

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,  
Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

Obtenção de Carvões a partir de Rejeitos Carbonosos Produzidos no  
Beneficiamento das Minas do Faxinal e Butiá Leste, RS.

Norton Ferreira Feil

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre  
2007

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,  
Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

Obtenção de Carvões a partir de Rejeitos Carbonosos Produzidos no  
Beneficiamento das Minas do Faxinal e Butiá Leste, RS.

Norton Ferreira Feil  
Engenheiro de Minas

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa

Porto Alegre  
2007

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

Orientador: Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sydney Sabedot – UNILASALLE/RS

Prof. Dr. Irineu Antônio Schadach de Brum – UFRGS/RS

Prof. Dr. Washington Aliaga – UFRGS/RS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador do PPGEM/UFRGS

Dedico em especial a Anne, Bruno, Silvia  
e meus pais.

*“Nada esplêndido jamais foi atingido exceto por aqueles que ousaram acreditar que algo dentro deles era superior à circunstância”.*

Bruce Barton

## AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas e instituições que colaboraram direta e indiretamente na elaboração deste trabalho, manifesto meus sinceros agradecimentos.

Ao Professor Dr. Carlos Hoffmann Sampaio pelo estímulo no retorno à Universidade, proporcionado através da colaboração, escolha do tema, sugestões, confiança e amizade.

Ao Engenheiro Alexandre Grigorieff da COPELMI Mineração Ltda. pelo fornecimento das amostras, visita às minas e informações necessárias que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Gerson Luis Miltzarek pelas sugestões, ensinamentos das práticas laboratoriais e realização dos ensaios de afunda-flutua, além do companheirismo demonstrado.

Aos demais colegas do LAPROM, em especial a Karime Ribeiro e Silva Ferreira, Edison Pacheco e Giovani Dalpiaz pelas sugestões, além da agradável convivência.

Aos bolsistas de Iniciação Científica do LAPROM, Luciana Arnt Abicherquer e Dieison Ferreira de Oliveira pelo auxílio valioso na preparação das amostras e análises imediatas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM - UFRGS) pela oportunidade oferecida e aprendizado indispensável à consecução deste trabalho.

À CAPES pela bolsa de estudos concedida que possibilitou dedicação exclusiva ao estudo ora concluído.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	X
LISTA DE TABELAS .....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS .....	XV
RESUMO .....	XVI
ABSTRACT .....	XVIII
1. COMENTÁRIOS INICIAIS .....	1
1.1. INTRODUÇÃO .....	1
1.2. TEMA E OBJETIVO DO ESTUDO .....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1. MATÉRIA-PRIMA CARVÃO .....	4
2.1.1. Definição e características do carvão brasileiro .....	4
2.1.2. Tipos de carvões e principais usos .....	6
2.2. LIBERAÇÃO ENTRE OS CONSTITUINTES DO CARVÃO .....	9
2.3. BENEFICIAMENTO GRAVIMÉTRICO DO CARVÃO .....	11
2.3.1. Definição de beneficiamento de minérios .....	11
2.3.2. Operações dos processos de concentração .....	11
2.3.3. Requisitos para a concentração do carvão .....	11
2.3.4. Beneficiamento gravimétrico .....	12
2.3.4.1. Definição .....	12
2.3.4.2. Jigue .....	12
2.3.4.3. Espirais concentradoras .....	15
2.4. ESTUDO ANTERIOR SOBRE AS FRAÇÕES DE BENEFICIAMENTO DO CARVÃO DA JAZIDA DO FAXINAL .....	19
2.5. MINA DO FAXINAL .....	21
2.5.1. Extração do carvão bruto .....	21
2.5.2. Beneficiamento do carvão R.O.M.....	22
2.5.3. Mercado e usos do carvão beneficiado .....	26
2.6. MINA BUTIÁ LESTE .....	27

2.6.1. Extração do carvão bruto .....	27
2.6.2. Beneficiamento do carvão R.O.M. ....	28
2.6.3. Mercado e usos do carvão beneficiado .....	32
3. EXPERIMENTAL .....	33
3.1. MATERIAIS E MÉTODOS .....	33
3.2. CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS SUBPRODUTOS .....	35
3.3. CARACTERIZAÇÃO DENSIMÉTRICA DOS SUBPRODUTOS .....	37
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	40
4.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA .....	40
4.1.1. Análise Granulométrica dos Subprodutos da Mina do Faxinal .....	40
4.1.1.1. Rejeito 1 .....	40
4.1.1.2. Intermediário .....	41
4.1.2. Análise Granulométrica dos Subprodutos da Mina Butiá Leste .....	42
4.1.2.1. Rejeito 1 .....	42
4.1.2.2. Intermediário .....	42
4.2. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DE LAVABILIDADE .....	44
4.3. PRODUTOS PROCEDENTES DA MINA DO FAXINAL .....	46
4.3.1. Subproduto Rejeito 1 .....	46
4.3.1.1. Amostra sem beneficiamento em laboratório (Lote I) .....	46
4.3.1.2. Amostra cominuída a -9,5 mm em laboratório (Lote II) .....	51
4.3.1.3. Amostra cominuída a -2,0 mm em laboratório (Lote III) .....	59
4.3.2. Subproduto Intermediário .....	63
4.3.2.1. Amostra sem beneficiamento em laboratório (Lote I) .....	63
4.3.2.2. Amostra cominuída a -9,5 mm em laboratório (Lote II) .....	68
4.3.2.3. Amostra cominuída a -2,0 mm em laboratório (Lote III) .....	76
4.4. PRODUTOS PROCEDENTES DA MINA BUTIÁ LESTE .....	79
4.4.1. Subproduto Rejeito 1 .....	79
4.4.1.1. Amostra sem beneficiamento em laboratório (Lote I) .....	79
4.4.1.2. Amostra cominuída a -9,5 mm em laboratório (Lote II) .....	83
4.4.1.3. Amostra cominuída a -2,0 mm em laboratório (Lote III) .....	90
4.4.2. Subproduto Intermediário .....	93
4.4.2.1. Amostra sem beneficiamento em laboratório .....	93
4.4.2.2. Amostra cominuída a -9,5 mm em laboratório .....	96
4.4.2.3. Amostra cominuída a -2,0 mm em laboratório (Lote III) .....	106
5. COMENTÁRIOS FINAIS .....	109

5.1. CONCLUSÕES .....	109
5.2. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS .....	114
REFERÊNCIAS .....	115
ANEXO I .....	116
ANEXO II .....	125

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de carvão e principais usos.....	8
Figura 2. Modos de fraturas (Sampaio e Tavares, 2005).....	10
Figura 3. Condições a serem satisfeitas para ocorrer a concentração (ideal) do carvão. ....	12
Figura 4. Diagrama esquemático de um jigge Baum (Sampaio e Tavares, 2005). ....	15
Figura 5. Seção de uma espiral com a disposição dos produtos (Sampaio e Tavares, 2005)...	17
Figura 6. Estratificação vertical devido às forças de Bagnold. ....	18
Figura 7. Unidade de britagem com a recebedoria do carvão ROM. ....	23
Figura 8. Vistas da Unidade de Lavagem onde se vêem os prédios do jigge (ao centro na foto) e do circuito de finos (à direita na foto). ....	24
Figura 9. Vista da área onde são estocados os subprodutos Rejeito 1 e Intermediário. ....	24
Figura 10. Vista do leito do jigge. ....	25
Figura 11. Grelha da moega de recebedoria do carvão ROM. ....	29
Figura 12. Sistema de estocagem do carvão britado. ....	30
Figura 13. Hidrociclones deslamadores. ....	30
Figura 14. Bateria de espirais triplas para finos. ....	31
Figura 15. Metodologia aplicada para classificação das faixas granulométricas (100% da massa) abaixo de 103 mm, aplicado no tratamento dos subprodutos.....	36
Figura 16. Metodologia aplicada para redução das partículas (100% da massa) a -9,5 mm e classificação das respectivas faixas granulométricas. ....	36
Figura 17. Metodologia aplicada para redução das partículas (100% da massa) a -2,0 mm e classificação das respectivas faixas granulométricas. ....	37
Figura 18. Ensaios de afunda-flutua das frações granulométricas (modificada de Sampaio e Tavares, 2005). ....	39
Figura 19. Curvas dos flutuados para a faixa -9,5 mm +0,1 mm do Rejeito 1, Mina do Faxinal. ....	54
Figura 20. Curvas dos flutuados para a faixa -9,5 mm +0,1 mm do Intermediário, Mina do Faxinal. ....	71
Figura 21. Curvas dos flutuados para a faixa -9,5 mm +0,1 mm do Rejeito 1, Mina Butiá Leste. ....	87
Figura 22. Curvas dos flutuados para a faixa -9,5 mm +0,1 mm do Intermediário, Mina Butiá Leste. ....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tipo de análise para carvões, características avaliadas e suas finalidades .....	5
Tabela 2. Especificações dos carvões energéticos (resumidas). .....	7
Tabela 3. Dados quantitativos e qualitativos do carvão R.O.M. – Mina do Faxinal. ....	21
Tabela 4. Unidades de beneficiamento e suas capacidades horárias - Mina do Faxinal. ....	22
Tabela 5. Produtos do lavador e suas produções percentuais Mina do Faxinal. ....	26
Tabela 6. Dados quantitativos e qualitativos do carvão R.O.M. - Mina Butiá Leste. ....	27
Tabela 7. Unidades de beneficiamento e suas capacidades horárias na Mina Butiá Leste (Lavador de Recreio). .....	28
Tabela 8. Produtos do lavador e suas produções percentuais na Mina Butiá Leste (Lavador de Recreio). .....	32
Tabela 9. Ensaio realizados nos lotes I, II e III. ....	35
Tabela 10. Líquidos densos e solvente orgânicos empregados nos testes de afunda-flutua. ..	38
Tabela 11. Classificação granulométrica resultante dos subprodutos da Mina do Faxinal. ....	41
Tabela 12. Classificação granulométrica resultante dos subprodutos da Mina Butiá Leste. ....	43
Tabela 13. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -103 mm + 2,0 mm – subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal. ....	47
Tabela 14. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, lote I – subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal. ....	47
Tabela 15. Resultado total dos ensaios densimétricos e análises imediatas, faixa -103 mm +0,1 mm - subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal. ....	48
Tabela 16. Combinações de faixas granulométricas e densimétricas, na fração abaixo de 103 mm, Rejeito 1, Mina do Faxinal. ....	50
Tabela 17. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -9,5 mm + 2,0 mm, lote II – subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal. ....	51
Tabela 18. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, lote II – subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal. ....	52
Tabela 19. Resultado total dos ensaios densimétricos e análises imediatas, faixa -9,5 mm +0,1 mm - subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal. ....	53
Tabela 20. Combinações de faixas granulométricas e densimétricas, na fração abaixo de 9,5 mm, Rejeito 1, Mina do Faxinal. ....	58
Tabela 21. Resultado total do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm + 0,1 mm – subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal. ....	60
Tabela 22. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -103 mm +2,0 mm, lote I – subproduto Intermediário, Mina do Faxinal. ....	63
Tabela 23. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, lote I – subproduto Intermediário, Mina do Faxinal. ....	64

Tabela 24. Resultado total dos ensaios densimétricos e análises imediatas, faixa -103 mm +0,1 mm - subproduto Intermediário, Mina do Faxinal. ....	65
Tabela 25. Combinações de faixas granulométricas e densimétricas, na fração abaixo de 103 mm, Intermediário, Mina do Faxinal. ....	67
Tabela 26. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -9,5 mm +0,1 mm, lote II – subproduto Intermediário, Mina do Faxinal....	68
Tabela 27. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, lote II – subproduto Intermediário, Mina do Faxinal. ....	69
Tabela 28. Resultado total dos ensaios densimétricos e análises imediatas, faixa -9,5 mm +0,1 mm subproduto Intermediário, Mina do Faxinal. ....	70
Tabela 29. Resultado total do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm – subproduto Intermediário, Mina do Faxinal. ....	77
Tabela 30. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -103 mm +2,0 mm, lote I – subproduto Rejeito 1, Mina Butiá Leste. ....	80
Tabela 31. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, lote I – subproduto Rejeito 1, Mina Butiá Leste. ....	80
Tabela 32. Resultado total dos ensaios densimétricos e análises imediatas, faixa -103 mm +0,1 mm - subproduto Rejeito 1, Mina Butiá Leste. ....	81
Tabela 33. Combinações de faixas granulométricas e densimétricas, na fração menor do que 103 mm, Rejeito 1, Mina Butiá Leste. ....	82
Tabela 34. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -9,5 mm +2,0 mm – subproduto Rejeito 1, Mina Butiá Leste. ....	83
Tabela 35. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, lote II – subproduto Rejeito 1, Mina Butiá Leste. ....	85
Tabela 36. Resultado total dos ensaios densimétricos e análises imediatas, faixa -9,5 mm +0,1 mm - subproduto Rejeito 1, Mina Butiá Leste. ....	86
Tabela 37. Combinações de faixas granulométricas e densimétricas, na fração abaixo de 9,5 mm, Rejeito 1, Mina Butiá Leste. ....	90
Tabela 38. Resultado total do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm – subproduto Rejeito 1, Mina Butiá Leste. ....	91
Tabela 39. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -103 mm +2,0 mm, lote I – subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste. ....	93
Tabela 40. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, lote I – subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste. ....	94
Tabela 41. Resultado total dos ensaios densimétricos e análises imediatas, faixa -103 mm +0,1 mm - subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste. ....	95
Tabela 42. Combinações de faixas granulométricas e densimétricas, na fração abaixo de 103 mm, Intermediário, Mina Butiá Leste. ....	96
Tabela 43. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -9,5mm + 2,0 mm – subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste. ....	97
Tabela 44. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, lote II – subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste. ....	99

Tabela 45. Resultado total dos ensaios densimétricos e análises imediatas, faixa -9,5 mm +0,1 mm - subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste. ....	101
Tabela 46. Combinações de faixas granulométricas e densimétricas, na fração abaixo de 9,5 mm, subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste. ....	105
Tabela 47. Resultado total do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm + 0,1 mm – subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste. ....	107
Tabela 48. Resumo dos principais parâmetros operacionais para tratamento de grossos e finos e combinações alternativas entre faixas granulométricas dos subprodutos estudados para viabilização de seu reprocessamento. ....	111
Tabela 49. Taxas teóricas de reprocessamento dos subprodutos por Mina. ....	118
Tabela 50. Produção de carvão CE-4700 a partir dos subprodutos da Mina do Faxinal. ....	119
Tabela 51. Produção de carvão CE-4700 a partir dos subprodutos da Mina Butiá Leste. ....	119
Tabela 52. Produção de carvão CE-4200 a partir dos subprodutos da Mina do Faxinal. ....	120
Tabela 53. Produção de carvão CE-4200 a partir dos subprodutos da Mina Butiá Leste. ....	120
Tabela 54. Produção de carvão CE-5200 a partir dos subprodutos da Mina do Faxinal. ....	121
Tabela 55. Produção de carvão CE-5200 a partir dos subprodutos da Mina Butiá Leste. ....	122
Tabela 56. Produção horária dos carvões CE-4200, CE-4700 e CE-5200 por Mina. ....	123
Tabela 57. Produção anual dos carvões CE-4200, CE-4700 e CE-5200 por origem. ....	123
Tabela 58. Receita anual por tipo de carvão energético produzido. ....	124

**LISTA DE SÍMBOLOS**

c.b.s.	cinzas à base seca
CE	carvão energético
cm <sup>3</sup>	centímetro cúbico
g	grama
h	hora
kcal	quilocaloria
kg	quilograma
km	quilômetro
mm	milímetro
t	tonelada

**LISTA DE ABREVIATURAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
COPELMI	Companhia de Pesquisas e Lavras Minerais
P.C.S.	Poder Calorífico Superior
COPELUL	Companhia Petroquímica do Sul
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
LAPROM	Laboratório de Processamento Mineral
LTDA.	Limitada
R1	Rejeito primário
R2	Rejeito secundário
R.O.M.	<i>Run of Mine</i>
RS	Estado do Rio Grande do Sul
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## RESUMO

Seguindo a tendência mundial de reaproveitamento dos escassos recursos materiais não-renováveis, a partir da reciclagem de resíduos urbanos e industriais, devido à inexistência de novas fontes de matéria-prima, busca-se, no presente estudo, estabelecer a recuperabilidade da matéria carbonosa remanescente em amostras de rejeitos carbonosos (subprodutos), refugados nas operações de beneficiamento quando produzem carvão CE-5200 nas Minas do Faxinal e Butiá Leste da COPELMI Mineração, gerando acréscimo na produção total, bem como avaliar as perdas ocorridas por ineficiência nas mesmas operações.

As amostras recebidas foram divididas em três lotes, sendo cada lote tratado em granulometria diferenciada no Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) dessa Universidade. Com exceção do primeiro lote, que permaneceu na mesma granulometria em que foi recebido, os demais foram reduzidos 100% a -9,5 mm e -2,0 mm e juntamente com o primeiro classificados nas peneiras de aberturas 2,0 mm e 0,1 mm com a finalidade de mensuração do grau de liberação da fração orgânica, indicando os carvões teoricamente possíveis de serem recuperados de cada lote mediante ensaios de afunda-flutua. Nas densidades teóricas de corte de 1,5 g/cm<sup>3</sup>, 1,8 g/cm<sup>3</sup>, 2,0 g/cm<sup>3</sup> e 2,2 g/cm<sup>3</sup>, e com base no critério inicial adotado para avaliação dos resultados dos parâmetros ‘recuperação mássica’ e ‘teor em cinzas’, acima de 12% e em torno de 30%, respectivamente, pesquisa-se dentre os diversos tipos de carvões residuais, aquele que se aproxima do tipo CE-5200 (carvão energético com poder calorífico superior de 5200 kcal/kg ou o teor em cinzas 30%) e com o conhecimento dos respectivos percentuais mássicos e teores em cinzas encontrados, avaliam-se suas características de lavabilidade resultantes com o fim de aplicação futura em escala industrial.

Ao final dos ensaios em laboratório, verifica-se que na faixa 100% a -9,5 mm ocorre o maior grau de liberação da matéria orgânica, impactando nos resultados de recuperação mássica e teor em cinzas que se aproximam dos propostos. Os subprodutos Rejeito 1 e Intermediário originados na Mina Butiá Leste juntamente com Rejeito 1 procedente da Mina do Faxinal apresentam a relação ‘quantidade *versus* qualidade’ mais promissora, ou seja, 14,02% *versus* 28,65% e 18,10% *versus* 29,56%, e ainda 14,83% *versus* 29,77%, nessa ordem. Do subproduto Intermediário restante, obtém-se carvão com teor de cinzas superior de 35,60% (equivalente ao carvão tipo CE-4700 com mercado local) e massa recuperável de

16,13%. Esses resultados identificam as perdas existentes nas operações de beneficiamento de cada unidade produtora por não apresentarem adequada liberação de seus constituintes dentre outras causas possíveis e não discutidas no presente estudo.

Torna-se evidente que a legitimação dos resultados ora apresentados, tendo em vista futura implantação do reprocessamento dos subprodutos, deve ser avaliada por criteriosa análise de viabilidade econômica, proposta ao final do trabalho.

## ABSTRACT

This work is a study of recycling of coal wastes produced in coal processing by wet jigging. The process produces two waste products. One is the refuse from the first jigging step. The second one, is the cleaning step of the concentrate of the first, producing a second waste material called middling. The aim is to determine feasibility of increasing recovery by reprocessing those samples with an additional jigging step.

The studied Samples came from Faxinal and Butiá Leste mines, belonging to COPELMI mining, from Rio Grande do Sul State, Brazil. Samples as received were divided in three groups: Sample A that was ground 100% - 103 mm. Sample B was ground to 100% -9.5 mm. and sample C which was ground 100% -2 mm. Then, each sample was divided in two or three particle sizes: Sample A was divided in -103 mm +2.0 mm, -2.0 mm +0.1 mm and -0.1 mm. By the other hand, sample B was divided in -9.5 mm +2.0 mm, -2.0 mm +0.1 mm and -0.1 mm. The last fraction C was divided in -2.0 mm +0.1 mm and -0.1 mm. In order to determine coal separation degree in each fraction, the samples were submitted to sink and float tests. The following densities series were prepared with bromoform and xylol: 1.5 g/cm<sup>3</sup>, 1.8 g/cm<sup>3</sup>, 2.0 g/cm<sup>3</sup> and 2.2 g/cm<sup>3</sup>. The criteria to determine recoverability was to get minimum of 12% recovery with no more than 30% ash, because in that range calorific capacity of coal is the order of 5200 kcal/kg. The results obtained showed that samples that best fitted the criteria were the fraction 100% -9.5 mm for both mines. However, middling for Faxinal did not give adequate products. In effect, sample from first refuse of Butiá Leste gave 14.02% recovery and 28.65% ash. Middling of the same sample gave 18.10% recovery and 29.56% ash. On the other hand, Faxinal first refuse gave 14.83% recovery and 29.77% ash. But, middling of this sample despite that recovery was not bad (16.13%), ash grade was out of the range of the criteria used (35.60%).

These results showed that technically it is possible to recover more coal from samples of the mines studied. Nevertheless, the application of the process must be supported by an economical analysis.

## **1. COMENTÁRIOS INICIAIS**

### **1.1. INTRODUÇÃO**

O crescente consumo mundial de recursos de toda ordem (renováveis ou não), impulsionado pelos avanços tecnológicos e exigências da sociedade moderna, tem motivado estudos e pesquisas de abrangência acadêmica e empresarial direcionados à busca de fontes alternativas de matéria-prima e otimização no uso das existentes. As fontes energéticas não-renováveis, fundamentais nesse contexto em função de sua escassez, têm sido valorizadas nos tempos atuais.

O carvão mineral, segunda fonte de energia não-renovável logo depois do petróleo, e a região sul do Brasil, por concentrar a totalidade das reservas lavráveis desse bem, 6.595.781.463 toneladas (DNPM, 2006), começam a despertar a atenção do restante do país, devido à crescente demanda energética, por sua aplicação como combustível em centrais termoelétricas e na geração de vapor para outros fins industriais. Embora o carvão produzido no Rio Grande do Sul seja destituído de propriedades coqueificantes, que possibilitariam seu uso na siderurgia, tem-se procurado novas alternativas tecnológicas ‘limpas’ para seu melhor reaproveitamento através de operações unitárias de beneficiamento, visando à qualidade superior do carvão com impactos positivos no rendimento das termoelétricas e indústrias, na medida em que concentra a matéria combustível e reduz as quantidades de inertes (matéria mineral) e poluentes (enxofre inorgânico) contidos. Com isso, reduzem-se as emissões de poluentes na atmosfera (e conseqüente ocorrência de precipitação ácida nas proximidades das usinas) em atendimento aos limites restritivos da legislação ambiental, bem como os investimentos na construção de novas usinas de menor custo operacional, haja vista seus projetos adequarem-se ao combustível mais nobre.

O uso responsável das escassas fontes energéticas existentes, principalmente as não-renováveis, e a reciclagem de resíduos industriais começam a ser intensificados na Europa e em outros países para se evitar colapso industrial no futuro, quando a maioria dessas fontes chegarem à exaustão.

Seguindo essa linha, busca-se na reciclagem de rejeitos carbonosos a recuperação de carvões remanescentes com qualidade adequada a fins industriais, juntamente com a avaliação

das perdas ocorridas nas operações atuais de tratamento com foco no melhor reaproveitamento dessa fonte não-renovável.

