow" da bateria de hidrociclones.

Do estudo de simulação para o circuito de finos com mesas concentradoras, espirais concentradoras e ciclones autógenos notou-se que, em média, as recuperações nas mesas são 4% superiores às obtidas pelas espirais. Os ciclones apresentam desempenho bem inferior. Porém, sem estudos econômicos prévios de viabilidade não se pode afirmar que as mesas sejam a melhor opção.

Do estudo econômico, foi determinado que a melhor alternativa por apresentar um maior rendimento incremental é a utilização de espirais concentradoras. Por outro lado, a alternativa que gera o maior rendimento bruto dentre as estudadas é o uso de mesas concentradoras, porém os custos de investimento e operacional são bastante altos.

Do estudo em escala piloto com espiral de Reichert LD 9 foi notado que produtos diversos com os diferentes carvões da Mina do Recreio e Butiá-Leste são passíveis de serem obtidos através, tão somente, da mudança do

posicionamento dos desviadores. Ainda foi notado que, para a fração -1 mm que está alimentando o Lavador, o melhor carvão é o proveniente da 1ª Camada Butiá-Leste por apresentar melhores recuperações para um mesmo dado teor de cinzas (o melhor teste mostrou recuperação de 60,59% com 21,93% de cinzas) e os piores são os da Camada A e Camada B (recuperações acima de 38% levam a teores de cinzas superiores a 40%). Além da pior qualidade, o carvão da Camada B é, também, o mais difícil de ser beneficiado em espirais, segundo os índices de avaliação de desempenho calculados. No entanto, o comportamento da espiral em termos de critérios de performance foi satisfatório, beneficiando os três carvões testados.

Excetuando-se os carvões da Camada A e Camada B, os demais, após beneficiamento em espirais, apresentam teores de enxofre total inferiores a 1,0%. Os valores altos de enxofre total da Camada A e Camada B (1,2% a 1,5%) não podem ser atribuídos ao enxofre pirítico.

A espiral teve comportamento satisfatório para taxas de alimentação de até 1,621 tph, concentração de sólidos de até 50% e altas taxas de lamas.

Devido a grande quantidade de ultrafinos (-0,15 mm) remanescentes no circuito de finos ("underflow" dos hidrociclones e espiral), um circuito adicional para retirada destes é sugerido, a fim de não inviabilizar o processo. O produto vendável beneficiado nas espirais (carvão lavado ou blendagem entre carvão lavado e mistos) deverá passar por estágios adicionais de classificação granulométrica e deságue em hidrociclone e peneira, dispostos em série. A granulometria de corte indicada é 0,15 mm.

A vazão medida na alimentação da espiral, "underflow" da bateria de hidrociclones, foi no máximo 30 tph. Para tal vazão seriam necessárias 20 espirais simples ou 10 duplas. Adicionalmente, para obtenção de produtos com melhor colocação no mercado, secagem e briquetagem podem ser muito convenientes.

Para um melhor resultado do circuito de finos é necessário uma otimização no funcionamento dos

hidrociclones, principalmente no que se refere a pressão de alimentação. A fração granulométrica $-0,15$ mm possui, para todos os carvões estudados, teores de cinzas entre 60% e 80%, sendo sua presença fator de contaminação do produto, além de trazer problemas de manuseio. Logo, participações acima de 5% desta fração no produto fino final vendável não é tolerável.

A avaliação econômica da alteração proposta para o circuito de finos, a partir dos resultados obtidos nos testes em escala piloto (balanços de massas e metalúrgico), mostrou ser o projeto altamente compensador, tanto no aspecto de lucratividade, quanto no de segurança. O prazo de recuperação do investimento é da ordem de nove meses, podendo ser considerado seguro, levando-se em conta as reservas mineráveis ainda disponíveis. Conclui-se, portanto, pela viabilidade técnica e econômica do investimento na modificação da planta.

Finalmente, após estes projetos realizados conjuntamente entre a Companhia de Pesquisas e Lavras Minerais, COPELMI, e o Laboratório de Processamento de Minerais, LAPROM, investimentos estão sendo feitos pela referida empresa com vistas a inserção de um estágio de beneficiamento gravítico no atual circuito de finos do Lavador do Recreio. A opção escolhida foi aquela por nós indicada, qual seja, a utilização de espirais concentradoras (10 espirais duplas de Reichert LD 9), hidrociclones (2 hidrociclones de 10 tph) para deslamagem do produto final da espiral e, ainda, peneira para efetuar o deslame (0,15 mm) do "underflow" dos hidrociclones. Um secador também está sendo adquirido para reduzir a umidade do "oversize" desta peneira final até valores compatíveis com o mercado (figura 44, a seguir).