A Companhia de Pesquisa e Lavras Minerais (COPELMI Mineração Ltda.), interessada no reaproveitamento dos carvões remanescentes nos subprodutos (rejeitos) originários de seu beneficiamento, vem estocando seus rejeitos com a finalidade de reprocessamento futuro, totalizando mais de um milhão de toneladas armazenadas. As amostras dos rejeitos, matéria-prima aqui estudada, foram coletadas nas plantas de tratamento de carvão ROM (bruto) das Minas do Faxinal e Mina Butiá Leste, localizadas nos municípios de Arroio dos Ratos e Butiá, respectivamente, na porção central do Estado do Rio Grande do Sul.

O presente trabalho constitui-se, além dessa introdução, do objetivo do estudo, revisão bibliográfica para a familiarização dos termos técnicos utilizados e entendimento da sistemática da investigação proposta, expondo na seqüência, a descrição da metodologia aplicada, apresentação e discussão dos resultados, e por fim, as conclusões e sugestões para estudos futuros.

## **1.2. TEMA E OBJETIVO DO ESTUDO**

O tema deste estudo investiga a possibilidade de recuperação da matéria carbonosa remanescente em amostras de rejeitos gerados no beneficiamento de carvão nas minas da COPELMI Mineração, assim como avalia as perdas ocorridas nas mesmas operações de tratamento.

Como objetivos, em primeiro plano, avaliam-se as características de lavabilidade das amostras, especificamente por meio de operações unitárias e ensaios realizados em laboratório, para possível aplicação futura no reprocessamento dos rejeitos em escala industrial. Na etapa inicial, avalia-se o grau de liberação dos constituintes orgânicos e inorgânicos da matriz carbonosa das amostras, provocado pela desagregação das partículas a granulometrias menores do que a usualmente utilizada nas operações de beneficiamento. Na etapa seguinte, classificam-se as frações cominuídas em peneiras obtendo-se faixas granulométricas, nas quais posteriormente realizam-se ensaios de afunda-flutua, buscando identificar a densidade teórica que separa (ou densidade ‘de corte’) a fração carbonosa dos

contaminantes, juntamente com a análise imediata dos flutuados e afundados. Com os resultados mensurados de 'quantidade *versus* qualidade', analisa-se a possibilidade do reprocessamento dos rejeitos, ora estocados sem aproveitamento imediato. Num segundo plano, valendo-se dos resultados obtidos em laboratório das amostras de rejeitos, demonstram-se as perdas por ineficiência decorrentes das operações atuais não-otimizadas de beneficiamento, focalizando a granulometria usual aplicada nos processos.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Esta seção visa apresentar de forma sucinta a conceituação básica comumente utilizada na literatura técnica sobre beneficiamento de carvão, para melhor compreensão não somente da lógica aplicada como dos resultados do trabalho aqui descrito.

Inicia-se pela definição de carvão, características do carvão brasileiro, tipos e principais usos, na seqüência, a liberação dos constituintes do carvão e o princípio da separação gravimétrica (graúdos e finos) para a consecução de seu tratamento, e por fim o resultado de estudo anteriormente realizado nos produtos do beneficiamento do carvão lavrado na Mina do Faxinal.

### **2.1. MATÉRIA-PRIMA CARVÃO**

#### **2.1.1. Definição e características do carvão brasileiro**

Carvão mineral é um recurso energético, não renovável, de maior abundância em nosso planeta. Segundo Perfil Analítico do Carvão (DNPM, 1987), carvão é uma rocha sedimentar combustível formada a partir de determinados vegetais (carvões húmicos) que sofreram soterramento e compactação em bacias originalmente pouco profundas. A carbonificação gradativa da matéria vegetal original, ou seja, as alterações significativas na composição química do carvão pela perda de  $O_2$  e  $H_2O$  e o conseqüente enriquecimento em carbono, foram determinadas pela pressão, temperatura, tectônica e seu tempo de atuação. Conforme o mesmo boletim, além da matéria carbonosa o carvão apresenta em sua constituição matéria mineral sendo as mais comuns os minerais de argila, carbonatos, sulfetos e quartzo. A matéria mineral pode ser responsável por rebaixamento na temperatura de fusão das cinzas, corrosão e abrasão nos tubos das caldeiras, motivo pelo qual se deve estudá-la na caracterização dos carvões.

Conforme Sampaio e Tavares (2005), carvão é uma rocha constituída por ‘minerais orgânicos’, chamados macerais, além de matéria inorgânica. Os macerais podem ser divididos em três grandes grupos: Vitritina, Exinita e Inertinita, com densidades variáveis conforme o teor em carbono. Portanto, por não ser rocha homogênea, a densidade do carvão é determinada pela concentração relativa dos diversos constituintes orgânicos (macerais) e

inorgânicos (também conhecidos por ganga, contaminante) presentes no carvão. A matéria inorgânica disseminada no carvão (origem das cinzas após incineração) apresenta densidade superior a dos macerais, de modo que havendo acréscimo em seu teor, conseqüentemente provocará aumento na densidade do carvão. No carvão R.O.M. os constituintes orgânicos não se encontram suficientemente concentrados para sua utilização direta, necessitando de algum tipo de beneficiamento que resulte acréscimo na concentração da matéria orgânica com redução dos minerais de ganga a proporções aceitáveis.

A caracterização físico-química do carvão é fundamental para seu futuro aproveitamento econômico, onde se faz necessário a realização de análises com a finalidade de determinar as mais adequadas aplicações, além de estabelecer as especificações dos tipos comerciais dos carvões, conforme as metodologias da ABNT, CIENTEC, ASTM e outras, resumidas na Tabela 1.

Tabela 1. Tipo de análise para carvões, características avaliadas e suas finalidades.

<b>TIPO DE ANÁLISE</b>	<b>CARACTERÍSTICA AVALIADA</b>	<b>FINALIDADE</b>
Análise Imediata do Carvão	Umidade (teor)	Relação entre material combustível/incombustível Bases para a comercialização Avaliar beneficiamento Resultado das análises em base seca
	Cinzas (teor)	
	Materiais voláteis (teor)	
	Carbono fixo (teor)	
Análise Elementar do Carvão	Carbono	Composição do carvão
	Hidrogênio	
	Nitrogênio	
	Enxofre	Calor gerado na combustão (parâmetro de comercialização)
	Oxigênio + Halogênios	Teor de enxofre (controle da poluição)
	Poder calorífico superior e inferior	
	Formas de enxofre sulfático, pirítico e orgânico	Presença de cloretos (corrosão em refratários dos fornos)
	Carbonatos	Dados para dimensionamento de moinhos
	Cloro	
	Moabilidade	

Por meio da análise imediata do carvão, teste laboratorial de resultado rápido, consegue-se determinar alguns parâmetros que caracterizam a qualidade dos carvões, entre esses, o teor (percentual) em cinzas, após incineração, segundo método normalizado. Esse resultado indica a massa residual de contaminante presente no carvão após a queima, grandeza inversamente proporcional ao poder calorífico, que determina a energia calórica liberada pelos constituintes orgânicos nessa transformação química. Então, o poder calorífico do carvão pode ser determinado com rapidez e razoável precisão através de reta de correlação entre ‘teor em cinzas *versus* poder calorífico’ característico em cada carvão de interesse. Quanto maior o poder calorífico, grandeza que define o tipo comercial e a qualidade do carvão, menor será seu teor em cinzas.

### **2.1.2. Tipos de carvões e principais usos**

Os carvões comercializados no país atendem especificações baseadas em algumas características mensuradas nas análises já comentadas. Os tipos comerciais e industriais de carvões produzidos no Brasil, suas definições e especificações estão regulamentadas pela Portaria CNP-DIPLAN nº. 100 de 1º de abril de 1987 e classificam-se em três tipos:

- a) Carvão pré-lavado;
- b) Carvão metalúrgico; e
- c) Carvão energético.

Dos tipos de carvões apresentados, somente o terceiro é produzido também no RS, razão pela qual o foco do estudo restringir-se-á ao carvão energético.

O carvão energético é não-coqueificável e atende as especificações listadas resumidamente na Tabela 2 seguinte, segundo a mesma Portaria.

Tabela 2. Especificações dos carvões energéticos (resumidas).

CARACTERÍSTICAS	TIPOS DE CARVÃO								
	CE-6000	CE-5900	CE-5200	CE-4700	CE-4500	CE-4200	CE-3700	CE-3700	CE-3100
PODER CALORÍFICO SUPERIOR, base seca – mínimo (kcal/kg)	5.700	5.900	5.200	4.700	4.500	4.200	3.700	3.150	2.950
GRANULOMETRIA (mm)	35 x 0	50 x 0	*	50 x 0	*	50 x 0	50 x 0	50 x 0	75 x 0
UMIDADE – TOTAL MÁXIMO (%)	15	20	10	19	10	19	15	17	15
TEOR DE CINZAS MÁXIMO (%)	25	22	35	35	43	40	47	54	57
TEOR DE ENXOFRE MÁXIMO (%)	6,5	1,5	2,5	1,5	3,5	1,5	1,5	1,5	1,0

(\*) 25,0 x 0,60 – 60% Min. e 0,60 x 0 – 40% Máx.

Fonte: D.O.U. – Portaria do C.N.P. nº 100/87.

O carvão nacional tem indicação de uso nos seguintes setores:

- Na geração de termoeletricidade;
- Na geração de calor e vapor utilizados pelas indústrias de cimento, de cerâmicas, de papel e celulose, de alimentos e de fumo;
- Na siderurgia – a lavra do carvão metalúrgico de Chico Lomã–Santa Terezinha (RS), permitirá, no futuro, produzir frações de carvão-coque para o alto forno das indústrias nacionais com rendimentos superiores aos do carvão catarinense, desde que as frações energéticas tenham aproveitamento regional; e
- Na carboquímica – a gaseificação do carvão nacional é tecnicamente exequível e foi comprovado que se pode obter gás de médio a alto poder calorífico, porém ainda sem utilização a nível industrial.

Os usos de maior relevância atualmente do carvão são apresentados na Figura 1.

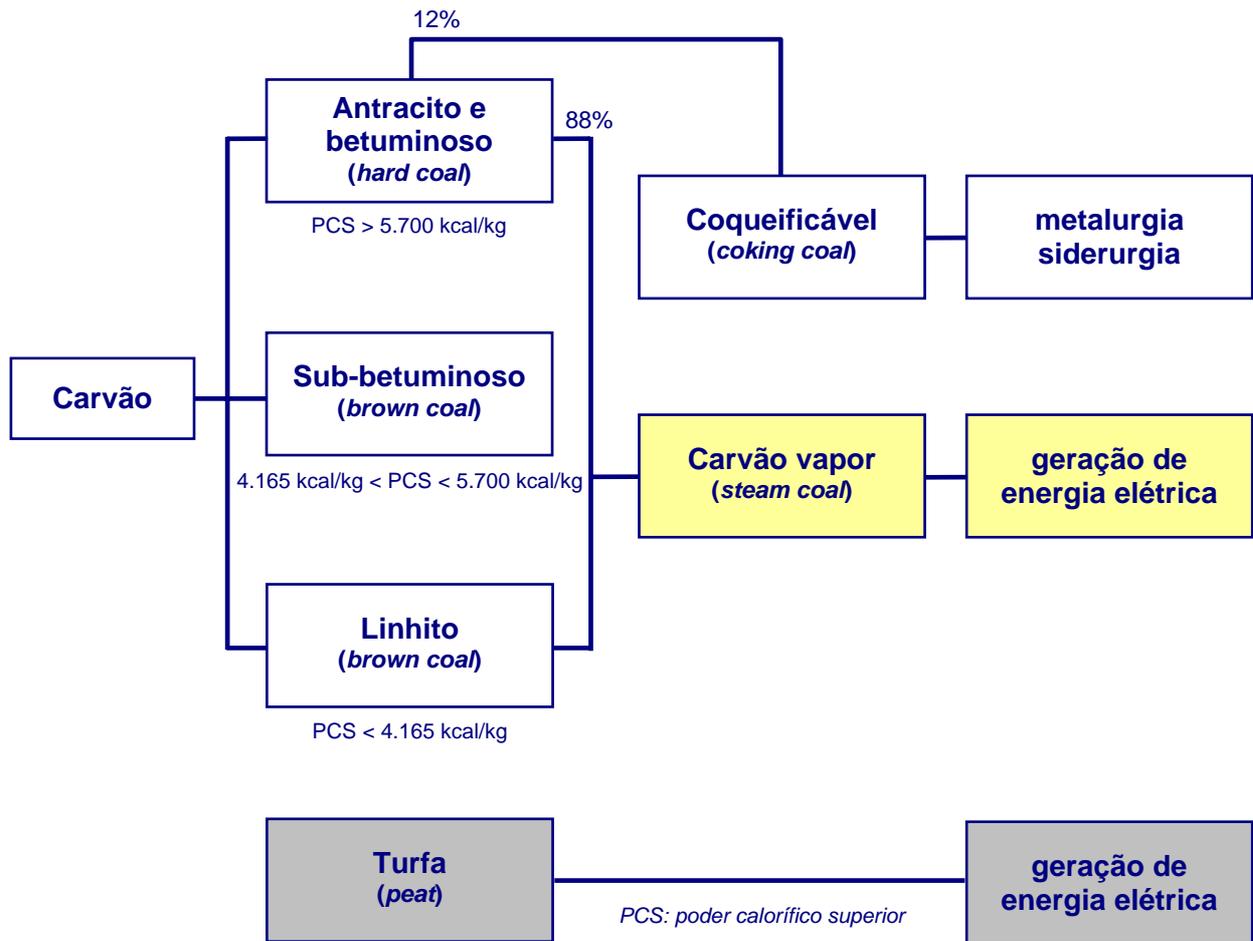


Figura 1. Tipos de carvão e principais usos.

Fonte: Plano Nacional de Energia 2030, Ministério de Minas e Energia – 2006.

## 2.2. LIBERAÇÃO ENTRE OS CONSTITUINTES DO CARVÃO

Os constituintes do carvão bruto encontram-se associados, devendo ser liberados antes de ingressar em qualquer processo que vise sua concentração em matéria orgânica. De acordo com Sampaio e Tavares (2005), a eficiência na separação de componentes de um material depende tanto da precisão do processo de concentração (beneficiamento) quanto das características de liberação do minério. A separação perfeita entre os minerais de interesse e os de ganga (contaminante) somente é possível quando ambos se encontram perfeitamente liberados.

A primeira etapa básica do processo de beneficiamento é a liberação que consiste na cominuição (ação que objetiva reduzir as dimensões das partículas) da rocha até um tamanho a partir do qual se obtenha um produto composto de partículas relativamente 'limpas' e minerais de ganga. Após a cominuição, as partículas do mineral (ou composto) podem-se encontrar na forma de partículas livres (liberadas) ou constituírem partículas mistas (ou simplesmente *middlings*), quando contêm tanto os minerais de interesse quanto os de ganga. Ainda, conforme Sampaio e Tavares (2005), a facilidade (ou dificuldade) com que os minerais de interesse são liberados dos de ganga é determinada pelas características morfológicas e mecânicas do material, bem como o modo da propagação de fraturas quando lhes são aplicadas cargas mecânicas. As principais propriedades mecânicas são a coesão interna dos grãos, de grãos entre si e sua tenacidade e ainda a proporção dos minerais presentes.

A liberação de fases constituintes da rocha depende fundamentalmente do modo de fraturamento dominante, podendo ocorrer três tipos principais de fraturas: fratura intergranular, preferencial ou diferencial, e aleatória (normalmente transgranular). O tipo ideal de liberação ocorre na fratura intergranular, quando a rocha é fragmentada ao longo das interfaces, entre os grãos dos minerais de interesse e a ganga. Pelas características morfológicas e mecânicas dos carvões encontrados no RS, a liberação não é perfeita, pois ocorre uma separação apenas parcial dos constituintes (fratura aleatória) prevalecendo a formação de partículas mistas. A Figura 2 ilustra os tipos principais de fraturas.

Este estudo analisa a recuperação de carvão residual presente em subprodutos refugados que, por se apresentarem ainda coesos à ganga, são igualmente descartados nas

operações de tratamento nas minas da COPELMI, razão pela qual o trabalho busca o maior grau de liberação possível entre os constituintes dos subprodutos, bem como aproveita seus resultados para mensurar as perdas existentes nas mesmas unidades de beneficiamento, a fim de se alcançarem as alternativas de produção de carvão mais promissoras no futuro.

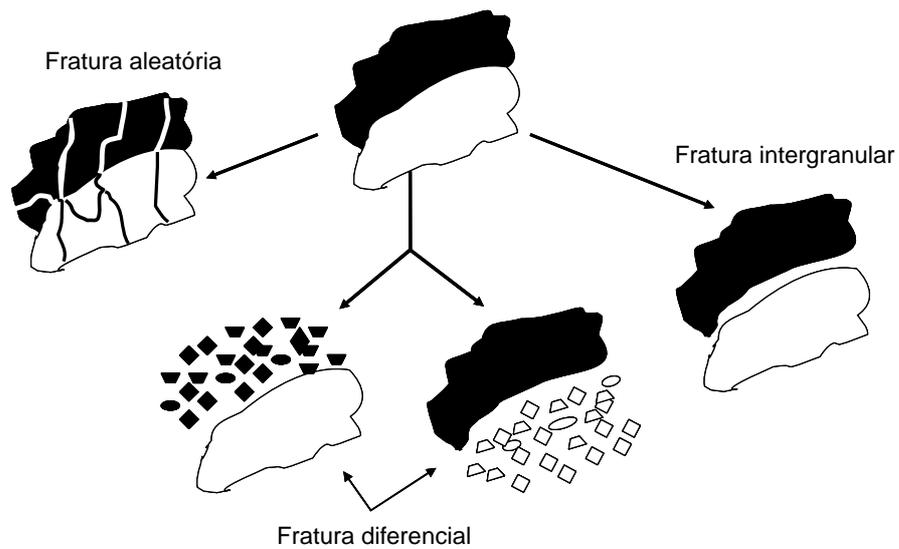


Figura 2. Modos de fraturas (Sampaio e Tavares, 2005).

## 2.3. BENEFICIAMENTO GRAVIMÉTRICO DO CARVÃO

### 2.3.1. Definição de beneficiamento de minérios

O tratamento (preparação ou beneficiamento) de minérios compreende aquelas operações que se aplicam aos bens minerais para modificar as suas condições de composição ou de forma, exigidas ou convenientes ao seu uso ou aplicação.

### 2.3.2. Operações dos processos de concentração

As operações envolvidas em processos de concentração podem ser de dois tipos:

- a) **Transformativas:** que alteram profundamente as espécies minerais do minério tratado. São operações térmicas e químicas (piro e hidrometalurgia); e
- b) **Não Transformativas:** que não alteram as espécies minerais primitivas do minério tratado, constituindo-se de operações físicas, mecânicas e físico-químicas, que modificam apenas a composição mineralógica ou a sua forma ou tamanho e estrutura.

### 2.3.3. Requisitos para a concentração do carvão

A segunda etapa do processamento mineral de carvão bruto, operação não transformativa, é a concentração propriamente dita da matéria carbonosa que consiste na separação da fração orgânica (mineral de valor econômico) dos minerais de ganga em unidades conhecidas como plantas, lavadores ou usinas de beneficiamento de carvão. Porém, para que seja possível tal concentração, é fundamental que três condições sejam satisfeitas (ver Figura 3):

- I. **Liberação:** Individualização das espécies. Separação em partículas livres. (conceito distinto do utilizado na hidrometalurgia);
- II. **Diferenciação:** Que exista, ou que se possa criar, pelo menos uma propriedade ou condição diferenciadora entre as espécies a separar; e

III. **Separabilidade possível:** Que haja uma maneira se separar efetivamente o concentrado da ganga (rejeito).

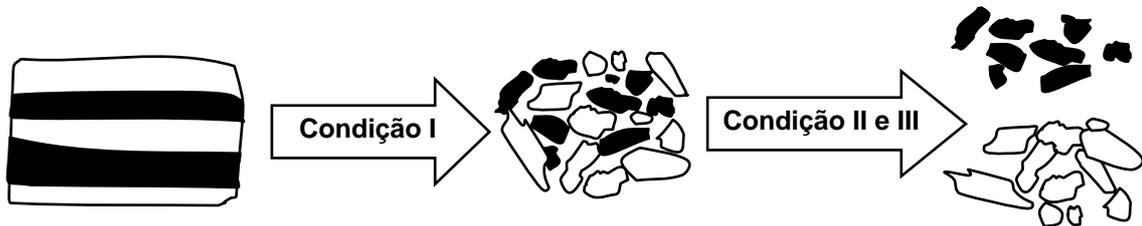


Figura 3. Condições a serem satisfeitas para ocorrer a concentração (ideal) do carvão.

## 2.3.4. Beneficiamento gravimétrico

### 2.3.4.1. Definição

Os constituintes orgânicos do carvão, ainda que apresentem diferenças em suas densidades, são bem menos densos do que os minerais componentes da ganga, determinando que essa diferença relativa entre seus pesos específicos seja adotada para a concentração do mineral de interesse nos equipamentos de beneficiamento. Conforme Sampaio e Tavares (2005), a concentração gravimétrica pode ser definida como o processo pelo qual partículas de diferentes tamanhos, formas e densidades são separadas umas das outras pela força da gravidade ou pela força centrífuga.

Processos de concentração gravimétrica apresentam vantagens relativamente aos demais processos de beneficiamento, tais como (i) alta capacidade de processamento e baixos custos de investimentos e operação, (ii) sem limitação quanto ao tamanho máximo de partícula para aplicação na concentração e (iii) sem necessidade de uso de reagentes químicos reduzindo o custo operacional e impacto ambiental.

### 2.3.4.2. Jigue

Conforme Rubio (1988), jigagem é um processo no qual ocorre a estratificação (leito) de partículas que por meio de expansões (impulsão) e compactações (sucção) alternadas, provocadas por correntes de fluido pulsante que periodicamente se revertem, rearranjam-se

em função das distintas velocidades de sedimentação, aumentando a densidade do leito do topo para sua base. Na impulsão as partículas são movidas para cima, criando uma expansão do volume do leito e é nesse instante que as partículas de menor densidade (matéria carbonosa) são deslocadas a uma altura maior que as partículas de maior densidade de igual tamanho. Na seqüência, o sistema desacelera até atingir velocidade nula e muda de direção para o subsequente golpe de sucção. Nem todas as partículas alcançam velocidade zero no mesmo instante. Durante a fase de expansão do leito, cada partícula tem mobilidade suficiente para reposicionar-se umas em relação às outras. Na fase de sucção as partículas movem-se para baixo formando um leito compacto, onde a separação entre as partículas de menor tamanho não se interrompe, após as maiores tiverem ocupado posições fixas.

Segundo Sampaio e Tavares (2005), baseado no texto clássico de Antoine Marc Gaudin (1939), a estratificação ocorrida na jigagem é o resultado da combinação de três fenômenos principais: a sedimentação retardada diferencial, a aceleração diferencial no início da queda e a consolidação intersticial das partículas durante a sucção.