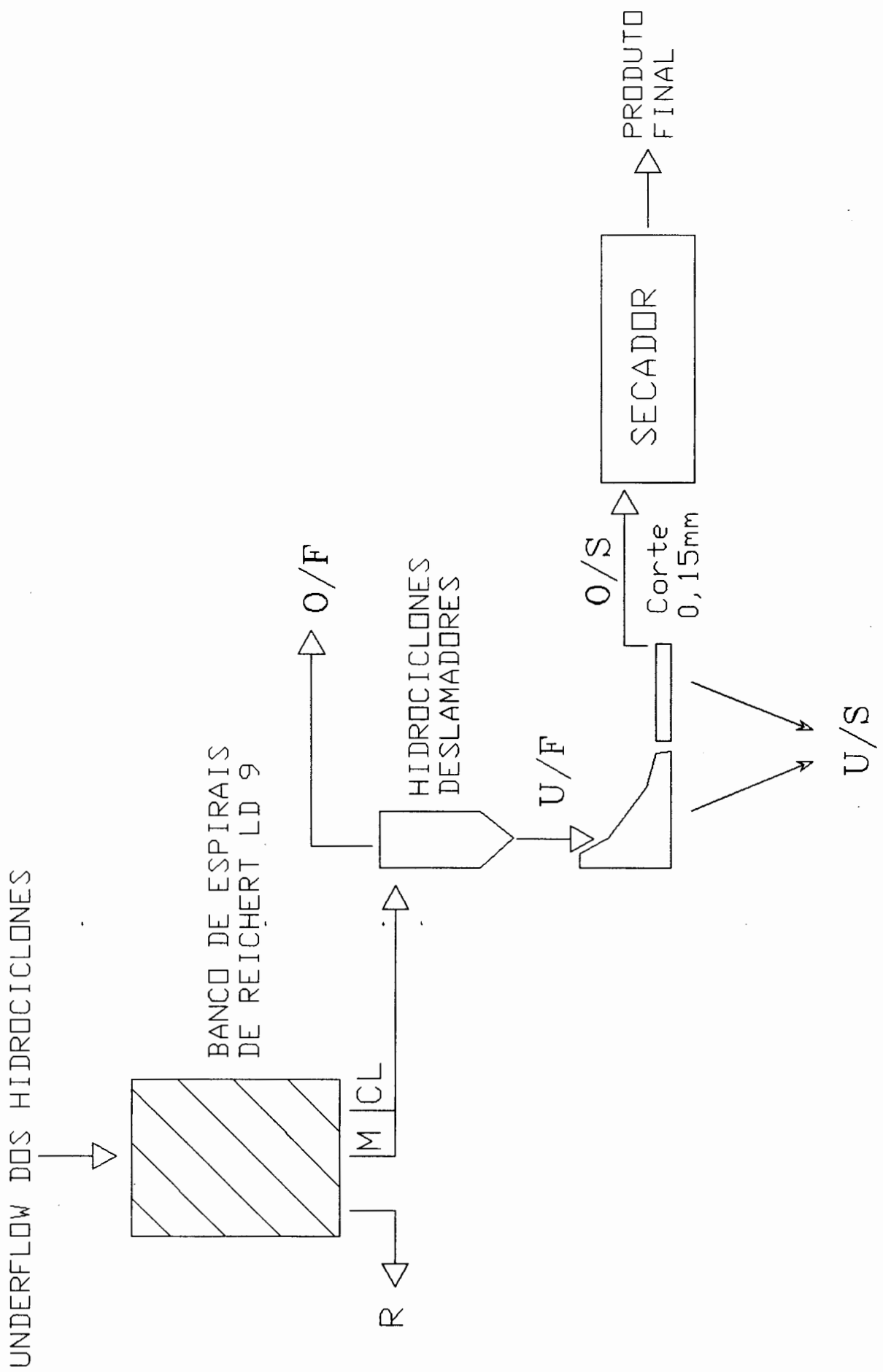


Figura 44 - Fluxograma Proposto para o Circuito de Finos do Lavador do Recreio.

9. BIBLIOGRAFIA

1. SOUZA, R.J.P.; FREITAS, J.T.; BASTIANI, G.A.; SILVA, S.I.T. and RIBEIRO, G.V.B. Geological Synthesis of the Coal Basins in the Southern Brazil and Their Potentiality to the Underground Coal Gasification, In: ANNUAL UNDERGROUND COAL GASIFICATION SYMPOSIUM, 13, 1987, Laramie, Wyoming, USA. Proceedings..., pp. 81-94.

2. CORREIA DA SILVA, Z.C.; PUTTMANN, W. and WOLF, M. Studies on the Rank Determination of South Brazilian Gondwana Coals, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COAL SCIENCE, Elsevier, Amsterdam.

3. COPELMI, Informações do Corpo Técnico.

4. DNPM. Métodos de Lavra de Carvão no Brasil: Subsolo e Céu Aberto, Brasília, Seção de Lavra e Beneficiamento do Departamento Nacional de Produção Mineral, 1984.

5. MIKHAIL, M.W.; SALAMA, A.I.A.; PARSONS, I.S. and HUMENIUK, O.E. Evaluation and Application of Spirals and Water-only Cyclones in Cleaning Fine Coal, **Coal Preparation**, v. 6, pp. 53-78, 1988.

6. BURT, R.O. and YASHIN, A.V. Spiral Concentration: Current Trends in design and Operation, **International Journal of Mineral Processing**, pp. 117-127, 1984.

7. BURT, R. **Gravity Concentration Technology**. Holanda: Elsevier Science Publishers, 1984. 605 p.

8. RYBALOWSKY, E. e RAJAGOPAL, K. Espiral Concentradora: Uma Revisão do Estado da Arte, In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 11, 1985, Natal, RN. Anais..., v. 4, p. 452-468.

9. DAVIES, P.O.J.; GOODMAN, R.H. and DESCHAMPS, J.A. Recent Developments in Spirals Design, Construction and Application, **Minerals Engineering**, v. 4, pp. 437-456, 1991.

10. EISENLOHR, V. O Desenvolvimento Recente e Aplicações de Espirais Concentradoras, In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 10, 1984, Belo Horizonte, MG. Anais..., p. 585-596.

11. RUBIO, J. **Carvão Mineral: Caracterização e Beneficiamento**. Porto Alegre: Nova Linha Artes Gráficas, 1988, 240 p.

12. SIVAMOHAN, R. and FORSSBERG, E. Principles of Spiral Concentration. **International Journal of Mineral Processing**, v. 15, pp. 173-181, 1985.
13. CAVALCANTE, G.G.; KLUJSZO, L.A.C. e SAMPAIO, C.H. Princípios da Espiral Concentradora. **EGATEA, Revista da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, v. 20, p. 55-64, 1992.
14. AKW DO BRASIL. Operating and Testwork Procedure for Reichert LD 9 Spiral.
15. KLUJSZO, L.A.C.; CAVALCANTE, G.F. and SAMPAIO, C.H. Evaluation of the Recreio Flowsheet - COPELMI, Brazil. não publicado.
16. KLUJSZO, L.A.C.; CAVALCANTE, G.F. e SAMPAIO, C.H. Avaliação do Lavador do Recreio - COPELMI, In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2, setembro 1993, São Paulo, SP. Anais..., no prelo.
17. TAVARES, L.M.M.; SCHNEIDER, C.L. e RUBIO, J. Índices de Avaliação do Beneficiamento de Carvão: Uma Revisão e uma Proposta, In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CARVÃO, 2, 1989, Porto Alegre, RS. Anais..., p. 333-352.
18. SCHNEIDER, C.L. **Caracterização do Beneficiamento de Carvão por Jigagem no Brasil**, Dissertação de Mestrado, PPGEMM/UFRGS, Porto Alegre, 1987.
19. PETTER, C.O. **Comportamento do Carvão de Candiota Durante a Deslamagem em Hidrociclones**, Dissertação de Mestrado, PPGEMM/UFRGS, Porto Alegre, 1990.
20. PETTER, C.O.; SAMPAIO, C.H. e JABLONSKI, A. Liberação do Carvão de Candiota Durante a Deslamagem em Hidrociclones, In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES, 1, 1990, Santiago, Chile. Anais..., pp. 559-572.
21. KLUJSZO, L.A.C. e SAMPAIO, C.H. Estudos de Simulação no Lavador do Recreio, COPELMI, In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 48, julho 1993, Rio de Janeiro, RJ. Anais..., no prelo.
22. SOKASKI, M.; GEER, M.R.; McMORRIS, W.L.; DEURBROUCK, A.W. and PALOWITCH, E.R. **Coal Preparation**, chapter 10. Baltimore: Port City Press, 1979, 20 chapters.
23. TAVARES, L.M.M. **Modelamento e Simulação do Beneficiamento Gravimétrico de Carvão Mineral**, Dissertação de Mestrado, PPGEMM/UFRGS, Porto Alegre, 1990.

24. SOUZA, J.C.; KLUJSZO, L.A.C.; CAVALCANTE, G.F. e SAMPAIO, C.H. Análise-Técnico Econômica de Alternativas para o Processamento dos Finos do Lavador do Recreio. EGATEA, Revista da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, v. 20, p. 31-42, 1992.

25. KLUJSZO, L.A.C.; CAVALCANTE, G.F.; GRIGORIEFF, A. e SAMPAIO, C.H. Utilização de Espirais Concentradoras no Circuito de Finos do Lavador do Recreio, COPELMI, In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2, setembro 1993, São Paulo, SP. Anais..., no prelo.

26. TAVARES, L.M.M. e SAMPAIO, C.H. Caracterização do Desempenho de Espirais de Reichert no Beneficiamento de Finos do Carvão de Cambuí - Paraná, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO, 2, 1989, Porto Alegre, RS. Anais..., p. 268-280.

27. KLUJSZO, L.A.C. e SAMPAIO, C.H. Avaliação do Circuito Hidrociclone/Espiral para os Finos do Carvão de Candiota, In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 47, 1992, Belo Horizonte, MG. Anais..., p. 111-128.

28. KLUJSZO, L.A.C. e SAMPAIO, C.H. Use of Reichert LD 9 Spirals to Clean Coal Fines from Candiota, In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ORGANIC GEOCHEMISTRY, 3, 1992, Manaus, AM. Anais...

29. KLUJSZO, L.A.C. e SAMPAIO, C.H. Avaliação do Circuito Espiral/Hidrociclones para os Finos do Carvão de Candiota, In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA METALURGICA Y DE MATERIALES, 2, 1992, Ciudad Satélite, México. Anais...

10. ANEXOS

Tabela 19 - Balanço de Massas, Metalúrgico e Rendimentos do Circuito de Espirais Concentradoras

CARVÃO DO RECREIO (27,63% < 0,074 mm)

Fração	-1 +0,074 mm		-0,074 mm		Produto Final				
	Recup. (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Preço Venda (US\$/ton)	Produção (ton/ano)
41,08	6,33	20,28	0,47	75,64	6,80	24,11	40,0	22.304	892.000
54,37	8,38	24,62	0,50	75,64	8,88	27,49	38,0	29.126	1.107.000
67,04	10,33	29,66	0,53	75,64	10,86	31,90	35,0	35.621	1.247.000
80,17	12,35	34,78	0,56	75,64	12,91	36,55	29,0	42.345	1.228.000

CARVÃO DO RECREIO (32,77% < 0,074 mm)

Fração	-1 +0,074 mm		-0,074 mm		Produto Final				
	Recup. (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Preço Venda (US\$/ton)	Produção (ton/ano)
41,08	5,88	20,28	0,56	75,64	6,44	25,09	40,0	21.123	845.000
54,37	7,79	24,62	0,59	75,64	8,38	28,21	37,0	27.486	1.017.000
67,04	9,60	29,66	0,63	75,64	10,23	32,49	35,0	33.554	1.171.000
80,17	11,48	34,78	0,66	75,64	12,14	37,00	29,0	39.819	1.155.000

CARVÃO DO BUTIÁ-LESTE (16,97% < 0,074 mm)

Fração	-1 +0,074 mm		-0,074 mm		Produto Final				
	Recup. (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Preço Venda (US\$/ton)	Produção (ton/ano)
55,49	12,95	19,99	0,38	65,65	13,33	21,29	43,0	9.597	413.000
78,62	18,34	24,92	0,41	65,65	18,75	25,81	39,0	13.500	526.000
86,40	20,16	27,52	0,43	65,65	20,59	28,32	37,0	14.825	548.000

CARVÃO DO BUTIÁ-LESTE (25,27% < 0,074 mm)

Fração	-1 +0,074 mm		-0,074 mm		Produto Final				
	Recup. (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Preço Venda (US\$/ton)	Produção (ton/ano)
55,49	11,65	19,99	0,57	65,65	12,22	22,11	42,0	8.798	369.000
78,62	16,51	24,92	0,60	65,65	17,11	26,35	39,0	12.319	480.000
86,40	18,14	27,52	0,64	65,65	18,78	28,82	37,0	13.522	500.000

Tabela 22 - Balanço de Massas, Metalúrgico e Rendimentos do Circuito de Mesas Concentradoras

CARVÃO DO RECREIO (27,63% < 0,074 mm)

Fração	-1 +0,074 mm		-0,074 mm		Produto Final				
Recup. (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Preço Venda (US\$/ton)	Produção (ton/ano)	Rendimento (US\$/ano)
39,35	6,06	20,81	0,47	75,64	6,53	24,76	40,0	21.418	857.000
59,77	9,21	24,98	0,50	75,64	9,71	27,56	38,0	31.845	1.210.000
71,87	11,08	29,82	0,53	75,64	11,16	33,20	33,0	36.605	1.208.000
84,04	12,95	34,96	0,56	75,64	13,51	36,64	29,0	44.313	1.285.000

CARVÃO DO RECREIO (32,77% < 0,074 mm)

Fração	-1 +0,074 mm		-0,074 mm		Produto Final				
Recup. (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Preço Venda (US\$/ton)	Produção (ton/ano)	Rendimento (US\$/ano)
39,35	5,63	20,81	0,56	75,64	6,19	25,77	39,0	20.303	792.000
59,77	8,56	24,98	0,59	75,64	9,15	28,25	37,0	30.012	1.110.000
71,87	10,29	29,82	0,63	75,64	10,92	34,62	33,0	35.817	1.146.000
84,04	12,03	34,96	0,66	75,64	12,69	37,07	29,0	41.623	1.207.000

CARVÃO DO BUTIÁ-LESTE (16,97% < 0,074 mm)

Fração	-1 +0,074 mm		-0,074 mm		Produto Final				
Recup. (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Preço Venda (US\$/ton)	Produção (ton/ano)	Rendimento (US\$/ano)
48,76	12,79	19,95	0,38	65,65	13,17	21,27	43,0	9.482	408.000
74,90	19,60	24,99	0,41	65,65	20,01	25,82	39,0	14.407	562.000
78,91	21,09	28,09	0,43	65,65	21,52	28,84	36,0	15.494	558.000

CARVÃO DO BUTIÁ-LESTE (25,27% < 0,074 mm)