- i. **Sedimentação retardada diferencial:** Uma partícula em sedimentação livre em um fluido é acelerada por um determinado período de tempo pela ação da força da gravidade, aumentando sua velocidade até alcançar um valor máximo, a velocidade terminal. Como as partículas estão muito próximas umas das outras no leito, aumenta o número de colisões entre elas, tanto nos movimentos de ascensão como de sedimentação, sendo suas trajetórias influenciadas pelas das demais e pelo deslocamento do fluido através dos espaços entre elas. O resultado é uma velocidade terminal de sedimentação menor do que aquela observada em queda livre. Por esse mecanismo, as partículas maiores e as mais pesadas depositam-se primeiro, com as menores e as mais leves acima destas.
- ii. **Aceleração diferencial:** No caso de jigsawes, bem como de outros equipamentos de concentração gravimétrica, uma partícula sofre a interferência das paredes do aparelho ou de outras partículas e, somente pode mover-se por um tempo e distância curtos antes que pare ou seja desviada. Desta maneira, partículas são sujeitas a sucessivas acelerações (e desacelerações) e, em algumas condições, estes períodos de aceleração podem ocupar uma proporção significativa do período do movimento das partículas. O aspecto principal do mecanismo da aceleração diferencial é que a

aceleração da partícula no início de seu movimento depende das densidades da partícula e do fluido. Portanto, seria possível separar partículas de diferentes densidades sem qualquer influência do tamanho da partícula. A partir de um determinado instante, a influência do tamanho da partícula aumenta com o tempo de sedimentação, desta maneira, para que a separação entre as partículas ocorra significativamente, como resultado da ação da aceleração diferencial do que da velocidade terminal, é necessário que o tempo de deslocamento seja suficientemente curto e que o ciclo de jigagem (expansão e compactação do leito) seja repetido inúmeras vezes.

- iii. **Consolidação intersticial:** Partículas de diferentes tamanhos e densidades percorrem distâncias diferentes durante o golpe de jigagem. Devido às suas maiores velocidade de sedimentação, as partículas maiores irão alcançar posições de repouso, - seja sobre o crivo do jigue ou outras sobre partículas previamente depositadas -, antes das partículas finas. Porém, devido à existência de interstícios (espaços vazios) entre as partículas grossas, as partículas finas podem continuar a sedimentar. Esse é o mecanismo denominado consolidação (ou percolação) intersticial.

O estudo aqui tratado, que visa à recuperação de frações carbonosas remanescentes nos rejeitos e avaliar perdas do processo atual, simulará em laboratório por meio de ensaios de afunda-flutua a operação de beneficiamento (ou precisamente o reprocessamento) dos subprodutos em jigue e espirais concentradoras para a consecução desse fim.

A Figura 4 apresenta diagrama de um jigue tipo Baum (pulsado a ar) em cortes longitudinal e transversal.

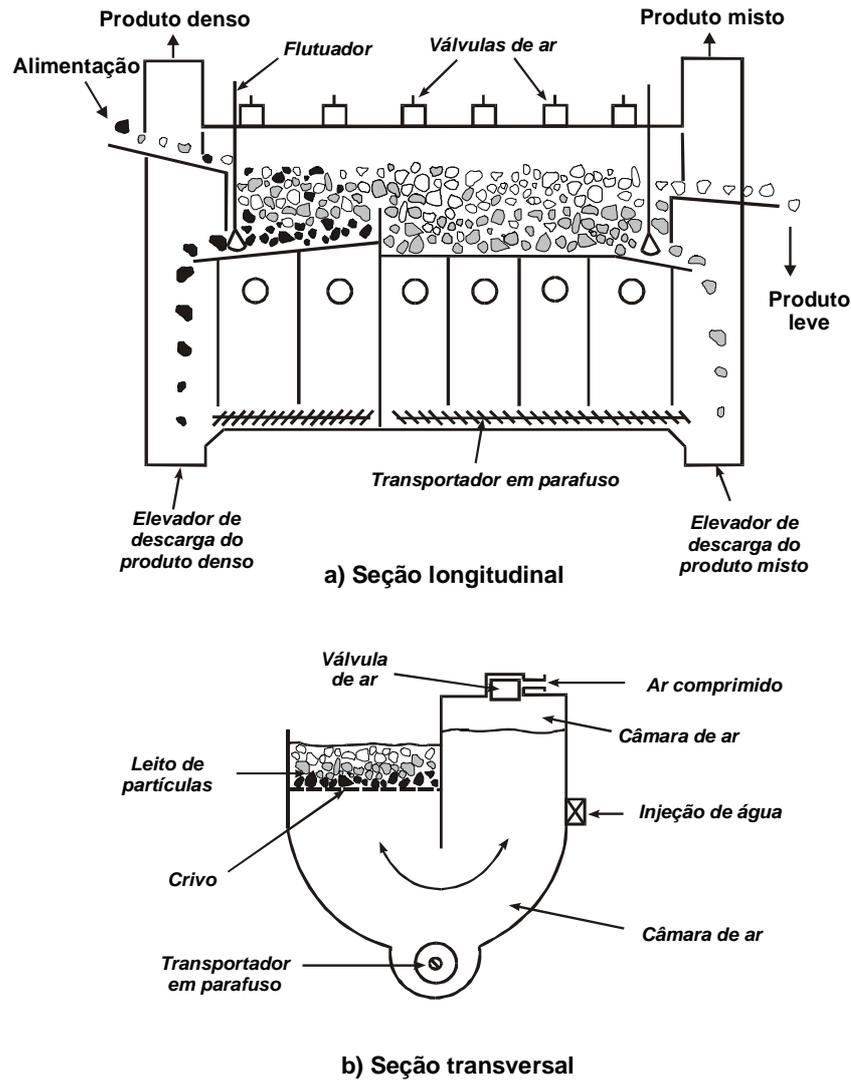


Figura 4. Diagrama esquemático de um jigge Baum (Sampaio e Tavares, 2005).

### 2.3.4.3. Espirais concentradoras

São equipamentos em formato helicoidal de seção transversal semicircular que concentram frações finas de minério em película de água. As espirais concentradoras são fabricadas e comercializadas por empresas multinacionais sendo fornecidas com características técnicas distintas, conforme o fim a que se destina. Os parâmetros de projeto que podem variar para atender as características do minério são:

- Perfil da calha;
- Passo do helicóide;
- Posição e tamanho dos desviadores;

- Tipo de material empregado na sua fabricação;
- Diâmetro e variações de diâmetro das espirais; e
- Aplicação opcional de água suplementar.

Mesmo que apresentem alterações nos parâmetros de projeto, as espirais estratificam as partículas de forma semelhante no processo de concentração. A ampla distribuição granulométrica das partículas, variações de espiral para espiral na forma, altura, geometria das calhas e em outras especificações tornam praticamente impossível aplicar-se os fundamentos teóricos em espirais a todas as partículas do sistema.

Porém, segundo Rubio (1988), há um consenso nos países do Ocidente de que ocorreriam pelo menos os seguintes fatos no mecanismo de separação:

1. A separação gravimétrica nas espirais se dá através da combinação da ação centrífuga, ação gravitacional e escoamento laminar (concentração em película de água);
2. A velocidade do fluxo em uma espiral aumenta de zero junto à lâmina basal, próximo da coluna central, até um valor máximo na interface fluido/ar. Ao longo do perfil da calha, tem-se uma distribuição de regimes hidrodinâmicos passando de laminar, perto da coluna central, a turbulento na região mais vertical;
3. A estratificação da polpa ao redor da hélice da espiral resulta de uma combinação de sedimentação impedida (% sólidos entre 20 a 50%) e consolidação intersticial. Provavelmente ainda exista estratificação devido às forças de Bagnold pelas altas velocidades de cisalhamento;
4. O resultado dos fenômenos anteriormente citados induz as partículas pesadas a movimentarem-se em direção à zona de menor velocidade (parte interior da espiral) e as mais leves a permanecerem na zona de alta velocidade;
5. O passo de uma helicóide origina um gradiente de velocidades de fluxos num plano vertical e gradiente de velocidades radiais no plano horizontal.

As forças centrífugas afetam preferencialmente as partículas pequenas leves e pesadas. Já as gráúdas pesadas sedimentam rapidamente no fundo da lâmina basal e próximo da coluna central, formando uma faixa bem definida e possível de ser removida pelos desviadores ou pontos de coleta. A Figura 5 apresenta a seção de uma espiral com a posição dos produtos.

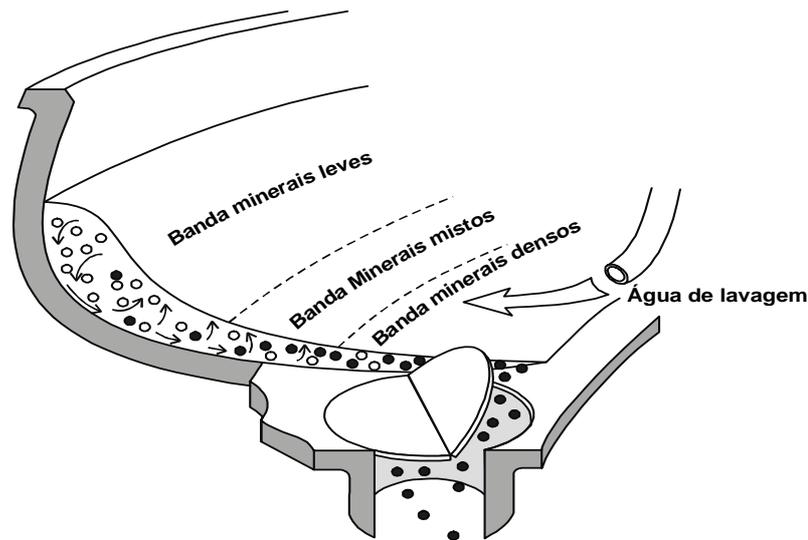


Figura 5. Seção de uma espiral com a disposição dos produtos (Sampaio e Tavares, 2005).

As espirais concentradoras operam numa faixa granulométrica conveniente de 2 mm x 0,037 mm. De um modo geral, a separação dos materiais em espiral é rápida, pois logo nas duas primeiras voltas as frações mais densas poderiam ser retiradas, deixando as demais voltas para separação dos mistos.

O esforço de cisalhamento pode surgir de uma polpa concentrada fluindo sobre uma superfície inclinada ou ser produzido pelo movimento da superfície, ou, ainda, pela combinação de ambos, segundo Luz, Sampaio e Almeida (2004). O efeito resultante desses esforços de cisalhamento, as forças de Bagnold, sobre uma partícula, é proporcional ao quadrado de seu raio e decresce com o aumento da densidade. Deste modo, as forças de Bagnold provocam uma estratificação vertical: as partículas grosseiras leves situar-se-ão mais próximas da interface fluido/ar, seguindo-se as finas leves e as grosseiras pesadas e, na região próxima à superfície, as partículas finas pesadas, conforme a Figura 6. Esse mecanismo de separação produz uma estratificação oposta à resultante da sedimentação retardada ou classificação hidráulica.

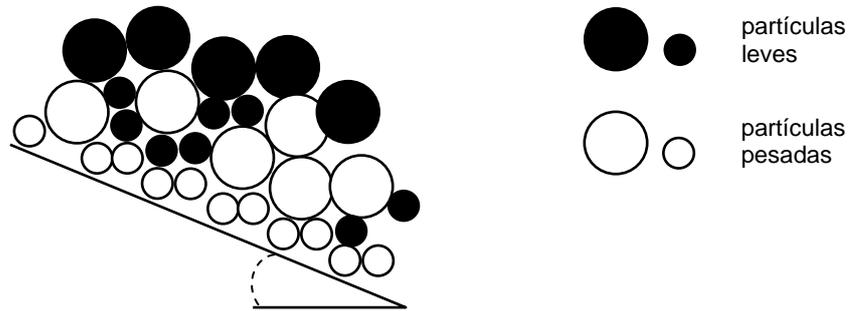


Figura 6. Estratificação vertical devido às forças de Bagnold.

## 2.4. ESTUDO ANTERIOR SOBRE AS FRAÇÕES DE BENEFICIAMENTO DO CARVÃO DA JAZIDA DO FAXINAL

Cabe registrar, por oportuno, o estudo anteriormente realizado nos produtos do beneficiamento da Mina do Faxinal que trata das frações de matéria orgânica contidas no carvão R.O.M., Rejeitos (primário R1 e secundário R2), carvões acima de 0,5 mm, CE-3100 (carvão com poder calorífico superior aproximado de 3000 kcal/kg) e CE-4700 (poder calorífico superior de 4700 kcal/kg), e ainda finos (-0,5 mm) produzidos no lavador à época do trabalho, a partir de amostras cedidas pela COPELMI. Os resultados alcançados nesse trabalho são similares ao comportamento e dados obtidos em laboratório, quando se analisa a matéria carbonosa remanescente nos subprodutos Rejeito 1 (primário) e Intermediário (secundário) gerados na operação que produz carvão energético CE-5200 (poder calorífico superior de 5200 kcal/kg), no mesmo jigue atualmente.

Miltzarek (1991), no tocante à matéria orgânica, constata que os macerais do grupo da vitrinita, o mais abundante no carvão R.O.M. e produtos flutuados na jigagem (CE-3100 e CE-4700), por serem mais friáveis (alto grau de fragilidade) e quando submetidos a pressões na cominuição, fragmentam-se em partículas menores, concentrando nos produtos finos (-0,5 mm). A densidade média da matéria orgânica determinada no mesmo estudo atinge 1,4 g/cm<sup>3</sup>.

Por outro lado, quanto aos minerais de ganga presentes, principalmente no carvão R.O.M. e rejeitos (R1 e R2), o mesmo autor observa que as argilas, predominantes em todas as amostras e frações densimétricas, elevam-se no carvão R.O.M., rejeitos e Finos pelo volume de argilominerais (de densidade média 2,5 g/cm<sup>3</sup>) encontrado, reduzindo nos produtos CE-3100 e CE-4700. No carvão bruto e nos rejeitos os maiores teores são determinados na fração +2,1 g/cm<sup>3</sup> -2,2 g/cm<sup>3</sup>, enquanto nos finos os argilominerais distribuem-se uniformemente com valores acima de 80% nos produtos flutuados, diminuindo de forma considerável nos afundados em 2,2 g/cm<sup>3</sup>, onde se concentram os minerais de maior peso específico.

Os carbonatos ocorrem secundariamente, em volume, quando comparados às argilas, porém mais abundantes que as pirritas (sulfeto de ferro com densidade média 5,0 g/cm<sup>3</sup>, não analisado aqui experimentalmente), na maioria das frações densimétricas, à exceção dos

afundados, onde elas prevalecem. Os carbonatos com densidade média  $3,0 \text{ g/cm}^3$  concentram-se nos rejeitos preferencialmente nas faixas  $+1,5 \text{ g/cm}^3 -1,6 \text{ g/cm}^3$ ;  $+1,7 \text{ g/cm}^3 -1,8 \text{ g/cm}^3$  e  $+1,9 \text{ g/cm}^3 -2,0 \text{ g/cm}^3$  e nos finos são mais abundantes nas frações  $+2,1 \text{ g/cm}^3 -2,2 \text{ g/cm}^3$  e  $+2,2 \text{ g/cm}^3$ , possivelmente devido ao maior grau de liberação da matéria orgânica que ocorre nos carbonatos, contrariamente aos argilominerais que não se liberam facilmente da fração carbonosa. Também se encontram em quantidade relevante nos produtos CE-3100 e CE-4700.

Os maiores volumes de pirita situam-se nos afundados em  $2,2 \text{ g/cm}^3$  de todas as amostras, com maior abundância no rejeito primário, excepcionalmente no CE-4700 e rejeito secundário, correspondendo ao subproduto Intermediário na atualidade.

Especificamente nas frações abaixo de  $0,5 \text{ mm}$ , Miltzarek (1991) constata que, embora as argilas sejam predominantes em todas as amostras, são inferiores em volume nas frações finas, não variando sua quantidade com a densidade. Os carbonatos, por sua vez, em maior teor, ocorrem nas porções mais finas crescendo com a densidade.

Acredita-se, pela proximidade das áreas mineradas, que o comportamento apresentado pelos produtos do lavador da Mina do Faxinal assemelhe-se aos resultados dos respectivos provenientes da lavagem no Butiá Leste.

## 2.5. MINA DO FAXINAL

Esta unidade mineradora tem acesso pela Rodovia BR-290, km 152, próximo ao trevo para o município de Arroio dos Ratos.

A unidade do Faxinal é composta por mina a céu aberto e por planta de beneficiamento com capacidade de tratamento de 90 mil toneladas mensais de carvão bruto recebidas da frente de lavra.

### 2.5.1. Extração do carvão bruto

O carvão bruto, processado na planta de beneficiamento, é lavrado a céu aberto pelo método de mineração em tiras (*strip mining*). O material estéril que cobre as camadas de carvão mineral é retirado por empresa empreiteira, ficando a lavra do carvão sob a responsabilidade da própria COPELMI. O depósito carbonífero nesta localidade constitui-se de 3 (três) camadas de carvão mineral: a Superior, a Média e a Inferior, subdivididas em Superior I e II, Média I e II e ainda Inferior I e II. Cada camada por apresentar teores de matéria carbonosa e mineral distintos é processada separadamente no lavador de carvão (jigüe tipo Baum), objetivando obter-se melhor rendimento e recuperação do carvão contido no R.O.M. na operação de beneficiamento. Portanto não há blendagem das camadas de carvão antes do tratamento na unidade em questão. Algumas características da produção de ROM são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Dados quantitativos e qualitativos do carvão R.O.M. – Mina do Faxinal.

Produção diária	4.000 toneladas R.O.M.
Produção mensal	90.000 toneladas R.O.M.
Teor em cinzas (c.b.s.)	54%

Por apresentar poder calorífico baixo e incompatível com o Mercado, o carvão R.O.M. necessita ser beneficiado objetivando aumentar sua concentração em matéria carbonosa e a respectiva redução da matéria inerte (inorgânica) contida.

### 2.5.2. Beneficiamento do carvão R.O.M.

Os subprodutos Rejeito 1 e Intermediário são gerados na mesma operação de beneficiamento que visa produzir carvão energético com poder calorífico em torno de 5200 kcal/kg, ou seja, o produto principal CE-5200, equivalente a um carvão com teor em cinzas de 30%.

Esta operação de beneficiamento é constituída por dois processos: a britagem e a lavagem propriamente dita do carvão cominuído. A britagem tem por objetivo não apenas determinar uma faixa granulométrica uniforme para o processamento do carvão bruto e comercialização do produto após seu tratamento, mas principalmente para aumentar a separação da matéria carbonosa do contaminante mineral. O processo de lavagem do carvão tem como meta a redução do teor em cinzas de 54% para 30% pela remoção da porção mineral já liberada parcialmente da combustível no processo anterior (britagem), por diferença densimétrica entre essas frações, aumentando a concentração de carbono com a conseqüente elevação no poder calorífico do produto.

As capacidades horárias das unidades de beneficiamento estão descritas na Tabela 4. O regime operacional diário das mesmas é de três turnos de 8 horas.

Tabela 4. Unidades de beneficiamento e suas capacidades horárias - Mina do Faxinal.

<b>Unidade de beneficiamento</b>	<b>Capacidade horária (t/h)</b>
Britagem	300
Lavagem	200

O carvão R.O.M., extraído na lavra, ingressa na planta através da unidade de britagem (Figura 7). Nessa, o carvão bruto descarregado dos caminhões inicia sua rota alimentando uma grelha estacionária com abertura de 450 mm, a fim de que o material retido nessa seja cominuído por rompedor hidráulico, tornando mais homogênea a granulometria para as operações subseqüentes de tratamento. O carvão 100% passante em 450 mm é conduzido por alimentador vibratório até uma peneira vibratória de dois *decks* (armação para suportar cada tela) onde é reclassificado nas aberturas de 100 mm e 50 mm, respectivamente. A parcela

retida na tela de 100 mm abastece o britador primário de duplo rolo e seu produto alimenta o britador secundário de duplo rolo juntamente com a fração passante na abertura de 100 mm, mas retida na tela de 50 mm do segundo deck (-100 mm +50 mm). O material britado se junta à porção passante no segundo *deck* (-50 mm) e são transferidos por transportador de correia a uma pilha-pulmão que alimentará a Unidade de Lavagem.



Figura 7. Unidade de britagem com a recebedoria do carvão ROM.

O carvão empilhado é retomado por alimentador vibratório e transportador de correia instalados em túnel sob a mesma pilha, abastecendo um britador terciário de duplo rolo na entrada do jig. A finalidade desse britador é reduzir as partículas a -40 mm, homogeneizando a distribuição granulométrica do carvão a ser lavado.

O carvão antes de ingressar no jig (Figura 8) tem fração coletada por amostrador automático com atuação temporal controlada. Na etapa de jigagem, o carvão sofre dois cortes densimétricos, sendo as parcelas mais densas de cada corte extraídas por elevadores de caçamba e amostradas por dispositivos semelhantes (amostrador automático) para o controle qualitativo, antes de serem conduzidas até transportadores de correia, que formam as pilhas de Rejeito 1 e Intermediário, nessa seqüência. Esses subprodutos Rejeito 1 e Intermediário são transportados por caminhões e depositados nas escavações já mineradas para posterior reaproveitamento (Figura 9).



Figura 8. Vistas da Unidade de Lavagem onde se vêem os prédios do jigue (ao centro na foto) e do circuito de finos (à direita na foto).



Figura 9. Vista da área onde são estocados os subprodutos Rejeito 1 e Intermediário.

Na continuação do processo, a fração menos densa, ou seja, o carvão flutuado (CE-5200) no leito do jigue (Figura 10), passa por duas peneiras estacionárias de malha 1,0 mm para a retirada de finos menores que 1,0 mm que são lançados em um tanque para posterior bombeamento e alimentação da bateria de hidrociclones.



Figura 10. Vista do leito do jigue.

O carvão CE-5200 retido em 1,0 mm é conduzido por transportador de correia para outro transportador que abastece a pilha de produto pronto para a comercialização. Na transferência entre transportadores, o produto é amostrado em dispositivo automático semelhante aos anteriores, possibilitando o controle qualitativo não somente desse produto, como do balanço mássico de todo o processo. O carvão fino (-1,0 mm) beneficiado, após deslamagem (*overflow*) na bateria de hidrociclones, é enviado ao conjunto de duas espirais concentradoras triplas para nova etapa de beneficiamento (Figura 8), produzindo carvão fino com 30% de teor em cinzas e rejeito fino.

O material particulado menos denso que sai das espirais concentradoras é ainda desaguado em peneira estacionária com abertura de 0,3 mm, buscando separar o carvão mais fino da água para que essa retorne ao circuito de lavagem. O carvão fino se junta ao carvão de granulometria mais graúda e é estocado na mesma pilha de produto.

Na Tabela 5 seguinte, pode-se observar os produtos obtidos na operação CE-5200 e suas respectivas recuperações percentuais.

Tabela 5. Produtos do lavador e suas produções percentuais Mina do Faxinal.

Produtos do Lavador	Recuperação (%)
Rejeito 1	42,0
Intermediário	22,0
Carvão CE-5200 (-25,0 mm +1,0 mm)	27,0
Carvão CE-5200 (-1,0mm)	5,0
Rejeito fino (cavas de mineração)	4,0
<b>Alimentação do jig</b>	<b>100,0</b>

### 2.5.3. Mercado e usos do carvão beneficiado

O produto CE-5200 beneficiado tem aplicação na geração de energia e vapor e destina-se às empresas Aracruz Celulose e Companhia Petroquímica do Sul (Copesul), ambas situadas no RS.

## 2.6. MINA BUTIÁ LESTE

Esta unidade mineradora tem acesso pela Rodovia BR-290, km 173, próximo ao trevo para o município de Butiá.