Fração	-1 +0,074 mm		-0,074 mm		Produto Final				
Recup. (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Preço Venda (US\$/ton)	Produção (ton/ano)	Rendimento (US\$/ano)
48,76	11,51	19,95	0,57	65,65	12,08	22,11	42,0	8.697	366.000
74,90	17,64	24,99	0,60	65,65	18,24	26,33	39,0	13.133	512.000
78,91	18,99	28,09	0,64	65,65	19,63	29,31	36,0	14.134	509.000

Tabela 25 - Balanço de Massas, Metalúrgico e Rendimentos do Circuito de Ciclones Autôgenos

CARVÃO DO RECREIO (27,63% < 0,074 mm)

Fração	-1 +0,074 mm		-0,074 mm		Produto Final				
Recup. (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Preço Venda (US\$/ton)	Produção (ton/ano)	Rendimento (US\$/ano)
42,71	6,58	26,91	0,47	75,64	7,05	30,15	35,0	23.124	809.000
59,46	9,16	29,95	0,50	75,64	9,66	32,31	34,0	31.685	1.077.000
74,70	11,51	34,78	0,53	75,64	12,04	36,58	29,0	39.491	1.145.000

CARVÃO DO RECREIO (32,77% < 0,074 mm)

Fração	-1 +0,074 mm		-0,074 mm		Produto Final				
Recup. (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Preço Venda (US\$/ton)	Produção (ton/ano)	Rendimento (US\$/ano)
42,71	6,12	26,91	0,56	75,64	6,68	30,99	35,0	21.910	767.000
59,46	8,51	29,95	0,59	75,64	9,10	32,91	34,0	29.848	1.015.000
74,70	10,70	34,78	0,63	75,64	11,33	37,05	29,0	37.162	1.078.000

CARVÃO DO BUTIÁ-LESTE (16,97% < 0,074 mm)

Fração	-1 +0,074 mm		-0,074 mm		Produto Final				
Recup. (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Preço Venda (US\$/ton)	Produção (ton/ano)	Rendimento (US\$/ano)
70,21	16,38	24,98	0,41	65,65	16,79	25,97	39,0	12.089	471.000
82,65	19,28	27,99	0,43	65,65	19,71	28,81	36,0	14.191	511.000

CARVÃO DO BUTIÁ-LESTE (25,27% < 0,074 mm)

Fração	-1 +0,074 mm		-0,074 mm		Produto Final				
Recup. (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Massa (tph)	Cinzas (%)	Preço Venda (US\$/ton)	Produção (ton/ano)	Rendimento (US\$/ano)
70,21	14,74	24,98	0,60	65,65	15,34	26,57	38,0	11.045	420.000
82,65	17,36	27,99	0,64	65,65	18,00	29,33	36,0	12.969	467.000

Tabela 27 - Modelos Utilizados para Interpolação das Curvas de Partição da Espiral

<u>Modelo de Erasmus</u>
$CP = 100 * (a + (1 - a - C) * (0,5 - ATN(k * (X - x0)) / pi))$
<u>Modelo de Lynch</u>
$CP = 100 * (a + (1 - a - C) * (1 - (EXP(X * k / x0) - 1) / (EXP(X * k / x0) + EXP(k) - 2)))$
<u>Modelo de Trawinski</u>
$CP = 100 * (a + (1 - a - C) * (1 - 2 ^ (-((x0 / X) ^ k)))$
<u>Modelo de Heurístico</u>
$CP = 100 * (a + (1 - a - C) * (1 + (0,5 - C) / (0,5 - a) * ((X - b) / (x0 - b)) ^ k) ^ -1)$
<u>Modelo de Kelly</u>
$CP = 100 * (a + (1 - a - C) * 2 ^ (-((X / x0) ^ k))$
<u>Modelo da Tangente Hiperbólica</u>
$CP = 100 * (a + (1 - a - C) * (0,5 - 0,5 * tanh(k * (X - x0))))$
<u>Modelo da Tangente Hiperbólica Modificada</u>
$CP = 100 * (a + C * tanh(k * (X - x0)) + b * X)$
<u>Modelo do Argumento do Seno Hiperbólico</u>
$CP = 100 * (a + C * Arsenh(k * (X - x0)))$
<u>Modelo de Rong</u>
$CP = 100 * (a + (1 - a - C) * (((X / x0) ^ -k) / (1 + (X / x0) ^ -k)))$

onde:

CP: coeficiente de partição para uma dada densidade;

X: densidade qualquer;

a, b, C, k e x0: parâmetros de ajuste dos modelos.

Tabela 28 - Diversos Testes Realizados com a Espiral de Reichert LD 9 e com os Diversos Carvões das Minas do Recreio e Butiá-Leste

Teste 1 - 1ª Camada Butiá-Leste

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	2,592	170	0,432	35,06	1,64
Carvão Lavado	55,09	1,831	130	0,238	28,27	1,25
Mistos	33,33	0,653	220	0,144	36,29	1,18
Rejeito	11,58	0,108	460	0,050	63,79	4,85

desviadores: a = 10,8 cm b = 9,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	33,98	20,57	14,04	33,43	3,68	58,99
0,50	13,59	18,99	15,79	27,28	7,17	58,52
0,25	19,42	18,85	21,05	22,52	22,55	58,24
0,15	5,83	19,75	10,53	22,30	17,42	60,58
-0,15	27,18	51,13	38,59	52,35	49,18	68,61

Teste 2 - 1ª Camada Butiá-Leste

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	3,036	330	1,001	43,99	1,25
Carvão Lavado	75,92	2,532	300	0,760	36,49	0,95
Mistos	13,09	0,345	380	0,131	57,92	0,82
Rejeito	10,99	0,159	690	0,110	79,21	3,87

desviadores: a = 6,0 cm b = 6,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	26,59	19,48	5,10	58,25	1,94	79,21
0,50	13,83	20,19	20,41	52,04	6,54	80,09
0,25	14,89	23,08	10,20	47,62	23,00	82,50
0,15	5,32	23,27	14,29	48,00	18,89	80,46
-0,15	39,37	60,55	50,00	65,22	49,63	77,08

Teste 3 - 1ª Camada Butiá-Leste

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	3,358	270	0,919	44,73	1,11
Carvão Lavado	76,06	2,795	250	0,699	38,64	0,80
Mistos	13,38	0,411	300	0,123	52,03	1,05
Rejeito	10,56	0,152	640	0,097	79,39	3,39

desviadores: a = 6,0 cm b = 6,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	22,35	18,43	5,98	51,98	1,58	76,02
0,50	9,41	17,99	12,82	42,85	7,09	77,33
0,25	11,77	17,53	21,37	39,37	24,80	79,73
0,15	6,27	18,58	12,82	38,14	21,65	81,80
-0,15	50,20	58,97	47,01	64,09	44,88	78,48