A unidade do Butiá Leste é constituída por mina a céu aberto com capacidade produtiva mensal de até 80 mil toneladas de carvão bruto. Todo o carvão R.O.M. que provém da frente de lavra é transportado para ser beneficiado na Mina do Recreio, distante cerca de 3 km, cujo acesso se dá pela mesma Rodovia no km 178.

### 2.6.1. Extração do carvão bruto

O carvão bruto, a exemplo da unidade do Faxinal, é lavrado igualmente a céu aberto pelo método de mineração em tiras (*strip mining*). A cobertura de material estéril sobreposta às camadas de carvão é retirada pela mesma empresa empreiteira, e o carvão R.O.M. minerado pela própria COPELMI. Nesta região são extraídas duas camadas de carvão mineral: a Superior e a Média. Tais camadas também apresentam teores de matéria carbonosa e mineral distintos, razão pela qual, mais uma vez, são tratadas separadamente no jigue tipo Baum, fabricado pelo consórcio *Condor-McNally*. As produções e teor em cinzas do R.O.M. são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Dados quantitativos e qualitativos do carvão R.O.M. - Mina Butiá Leste.

Produção diária	3.500 toneladas R.O.M.
Produção mensal	80.000 toneladas R.O.M.
Teor em cinzas (c.b.s.)	50%

Embora esse carvão R.O.M. apresente teor em cinzas ligeiramente inferior que o carvão minerado na Mina do Faxinal, esse não oferece condições de ser utilizado no estado em que se encontra, sendo transportado até a planta de beneficiamento para o devido tratamento.

### 2.6.2. Beneficiamento do carvão R.O.M.

Os subprodutos Rejeito 1 e Intermediário aqui estudados são obtidos a partir da mesma operação de beneficiamento que produz o carvão energético CE-5200, com teor em cinzas de 30%. Outros carvões energéticos também são produzidos em processos distintos nesse mesmo lavador, tais como CE-4500 e CE-4700, com poder calorífico de 4500 kcal/kg e 4700 kcal/kg, respectivamente.

A operação de beneficiamento na unidade mineira do Recreio compõe-se por três processos: a britagem, a lavagem propriamente dita do carvão britado e a blendagem (ou *blending*) de um produto beneficiado com outro apenas cominuído.

Na mina do Recreio, além das unidades de britagem e lavagem, existe a unidade de blendagem que realiza a mistura, em proporções adequadas, de produtos com características distintas, objetivando obter novo produto com a média ponderada de suas qualidades. Suas capacidades horárias são mostradas na Tabela 7. As unidades de britagem e lavagem operam em dois turnos de 12 e 8 horas, diariamente.

Tabela 7. Unidades de beneficiamento e suas capacidades horárias na Mina Butiá Leste (Lavador de Recreio).

<b>Unidade de beneficiamento</b>	<b>Capacidade horária (t/h)</b>
Britagem	500
Lavagem	350
Blendagem	200

A unidade de britagem recebe o carvão R.O.M. descarregado dos caminhões em sua moega, composta por grelha de abertura 450 mm (Figura 11), cujo material retido é cominuído por rompedor hidráulico, e através de um transportador de correia alimenta uma peneira vibratória com abertura de 100 mm, a fim de que a granulometria retida nessa malha seja conduzida a um britador primário de rolo. O carvão com tamanho menor que 100 mm se junta ao produto do britador primário e são transferidos por transportador de correia até segunda peneira vibratória que classifica essas frações de carvão britado na tela 50 mm. O material retido ingressa em um britador secundário de duplo rolo e o produto rebitado é

acrescentado ao material passante nessa abertura e por meio de transportador de correia são conduzidos a uma pilha-pulmão, ou, ainda, podem ser desviados para um sistema de estocagem (transportadores de correia) em pilhas de carvão britado para futura blendagem com carvão lavado, originando outro produto (CE-3100). Esse último carvão britado, por sua vez, quando não é transportado por caminhões até a planta de blendagem para abastecer silos dosadores que realizam o *mix*, gerando o CE-3100, pode suprir a unidade de lavagem por meio de transportador de correia que o transfere ao mesmo transportador que recebe a retomada de carvão britado (-50 mm) da pilha-pulmão, antes de ingressar no jigüe.



Figura 11. Grelha da moega de recebedoria do carvão ROM.

A unidade de lavagem é abastecida por carvão britado -50 mm a partir da pilha-pulmão ou, alternativamente, do sistema de estocagem para *blending* (Figura 12), realizando dois cortes densimétricos que originam os subprodutos Rejeito 1 e Intermediário, juntamente com carvão flutuado no leito do jigüe que pode ser CE-5200, ou CE-4700 ou ainda CE-4500, dependendo do produto que se programe para obter na operação de beneficiamento. Esses subprodutos Rejeito 1 e Intermediário são transportados por caminhões e depositados nas escavações de lavras para futuro reaproveitamento. Considerando a operação para produzir o carvão CE-5200, o produto após sair do jigüe é desaguado em peneira estacionária com abertura de 1,0 mm, sendo novamente britado a 40 mm (britador duplo rolo) com a fração retida conduzida por transportador de correia até outra peneira vibratória de dois *decks*, telas

de 38,0 mm e 10,0 mm, com o fim de armazenar o produto acima, dentro e abaixo dessa faixa granulométrica em silos distintos para atendimento do mercado local.



Figura 12. Sistema de estocagem do carvão britado.

A porção passante na peneira de 1,0 mm (água+lama+carvão fino) é lançada em tanques para ser bombeada à unidade de hidrociclonagem primária (Figura 13) que realiza a deslamagem (separação de matéria mineral fina da carbonosa).



Figura 13. Hidrociclones deslamadores.

O *overflow* do ciclone (polpa formada por água+lama) é levado ao tanque principal de água que abastece o lavador. O *underflow* (material de maior massa, ou seja, carvão e minerais finos) é conduzido até dois bancos de espirais concentradoras triplas (Figura 14) que retiram ainda as frações mais finas de contaminantes inorgânicos do carvão fino, reduzindo suas impurezas.



Figura 14. Bateria de espirais triplas para finos.

O rejeito fino retirado nas espirais concentradoras é depositado nas cavas já mineradas para reaproveitamento da água contida por meio de decantação do material sólido. O particulado menos denso, separado nas espirais é reconduzido até um tanque, onde é bombeado para unidade de hidrociclonação secundária para recuperação da água e do carvão fino existentes. O *overflow* do ciclone junta-se à parcela  $-1,0$  mm do deságüe do carvão CE-5200, recém saído do jig, e novamente é bombeado para o hidrociclone primário. O *underflow* desse é levado até peneira estacionária com tela de  $0,2$  mm para a recuperação da água ainda contida (fração  $-0,2$  mm), que retorna ao mesmo tanque que alimenta a hidrociclonação primária. A fração de carvão retida na malha de  $0,2$  mm, ou seja, na faixa  $-1,0$  mm  $+0,2$  mm é estocada em silo separado dos demais para comercialização. A água excedente do tanque principal que abastece o lavador também é conduzida até a mesma bacia de sedimentação, onde o rejeito fino retirado das espirais fora depositado, juntando-se à água recuperada na sedimentação do material fino, fechando o circuito de água reaproveitada no processo de beneficiamento do carvão.

Na Tabela 8, observa-se os quantitativos dos produtos e subprodutos gerados na operação descrita.

Tabela 8. Produtos do lavador e suas produções percentuais na Mina Butiá Leste (Lavador de Recreio).

Produtos do Lavador	Recuperação (%)
Rejeito 1	32,0
Intermediário	17,0
Carvão CE-5200 (-25,0 mm +1,0 mm)	42,0
Carvão CE-5200 (-1,0mm)	6,0
Rejeito fino para a bacia de decantação	3,0
<b>Alimentação do jigue</b>	<b>100,0</b>

### 2.6.3. Mercado e usos do carvão beneficiado

O carvão CE-3100 produzido por blendagem de carvão britado (sem lavagem) com carvão lavado apresenta teor em cinzas aproximado de 54% (c.b.s.) e poder calorífico de 3100 kcal/kg, sendo comercializado para a Tractebel Energia de Charqueadas com aplicação na geração de vapor.

O produto CE-5200 beneficiado tem aplicação na geração de energia e vapor e destina-se às empresas Aracruz Celulose, Camargo Corrêa e Votorantin.

### 3. EXPERIMENTAL

#### 3.1. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais analisados no presente estudo são amostras de subprodutos (Rejeito 1 e Intermediário) refugados na mesma operação de beneficiamento do carvão bruto que objetiva produzir carvão com maior concentração em matéria carbonosa (produto principal), caracterizando-se por apresentar poder calorífico aproximado de 5200 kcal/kg, ou seja, carvão energético, tipo CE-5200. A referida operação de beneficiamento para a produção de carvão energético supra referido ocorre nas Minas do Faxinal e Butiá Leste, razão pela qual são produzidos, segundo a procedência, Rejeito 1 do Faxinal e Rejeito 1 do Butiá Leste, bem como Intermediário do Faxinal e Intermediário do Butiá Leste.

Em novembro de 2006, a COPELMI disponibilizou e enviou quatro amostras com peso aproximado de 26 kg cada uma, duas procedentes da Mina do Faxinal e as duas restantes da Mina Butiá Leste, ambas com os subprodutos denominados Rejeito 1 e Intermediário, respectivamente que foram secas ao sol e acondicionadas em sacos plásticos para posteriores testes em laboratório.

Tomando-se quase a totalidade dessas amostras, separaram-se 3 lotes para os seguintes ensaios realizados, conforme procedimentos normalizados na ABNT-NBR 8629 - Carvão Mineral – Análise Granulométrica no LAPROM.

No Lote I, tomaram-se 4 kg de cada produto e procedeu-se à classificação granulométrica dos produtos exatamente como foram recebidos da COPELMI, ou seja, sem qualquer tratamento. A dimensão das maiores partículas, medida em seu comprimento, apresentou-se próxima de 103 mm. As aberturas das telas escolhidas para o ensaio foram 2,0 mm e 0,1 mm. O que se buscou identificar na faixa -103 mm +2,0 mm foram os tipos de carvões presentes, motivados por perdas no processo de beneficiamento das usinas consideradas, e possíveis de se recuperar no reprocessamento do produto. Na faixa -2,0 mm +0,1 mm, o carvão possível de ser obtido em circuito de finos (-2,0 mm), e por fim a -0,1 mm, aquela que pela sua reduzida massa não apresenta diferenças densimétricas significativas, dificultando sua separação nos circuitos convencionais de tratamento de finos. Por essa razão, esta faixa não foi submetida a ensaios de afunda-flutua.

Em seguida, as faixas granulométricas  $-103 \text{ mm} +2,0 \text{ mm}$  e  $-2,0 \text{ mm} +0,1 \text{ mm}$  foram submetidas a ensaios de afunda-flutua, objetivando-se verificar os tipos de carvões existentes nas densidades de corte  $1,5 \text{ g/cm}^3$ ;  $1,8 \text{ g/cm}^3$ ;  $2,0 \text{ g/cm}^3$  e  $2,2 \text{ g/cm}^3$ . Por fim, realizou-se a análise imediata das faixas densimétricas em cada intervalo granulométrico dos produtos estudados, incluindo-se a porção  $-0,1 \text{ mm}$  não ensaiada no afunda-flutua.

No Lote II, separaram-se 2 kg de cada produto e na seqüência cada um foi cominuído em britador de mandíbulas (de laboratório) até 100% da massa situar-se abaixo de 9,5 mm. Com o objetivo de não gerar aumento significativo no percentual da fração fina, abasteceu-se o britador de mandíbulas com a amostra e o material coletado à saída do britador foi classificado nas peneiras de 9,5 mm; 2,0 mm e 0,1 mm. Apenas a parcela retida na tela de 9,5 mm era submetida às sucessivas recargas no mesmo equipamento, buscando-se que a totalidade da amostra ficasse abaixo de 9,5 mm. Essa redução no tamanho das partículas visou avaliar o grau de liberação carvão-ganga. A seguir, procedeu-se aos ensaios granulométricos nas mesmas aberturas dos ensaios do Lote 1, ou seja, 2,0 mm e 0,1 mm, mantendo-se o mesmo objetivo. Pesquisou-se na faixa  $-9,5 \text{ mm} +2,0 \text{ mm}$  o tipo de carvão que se poderia obter com essa granulometria a partir dos Rejeito 1 e Intermediário em um reprocessamento futuro, caso haja viabilidade econômica para sua implantação. Na classificação  $-2,0 \text{ mm} +0,1 \text{ mm}$ , buscou-se caracterizar o comportamento do carvão possível de ser recuperado em circuitos de finos produzidos na faixa  $-9,5 \text{ mm}$ . Pela mesma razão apresentada no Lote 1, deixou-se de realizar o ensaio de afunda-flutua na faixa granulométrica  $-0,1 \text{ mm}$ . Com o mesmo procedimento do lote inicial, realizou-se a análise imediata dos produtos gerados nos diversos ensaios, objetivando identificar os tipos de carvões existentes em cada categoria ensaiada.

No Lote III, também se tomaram 2 kg de cada produto, sendo inicialmente conduzidos ao britador de mandíbulas para redução de granulometria até aproximadamente 10 mm, e na seqüência cada um foi cominuído em moinho de duplo rolo de laboratório, até 100% da massa situar-se abaixo de 2,0 mm. Com a mesma preocupação em não aumentar o percentual da fração fina, cada porção após ser moída era classificada nas telas de 2,0 mm e 0,1 mm, e somente o retido em 2,0 mm retornava ao moinho para atingir o tamanho de 2,0 mm desejado.

Embora não seja aplicada em operações de beneficiamento gravimétrico, a redução de partículas 100% abaixo de 2,0 mm teve a finalidade de avaliar ainda se houve alteração no

grau de liberação do carvão-ganga, após a cominuição e possibilitar a escolha de granulometrias intermediárias em futuros testes que apresentem melhores liberações. Em função de já estar-se na própria faixa -2,0 mm +0,1 mm, procedeu-se aos ensaios densimétricos a exemplo dos lotes anteriores. Na seqüência, foi realizada a análise imediata dos produtos gerados em todos os ensaios. Na fração -0,1 mm, mais uma vez, procedeu-se somente a análise imediata. A Tabela 9 resume os ensaios realizados nos lotes I, II e III.

Tabela 9. Ensaios realizados nos lotes I, II e III.

LOTE	ENSAIO	MINA DO FAXINAL		MINA BUTIÁ LESTE	
	Tipo	Rejeito 1	Intermediário	Rejeito 1	Intermediário
1	Quantidade ensaiada	4 kg	4 kg	4 kg	4 kg
2		2 kg	2 kg	2 kg	2 kg
3		2 kg	2 kg	2 kg	2 kg
1, 2 e 3	Granulométrico	-103 mm + 2,0 mm e -9,5 mm + 2,0 mm			
		-2,0 mm + 0,1 mm			
		-0,1 mm *			
	Densimétrico	-1,5 g/cm <sup>3</sup>			
		-1,8 g/cm <sup>3</sup>			
		-2,0 g/cm <sup>3</sup>			
		-2,2 g/cm <sup>3</sup>			
+2,2 g/cm <sup>3</sup>					

(\*) Faixa granulométrica não submetida ao ensaio de funda/flutua

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS SUBPRODUTOS

Seguindo a metodologia, objetivo e a distribuição dos três lotes constantes na Tabela 9 e apresentados no subitem anterior, realizam-se os ensaios granulométricos dos subprodutos, limitados ao tamanho 103 mm (lote I) e procedentes de cada unidade mineira, para a constituição dos respectivos lotes nas telas de 9,5 mm (lote II), 2,0 mm (lote III) e adicionalmente em 0,1 mm. Após, cada faixa classificada resultante é pesada e calculada a sua participação percentual na massa total. Os diagramas ilustrativos da referida metodologia são mostrados nas Figuras 15, 16 e 17 e os resultados da caracterização granulométrica dos subprodutos são apresentados na seção 4.

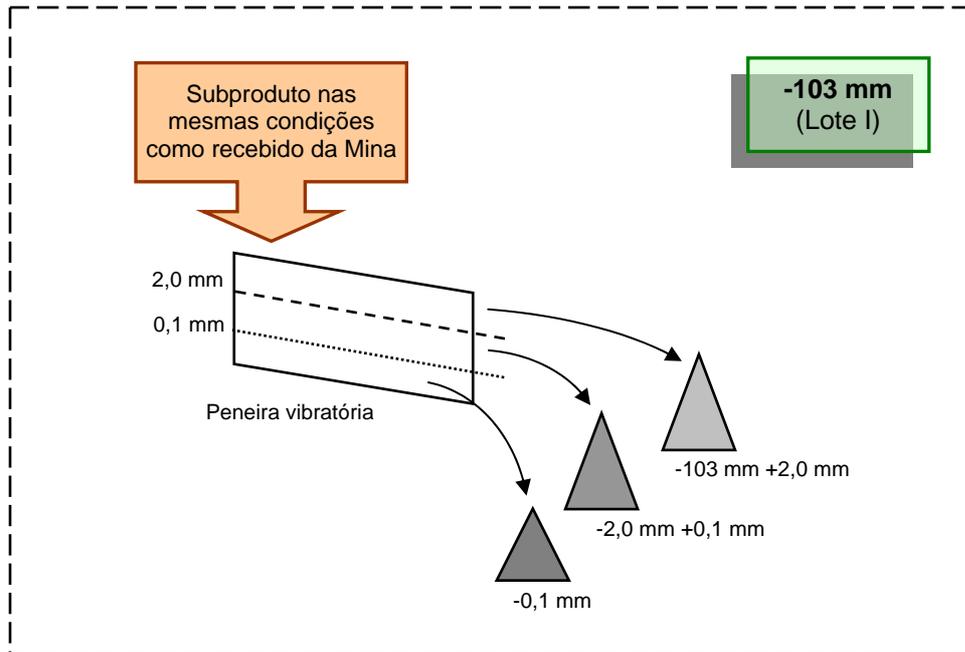


Figura 15. Metodologia aplicada para classificação das faixas granulométricas (100% da massa) abaixo de 103 mm, aplicado no tratamento dos subprodutos.

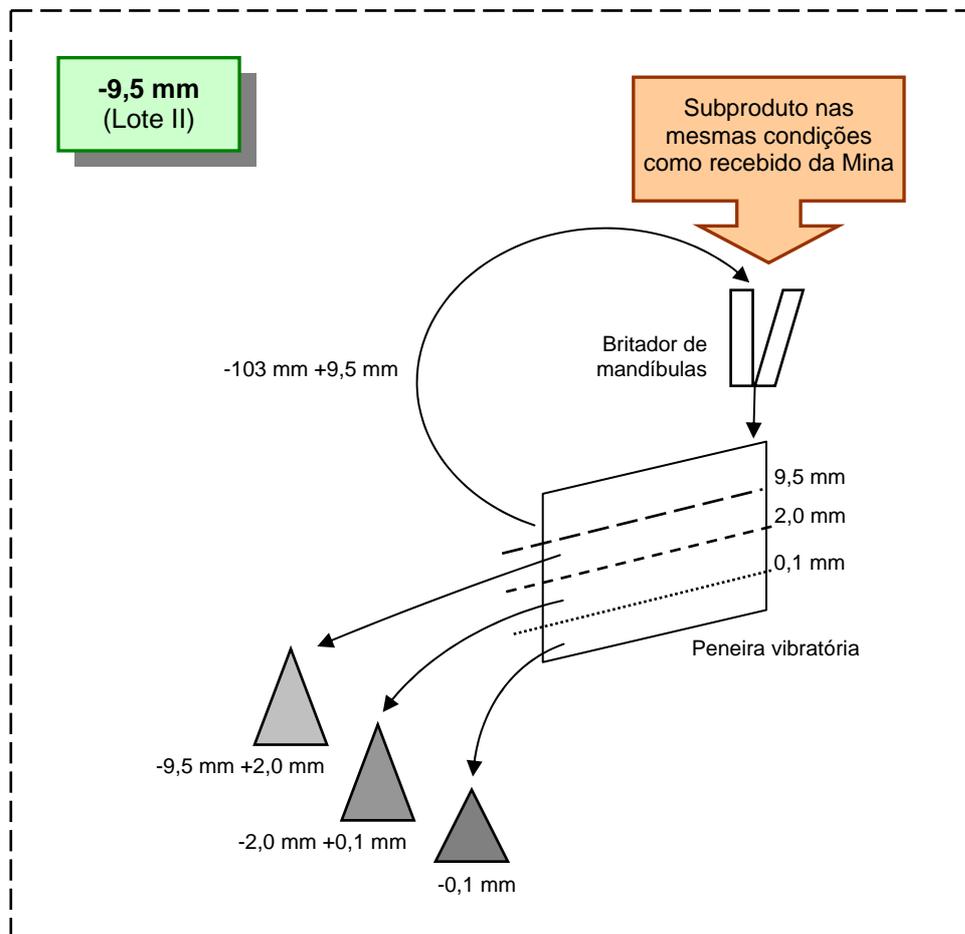


Figura 16. Metodologia aplicada para redução das partículas (100% da massa) a -9,5 mm e classificação das respectivas faixas granulométricas.

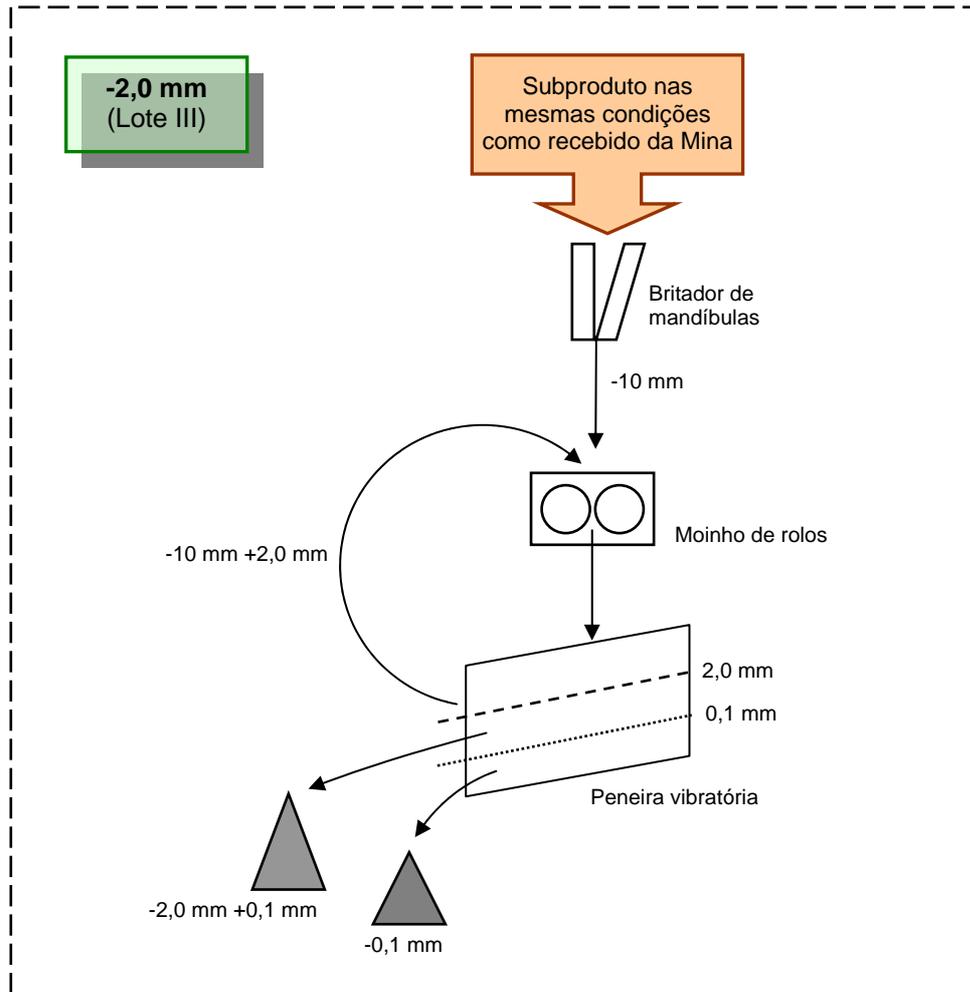


Figura 17. Metodologia aplicada para redução das partículas (100% da massa) a -2,0 mm e classificação das respectivas faixas granulométricas.

### 3.3. CARACTERIZAÇÃO DENSIMÉTRICA DOS SUBPRODUTOS

Após a classificação granulométrica dos lotes considerados, procedeu-se à caracterização densimétrica dos constituintes orgânicos e inorgânicos contidos em cada matriz carbonosa dos subprodutos, buscando identificar os tipos de carvões remanescentes. Obedecendo aos procedimentos da norma ABNT-NBR 8738 – Carvão Mineral – Ensaio Densimétrico, realizaram-se os testes no próprio LAPROM-UFRGS. Com base nas densidades teóricas de corte a serem aplicadas nos ensaios de afunda-flutua, ou seja,  $1,5 \text{ g/cm}^3$ ;  $1,8 \text{ g/cm}^3$ ;  $2,0 \text{ g/cm}^3$  e  $2,2 \text{ g/cm}^3$ , pesquisaram-se, dentre os líquidos orgânicos usualmente utilizados e comercializados, aqueles que por suas características possibilitassem o fracionamento densimétrico na faixa escolhida. Adotaram-se os líquidos densos

Tribromometano, também denominado Bromofórmio, com densidade relativa de 2,89 e fórmula química  $\text{CHBr}_3$  e o Tetracloroetileno (ou Percloroetileno), com densidade relativa 1,63 e fórmula  $\text{C}_2\text{Cl}_4$ , ambos diluídos pelo solvente, igualmente orgânico, Xileno (ou Xilol,  $\text{C}_8\text{H}_{10}$ ) de densidade relativa 0,86; para que se atingissem as densidades adotadas no ensaio aqui tratado. Para a densidade de  $1,5 \text{ g/cm}^3$  utilizaram-se apenas Tetracloroetileno diluído com Xileno e a mistura desses com o Tribromometano para as densidades maiores,  $1,8 \text{ g/cm}^3$  a  $2,2 \text{ g/cm}^3$ , segundo a Tabela 10.

Tabela 10. Líquidos densos e solvente orgânicos empregados nos testes de afunda-flutua.

	LÍQUIDOS DENSOS ORGÂNICOS		SOLVENTE ORGÂNICO
DENOMINAÇÃO (SINÔNIMO)	Tribromometano (Bromofórmio)	Tetracloroetileno (Percloroetileno)	Xileno (Xilol)
FÓRMULA	$\text{CHBr}_3$	$\text{C}_2\text{Cl}_4$	$\text{C}_8\text{H}_{10}$
DENSIDADE	2,89	1,63	0,86
APLICADO NA FAIXA	1,8 a $2,2 \text{ g/cm}^3$	1,5 a $2,2 \text{ g/cm}^3$	1,5 a $2,2 \text{ g/cm}^3$

Nos testes de afunda-flutua as amostras de cada subproduto classificadas nas respectivas faixas abaixo de 103 mm, 9,5 mm e 2,0 mm foram ensaiadas. Cada amostra foi imersa em recipiente contendo o líquido denso (ou mistura) de menor densidade. A fração que flutuou foi retirada (escumadeira) do topo da superfície livre do líquido e a parcela que afundou removida do fundo do recipiente, sendo ambas secas para evaporação do líquido orgânico. O material afundado na densidade anterior (inferior) foi mais uma vez imerso em novo recipiente contendo o líquido denso na densidade imediatamente superior. O material flutuado foi removido como no procedimento anterior e seco. O afundado foi retirado do fundo do recipiente e posteriormente seco. Esse procedimento foi repetido nas demais densidades até atingir-se a densidade máxima do ensaio:  $2,2 \text{ g/cm}^3$ , conforme esquema da Figura 18.

As frações flutuadas nas densidades testadas, juntamente com a porção afundada em  $2,2 \text{ g/cm}^3$  foram pesadas, sendo calculadas suas participações na massa total, bem como os respectivos teores em cinzas mensurados para avaliação de suas características de

lavabilidade. Os resultados dessa caracterização juntamente com a análise imediata dos subprodutos encontram-se nas tabelas apresentadas e comentadas no item 4 próximo.

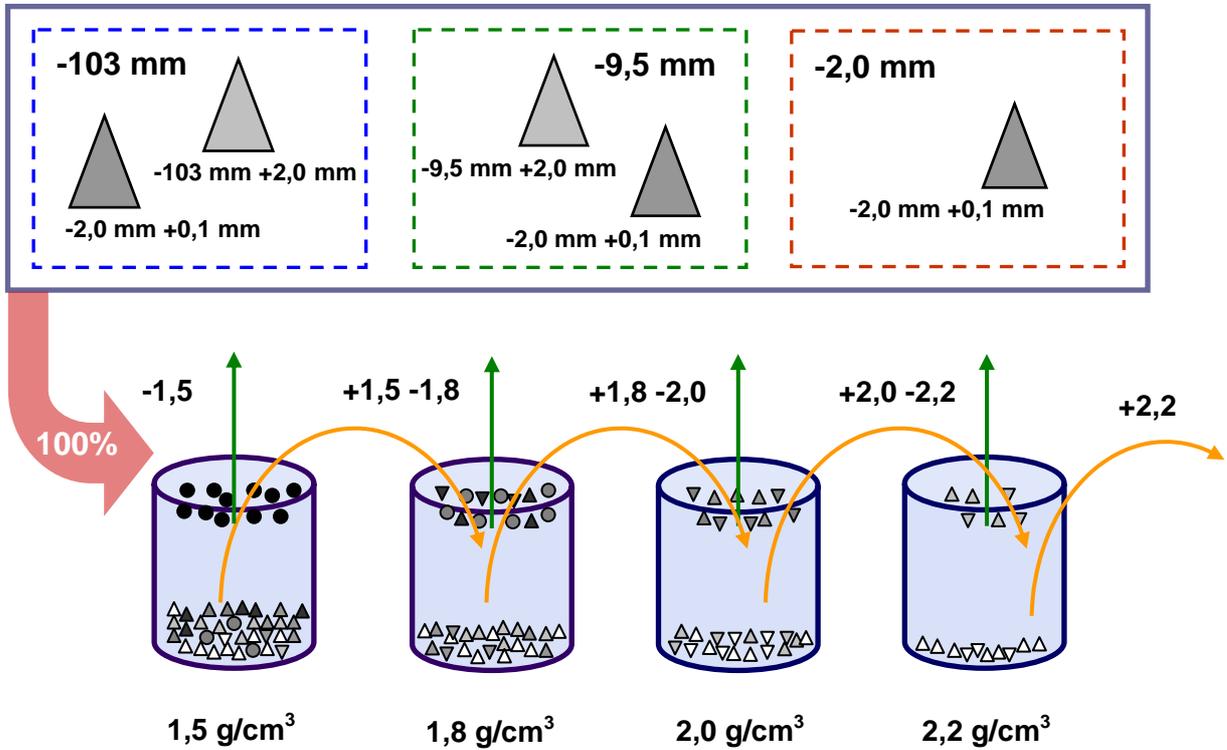


Figura 18. Ensaios de afunda-flutua das frações granulométricas (modificada de Sampaio e Tavares, 2005).

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção apresentam-se os resultados dos ensaios e análises realizados nos subprodutos Rejeito 1 e Intermediário, ambos procedentes da Mina do Faxinal e Mina Butiá Leste. Conjuntamente são discutidos os parâmetros resultantes que seqüencialmente embasam a conclusão final do presente estudo.

### 4.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Nas tabelas seguintes são apresentados os resultados da caracterização granulométrica das amostras de Rejeito 1 e Intermediário produzidos nas Minas do Faxinal e Butiá Leste, segundo metodologia adotada e detalhada no item 3. Os percentuais retidos em cada faixa granulométrica, nos três lotes analisados, são considerados no cálculo dos balanços metalúrgicos na lavabilidade das mesmas amostras.

#### 4.1.1. Análise Granulométrica dos Subprodutos da Mina do Faxinal

##### 4.1.1.1. Rejeito 1

- a) **Lote I (-103 mm):** foram ensaiadas 3.985 gramas de amostra que, após classificação nas telas 2,0 mm e 0,1 mm, distribuíram-se da seguinte forma: 3.730 g na faixa -103 mm +2,0 mm, 228 g em -2,0 mm +0,1 mm e as restantes 27 g na fração abaixo de 0,1 mm.
- b) **Lote II (-9,5 mm):** foram utilizadas no ensaio 1.908 gramas de amostra que, após classificação nas mesmas telas, distribuíram-se da seguinte forma: 1.405 g na faixa -9,5 mm +2,0 mm, 460 g em -2,0 mm +0,1 mm e ainda 43 g na fração abaixo de 0,1 mm.
- c) **Lote III (-2,0 mm):** foram aplicadas 1.915 gramas de amostra que, após classificação nas aberturas 2,0 mm e 0,1 mm, distribuíram-se da seguinte forma: 1.720 g na faixa -2,0 mm +0,1 mm e 195 g na fração abaixo de 0,1 mm.

#### 4.1.1.2. Intermediário

- d) **Lote I (-103 mm)**: foram utilizadas no ensaio 3.980 gramas de amostra que, após classificação nas telas 2,0 mm e 0,1 mm, ficaram assim distribuídas: 3.890 g na faixa -103 mm +2,0 mm, 78 g em -2,0 mm +0,1 mm e por fim 12 g na fração -0,1 mm.
- e) **Lote II (-9,5 mm)**: foram ensaiadas 1.965 gramas de amostra que, após classificação nas mesmas telas, ficaram assim distribuídas: 1.412 g na faixa -9,5 mm +2,0 mm, 498 g em -2,0 mm +0,1 mm e ainda 55 g na fração -0,1 mm.
- f) **Lote III (-2,0 mm)**: 1.898,3 gramas de amostra foram aplicadas no ensaio que, após classificação nas malhas 2,0 mm e 0,1 mm, ficaram assim distribuídas: 1.840,5 g na faixa -2,0 mm +0,1 mm e ainda 57,8 g na fração -0,1 mm.

Os resultados percentuais calculados são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Classificação granulométrica resultante dos subprodutos da Mina do Faxinal.

MINA DO FAXINAL Faixas granulométricas	Rejeito 1		Intermediário	
	Retido (%)	Retido acum. (%)	Retido (%)	Retido acum. (%)
-103 mm +2,0 mm	93,60	93,60	97,74	97,74
-2,0 mm +0,1 mm	5,72	99,32	1,96	99,70
-0,1 mm	0,68	100,00	0,30	100,00
-9,5 mm +2,0 mm	73,64	73,64	71,86	71,86
-2,0 mm +0,1 mm	24,11	97,75	25,34	97,20
-0,1 mm	2,25	100,00	2,80	100,00
-2,0 mm +0,1 mm	89,82	89,82	96,96	96,96
-0,1 mm	10,18	100,00	3,04	100,00

#### 4.1.2. Análise Granulométrica dos Subprodutos da Mina Butiá Leste

##### 4.1.2.1. Rejeito 1

- g) **Lote I (-103 mm)**: foram aplicadas no ensaio 4.000 gramas de amostra que, após classificação nas telas 2,0 mm e 0,1 mm, distribuíram-se da seguinte forma: 3.737 g na faixa -103 mm +2,0 mm, 232 g em -2,0 mm +0,1 mm e ainda 31 g na fração abaixo de 0,1 mm.
- h) **Lote II (-9,5 mm)**: foram utilizadas no ensaio 2.029 gramas de amostra que, após classificação nas mesmas telas, distribuíram-se da seguinte forma: 1.490 g na faixa -9,5 mm +2,0 mm, 482 g em -2,0 mm +0,1 mm e ainda 57 g na fração abaixo de 0,1 mm.
- i) **Lote III (-2,0 mm)**: foram ensaiadas 1.899,7 gramas de amostra que, após classificação nas aberturas 2,0 mm e 0,1 mm, distribuíram-se da seguinte forma: 1.676,8 g na faixa -2,0 mm +0,1 mm e 222,9 g na fração abaixo de 0,1 mm.

##### 4.1.2.2. Intermediário

- j) **Lote I (-103 mm)**: foram utilizadas no ensaio 3.929 gramas de amostra que, após classificação nas telas 2,0 mm e 0,1 mm, ficaram assim distribuídas: 3.650 g na faixa -103 mm +2,0 mm, 260 g em -2,0 mm +0,1 mm e por fim 19 g na fração -0,1 mm.
- k) **Lote II (-9,5 mm)**: foram ensaiadas 2.070 gramas de amostra que, após classificação nas mesmas telas, ficaram assim distribuídas: 1.467 g na faixa -9,5 mm +2,0 mm, 553 g em -2,0 mm +0,1 mm e ainda 50 g na fração -0,1 mm.
- l) **Lote III (-2,0 mm)**: 1.874,2 gramas de amostra foram aplicadas no ensaio que, após classificação nas malhas 2,0 mm e 0,1 mm, ficaram assim distribuídas: 1.642,1 g na faixa -2,0 mm +0,1 mm e ainda 232,1 g na fração -0,1 mm.

A Tabela 12 apresenta os resultados percentuais dos respectivos subprodutos.

Tabela 12. Classificação granulométrica resultante dos subprodutos da Mina Butiá Leste.

MINA BUTIÁ LESTE Faixas granulométricas	Rejeito 1		Intermediário	
	Retido (%)	Retido acum. (%)	Retido (%)	Retido acum. (%)
-103 mm +2,0 mm	93,43	93,43	92,90	92,90
-2,0 mm +0,1 mm	5,80	99,23	6,62	99,52
-0,1 mm	0,77	100,00	0,48	100,00
-9,5 mm +2,0 mm	73,44	73,44	70,87	70,87
-2,0 mm +0,1 mm	23,75	97,19	26,71	97,58
-0,1 mm	2,81	100,00	2,42	100,00
-2,0 mm +0,1 mm	88,27	88,27	87,62	87,62
-0,1 mm	11,73	100,00	12,38	100,00

## 4.2. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DE LAVABILIDADE

Para a síntese dos diversos parâmetros obtidos após os ensaios de afunda-flutua em laboratório, foram adotados dois critérios para a análise dos resultados dos balanços metalúrgicos. Relacionaram-se os principais parâmetros dos subprodutos para a aplicação de cada critério, conforme listado a seguir:

- a) Recuperação teórica total *versus* teor em cinzas total das faixas granulométricas;
- b) Combinações de recuperação teórica e teores em cinzas por faixa granulométrica *versus* recuperação teórica total e teor em cinza total em densidades de corte distintas.

O objetivo foi identificar, a partir dos ensaios realizados em laboratório, o teor em cinzas e respectiva recuperação mássica teórica dos subprodutos Rejeito 1 e Intermediário que se aproximassem do teor em cinzas obtido na operação original de produção de CE-5200 (30% c.b.s.) e superassem 12% de recuperação mássica total. Escolheu-se o teor em cinzas próximo a 30% para verificar a partir dos resultados o quanto de carvão desse tipo não está sendo aproveitado nas operações de beneficiamento atuais. Adotou-se o percentual mássico de 12% no estudo (i) por se tratar de amostras de subprodutos (rejeitos) com reduzido teor em matéria orgânica; (ii) em função de a ineficiência dos processos gravimétricos oscilarem em torno de 10%; e por fim (iii) adicionaram-se 2% no critério para ‘ajuste’ nos resultados teóricos após mensuração da imperfeição do equipamento (dados reais).

No decorrer dos resultados obtidos em laboratório, constatou-se uma tendência de melhoria no grau de liberação entre as matérias orgânica residual e inorgânica contidas nos subprodutos quando se reduz 100% da massa a -9,5 mm, viabilizando teoricamente o reprocessamento do rejeito carbonoso ora pesquisado. Por essa característica, deu-se maior ênfase nas comparações dos resultados ‘recuperação *versus* teor em cinzas’ do Rejeito 1 e Intermediário na granulometria abaixo de 9,5 mm, conjuntamente com a densidade teórica preferencial de corte 1,8 g/cm<sup>3</sup>, outro fator determinante no resultado final.

As referidas comparações tiveram por finalidade apresentar as alterações mensuradas nos parâmetros conjuntos ‘recuperação mássica teórica e respectivo teor em cinzas’ avaliados

quando se reduziu a granulometria das partículas dos subprodutos, indicando a melhor alternativa conjunta que viabilizasse o reprocessamento dos subprodutos Rejeito 1 e Intermediário aqui estudados. A partir da malha inicial de 103 mm, dimensão em que 100% da massa das amostras recebidas no laboratório são passantes, e ainda utilizada nas operações de beneficiamento nas unidades produtoras da COPELMI, cominuíram-se outros lotes de amostras a -9,5 mm e -2,0 mm para estudo de seus reflexos na liberação da matéria orgânica residual contida nos subprodutos. Para melhor compreensão das variações ocorridas no Rejeito 1 e Intermediário, ordenaram-se as comparações da seguinte forma: confrontaram-se os resultados ‘recuperação mássica teórica e teor em cinzas’ das faixas granulométricas -103 mm +2,0 mm *versus* -9,5 mm +2,0 mm (nos lotes 100% passante em 103 mm e 9,5 mm); entre as frações -2,0 mm +0,1 mm presentes em todos os lotes (-103 mm, -9,5 mm e -2,0 mm) e os respectivos totais calculados pela ponderação das duas faixas granulométricas consideradas (somente nos lotes abaixo de 103 mm e 9,5 mm). Primeiramente a comparação das referidas faixas se deu entre o mesmo subproduto, posteriormente entre os subprodutos Rejeito 1 e Intermediário dentro da mesma unidade mineira, e por fim, o resultado total ponderado, especificamente na fração -9,5 mm (pelo maior grau de liberação), do Rejeito 1 e Intermediário produzidos na Mina do Faxinal *versus* os análogos gerados na Mina Butiá Leste, apenas para investigação de suas diferenças comportamentais, uma vez que procederam de frentes de lavra distintas, embora não fossem o foco prioritário do estudo, motivo pelo qual essas duas comparações foram suficientes para a finalidade.

### **4.3. PRODUTOS PROCEDENTES DA MINA DO FAXINAL**

#### **4.3.1. Subproduto Rejeito 1**

##### **4.3.1.1. Amostra sem beneficiamento em laboratório (Lote I)**

Nas Tabelas 13, 14 e 15, são apresentados os resultados do balanço metalúrgico do subproduto Rejeito 1 **sem beneficiamento em laboratório** (100% da massa passante em 103 mm), ora procedente da Mina do Faxinal, apenas classificado granulometricamente nas peneiras 2,0 mm e 0,1 mm e levado a ensaios de afunda-flutua nas densidades 1,5 g/cm<sup>3</sup>, 1,8 g/cm<sup>3</sup>, 2,0 g/cm<sup>3</sup> e 2,2 g/cm<sup>3</sup>. Os resultados são analisados por faixa granulométrica separadamente e pelo total ponderado de ambas, conforme comentado a seguir:

##### **4.3.1.1.1. Recuperação teórica total versus teor em cinzas total das faixas granulométricas estudadas no lote I do subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal**

**Fração granulométrica -103 mm +2,0 mm** com participação de 93,60% na amostra total: na densidade teórica de corte 1,5 g/cm<sup>3</sup>, observa-se na Tabela 13 que a recuperação teórica acumulada na amostra total da porção flutuada é de 4,03% com teor em cinzas igualmente acumulado de 22,63%. O afundado contribui com 89,57% da massa total (diferença entre 99,60% e 4,03%) com teor em cinzas de 72,78%.

Ao se buscar, na densidade de corte imediatamente superior (1,8 g/cm<sup>3</sup>), a alternativa ‘recuperação versus teor em cinzas’ mais promissora, constata-se que a recuperação aumenta para 13,69% (acrécimo de 9,66%), enquanto que o teor em cinzas sobe para 39,40% (aumento de 16,77%), ultrapassando o objetivo de produção de carvão com 30% (c.b.s.). O teor em cinzas do respectivo afundado é de 75,97%, correspondendo a 79,91% da massa total.

O teor em cinzas tende a aumentar nas densidades maiores, inviabilizando a produção do carvão energético proposto no lote em questão.

Tabela 13. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -103 mm + 2,0 mm – subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal.

Faixa granulométrica -103 mm +2,0 mm								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					Teor em cinzas		
	na faixa granulométrica 100,0%			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	93,60%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	4,31	4,31	100,00	4,03	<b>4,03</b>	22,63	<b>22,63</b>	70,62
+1,5 -1,8	10,33	14,64	95,69	9,66	<b>13,69</b>	46,39	<b>39,40</b>	72,78
+1,8 -2,0	12,70	27,34	85,36	11,89	25,58	64,36	51,00	75,97
+2,0 -2,2	25,95	53,29	72,66	24,29	49,87	77,20	63,76	78,00
+2,2	46,71	100,00	46,71	43,73	93,60	78,45	70,62	78,45

**Fração granulométrica -2,0 mm + 0,1 mm** com participação de 5,72% na amostra total: na mesma densidade teórica de corte (1,5 g/cm<sup>3</sup>), pode-se verificar que a recuperação teórica acumulada na amostra total é de apenas 0,56% com teor em cinzas acumulado de 14,95%, conforme valores da Tabela 14. O afundado representa 5,16% da massa total e seu teor em cinzas 70,71%.

Na mesma tabela e densidade de corte 1,8 g/cm<sup>3</sup>, a recuperação teórica permanece irrelevante, embora o teor em cinzas alcance a meta, 30%.

Tabela 14. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, lote I – subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal.

Faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm (-103 mm)								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					Teor em cinzas		
	na faixa granulométrica 100,0%			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	5,72%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	9,69	9,69	100,00	0,56	<b>0,56</b>	14,95	<b>14,95</b>	65,31
+1,5 -1,8	11,37	21,06	90,31	0,65	<b>1,21</b>	41,13	<b>29,08</b>	70,71
+1,8 -2,0	10,51	31,57	78,94	0,60	1,81	56,43	38,18	74,97
+2,0 -2,2	16,30	47,87	68,43	0,93	2,74	69,41	48,82	77,82
+2,2	52,13	100,00	52,13	2,98	5,72	80,45	65,31	80,45

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela - 0,1mm)** com participação de 99,32% na amostra total: considerando a mesma densidade teórica de corte inicial (1,5 g/cm<sup>3</sup>), obtém-se uma recuperação teórica total ponderada da fração flutuada de 4,58% com teor em cinzas total ponderado de 21,70%. O afundado na referida densidade apresenta teor em cinzas de 72,67%, contribuindo com 94,74% da massa total.

O teor em cinzas medido na fração -0,1 mm é de 63,98% (ver Tabela 15).