Teste 4 - 1ª Camada Butiá-Leste

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	5,012	200	1,004	36,05	1,82
Carvão Lavado	61,85	4,143	150	0,621	27,40	1,16
Mistos	30,18	0,758	400	0,303	42,78	1,35
Rejeito	7,97	0,111	720	0,080	77,68	8,70

desviadores: a = 4,0 cm b = 13,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	31,58	12,76	14,29	38,11	1,57	75,30
0,50	11,28	13,47	16,33	36,09	4,90	81,73
0,25	12,78	11,63	23,67	35,20	20,10	80,39
0,15	6,77	15,71	14,29	36,27	21,33	77,87
-0,15	37,59	51,35	31,42	57,04	52,10	76,24

Teste 5 - 2ª Camada Butiá-Leste

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	3,479	350	1,218	54,59	1,14
Carvão Lavado	41,79	2,121	240	0,509	39,20	0,83
Mistos	28,49	0,825	420	0,347	58,83	1,37
Rejeito	29,72	0,533	680	0,362	72,18	1,35

desviadores: a = 12,5 cm b = 8,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	24,02	21,92	10,70	52,95	9,31	81,07
0,50	11,76	19,49	12,75	41,62	10,95	79,20
0,25	15,20	21,71	18,11	36,87	19,21	76,16
0,15	7,84	26,61	10,29	38,61	14,03	72,90
-0,15	41,18	63,37	48,15	77,27	46,50	66,88

Teste 6 - 2ª Camada Butiá-Leste

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	3,574	370	1,330	47,29	1,46
Carvão Lavado	55,19	2,447	300	0,734	35,05	1,13
Mistos	25,34	0,767	440	0,337	52,64	1,29
Rejeito	19,47	0,360	720	0,259	75,00	2,60

desviadores: a = 10,8 cm b = 9,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	23,21	18,75	16,35	49,72	6,93	78,03
0,50	13,76	18,27	14,49	39,76	10,95	78,70
0,25	14,33	16,59	19,63	35,51	22,68	74,70
0,15	8,60	16,46	11,21	35,89	15,64	77,46
-0,15	40,11	60,70	38,32	72,41	43,80	72,87

Teste 7 - 2ª Camada Butiá-Leste

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	3,591	320	1,143	44,27	1,33
Carvão Lavado	58,88	2,494	270	0,673	33,38	1,01
Mistos	21,52	0,723	340	0,246	47,57	1,15
Rejeito	19,60	0,374	600	0,224	73,35	2,48

desviadores: a = 10,8 cm b = 9,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	26,99	20,32	20,14	49,58	7,29	76,41
0,50	13,69	17,27	15,43	39,03	11,24	75,37
0,25	13,69	17,94	17,11	34,63	20,85	73,35
0,15	7,60	20,77	9,73	33,14	13,01	70,92
-0,15	38,03	56,51	37,59	59,63	47,61	73,06

Teste 8 - 2ª Camada Butiá-Leste

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	3,996	290	1,144	46,00	0,95
Carvão Lavado	74,83	3,425	250	0,856	37,73	0,77
Mistos	13,02	0,373	400	0,149	64,43	0,75
Rejeito	12,15	0,198	700	0,139	77,16	2,27

desviadores: a = 6,0 cm b = 6,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	26,81	23,11	19,05	68,29	6,42	83,07
0,50	10,61	19,50	12,32	65,57	11,41	83,31
0,25	13,41	19,95	18,21	58,86	25,67	80,85
0,15	10,06	23,27	11,48	54,03	17,47	78,97
-0,15	39,11	62,51	38,94	67,84	39,03	71,15

Teste 9 - 2ª Camada Butiá-Leste

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	3,285	330	1,083	49,21	1,26
Carvão Lavado	55,68	2,152	280	0,603	40,22	1,00
Mistos	31,49	0,948	360	0,341	53,34	0,97
Rejeito	12,83	0,185	750	0,139	78,09	3,07

desviadores: a = 6,0 cm b = 11,5 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	23,86	17,14	15,61	52,72	5,03	81,58
0,50	7,02	13,82	11,61	43,00	16,60	81,58
0,25	10,53	15,81	16,26	38,99	26,42	80,09
0,15	6,32	20,51	9,55	39,85	15,47	77,53
-0,15	52,27	61,60	46,97	63,81	36,48	74,83

Teste 10 - 2ª Camada Butiá-Leste

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	8,554	80	0,711	54,19	1,18
Carvão Lavado	53,31	7,579	50	0,379	47,75	0,81
Mistos	22,50	0,668	240	0,160	48,64	0,76
Rejeito	24,19	0,307	560	0,172	73,54	2,40

desviadores: a = 10,0 cm b = 9,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	20,44	18,12	30,91	48,41	7,77	81,29
0,50	5,52	15,55	15,77	39,22	15,37	79,25
0,25	7,73	16,03	15,77	33,22	25,89	75,93
0,15	4,42	19,42	7,89	33,63	15,37	72,50
-0,15	61,89	66,39	39,66	66,08	35,60	68,10

Teste 11 - 1ª Camada Charrua Sul

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	3,224	500	1,621	57,91	0,91
Carvão Lavado	54,91	1,711	520	0,890	51,77	0,64
Mistos	30,35	1,093	450	0,492	60,68	0,68
Rejeito	14,74	0,420	570	0,239	75,10	2,37

desviadores: a = 10,8 cm b = 9,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	20,81	20,32	12,09	45,13	3,70	76,85
0,50	7,23	20,39	9,99	41,39	7,66	75,59
0,25	8,67	24,82	13,32	40,64	14,53	68,48
0,15	5,49	33,37	7,99	46,52	11,36	72,11
-0,15	57,80	72,81	56,61	74,12	62,75	77,01

Teste 12 - 1ª Camada Charrua Sul

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	2,644	440	1,150	58,14	1,10
Carvão Lavado	69,13	1,893	420	0,795	53,46	0,79
Mistos	18,96	0,546	400	0,218	64,53	0,88
Rejeito	11,91	0,205	670	0,137	75,11	3,29

desviadores: a = 6,0 cm b = 6,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	21,34	25,83	4,31	52,35	4,85	76,62
0,50	6,43	26,25	6,60	45,54	7,97	79,50
0,25	9,00	31,53	11,93	42,47	14,90	71,14
0,15	5,40	41,35	8,12	49,28	10,75	70,18
-0,15	57,83	71,22	69,04	72,71	61,53	76,25

Teste 13 - 2ª Camada Charrua Sul

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	3,979	330	1,312	57,06	1,00
Carvão Lavado	78,43	3,429	300	1,029	52,75	0,82
Mistos	11,74	0,366	420	0,154	67,71	0,95
Rejeito	9,83	0,184	700	0,129	78,76	2,48

desviadores: a = 6,0 cm b = 6,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	14,74	21,51	10,73	70,78	4,70	84,10
0,50	6,36	19,69	11,11	65,39	9,82	83,53
0,25	8,67	21,89	16,86	58,94	23,24	82,22
0,15	5,20	28,29	9,20	54,52	13,14	78,66
-0,15	65,03	69,14	52,10	72,74	49,10	75,69

Teste 14 - 2ª Camada Charrua Sul

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	2,794	400	1,110	57,93	1,15
Carvão Lavado	49,64	1,449	380	0,551	48,55	0,78
Mistos	36,40	1,123	360	0,404	62,49	0,84
Rejeito	13,96	0,222	700	0,155	79,36	3,30

desviadores: a = 6,0 cm b = 11,5 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	23,76	19,16	13,16	57,35	7,33	83,42
0,50	8,29	28,92	9,45	48,82	9,87	83,28
0,25	9,67	26,47	11,70	43,36	17,21	79,71
0,15	6,08	36,80	7,20	44,82	10,44	74,90
-0,15	52,20	70,51	41,51	71,85	55,15	78,86

Teste 15 - 2ª Camada Charrua Sul

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	2,842	380	1,079	59,00	1,13
Carvão Lavado	61,54	2,075	320	0,664	51,10	0,83
Mistos	24,56	0,553	480	0,265	67,37	0,92
Rejeito	13,90	0,214	700	0,150	79,18	2,84

desviadores: a = 6,0 cm b = 6,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	18,21	22,15	14,22	69,12	7,34	83,48
0,50	8,53	22,49	9,48	61,77	11,71	82,85
0,25	8,91	25,70	13,03	53,70	15,73	79,13
0,15	6,20	32,69	7,58	50,55	9,44	73,81
-0,15	58,15	70,22	55,69	73,37	55,78	78,76

Teste 16 - 2ª Camada Charrua Sul

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	2,934	370	1,071	58,37	1,06
Carvão Lavado	48,18	1,666	310	0,516	48,78	0,84
Mistos	29,88	0,889	360	0,320	60,05	0,93
Rejeito	21,94	0,379	620	0,235	77,13	1,72

desviadores: a = 10,0 cm b = 9,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	25,00	21,17	16,58	53,95	8,47	78,98
0,50	8,18	22,18	10,94	44,99	12,90	78,60
0,25	9,55	28,13	12,99	40,88	17,74	75,16
0,15	5,45	37,73	7,52	43,56	9,68	69,96
-0,15	51,82	71,29	51,97	72,34	51,21	78,50

Teste 17 - 2ª Camada Charrua Sul

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	4,806	320	1,535	47,86	1,30
Carvão Lavado	75,83	4,157	280	1,164	40,97	0,92
Mistos	16,74	0,476	540	0,257	66,74	0,75
Rejeito	7,43	0,173	660	0,114	75,67	6,38

desviadores: a = 6,0 cm b = 6,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	26,84	27,44	13,74	72,54	2,68	78,24
0,50	11,58	25,75	14,89	68,53	7,38	81,08
0,25	13,68	26,06	19,86	61,87	19,69	76,88
0,15	7,37	26,63	11,17	55,85	16,55	73,69
-0,15	40,53	61,92	40,34	69,53	53,70	74,96

Teste 18 - 1ª Camada Riocell

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	3,229	360	1,164	53,19	0,82
Carvão Lavado	72,42	2,635	320	0,843	45,86	0,73
Mistos	14,69	0,389	440	0,171	67,51	0,49
Rejeito	12,89	0,205	730	0,150	78,07	1,72

desviadores: a = 6,0 cm b = 6,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	25,92	25,34	9,71	70,64	5,63	80,64
0,50	8,89	23,12	12,62	67,56	8,52	80,48
0,25	13,33	24,30	20,39	61,73	19,48	80,09
0,15	7,41	28,04	12,62	56,00	16,44	79,09
-0,15	44,45	71,82	44,66	72,71	49,93	76,25

Teste 19 - 1ª Camada Riocell

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	3,236	360	1,169	49,41	0,87
Carvão Lavado	73,05	2,669	320	0,854	41,74	0,73
Mistos	15,57	0,380	480	0,182	65,38	0,61
Rejeito	11,38	0,187	710	0,133	76,82	2,14

desviadores: a = 6,0 cm b = 6,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	23,36	23,51	11,88	67,21	6,41	80,10
0,50	7,48	21,19	12,26	61,32	11,54	79,65
0,25	11,84	23,00	18,01	53,51	22,82	78,15
0,15	6,85	25,80	10,34	47,54	12,82	76,07
-0,15	50,47	59,77	47,51	74,35	46,41	75,22

Teste 20 - Camada A Riocell

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	3,188	430	1,365	61,32	1,47
Carvão Lavado	44,47	1,685	360	0,607	50,83	1,14
Mistos	34,29	1,064	440	0,468	63,78	1,20
Rejeito	21,24	0,439	660	0,290	79,33	2,60

desviadores: a = 10,8 cm b = 9,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	27,01	29,98	17,87	62,26	10,72	81,52
0,50	11,34	30,85	13,59	52,18	12,92	85,96
0,25	12,78	37,27	18,06	53,10	20,28	76,34
0,15	7,63	47,23	10,68	55,05	13,44	74,65
-0,15	41,24	74,86	39,80	75,62	42,64	79,66

Teste 21 - Camada B Riocell

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	8,811	160	1,406	63,31	1,50
Carvão Lavado	52,77	7,423	100	0,742	54,27	1,22
Mistos	19,84	0,796	340	0,279	63,75	1,27
Rejeito	27,39	0,592	650	0,385	80,41	2,20

desviadores: a = 12,5 cm b = 8,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	17,27	30,21	27,58	62,50	7,94	82,00
0,50	10,91	25,77	16,28	55,18	12,01	79,87
0,25	10,91	29,30	18,96	55,25	24,29	77,85
0,15	6,36	33,42	8,51	57,62	17,94	77,24
-0,15	54,55	75,01	28,67	77,25	37,82	83,40

Teste 22 - Camada B Riocell

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	3,516	310	1,094	62,65	1,45
Carvão Lavado	64,90	2,839	250	0,710	54,24	1,26
Mistos	23,13	0,487	520	0,253	75,56	1,09
Rejeito	11,97	0,190	690	0,131	83,34	3,18

desviadores: a = 6,0 cm b = 6,0 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	22,31	32,94	15,48	78,95	6,39	84,45
0,50	9,62	33,59	14,42	75,05	9,33	83,92
0,25	11,54	32,40	20,88	70,61	20,03	83,79
0,15	6,54	37,51	11,93	68,13	15,03	80,43
-0,15	49,99	74,02	37,29	79,49	49,22	83,80