Ressalta-se que na análise teórica dos produtos obtidos na densidade 1,8 g/cm<sup>3</sup>, como já era esperado pelos resultados das frações granulométricas anteriormente estudadas, principalmente a faixa -103 mm +2,0 mm, observa-se considerável acréscimo na recuperação mássica com aumento no teor em cinzas superando o valor almejado de 30%.

O resultado da relação ‘recuperação *versus* teor em cinzas’ acumulada, quando se reporta à densidade 1,5 g/cm<sup>3</sup>, cujo teor situa-se bem abaixo de 30% (21,70%), indica ser inadequado o reprocessamento do subproduto Rejeito 1 na granulometria -103 mm, levando a decisão para tamanhos menores, haja vista não se atingir o teor de produção do carvão CE-5200 com recuperação mássica (irrelevantes 4,58%) significativa que viabilize essa operação: a matéria carbonosa ainda não está devidamente liberada da porção inorgânica.

Tabela 15. Resultado total dos ensaios densimétricos e análises imediatas, faixa -103 mm +0,1 mm - subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal.

Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	TOTAL (-103 mm +0,1 mm)					
	M a s s a		99,32%	Teor em cinzas		
	Flutuado		Afund.	Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	4,58	<b>4,58</b>	99,32	21,70	<b>21,70</b>	70,31
+1,5 -1,8	10,32	<b>14,90</b>	94,74	46,06	<b>38,56</b>	72,67
+1,8 -2,0	12,49	27,39	84,42	63,98	50,15	75,92
+2,0 -2,2	25,22	52,61	71,93	76,91	62,98	77,99
+2,2	46,71	99,32	46,71	78,57	70,31	78,57
		0,68	Faixa -0,1 mm	63,98		

#### **4.3.1.1.2. Combinações de recuperação teórica e teores em cinzas por faixa granulométrica *versus* recuperação teórica total e teor em cinza total em densidades de corte distintas no lote I do subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal**

Com a baixíssima recuperação teórica apresentada, buscam-se melhores relações ‘recuperação *versus* teor em cinzas’, se possível, na análise de combinações, conforme é exposto na seqüência (Tabela 16).

##### **Primeira Combinação**

**Fração granulométrica -103 mm +2,0 mm:** mantém-se na densidade teórica de corte de 1,5 g/cm<sup>3</sup>, recuperação teórica de 4,03% e teor em cinzas acumulado de 22,63%;

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm:** na densidade teórica de corte de 1,8 g/cm<sup>3</sup>, considera-se a recuperação teórica de 1,21% e teor em cinzas acumulado de 29,08%.

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm) na combinação estudada:** na ponderação dessas frações, obtém-se uma recuperação teórica total de 5,23%, acréscimo de apenas 0,65% em relação ao resultado da situação original (lote I), e teor em cinzas 24,11%, bem abaixo do percentual almejado (30%) da operação CE-5200.

Fato que sugere a realização de outras combinações, a fim de que se obtenha um teor em cinzas mais próximo do valor limítrofe de 30%, e se possível com acréscimo na recuperação.

##### **Segunda Combinação**

**Fração granulométrica -103 mm +2,0 mm:** mantém-se na densidade teórica de corte de 1,5 g/cm<sup>3</sup>, recuperação teórica de 4,03% e teor em cinzas acumulado de 22,63%;

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm:** na densidade teórica de corte de 2,0 g/cm<sup>3</sup>, considera-se a recuperação teórica de 1,81% e teor em cinzas acumulado de 38,18%;

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm) na combinação estudada:** na ponderação dessas frações, obtém-se uma recuperação teórica total de 5,84%, acréscimo de 1,26% em relação ao resultado da situação original (lote I), e teor em cinzas 27,45%, ainda abaixo do percentual da operação CE-5200. Do mesmo modo anterior, busca-se em outras combinações um teor em cinzas ainda mais próximo do valor limítrofe de 30%, além de recuperação teórica relevante, uma vez que o percentual encontrado até aqui tenha apresentado aumento discretíssimo.

Tabela 16. Combinações de faixas granulométricas e densimétricas, na fração abaixo de 103 mm, Rejeito 1, Mina do Faxinal.

Subproduto	100% abaixo de (mm)	Combinação	Faixas granulométricas combinadas						TOTAL (ponderado)	
			-103 mm + 2,0 mm			-2,0 mm + 0,1 mm			Recup.	Cinzas
			Dens.	Recup.	Cinzas	Dens.	Recup.	Cinzas		
			(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(%)	(%)
Rejeito 1 Mina do Faxinal	103	1 <sup>a</sup>	1,5	4,03	22,63	1,8	1,21	29,08	5,24	24,11
		2 <sup>a</sup>				2,0	1,81	38,18	5,84	27,45
		3 <sup>a</sup>				2,2	2,74	48,82	6,77	33,23

### Terceira Combinação

**Fração granulométrica -103 mm +2,0 mm:** mantém-se na densidade teórica de corte de 1,5 g/cm<sup>3</sup>, recuperação teórica de 4,03% e teor em cinzas acumulado de 22,63%;

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm:** na densidade teórica de corte de 2,2 g/cm<sup>3</sup>, considera-se a recuperação teórica de 2,74% e teor em cinzas acumulado de 48,82%.

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm) na combinação estudada:** na ponderação dessas frações, obtém-se uma recuperação teórica total de 6,77%, acréscimo relevante de 2,19% em relação ao resultado da situação original (4,58%), porém com teor em cinzas 33,23%, agora superior ao percentual da operação CE-5200.

Ressalta-se que embora as combinações tenham acrescido a recuperação teórica, essa se mantém abaixo dos 10%, desaconselhando a aplicação de quaisquer das combinações estudadas.

#### 4.3.1.2. Amostra cominuída a -9,5 mm em laboratório (Lote II)

As Tabelas 17, 18 e 19 apresentam os resultados do balanço metalúrgico do subproduto Rejeito 1 com **granulometria reduzida a -9,5 mm** (100% da massa passante em 9,5 mm), classificado nas peneiras 9,5 mm, 2,0 mm e 0,1 mm, e ensaiado nas densidades 1,5 g/cm<sup>3</sup>, 1,8 g/cm<sup>3</sup>, 2,0 g/cm<sup>3</sup> e 2,2 g/cm<sup>3</sup>, conforme metodologia adotada anteriormente, com a análise a seguir:

##### 4.3.1.2.1. Recuperação teórica total versus teor em cinzas total das faixas granulométricas estudadas no lote II do subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal

**Fração granulométrica -9,5 mm +2,0 mm** com participação de 73,64% na amostra total: na densidade teórica de corte 1,5 g/cm<sup>3</sup>, registra-se que a recuperação teórica acumulada na amostra total do flutuado é de 4,88% com um teor em cinzas acumulado de 22,31%, como mostrado na Tabela 17. O afundado participa com 68,76% da massa total e com 68,81% no teor em cinzas acumulado.

Tabela 17. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -9,5 mm + 2,0 mm, lote II – subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal.

Faixa granulométrica -9,5 mm +2,0 mm								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					T e o r e m c i n z a s		
	na faixa granulométrica			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	73,64%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	6,62	6,62	100,00	4,88	<b>4,88</b>	22,31	<b>22,31</b>	65,73
+1,5 -1,8	9,08	15,70	93,38	6,68	<b>11,56</b>	43,29	<b>34,44</b>	68,81
+1,8 -2,0	12,96	28,66	84,30	9,54	21,10	60,98	46,44	71,56
+2,0 -2,2	29,31	57,97	71,34	21,59	42,69	71,37	59,04	73,48
+2,2	42,03	100,00	42,02	30,95	73,64	74,96	65,73	74,96

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm** com participação de 24,11% na amostra total: na densidade teórica de corte de 1,5 g/cm<sup>3</sup>, segundo a Tabela 18, observa-se que a recuperação teórica acumulada da porção flutuada na amostra total é de apenas 3,27% com teor em cinzas acumulado de 13,27%. A respectiva parcela afundada apresenta 20,84% da massa total e teor em cinzas de 69,20%.

Tabela 18. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, lote II – subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal.

Faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm (-9,5 mm)								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					Teor em cinzas		
	na faixa granulométrica 100,0%			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	24,11%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	13,56	13,56	100,00	3,27	<b>3,27</b>	13,27	<b>13,27</b>	61,61
+1,5 -1,8	12,08	25,64	86,44	2,91	<b>6,18</b>	40,15	<b>25,94</b>	69,20
+1,8 -2,0	12,26	37,90	74,36	2,96	9,14	59,79	36,89	73,91
+2,0 -2,2	24,27	62,17	62,10	5,85	14,99	72,71	50,87	76,70
+2,2	37,83	100,00	37,83	9,12	24,11	79,26	61,61	79,26

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm)** com participação de 97,75% na amostra total: na mesma densidade teórica de corte (1,5 g/cm<sup>3</sup>), obtém-se uma recuperação teórica total ponderada da fração flutuada de 8,14% com teor em cinzas total ponderado de 18,68%. O material mais denso que 1,5 g/cm<sup>3</sup> apresenta teor em cinzas de 68,90%, correspondendo a 89,61% da massa total, conforme Tabela 19. A fração -0,1 mm contém teor em cinzas de 66,49%.

Tabela 19. Resultado total dos ensaios densimétricos e análises imediatas, faixa -9,5 mm +0,1 mm - subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal.

Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	TOTAL (-9,5 mm +0,1 mm)					
	M a s s a		97,75%	Teor em cinzas		
	Flutuado		Afund.	Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	8,14	<b>8,14</b>	97,75	18,68	<b>18,68</b>	64,72
+1,5 -1,8	9,60	<b>17,74</b>	89,61	42,34	<b>31,48</b>	68,90
+1,8 -2,0	12,50	30,24	80,01	60,70	43,56	72,09
+2,0 -2,2	27,44	57,68	67,51	71,65	56,92	74,20
+2,2	40,07	97,75	40,07	75,94	64,72	75,94
		2,25	Faixa -0,1 mm		66,49	

A Figura 19 apresenta as curvas dos percentuais mássicos e dos teores em cinzas em função da densidade para os flutuados do subproduto considerado na faixa ensaiada -9,5 mm +0,1 mm.

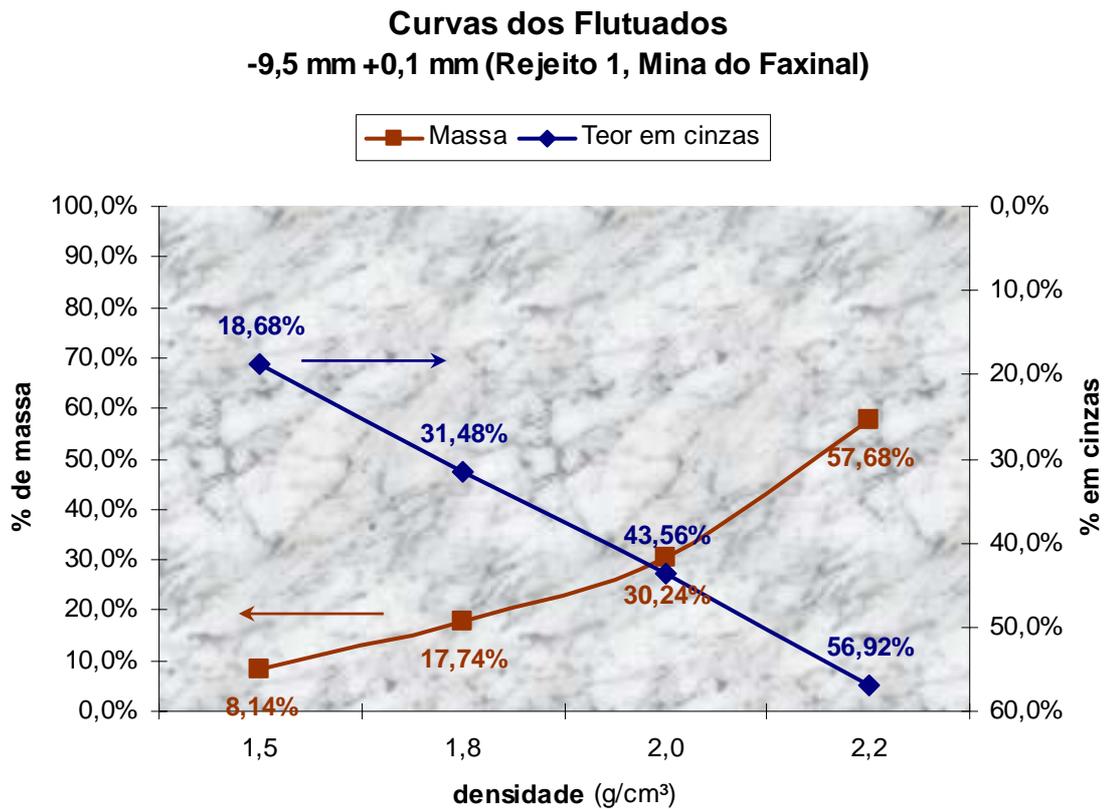


Figura 19. Curvas dos flutuados para a faixa -9,5 mm +0,1 mm do Rejeito 1, Mina do Faxinal.

Ressalta-se que, se comparado mais uma vez com o mesmo subproduto Rejeito 1 **sem beneficiamento em laboratório** (granulometria 100% passante em 103 mm - Tabela 15) na mesma densidade de 1,5 g/cm<sup>3</sup>, observa-se um acréscimo de 3,56% na recuperação teórica (8,14% *versus* 4,58%). Em contrapartida, o teor em cinzas apresenta um decréscimo de 3,02%, quando se reduz de 21,70% para 18,68%. Há melhoria nos parâmetros analisados, indicando maior liberação da matéria carbonosa do contaminante inorgânico contidos no Rejeito 1 com a redução no tamanho das partículas.

Em função dos baixos valores alcançados na recuperação mássica e teor em cinzas, 8,14% e 18,68%, respectivamente, busca-se resultado mais satisfatório na densidade imediatamente superior (1,8 g/cm<sup>3</sup>) com base nas Tabelas 17, 18 e 19, como segue.

**Fração granulométrica -9,5 mm +2,0 mm:** na densidade teórica de corte 1,8 g/cm<sup>3</sup>, observa-se que a recuperação teórica acumulada na amostra total flutuada aumenta para 11,56%, bem

como o teor em cinzas acumulado para 34,44%, se comparado com os resultados na densidade anterior (1,5 g/cm<sup>3</sup>). O teor em cinzas do afundado apresenta percentual de 71,56%, participando com 62,08% na massa total.

### **Comparando as faixas -9,5 mm +2,0 mm versus -103 mm +2,0 mm do subproduto Rejeito 1 da Mina do Faxinal**

Na comparação dos resultados de recuperação mássica e teor em cinzas da faixa -9,5 mm +2,0 mm e densidade de corte 1,5 g/cm<sup>3</sup> (Tabela 17), com os respectivos parâmetros na fração -103 mm +2,0 mm (Tabela 13), pode-se verificar que houve acréscimo desprezível na recuperação teórica (4,03% para 4,88%, acréscimo de 0,85%) e irrelevante redução no teor em cinzas (22,63% para 22,31%), indicando possível separação entre as frações carbonosa e do contaminante inorgânico, quando o tamanho máximo é reduzido para 9,5 mm.

Quando se analisa as mesmas frações granulométricas na densidade de 1,8 g/cm<sup>3</sup>, observa-se que a recuperação inicialmente maior na faixa -9,5 mm +2,0 mm e densidade de 1,5 g/cm<sup>3</sup> reduzem-se para 11,56%, enquanto que a faixa -103 mm +2,0 mm aumenta sua massa para 13,70%, porém com prejuízos ao teor em cinzas que, na mesma ordem, cresce de 34,44% para 39,40%, indicando maior concentração de refugo na faixa abaixo de 103 mm, sendo tais parâmetros determinantes no resultado total. Os teores em cinzas dos afundados confirmam a liberação dos constituintes da matriz carbonosa, quando aumenta de 71,56% para 75,97%, contribuindo com 62,08% e 79,90% na massa total, uma vez que tais faixas participam na massa total com 73,64% e 93,60%, respectivamente.

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm:** nessa mesma densidade teórica de corte (1,8 g/cm<sup>3</sup>), verifica-se que a recuperação teórica acumulada da fração flutuada na amostra total é de 6,18% com teor em cinzas acumulado de 25,94%. A fração afundada correspondente participa com 17,93% na massa total e contém 73,91% de teor em cinzas.

### **Comparando as faixas -2,0 mm +0,1 mm nas frações -9,5 mm *versus* -103 mm do subproduto Rejeito 1 da Mina do Faxinal**

Comparando-se o resultado do referido subproduto, na densidade de corte de 1,5 g/cm<sup>3</sup> e faixa granulométrica (Tabela 18), com a correspondente fração abaixo de 103 mm (Tabela 14), constata-se que há um ganho de 2,72% na recuperação mássica (desprezível 0,55% *versus* 3,27%) e redução de 1,68% no teor em cinzas (14,95% *versus* 13,27%), que se situa bem abaixo de 30%.

Na análise dos mesmos parâmetros na densidade de 1,8 g/cm<sup>3</sup>, observam-se melhores resultados, haja vista que a massa recuperável cresce de 1,20% para 6,18% (ganho de 4,98%) e o teor em cinzas acumulado decai de 29,08% para 25,94%, respectivamente, fato que sugere a tendência de maior liberação entre o componente carbonoso e o contaminante inorgânico. Os afundados, na mesma ordem, participam com 4,52% e 17,93% na massa total e apresentam baixa alteração nos teores em cinzas, ou seja, 74,97% e 73,91%. Os percentuais mássicos desprezíveis dos flutuados, obtidos na faixa considerada e na granulometria menor que 103 mm, são decorrentes da baixíssima participação desse na massa total que é de apenas 5,72% *versus* 24,11% da dimensão 9,5 mm.

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm):** considerando esse mesmo cenário (densidade teórica de 1,8 g/cm<sup>3</sup>), produz-se um carvão com recuperação teórica total ponderada da fração fluçada de 17,74% e teor em cinzas total ponderado de 31,48%. O afundado na referida densidade contém teor em cinzas de 72,09%, correspondendo a 80,01% da massa total.

### **Confrontando os resultados totais ponderados das faixas -9,5 mm *versus* -103 mm do subproduto Rejeito 1 da Mina do Faxinal**

Na comparação das Tabelas 15 e 19, constatam-se nas densidades 1,5 g/cm<sup>3</sup> e 1,8 g/cm<sup>3</sup> melhorias relevantes na massa teórica recuperável, passando de 4,58% para 8,14% e de 14,90% para 17,74% (acrécimo de 2,84%; nesse último), respectivamente, sem a parcialidade possivelmente provocada por diferença de participações dos lotes na massa total que se equivalem (99,32% e 97,75%). A vantagem se estende aos teores em cinzas totais que

decaem de 21,70% para 18,68% ( $1,5 \text{ g/cm}^3$ ) e de 38,56% para 31,48% (redução de 7,08% em  $1,8 \text{ g/cm}^3$ ), na mesma seqüência, resultado da maior liberação da matéria carbonosa provocada pela redução na granulometria. O teor em cinzas acumulado na densidade  $1,8 \text{ g/cm}^3$  ultrapassa ligeiramente o patamar de 30% (31,48%), porém, sem comprometer a relação ‘recuperação *versus* teor em cinzas’ pelo acréscimo obtido em sua recuperação mássica. Na densidade preferencial de  $1,8 \text{ g/cm}^3$ , verifica-se acréscimo considerável nos teores em cinzas dos afundados na granulometria -103 mm que, dessa densidade até  $2,2 \text{ g/cm}^3$ , são 75,92%; 77,99% e 78,57% variando para 72,09%; 74,20% e 75,94% na fração abaixo de 9,5 mm, devido aos constituintes (orgânico e inorgânico) da matriz não estarem ainda liberados. As massas dos afundados, na mesma densidade de corte, são 84,42% e 80,00%, respectivamente.

Por esse fato, considera-se o resultado obtido até aqui como o mais promissor.

#### **4.3.1.2.2. Combinações de recuperação teórica e teores em cinzas por faixa granulométrica *versus* recuperação teórica total e teor em cinza total em densidades de corte distintas no lote II do subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal**

Avaliam-se outras combinações, a fim de otimizar os resultados dos parâmetros até então estudados, com objetivo de se produzir carvão de maior poder calorífico, conforme Tabela 20.

##### **Primeira Combinação**

**Fração granulométrica -9,5 mm +2,0 mm:** mantendo-se a densidade teórica de corte de  $1,5 \text{ g/cm}^3$ , recuperação teórica de 4,88% e teor em cinzas acumulado de 22,31%;

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm:** na densidade teórica de corte de  $1,8 \text{ g/cm}^3$ , considera-se a recuperação teórica de 6,18% e teor em cinzas acumulado de 25,94%.

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm) na combinação estudada:** na ponderação dessas frações, obtém-se uma recuperação teórica total de 11,06%, acréscimo de 2,92% em relação ao resultado da situação original (8,14%), e teor em cinzas 24,34%, bem abaixo do percentual almejado (30%) da operação CE-5200.

Outras combinações são analisadas, a seguir, com o fim de se alcançar um teor em cinzas mais próximo ao valor limítrofe de 30% e recuperações mássicas mais significativas que viabilizem ganhos operacionais e na receita.

### Segunda Combinação

**Fração granulométrica -9,5 mm +2,0 mm:** mantendo-se na densidade teórica de corte de 1,5 g/cm<sup>3</sup>, recuperação teórica de 4,88% e teor em cinzas acumulado de 22,31%;

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm:** na densidade teórica de corte de 2,0 g/cm<sup>3</sup>, considera-se a recuperação teórica de 9,14% e teor em cinzas acumulado de 36,89%.

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm) na combinação estudada:** na ponderação dessas frações, obtém-se uma recuperação teórica total de 14,02%, acréscimo de 5,88% em relação ao resultado da situação original (8,14%), porém com teor em cinzas 31,82 %, acima do percentual da operação CE-5200.

Tabela 20. Combinações de faixas granulométricas e densimétricas, na fração abaixo de 9,5 mm, Rejeito 1, Mina do Faxinal.

Subproduto	100% abaixo de (mm)	Combinação	Faixas granulométricas combinadas						TOTAL (ponderado)	
			-9,5 mm + 2,0 mm			-2,0 mm + 0,1 mm			Recup.	Cinzas
			Dens.	Recup.	Cinzas	Dens.	Recup.	Cinzas		
			(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(%)	(%)
Rejeito 1 Mina do Faxinal	9,5	1 <sup>a</sup>	1,5	4,88	22,31	1,8	6,18	25,94	11,06	24,34
		2 <sup>a</sup>				2,0	9,14	36,89	14,02	31,82
		3 <sup>a</sup>	1,8	11,56	34,44	1,5	3,27	13,27	14,83	29,77

### Terceira Combinação

**Fração granulométrica -9,5 mm +2,0 mm:** considera-se nesta combinação a densidade teórica de corte de 1,8 g/cm<sup>3</sup>, recuperação teórica de 11,56% e teor em cinzas acumulado de 34,44%;

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm:** na densidade teórica de corte de 1,5 g/cm<sup>3</sup>, considera-se a recuperação teórica de 3,27%, embora baixíssima, e teor em cinzas acumulado de 13,27%.

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm) na combinação estudada:** na ponderação dessas frações, obtém-se uma recuperação teórica total de 14,83%, acréscimo de 6,69% em relação ao resultado da situação original (8,14%), mas nessa combinação o teor em cinzas alcança 29,77%, igualando-se ao percentual da operação CE-5200.