Teste 23 - Busato

Produto	Recup.	V(m ³ /h)	Conc.	V(tph)	Cz	S
Alimentação	100,00	2,986	380	1,128	50,60	1,40
Carvão Lavado	46,90	1,653	320	0,529	39,89	0,88
Mistos	45,66	1,225	420	0,515	57,17	1,31
Rejeito	7,44	0,108	780	0,084	77,85	5,29

desviadores: a = 3,5 cm b = 13,5 cm

Malha (mm)	Carvão Lavado		Mistos		Rejeito	
	% M	Cz	% M	Cz	% M	Cz
0,75	32,28	20,57	16,43	55,83	6,54	85,08
0,50	8,77	22,08	12,81	49,88	11,21	73,99
0,25	11,23	22,73	17,18	46,12	21,18	81,52
0,15	6,32	22,58	9,90	44,20	14,02	80,72
-0,15	41,40	66,02	43,68	67,10	47,05	75,26

onde:

Recup.: recuperação de sólidos secos de cada produto;

V(m³/h): vazão de polpa;

Conc.: concentração de sólidos (g/l);

V(tph): vazão de sólidos secos;

Cz: teor de cinzas;

S: teor de enxofre total;

a: distância da coluna central ao 1º desviador (canal do rejeito);

b: distância do 1º ao 2º desviador (canal dos mistos);

% M: recuperação em massa por granulometria.

Tabla 20 - Resultados los Diferentes Testes Realizados con a Espiral de Reichert LD 9

ROM	CARVANO LAVADO				INTERMEDIARIO				HEVITO				ELEMENTO		Y G DESTAFIADOR		
	St R-15	Cz	St R-15	Cz	St R-15	Cz	St R-15	Cz	St R-15	Cz	St R-15	Cz	St R-15	Cz	St	Y G	DESTAFIADOR
285124	58.22	0.72	17.21	188.51	12.22	34.77	41.70	10.68	13.72	17.27	2.13	15.90	76.76	1.53	12.22	188.51	12.22
285135	05.17	0.91	1.42	122.41	199.73	1.28	13.62	46.35	11.07	9.71	72.41	11.64	10.94	75.88	2.01	8.53	72.87
285158	49.19	0.56	12.30	20.58	2.11	23.13	43.42	31.09	7.89	59.63	11.58	9.33	73.08	0.49	12.30	20.58	2.11
285136	56.12	0.81	0.74	28.27	62.01	0.81	7.85	62.38	0.69	5.07	67.84	0.84	7.41	81.01	1.36	4.74	77.13
285126	58.16	0.90	0.65	29.10	81.68	1.04	13.70	44.07	0.75	14.79	83.81	1.21	8.15	79.37	1.55	4.88	74.83
285120	32.17	0.64	12.99	166.38	0.87	15.82	42.29	0.67	6.87	66.08	0.96	15.58	75.55	1.72	6.61	188.40	0.87
11d5	40.12	1.78	0.84	14.97	51.13	2.03	19.47	26.20	0.68	12.86	62.36	1.67	5.70	169.61	0.84	14.97	51.13
11d5	45.06	2.68	0.84	39.89	65.65	1.44	6.55	50.52	0.88	6.55	66.22	0.76	5.54	81.90	3.21	5.45	77.38
11d5	37.88	1.45	0.80	38.18	58.87	0.89	7.69	41.34	0.79	6.29	64.09	1.35	5.82	80.13	2.40	4.74	76.48
11d5	38.88	1.97	0.87	32.25	81.65	1.84	20.70	36.24	0.93	9.49	57.04	2.28	3.82	79.24	1.65	4.15	75.24
285127	48.22	0.74	11.00	168.14	0.88	5.82	52.24	0.83	6.12	72.74	1.06	5.00	81.79	2.12	4.83	75.38	0.88
285128	79.24	0.74	0.56	25.91	70.51	0.71	11.48	29.07	0.76	21.29	71.85	0.90	6.26	79.98	4.65	7.70	78.66
285125	73.24	0.84	1.87	35.79	78.22	0.56	10.36	58.84	1.07	13.88	73.57	0.80	6.15	79.70	4.91	7.75	78.76
285123	21.24	0.80	24.97	171.29	0.59	14.35	46.75	0.81	15.53	72.54	1.04	10.70	75.70	1.84	11.24	78.30	0.80
285146	16.26	0.59	0.36	30.73	61.33	0.37	3.89	54.36	0.54	6.75	59.53	0.91	3.44	75.49	1.17	3.98	74.86
11d5	28.17	2.23	0.83	21.74	72.81	0.81	13.74	81.50	0.44	17.18	74.12	0.85	5.48	71.86	2.25	3.25	77.01
11d5	29.19	2.00	0.65	20.98	71.82	0.75	5.87	43.28	0.67	13.03	72.71	0.98	4.58	73.29	1.53	7.88	76.33
11d5	48.29	2.59	0.77	35.19	71.82	0.75	3.29	53.29	0.34	6.56	72.71	0.67	6.45	79.89	1.52	6.44	76.56
11d5	42.28	0.86	0.74	39.87	51.77	0.73	6.17	57.28	0.56	7.40	74.35	0.67	8.10	78.21	1.44	5.28	75.22
08	26.19	0.97	1.04	18.38	74.87	1.06	19.84	55.88	1.28	13.65	75.62	1.07	12.18	79.08	2.81	9.06	79.66
08	28.04	0.38	1.54	58.79	75.17	0.39	14.16	58.29	1.39	5.89	77.26	0.96	17.03	78.58	2.32	10.36	93.40
08	22.46	1.94	0.51	53.06	44.74	0.52	12.88	49.79	0.21	8.08	82.90	2.81	5.89	83.60	0.49	5.89	83.60
08	37.49	1.43	0.70	62.62	51.11	0.71	13.70	46.47	1.00	19.94	87.10	1.60	3.94	80.15	1.71	3.56	75.26

Tabela 38 - Parâmetros Ajustados dos Modelos Utilizados para Interpolação das Curvas de Partição com seus Respectiveos Desvios - 1ª Camada Riocell

Corte 1

Modelo	a	C	k	x0	b	S
Erasmus	0,14273	0	9,44923	2,27185	0	4,6374
Lynch	0,17572	0	16,27883	2,24355	0	1,6493
Trawinski	0,07351	0,00107	8,09963	2,28066	0	0,6239
Heurístico	0	0,00245	2,32224	2,31450	1,76125	0,6084
Kelly	0,18839	0	12,55819	2,24554	0	1,8394
Rong	0,16106	0	15,22784	2,24685	0	1,3946
Tang Hip	0,17594	0	3,63322	2,24338	0	1,6492
Tang Hip M	1,08402	0,35653	-2,93776	2,19389	-0,20000	0,8685
Arg Seno Hip	0,66585	0,26351	-4,78432	2,17514	0	0,8921

Corte 2

Modelo	a	C	k	x0	b	S
Erasmus	0,03967	0	6,41138	2,03469	0	6,4021
Lynch	0,00532	0	10,75339	2,06826	0	4,1712
Trawinski	0	0,03422	7,48244	2,05641	0	3,4403
Heurístico	0	0,02953	3,75994	2,04641	1,33371	3,5912
Kelly	0,01556	0	7,56718	2,07947	0	4,6455
Rong	0	0,00526	10,50346	2,06428	0	3,8420
Tang Hip	0,00529	0	2,59991	2,06831	0	4,1713
Tang Hip M	1,75002	0,12777	-9,79119	1,93050	-0,57663	2,7936
Arg Seno Hip	0,63256	0,31642	-4,00061	1,94101	0	3,5509

Corte Total

Modelo	a	C	k	x0	b	S
Erasmus	0,01591	0	8,38637	1,98314	0	4,1749
Lynch	0,02529	0,01269	14,74381	1,99286	0	2,7277
Trawinski	0	0,03980	9,91563	1,99309	0	2,1919
Heurístico	0	0,03374	4,73650	1,98603	1,33135	2,0856
Kelly	0,04244	0,00206	10,15532	1,99427	0	3,7261
Rong	0,01443	0,02083	14,56564	1,99538	0	2,4358
Tang Hip	0,02519	0,01267	3,69908	1,99290	0	2,7277
Tang Hip M	0,87499	0,35146	-5,18866	1,97742	-0,17850	2,4627
Arg Seno Hip	0,55476	0,18272	-12,27322	1,95410	0	2,6238

Tabela 39 - Parâmetros Ajustados dos Modelos Utilizados para Interpolação das Curvas de Partição com seus Respective Desvios - 1ª Camada Butiá-Leste

Corte 1

Modelo	a	c	k	x0	b	S
Erasmus	0,07065	0	10,43762	2,11567	0	4,5721
Lynch	0,06874	0	16,28905	2,11976	0	1,6261
Trawinski	0,00470	0,00436	9,02225	2,12784	0	2,1859
Heurístico	0,05647	0	13,98871	2,13580	0,20302	1,5395
Kelly	0,07798	0	11,87712	2,12939	0	1,8245
Rong	0,05793	0	15,56171	2,11924	0	1,5403
Tang Hip	0,06869	0	3,84116	2,11981	0	1,6261
Tang Hip M	0,21729	0,59352	-3,04617	2,11382	0,15301	1,2588
Arg Seno Hip	0,56432	0,18122	-11,71402	2,10114	0	1,8764

Corte 2

Modelo	a	c	k	x0	b	S
Erasmus	0,00763	0	6,30292	1,86094	0	9,5771
Lynch	0	0	10,04199	1,87984	0	8,4768
Trawinski	0	0,05234	7,44058	1,87512	0	8,5856
Heurístico	0	0	13,08032	1,87213	-0,59741	8,4152
Kelly	0	0	6,89038	1,89507	0	8,5564
Rong	0	0,00572	10,00702	1,87252	0	8,4189
Tang Hip	0	0	2,67163	1,87981	0	8,4770
Tang Hip M	0,45193	1,91548	-0,48201	2,35847	-0,20000	8,0607
Arg Seno Hip	0,53510	0,21190	-7,52783	1,83850	0	8,3421

Corte Total

Modelo	a	c	k	x0	b	S
Erasmus	0	0	8,20126	1,82705	0	5,4661
Lynch	0,00725	0,00687	12,68382	1,82894	0	5,2574
Trawinski	0	0,06074	9,48745	1,83293	0	5,4973
Heurístico	0	0,03635	8,09903	1,82415	0,71093	5,1436
Kelly	0,02190	0	8,57028	1,83160	0	5,8506
Rong	0	0,02560	12,96628	1,83336	0	5,1608
Tang Hip	0,00710	0,00648	3,46224	1,82884	0	5,2574
Tang Hip M	1,70339	0,17703	-17,12497	1,83030	-0,65589	3,9086
Arg Seno Hip	0,50702	0,16774	-15,03316	1,82352	0	4,4553

Tabela 40 - Parâmetros Ajustados dos Modelos Utilizados para Interpolação das Curvas de Partição com seus Respectiveos Desvios - Camada B Riocell

Corte 1

Modelo	a	C	k	x0	b	S
Erasmus	0,45207	0	11,11211	2,31047	0	2,2636
Lynch	0,45916	0	14,89496	2,31973	0	0,7762
Trawinski	0,25923	0	5,67339	2,49219	0	0,4255
Heurístico	0,22833	0,00042	2,51443	2,75430	1,66605	0,4227
Kelly	0,48189	0	11,81418	2,30711	0	0,7722
Rong	0,43634	0	13,34175	2,33670	0	0,6586
Tang Hip	0,45921	0	3,21286	2,31963	0	0,7762
Tang Hip M	1,20118	0,18595	-2,67438	2,32225	-0,20000	0,3579
Arg Seno Hip	0,73743	0,19065	-3,71291	2,32108	0	0,3466

Corte 2

Modelo	a	C	k	x0	b	S
Erasmus	0,25668	0	7,04980	1,87734	0	4,6230
Lynch	0,26630	0	11,53300	1,87686	0	3,6552
Trawinski	0,22406	0,03056	7,46136	1,89684	0	4,2030
Heurístico	0,26312	0	47,08863	2,00099	-5,87408	3,6536
Kelly	0,27693	0	8,05907	1,88364	0	3,7081
Rong	0,25314	0,00345	11,12915	1,87939	0	3,7023
Tang Hip	0,26626	0	3,07214	1,87687	0	3,6552
Tang Hip M	0	0,68308	-1,97978	1,88911	0,32982	3,4653
Arg Seno Hip	0,65222	0,12933	-11,86264	1,85467	0	3,7829

Corte Total

Modelo	a	C	k	x0	b	S
Erasmus	0,13228	0	6,62384	1,91517	0	5,1165
Lynch	0,13147	0	10,97518	1,92511	0	3,4121
Trawinski	0,05836	0,02869	6,58402	1,95647	0	3,8154
Heurístico	0,11353	0	12,47288	1,97632	-0,37971	3,3410
Kelly	0,14498	0	7,75238	1,93109	0	3,6042
Rong	0,10956	0	10,30949	1,92893	0	3,3451
Tang Hip	0,13138	0	2,84881	1,92519	0	3,4123
Tang Hip M	0,00991	0,72263	-1,96297	1,92988	0,28606	3,2919
Arg Seno Hip	0,59685	0,16792	-9,09832	1,88893	0	3,3267