Embora a recuperação teórica dessa combinação seja inferior ao valor alcançado na ponderação final das faixas aqui consideradas (14,83% *versus* 17,74%), com base na densidade de corte 1,8 g/cm<sup>3</sup> (Tabela 18), o teor em cinzas aproxima-se dos 30 %, razão pela qual se considera também essa combinação uma boa alternativa.

#### 4.3.1.3. Amostra cominuída a -2,0 mm em laboratório (Lote III)

A Tabela 21 apresenta o balanço metalúrgico do subproduto Rejeito 1 **com granulometria reduzida a -2,0 mm** (100% da massa passante em 2,0 mm), a classificação desse produto nas peneiras 2,0 mm e 0,1 mm, e os ensaios de afunda-flutua nas mesmas densidades anteriores (1,5 g/cm<sup>3</sup>, 1,8 g/cm<sup>3</sup>, 2,0 g/cm<sup>3</sup> e 2,2 g/cm<sup>3</sup>), com resultados analisados por faixa granulométrica separadamente e pelo total ponderado de ambas.

**Recuperação teórica total *versus* teor em cinzas total das faixas granulométricas estudadas no lote III do subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal**

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm (desprezada a fração -0,1 mm)** com participação de 89,82% na amostra total: constata-se nessa faixa granulométrica pela

Tabela 21 que a densidade teórica de corte de  $1,8 \text{ g/cm}^3$  recupera 11,97% da massa flutuada, com teor em cinzas de 29,06%, inferiores aos 14,83% e 29,77% calculados, respectivamente, na terceira combinação da amostra cominuída a  $-9,5 \text{ mm}$ : o melhor resultado encontrado na relação ‘recuperação teórica *versus* teor em cinzas’ ao nível de 30%. A fração afundada na mesma densidade teórica de corte tem massa de 77,85% e teor em cinzas de 70,56%.

O teor em cinzas da fração  $-0,1 \text{ mm}$  é 67,49%, segundo a mesma tabela.

Beneficiamento de carvão mineral nessa granulometria é pouco usual, haja vista os vultosos investimentos na adequação das instalações de britagem, lavagem, e conseqüentes custos operacionais no manuseio e preparação para a comercialização do carvão energético produzido abaixo de  $2,0 \text{ mm}$ . Portanto, descarta-se o reprocessamento do subproduto estudado na granulometria em questão.

Tabela 21. Resultado total do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica  $-2,0 \text{ mm} + 0,1 \text{ mm}$  – subproduto Rejeito 1, Mina do Faxinal.

TOTAL (-2,0 mm +0,1 mm)								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					T e o r e m c i n z a s		
	na faixa granulométrica			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	89,82%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	5,07	5,07	100,00	4,55	4,55	15,65	15,65	65,03
+1,5 -1,8	8,27	13,34	94,93	7,42	<b>11,97</b>	37,28	<b>29,06</b>	67,66
+1,8 -2,0	6,48	19,82	86,66	5,82	17,79	57,90	38,49	70,56
+2,0 -2,2	10,85	30,67	80,18	9,75	27,54	74,24	51,14	71,58
+2,2	69,33	100,00	69,33	62,28	89,82	71,17	65,03	71,17
Faixa granulométrica $-0,1 \text{ mm}$					10,18	67,49		

### Confrontando os resultados das faixas $-2,0 \text{ mm} + 0,1 \text{ mm}$ nos lotes I, II e III do subproduto Rejeito 1 da Mina do Faxinal

Na avaliação da faixa granulométrica  $-2,0 \text{ mm} + 0,1 \text{ mm}$ , presente em todos os lotes, constata-se particularmente nas faixas abaixo de  $103 \text{ mm}$  e  $9,5 \text{ mm}$ , conforme já comparadas, nas densidades  $1,5$  até  $2,0 \text{ g/cm}^3$ , que os teores em cinzas acumulados (ponderados)

decrecem, conforme se pode observar nas Tabelas 14 e 18, ao mesmo tempo em que a recuperação teórica acumulada, respaldada pela participação maior da fração (-2,0 mm +0,1 mm) gerada na faixa -9,5 mm na massa total, aumenta consideravelmente, melhorando o resultado total ‘recuperação *versus* teor em cinzas’ alcançado.

Se fixada a densidade teórica de corte de 1,8 g/cm<sup>3</sup>, cujos teores em cinzas aproximam-se do percentual de 30%, constata-se nos três lotes que a recuperação acumulada, baixíssima na granulometria abaixo de 103 mm (1,20%) eleva-se para 6,18% e 11,97% na faixa -9,5 mm (Tabela 18) e -2,0 mm (Tabela 21), suportada pelas participações respectivas de cada lote na massa total (5,72%; 24,11% e 89,82%). Os teores em cinzas acumulados alteram-se de 29,08% para 25,94% e 29,06%, na mesma ordem, situando-se abaixo de 30%. Esse resultado sugere que parte de matéria carbonosa contida no subproduto Rejeito 1 é liberada a partir da granulometria passante em 9,5 mm, sendo concentrada nas faixas -2,0 mm +0,1 mm, haja vista que os teores em cinzas acumulados nas faixas granulométricas -103 mm +2,0 mm (Tabela 13) e -9,5 mm +2,0 mm (Tabela 17) mantêm-se superiores a 30% na mesma densidade. Verifica-se na fração passante em 2,0 mm acréscimo no teor em cinzas de 3,12%, ainda que se situe abaixo de 30%, bem como de 5,79% na massa recuperável, confirmando a maior liberação física entre as frações constituintes da matriz carbonosa. Os teores em cinzas, quando se analisam os afundados na mesma faixa, mantêm-se próximos e menores, possivelmente resultado da maior liberação motivada pela redução na granulometria da faixa.

Acredita-se ainda que a recuperação do carvão concentrado nessa faixa granulométrica (teor em cinzas de 25,94%) possa ser majorada através de alterações nos parâmetros de regulagem das espirais concentradoras que visem transferir fração de material com densidade mediana para o flutuado, de modo que esse produto alcance teor em cinzas próximo ao do carvão CE-5200 e otimize o resultado.

Com base nos resultados apresentados no presente estudo, após a avaliação do subproduto nos diversos lotes, torna-se imprescindível a redução da granulometria para 9,5 mm no Rejeito 1. Quer se utilize a densidade teórica de corte de 1,8 g/cm<sup>3</sup> para o reprocessamento nas faixas granulométricas -9,5 mm +2,0 mm e -2,0 mm +0,1 mm, quer se opte pela ‘terceira combinação’ que emprega a densidade 1,8 g/cm<sup>3</sup> para tratamento da faixa -9,5 mm +2,0 mm em jigue e 1,5 g/cm<sup>3</sup> para a fração -2,0 mm +0,1 mm nas espirais

concentradoras, busca-se a melhor relação ‘recuperação teórica *versus* teor em cinzas’ não somente para se obter carvão com teor em cinzas próximos a 30% (CE-5200), mas qualquer outro tipo de carvão com poder calorífico levemente inferior.

Deve-se ressaltar que, na medida em que se reduzem a granulometria dos lotes para a análise das mais promissoras relações ‘recuperação *versus* teor em cinzas’, e se ganha na recuperação de produto vendável, aumenta-se a geração de finos (frações abaixo de 0,1 mm), e conseqüentemente as perdas no processo de beneficiamento. No subproduto Rejeito 1 as frações finas crescem de 0,68% para 2,25% e 10,18%, na mesma seqüência em que se reduzem as dimensões máximas de 103 mm para 9,5 mm e 2,0 mm.

### 4.3.2. Subproduto Intermediário

#### 4.3.2.1. Amostra sem beneficiamento em laboratório (Lote I)

A seguir (Tabelas 22, 23 e 23), dá-se continuidade à análise, apresentando os resultados do balanço metalúrgico do subproduto Intermediário **sem beneficiamento em laboratório** (100% da massa passante em 103 mm), classificado nas peneiras 2,0 mm e 0,1 mm e levado a ensaios de afunda-flutua nas mesmas densidades 1,5 g/cm<sup>3</sup>, 1,8 g/cm<sup>3</sup>, 2,0 g/cm<sup>3</sup> e 2,2 g/cm<sup>3</sup>, a exemplo do estudo do Rejeito 1, conforme descrito abaixo.

##### 4.3.2.1.1. Recuperação teórica total *versus* teor em cinzas total das faixas granulométricas estudadas no lote I do subproduto Intermediário, Mina do Faxinal

**Fração granulométrica -103 mm +2,0 mm** com participação de 97,74% na amostra total: na densidade teórica de corte 1,5 g/cm<sup>3</sup>, pode-se verificar que a recuperação teórica acumulada do flutuado na amostra total é ínfima, 0,41%, com um teor em cinzas (à base seca) acumulado de 18,18%.

Tabela 22. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -103 mm +2,0 mm, lote I – subproduto Intermediário, Mina do Faxinal.

Faixa granulométrica -103 mm +2,0 mm								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					Teor em cinzas		
	na faixa granulométrica 100,0%			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	97,74%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	0,42	0,42	100,00	0,41	<b>0,41</b>	18,18	<b>18,18</b>	68,70
+1,5 -1,8	21,38	21,80	99,58	20,89	21,30	57,31	56,55	68,91
+1,8 -2,0	19,16	40,96	78,20	18,73	40,03	67,14	61,50	72,08
+2,0 -2,2	34,97	75,93	59,04	34,18	74,21	76,12	68,24	73,69
+2,2	24,07	100,00	24,07	23,53	97,74	70,15	68,70	70,15

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm** com participação de 1,96% na amostra total: na mesma densidade teórica de corte (1,5 g/cm<sup>3</sup>), observa-se que a recuperação teórica

acumulada da fração fluçada na amostra total ainda é desprezível: 0,21%; com teor em cinzas acumulado de 12,55%, ratificando o reduzido teor de matéria orgânica contido nessa faixa -2,0 mm e na anterior.

Tabela 23. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, lote I – subproduto Intermediário, Mina do Faxinal.

Faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm (-103 mm)								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					Teor em cinzas		
	na faixa granulométrica			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	1,96%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	10,66	10,66	100,00	0,21	<b>0,21</b>	12,55	<b>12,55</b>	61,01
+1,5 -1,8	12,91	23,57	89,34	0,25	<b>0,46</b>	37,95	<b>26,46</b>	66,79
+1,8 -2,0	14,86	38,44	76,43	0,29	0,75	56,38	38,03	71,67
+2,0 -2,2	19,82	58,26	61,56	0,39	1,14	68,08	48,25	75,36
+2,2	41,74	100,00	41,74	0,82	1,96	78,82	61,01	78,82

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm)** com participação de 99,70% na amostra total: na mesma densidade teórica de corte (1,5 g/cm<sup>3</sup>), obtém-se uma recuperação teórica total ponderada de 0,62% com teor em cinzas total ponderado de 16,29%. A parcela mais densa do que 1,5 g/cm<sup>3</sup> contém 68,87% de teor em cinzas, contribuindo com 99,08%, a grande maioria na massa total, conforme Tabela 24.

Acima da densidade teórica de corte 1,5 g/cm<sup>3</sup>, transfere-se matéria contaminante aos flutuados, aumentando suas recuperações mássicas e respectivos teores em cinzas, distanciando-se demasiadamente do teor do produto almejado, razão pela qual seu resultado total será desconsiderado na presente análise.

Tabela 24. Resultado total dos ensaios densimétricos e análises imediatas, faixa -103 mm +0,1 mm - subproduto Intermediário, Mina do Faxinal.

Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	TOTAL (-103 mm +0,1 mm)					
	M a s s a		99,70%	Teor em cinzas		
	Flutuado		Afund.	Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	0,62	<b>0,62</b>	99,70	16,29	<b>16,29</b>	68,54
+1,5 -1,8	21,15	21,77	99,08	57,08	55,91	68,87
+1,8 -2,0	19,02	40,79	77,93	66,97	61,07	72,07
+2,0 -2,2	34,57	75,35	58,91	76,03	67,93	73,72
+2,2	24,34	99,70	24,34	70,44	68,54	70,44
		0,30	Faixa -0,1 mm	66,51		

### Confrontando os resultados totais ponderados das faixas passantes em 103 mm dos subprodutos Intermediário *versus* Rejeito 1 da Mina do Faxinal

Pode-se perceber nessa faixa granulométrica e densidade de corte 1,5 g/cm<sup>3</sup> que além de o teor em cinzas encontrar-se bem aquém dos 30% (16,29% - Tabela 24), sua recuperação teórica ainda é ínfima (0,62%), enquanto que o Rejeito 1 contém 4,58% (Tabela 15), demonstrando ser desprezível a participação da matéria carbonosa no subproduto ora comentado. Os valores de recuperação teórica e teor em cinzas discutidos até aqui são bem inferiores aos encontrados no Rejeito 1 anteriormente estudado, conseqüentemente inviabilizando o reprocessamento do subproduto Intermediário na granulometria 103 mm, principalmente quando analisados na densidade de corte 1,8 g/cm<sup>3</sup>, cuja massa individual (não acumulada) apresenta teor em cinzas de 57,08%, ou seja, 11,02% acima de 46,06% do Rejeito 1 pelo conteúdo superior do contaminante inorgânico. Embora os teores em cinzas das frações flutuadas no Intermediário sejam superiores, os percentuais referentes aos afundados situam-se abaixo dos respectivos no Rejeito 1. Acredita-se que parte do contaminante inorgânico no Intermediário mantenha características impróprias mais acentuadas para sua separação do que o Rejeito 1, por apresentar densidade próxima à de corte, além de encontrar-se ainda intimamente ligada à matéria orgânica na matriz carbonosa, razão pela qual seus percentuais nos afundados são aparentemente contraditórios.

#### **4.3.2.1.2. Combinações de recuperação teórica e teores em cinzas por faixa granulométrica *versus* recuperação teórica total e teor em cinza total em densidades de corte distintas no lote I do subproduto Intermediário, Mina do Faxinal**

Apesar de a recuperação total ser desprezível na densidade de  $1,5 \text{ g/cm}^3$ , como apresenta a Tabela 24, analisam-se nas combinações seguintes outros resultados, na Tabela 25, apenas a título de complementação e para ratificação dos percentuais mássicos já obtidos.

##### **Primeira Combinação**

**Fração granulométrica -103 mm +2,0 mm:** mantendo-se a densidade teórica de corte de  $1,5 \text{ g/cm}^3$ , recuperação teórica de 0,41% e teor em cinzas acumulado de 18,18% (Tabela 22);

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm:** na densidade teórica de corte de  $1,8 \text{ g/cm}^3$ , considera-se a recuperação teórica de 0,46 % e teor em cinzas acumulado de 26,46% (Tabela 23).

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm) na combinação estudada:** na ponderação dessas frações, obtêm-se uma recuperação teórica total de 0,87%, valor ainda irrelevante, e teor em cinzas 22,56%, abaixo do percentual almejado de 30% da operação CE-5200. Recuperação ainda irrelevante.

Tabela 25. Combinações de faixas granulométricas e densimétricas, na fração abaixo de 103 mm, Intermediário, Mina do Faxinal.

Subproduto	100% abaixo de (mm)	Combinação	Faixas granulométricas combinadas						TOTAL (ponderado)	
			-103 mm + 2,0 mm			-2,0 mm + 0,1 mm			Recup.	Cinzas
			Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	Recup. (%)	Cinzas (%)	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	Recup. (%)	Cinzas (%)		
Intermediário Mina do Faxinal	103	1 <sup>a</sup>	1,5	0,41	18,18	1,8	0,46	26,46	0,87	22,56
		2 <sup>a</sup>				2,0	0,75	38,03	1,16	31,01

### Segunda Combinação

**Fração granulométrica -103 mm +2,0 mm:** mantendo-se na densidade teórica de corte de 1,5 g/cm<sup>3</sup>, recuperação teórica de 0,41% e teor em cinzas acumulado de 18,18%;

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm:** na densidade teórica de corte de 2,0 g/cm<sup>3</sup>, considera-se a recuperação teórica de 0,75% e teor em cinzas acumulado de 38,03%.

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm) na combinação estudada:** na ponderação dessas frações, obtém-se uma recuperação teórica total de 1,16%, com teor em cinzas de 31,01%, ligeiramente acima do percentual da operação CE-5200.

Como se pode observar, quaisquer que sejam as combinações possíveis, essas resultam em recuperações insignificantes e teores em cinzas superiores, em função da baixíssima contribuição da fração -103 mm +2,0 mm quantitativa e qualitativamente no arranjo combinado. Fato que desaconselha o reprocessamento do subproduto em questão na faixa granulométrica considerada, por apresentar maior percentual de contaminantes inorgânicos ainda não liberados da matriz carbonosa. Buscam-se nas faixas seguintes resultados mais promissores na relação 'recuperação *versus* teor em cinzas' para a obtenção de carvões energéticos próximos ao CE-5200.

#### 4.3.2.2. Amostra cominuída a -9,5 mm em laboratório (Lote II)

Nas Tabelas 26, 27 e 28, encontram-se os resultados do balanço metalúrgico do subproduto Intermediário **com granulometria reduzida a -9,5 mm** (100% da massa passante em 9,5 mm), classificado nas peneiras 9,5 mm, 2,0 mm e 0,1 mm, e ensaiado nas densidades 1,5 g/cm<sup>3</sup>; 1,8 g/cm<sup>3</sup>; 2,0 g/cm<sup>3</sup> e 2,2 g/cm<sup>3</sup>; segundo metodologia já adotada anteriormente e comentado a seguir:

#### Recuperação teórica total *versus* teor em cinzas total das faixas granulométricas estudadas no lote II do subproduto Intermediário, Mina do Faxinal

**Fração granulométrica -9,5 mm +2,0 mm** com participação de 71,86% na amostra total: na densidade teórica de corte 1,5 g/cm<sup>3</sup>, conclui-se que a recuperação teórica acumulada do flutuado na amostra total é de 1,55% com um teor em cinzas acumulado de 17,13%.

Tabela 26. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -9,5 mm +0,1 mm, lote II – subproduto Intermediário, Mina do Faxinal.

Faixa granulométrica -9,5 mm +2,0 mm								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					Teor em cinzas		
	na faixa granulométrica			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	71,86%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	2,16	2,16	100,00	1,55	<b>1,55</b>	17,13	<b>17,13</b>	69,49
+1,5 -1,8	11,73	13,88	97,84	8,43	<b>9,98</b>	44,14	<b>39,95</b>	70,64
+1,8 -2,0	17,78	31,67	86,12	12,78	22,76	62,62	52,68	74,25
+2,0 -2,2	32,30	63,97	68,33	23,21	45,97	73,97	63,43	77,28
+2,2	36,03	100,00	36,03	25,89	71,86	80,24	69,49	80,24

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm** com participação de 25,34% na amostra total: na mesma densidade teórica de corte (1,5 g/cm<sup>3</sup>), observa-se que a recuperação teórica acumulada da fração flutuada na amostra total é de 2,55% com teor em cinzas acumulado de 13,30%.

Tabela 27. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, lote II – subproduto Intermediário, Mina do Faxinal.

Faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm (-9,5 mm)								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					Teor em cinzas		
	na faixa granulométrica			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	25,34%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	10,07	10,07	100,00	2,55	<b>2,55</b>	13,30	<b>13,30</b>	62,43
+1,5 -1,8	14,22	24,29	89,93	3,60	<b>6,15</b>	39,38	<b>28,56</b>	67,94
+1,8 -2,0	13,80	38,09	75,71	3,50	9,65	58,90	39,55	73,30
+2,0 -2,2	25,17	63,27	61,91	6,38	16,03	71,37	52,21	76,51
+2,2	36,73	100,00	36,73	9,31	25,34	80,03	62,43	80,03

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm)** com participação de 97,20% na amostra total: na mesma densidade teórica de corte (1,5 g/cm<sup>3</sup>), obtém-se na porção flutuada a recuperação teórica total ponderada de 4,10% com teor em cinzas total ponderado de 14,74%. A parcela afundada na densidade considerada atinge teor em cinzas de 69,98%, com participação na massa total de 93,10%.

Conseqüentemente, o resultado total reflete as melhorias provocadas pela redução na granulometria para 9,5 mm (maior liberação da matéria carbonosa), nas faixas granulométricas avaliadas e em relação à fração abaixo de 103 mm, é salientado pelo vultoso aumento na recuperação mássica e decréscimo de 9,51% no teor em cinzas, embora ainda irrelevantes para a decisão sobre seu beneficiamento, ou seja, recuperação de 4,10% e teor de 14,74%.

Tabela 28. Resultado total dos ensaios densimétricos e análises imediatas, faixa -9,5 mm +0,1 mm subproduto Intermediário, Mina do Faxinal.

Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	TOTAL (-9,5 mm +0,1 mm)					
	M a s s a		97,20%	Teor em cinzas		
	Flutuado		Afund.	Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	4,10	<b>4,10</b>	97,20	14,74	<b>14,74</b>	67,65
+1,5 -1,8	12,03	<b>16,13</b>	93,10	42,71	<b>35,60</b>	69,98
+1,8 -2,0	16,28	32,41	81,07	61,82	48,77	74,03
+2,0 -2,2	29,59	62,00	64,79	73,41	60,53	77,09
+2,2	35,20	97,20	35,20	80,19	67,65	80,19
		2,80	Faixa -0,1 mm	66,90		

Os percentuais de teor em cinzas e das massas recuperáveis são mínimos, razão pela qual se busca na densidade maior (1,8 g/cm<sup>3</sup>) valores mais promissores.

As curvas dos percentuais mássicos (referidos ao eixo Y esquerdo) e dos teores em cinzas (referidos ao eixo Y direito), em função da densidade para os flutuados do subproduto Intermediário na faixa -9,5 mm +0,1 mm, encontram-se na Figura 20.

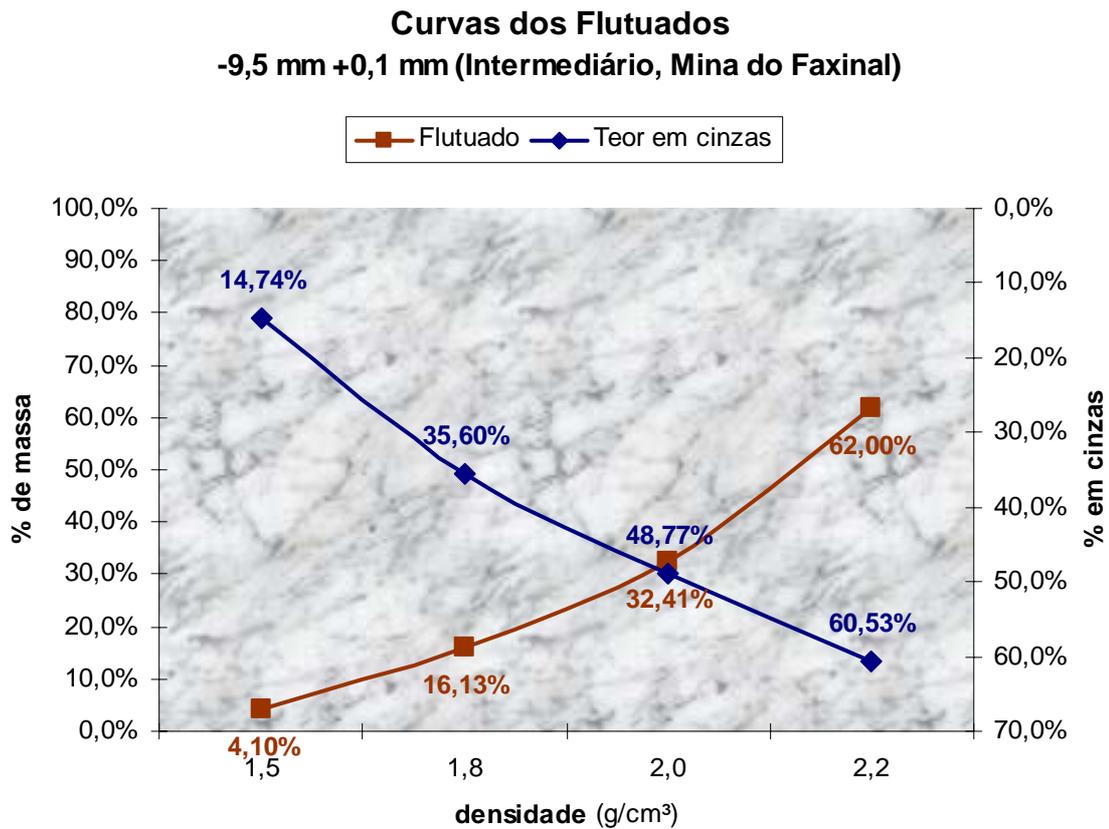


Figura 20. Curvas dos flutuados para a faixa -9,5 mm +0,1 mm do Intermediário, Mina do Faxinal.

**Fração granulométrica -9,5 mm +2,0 mm:** na densidade teórica de corte 1,8 g/cm<sup>3</sup>, verifica-se que a recuperação teórica acumulada na amostra total é de 9,98% com um teor em cinzas acumulado de 39,95% (Tabela 26). O afundado contém teor em cinzas de 74,25%, representando 61,88% da massa total.

**Comparando as faixas -9,5 mm +2,0 mm versus -103 mm +2,0 mm do subproduto Intermediário da Mina do Faxinal**

Embora o resultado apresentado na densidade de corte 1,5 g/cm<sup>3</sup> ainda situe-se aquém do satisfatório, salienta-se a melhoria ocorrida na relação ‘recuperação versus teor em cinzas’, motivada pela redução para 9,5 mm (Tabela 26), tomando por base a fração -103 mm (-103 mm +2,0 mm, Tabela 22), haja vista haver variação ainda que mínima de 1,14% na recuperação mássica (de 0,41% para 1,55%), além de discreta redução no teor em cinzas

(de 18,18% para 17,13%). Constata-se a partir da análise dos parâmetros na densidade  $1,8 \text{ g/cm}^3$ , que há maior liberação da matéria orgânica quando se cominui o Intermediário a  $-9,5 \text{ mm}$ , avalizado pela redução no teor em cinzas individual (não acumulado) do flutuado, que diminui para 44,14% enquanto na fração passante em  $103 \text{ mm}$  o mesmo parâmetro atinge 57,31% (acrécimo de 13,17%). Consequentemente, a massa recuperável decresce para 9,98% na faixa  $-9,5 \text{ mm} +2,0 \text{ mm}$  por haver melhor seletividade da fração carbonosa. Ainda na mesma densidade teórica de corte, observa-se que o teor em cinzas decresce no sentido do maior para o menor tamanho, diminuindo de 56,55% para 39,95%, superior aos 30%, porém, com redução de 16,60%. Os afundados em todas as densidades de corte aumentam, na mesma ordem anterior, de 68,91%; 72,08%; 73,69% e 70,15% *versus* 70,64%; 74,25%; 77,28% e 80,24%, sugerindo que parte da ganga (matéria inorgânica) tenha se concentrado na fração  $-9,5 \text{ mm} +2,0 \text{ mm}$ .

### **Comparando as faixas $-9,5 \text{ mm} +2,0 \text{ mm}$ dos subprodutos Intermediário *versus* Rejeito 1 da Mina do Faxinal**

Analisando-se os parâmetros ‘recuperação teórica e teor em cinzas’ na faixa considerada do subproduto Intermediário (Tabela 26), em relação ao Rejeito 1 (Tabela 17), verifica-se que o primeiro leva vantagem no teor em cinzas individualizado (não acumulado) com apenas 1,55% de massa recuperável, somente na densidade de corte  $1,5 \text{ g/cm}^3$  (17,13% *versus* 22,31%), sendo desfavorável nas demais densidades. Quando se observa apenas a massa recuperável na mesma densidade ( $1,5 \text{ g/cm}^3$ ), constata-se comportamento semelhante, uma vez que esse parâmetro é inferior na densidade inicial, apresentando crescimento nas seguintes. E mesmo com essa tendência ao crescimento, ainda é inferior ao Rejeito 1 na recuperação mássica acumulada. Os teores em cinzas dos afundados são superiores no Intermediário, ratificando que esse contém menor fração de matéria carbonosa e consequentemente maior porção de contaminante inorgânico com densidade próxima a de corte em sua matriz carbonosa.

**Fração granulométrica  $-2,0 \text{ mm} +0,1 \text{ mm}$ :** na mesma densidade teórica de corte ( $1,8 \text{ g/cm}^3$ ), pode-se observar que a recuperação teórica acumulada na amostra total é de 6,15% com teor em cinzas acumulado de 28,56%. A porção afundada contribui com 19,19% na massa total e seu teor em cinzas atinge 73,30% (Tabela 27).

### **Comparando as faixas -2,0 mm +0,1 mm nas frações passante em 9,5 mm versus passante em 103 mm do subproduto Intermediário da Mina do Faxinal**

Na comparação da faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm gerada na fração -9,5 mm (Tabela 27) com a existente na granulometria 103 mm (Tabela 23), especificamente na densidade de 1,5 g/cm<sup>3</sup>, constata-se resultado ligeiramente satisfatório quando a recuperação teórica altera-se de 0,21% para 2,55% e ocorre irrelevante aumento no teor do contaminante inorgânico de 12,55% para 13,30% (acréscimo somente de 0,75%). Na densidade de corte 1,8 g/cm<sup>3</sup>, os resultados são mais promissores, cuja participação irrelevante da faixa abaixo de 103 mm na massa total (1,96%) contribui para a recuperação desprezível de 0,46%, alterando-a significativamente para 6,15% na granulometria menor com participação superior de 25,34% na massa total. Os teores em cinzas dos afundados em 103 mm e densidades estudadas são ligeiramente inferiores aos teores encontrados na granulometria 9,5 mm, ratificando a liberação entre os componentes da matriz carbonosa, embora a discrepância entre as respectivas participações na massa total não constitua a melhor base para comparação.

### **Comparando as faixas -2,0 mm +0,1 mm nas faixas passantes em 9,5 mm dos subprodutos Intermediário versus Rejeito 1 da Mina do Faxinal**

Diferentemente do comportamento demonstrado nas comparações anteriores entre os referidos subprodutos, o desfavorecimento no teor de matéria carbonosa do Intermediário (Tabela 27), quando se defronta com o mesmo parâmetro no subproduto Rejeito 1 (Tabela 18), torna-se menos evidente nessa faixa granulométrica. Detendo-se na densidade de corte 1,8 g/cm<sup>3</sup>, constata-se que os percentuais de massa recuperável e teor em cinzas se aproximam, sugerindo que parte do contaminante inorgânico tenha permanecido na faixa -9,5 mm +2,0 mm. Dentro da mesma lógica, os teores em cinzas dos afundados também se assemelham, como observado nas tabelas anteriormente referenciadas.

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm) com participação de 97,20% na amostra total: na mesma densidade teórica de corte (1,8 g/cm<sup>3</sup>), obtém-se uma recuperação teórica total ponderada no flutuado de 16,13% com teor em cinzas total ponderado de 35,60%. O afundado correspondente contém teor em cinzas de 74,03% e contribui com 81,07% na massa total.**

### **Confrontando os resultados totais ponderados das faixas passante em 103 mm versus passante em 9,5 mm do subproduto Intermediário da Mina do Faxinal**

O efeito da redução de granulometria (-9,5 mm) é ainda mais evidente na recuperação teórica total desse subproduto, conforme Tabela 25, que passa de 1,16% (segunda combinação da amostra sem beneficiamento, melhor resultado na fração 103 mm) para 16,13% (Tabela 28), ainda que o teor em cinzas tenha aumentado igualmente de 31,01% para 35,60%. Fato que indica haver maior parcela do contaminante inorgânico na matriz do subproduto Intermediário em estudo.

A análise do subproduto Intermediário em 103 mm e 9,5 mm e nas respectivas classificações -103 mm + 2,0 mm (Tabela 22) e -9,5 mm + 2,0 mm (Tabela 26), com as maiores participações na massa total (94,74% e 71,86%), mostra uma diminuição significativa nos teores em cinzas nessa última faixa granulométrica em relação àquela, precisamente na porção fluada a partir da densidade de 1,8 g/cm<sup>3</sup>, repetindo o comportamento do subproduto Rejeito 1, embora os valores do Intermediário situem-se acima daquele. Ressalta-se que na densidade acima, a recuperação teórica reduz-se de 21,30% para 9,98% e o teor em cinzas, embora ainda situe-se bem acima dos 30%, de 56,55% para 39,95%, indicando diminuição da porção inorgânica e decréscimo na massa a ser recuperada, provavelmente resultado de liberação da matéria carbonosa da ganga quando se reduz a granulometria de 103 mm para 9,5 mm. A alteração no teor em cinzas dos fluados especificamente na faixa granulométrica (não acumulado) e na densidade 1,8 g/cm<sup>3</sup>, conforme já comentado, decaiu de 57,31% para 44,14% e impacta no teor em cinzas ponderado final da fração -9,5 mm que diminui de 55,91% (na faixa abaixo de 103 mm – Tabela 20) para 35,60% (Tabela 28), confirmando a maior dificuldade de se obter um produto, a partir do Intermediário do Faxinal, com poder calorífico próximo ao do carvão CE-5200. A fração mais densa na mesma densidade de corte participa com 77,93% da massa total e apresenta teor em cinzas de 72,07% na granulometria 103 mm, enquanto que a participação mássica na fração 9,5 mm é de 81,07% com teor em cinzas ligeiramente maior (74,03%), concentrando porção da matéria inorgânica em 9,5 mm.

### **Confrontando os resultados totais ponderados das faixas passantes em 9,5 mm dos subprodutos Intermediário versus Rejeito 1 da Mina do Faxinal**

Na comparação dos parâmetros estudados entre os subprodutos Intermediário (Tabela 28) e Rejeito 1 (Tabela 19), respectivamente, verifica-se um decréscimo na qualidade do Intermediário mensurada principalmente nas densidades  $1,5 \text{ g/cm}^3$  e  $1,8 \text{ g/cm}^3$ , quando as massas recuperáveis individuais (não acumuladas) alteram-se de 4,10% para 8,14% com os teores em cinzas variando de 14,74% para 18,68%, na mesma seqüência e na densidade de  $1,5 \text{ g/cm}^3$ , enquanto na densidade  $1,8 \text{ g/cm}^3$  tem-se recuperações mássicas individuais variando de 12,03% para 9,60% com teores em cinzas praticamente inalterados de 42,71% e 42,34%, respectivamente. Observa-se que embora na densidade  $1,5 \text{ g/cm}^3$  o teor em cinzas individualizado no Rejeito 1 seja superior ao análogo do Intermediário (18,68% *versus* 14,74%), há uma ‘compensação’ na densidade de corte seguinte quando o mesmo contribui com teor em cinzas de 42,34% e 9,60% na massa individual, enquanto que no Intermediário o teor em cinzas permanece próximo 42,71%, porém com participação de 12,03% (acrécimo de 2,43%), determinando o aumento no teor em cinzas ponderado total que alcança 35,60% *versus* 31,48% do Rejeito 1. Os teores em cinzas do afundado mantêm a lógica e superam os respectivos do Rejeito 1, ratificando a diferença existente nos teores de matéria carbonosa entre os subprodutos ora relacionados.

#### 4.3.2.3. Amostra cominuída a -2,0 mm em laboratório (Lote III)

A Tabela 29 apresenta o balanço metalúrgico do subproduto Intermediário com granulometria reduzida a -2,0 mm (100% passante em 2,0 mm), a classificação desse produto nas peneiras 2,0 mm e 0,1 mm, e os ensaios de afunda-flutua nas mesmas densidades já anteriormente utilizadas (1,5 g/cm<sup>3</sup>; 1,8 g/cm<sup>3</sup>; 2,0 g/cm<sup>3</sup> e 2,2 g/cm<sup>3</sup>), conforme comentado na seqüência:

#### **Recuperação teórica total *versus* teor em cinzas total das faixas granulométricas estudadas no lote III do subproduto Intermediário, Mina do Faxinal**

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm (desprezada a fração -0,1 mm)** com participação de 96,96% na amostra total: na faixa -2,0 mm +0,1 mm, verifica-se que na densidade teórica de corte de 1,8 g/cm<sup>3</sup>, a recuperação teórica atinge 18,45%, com teor em cinzas de 33,96%, superior aos 16,13% a ser recuperado, mas inferior ao teor em cinzas de 35,60% calculados, respectivamente, na Tabela 28, resultado total do estudo na granulometria 9,5 mm. A fração afundada na mesma densidade teórica de corte apresenta teor em cinzas de 72,44%, com participação de 78,51% na massa total.

O resultado 'recuperação *versus* teor em cinzas' na faixa considerada e densidade 1,8 g/cm<sup>3</sup> não atinge o teor de 30% da operação CE-5200, porém é o de maior recuperação teórica e menor teor (33,96%) obtido no estudo do subproduto Intermediário do Faxinal.

Especificamente na densidade de corte 1,5 g/cm<sup>3</sup>, o resultado obtido nessa faixa a partir dos parâmetros de recuperação e teor em cinzas, é irrelevante, razão pela qual não é citado na presente análise.

Tabela 29. Resultado total do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm – subproduto Intermediário, Mina do Faxinal.

TOTAL (-2,0 mm +0,1 mm)								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					Teor em cinzas		
	na faixa granulométrica			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	96,96%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	6,39	6,39	100,00	6,20	6,20	16,25	16,25	65,12
+1,5 -1,8	12,64	19,03	93,61	12,25	<b>18,45</b>	42,91	<b>33,96</b>	68,46
+1,8 -2,0	14,51	33,54	80,97	14,07	32,52	62,08	46,13	72,44
+2,0 -2,2	27,31	60,85	66,46	26,48	59,00	74,17	58,71	74,70
+2,2	39,15	100,00	39,15	37,96	96,96	75,08	65,12	75,08
Faixa granulométrica -0,1 mm					3,04	67,39		

### Confrontando os resultados das faixas -2,0 mm +0,1 mm nos lotes I, II e III do subproduto Intermediário da Mina do Faxinal

Na avaliação da faixa -2,0 mm +0,1 mm nos três lotes estudados (Tabelas 23, 27 e 29), constata-se que, diferentemente do subproduto Rejeito 1 (Tabelas 14, 18 e 21), há aumento no teor em cinzas da porção flutuada em todas densidades teóricas de corte, nem sempre relevante, na medida em que decresce a granulometria das partículas. Presume-se que, mesmo em volume mínimo, a matéria inorgânica desagregada na cominuição das partículas nas frações -9,5 mm e -2,0 mm transferiu-se para essa faixa granulométrica, particularmente no Intermediário. As recuperações teóricas, na mesma ordem, também tendem a aumentar significativamente em todas as densidades estudadas, devido possivelmente à liberação maior da fração carbonosa e incorporação mínima de parcela inorgânica (ganga), mais acentuada nesse subproduto. Fica evidente, na faixa -2,0 mm, a maior concentração do contaminante inorgânico, de densidade próxima à de corte e maior friabilidade, ratificado pela superioridade nos teores em cinzas dos flutuados e ligeira inferioridade nos respectivos afundados, em relação aos demais lotes estudados e nas densidades consideradas. Mais uma vez, a comparação da fração -2,0 mm +0,1 mm em todos os lotes não é a mais adequada, em virtude de haver grande discrepância entre as respectivas participações na massa total (1,96%; 25,34% e 96,96%), embora necessária para a análise global.

Embora a redução das partículas do Intermediário a menos 2,0 mm não seja usualmente aplicada em operações de beneficiamento, tendo em vista envolver investimento na unidade de britagem, elevados custos para manuseio e adequação do produto de fina granulometria às características de comercialização após seu tratamento, foi nessa faixa que se produziu um carvão com características mais próximas daquelas aceitas pelo mercado atual, ou seja, maior recuperação teórica com menor teor em cinzas entre os lotes analisados.

Dentro da razoabilidade em termos operacional e de custeio, é indiscutível que o Intermediário seja cominuído a -9,5 mm, e com isso se busque, na densidade teórica de corte de  $1,8 \text{ g/cm}^3$  e em ambas as faixas granulométricas -9,5 mm +2,0 mm e -2,0 mm +0,1 mm, um produto com teor em cinzas e recuperação teórica totais próximos de 35,60% e 16,13%, respectivamente (Tabela 28). No presente caso, não se obtém o carvão CE-5200, mas possivelmente um carvão energético tipo CE-4700 que apresenta um teor em cinzas próximo de 35% com aceitação comercial.

## **4.4. PRODUTOS PROCEDENTES DA MINA BUTIÁ LESTE**

### **4.4.1. Subproduto Rejeito 1**

#### **4.4.1.1. Amostra sem beneficiamento em laboratório (Lote I)**

A exemplo de estudo já realizado com os produtos da Mina do Faxinal, nas Tabelas 30, 31 e 32 encontram-se os resultados do balanço metalúrgico do subproduto Rejeito 1 sem beneficiamento em laboratório (100% passante em 103 mm), ou seja, apenas classificado granulometricamente nas peneiras 2,0 mm e 0,1 mm e levado a ensaios de afunda-flutua nas densidades 1,5 g/cm<sup>3</sup>, 1,8 g/cm<sup>3</sup>, 2,0 g/cm<sup>3</sup> e 2,2 g/cm<sup>3</sup>. Os resultados são analisados por faixa granulométrica separadamente e pelo total ponderado, como apresentados na seqüência:

##### **4.4.1.1.1. Recuperação teórica total versus teor em cinzas total das faixas granulométricas estudadas no lote I do subproduto Rejeito 1, Mina Butiá Leste**

**Fração granulométrica -103 mm +2,0 mm** com participação de 93,43% na amostra total: verifica-se na densidade teórica de corte 1,8 g/cm<sup>3</sup> que a fração teórica flutuada apresenta percentual acumulado na amostra total de 6,07% e teor em cinzas acumulado (ponderado) de 36,25%. Percentual mássico ainda abaixo dos 12 % mínimo almejado, conforme Tabela 30. A parcela mais densa que a densidade de corte considerada contém teor em cinzas de 74,61% e participa na massa total com 87,36%.

Devido à discretíssima recuperação mássica não se considera nessa análise o carvão obtido na densidade de corte de 1,5 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 30. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -103 mm +2,0 mm, lote I – subproduto Rejeito 1, Mina Butiá Leste.

Faixa granulométrica -103 mm +2,0 mm								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					Teor em cinzas		
	na faixa granulométrica			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	93,43%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	3,08	3,08	100,00	2,88	2,88	22,23	22,23	72,11
+1,5 -1,8	3,42	6,50	96,92	3,19	<b>6,07</b>	48,90	<b>36,25</b>	73,70
+1,8 -2,0	6,81	13,31	93,50	6,36	12,43	60,98	48,91	74,61
+2,0 -2,2	19,93	33,24	86,69	18,62	31,06	73,13	63,43	75,68
+2,2	66,76	100,00	66,76	62,37	93,43	76,44	72,11	76,44

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm** com participação de 5,80 % na amostra total: na mesma densidade teórica de corte (1,8 g/cm<sup>3</sup>), observa-se que a recuperação teórica acumulada da parcela flutuada na amostra total é apenas 1,05 % com teor em cinzas acumulado de 22,07 %. A recuperação teórica na faixa granulométrica considerada é ínfima, possivelmente motivada pelo baixíssimo grau de liberação da matéria carbonosa da inorgânica.

Tabela 31. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, lote I – subproduto Rejeito 1, Mina Butiá Leste.

Faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm (-103 mm)								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					Teor em cinzas		
	na faixa granulométrica			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	5,80%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	8,93	8,93	100,00	0,52	0,52	12,46	12,46	63,81
+1,5 -1,8	9,15	18,08	91,07	0,53	<b>1,05</b>	31,44	<b>22,07</b>	68,85
+1,8 -2,0	7,18	25,26	81,92	0,42	<b>1,47</b>	50,96	<b>30,28</b>	73,03
+2,0 -2,2	11,16	36,43	74,74	0,65	2,11	65,19	40,98	75,15
+2,2	63,57	100,00	63,57	3,69	5,80	76,89	63,81	76,89

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm)** com participação de 99,23 % na amostra total: na mesma densidade teórica de corte (1,8 g/cm<sup>3</sup>), obtém-se na parcela flutuada uma recuperação teórica total ponderada de 7,12% com teor em cinzas total ponderado de 34,17%. A fração afundada na mesma densidade de corte (+1,8 g/cm<sup>3</sup>) caracteriza-se por apresentar teor em cinzas de 74,52 %, correspondendo a 92,11% da massa total.

Observa-se que não se atinge o teor em cinzas de 30% da operação original (CE-5200), além de a recuperação teórica ser discretíssima, resultados que desaconselham o seu reprocessamento na granulometria em que se encontra o subproduto ora avaliado. Por essas características não se considerou o resultado total na densidade de corte 1,5 g/cm<sup>3</sup>, cujos parâmetros mensurados são ainda mais desfavoráveis.

Tabela 32. Resultado total dos ensaios densimétricos e análises imediatas, faixa -103 mm +0,1 mm - subproduto Rejeito 1, Mina Butiá Leste.

Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	TOTAL (-103 mm +0,1 mm)					
	M a s s a		99,23%	Teor em cinzas		
	Flutuado		Afund.	Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	3,40	3,40	99,23	20,74	20,74	71,63
+1,5 -1,8	3,72	<b>7,12</b>	95,83	46,42	<b>34,17</b>	73,43
+1,8 -2,0	6,78	13,90	92,10	60,37	46,94	74,52
+2,0 -2,2	19,27	33,17	85,33	72,86	62,00	75,65
+2,2	66,06	99,23	66,06	76,46	71,63	76,46
		0,77	Faixa -0,1 mm		62,98	

#### 4.4.1.1.2. Combinações de recuperação teórica e teores em cinzas por faixa granulométrica *versus* recuperação teórica total e teor em cinza total em densidades de corte distintas no lote I do subproduto Rejeito 1 Mina Butiá Leste

Tendo em vista os resultados irrelevantes, buscaram-se na análise de combinação entre as faixas granulométricas outras possíveis oportunidades para a obtenção de carvão com

características quantitativa e qualitativa aceitas no mercado local, a exemplo da avaliação já realizada nos subprodutos da Mina do Faxinal (Tabela 33).

### Única Combinação

**Fração granulométrica -103 mm +2,0 mm:** mantendo-se na densidade teórica de corte de 1,8 g/cm<sup>3</sup>, recuperação teórica de 6,07% e teor em cinzas acumulado de 36,25%;

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm:** na densidade teórica de corte de 2,0 g/cm<sup>3</sup>, recuperação teórica de 1,47% e teor em cinzas acumulado de 30,28%.

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm) na combinação estudada:** na ponderação dessas frações, obtém-se uma recuperação teórica total de 7,54% com teor em cinzas de 35,09%. Recuperação mássica ainda aquém dos 12%.

Tabela 33. Combinações de faixas granulométricas e densimétricas, na fração menor do que 103 mm, Rejeito 1, Mina Butiá Leste.

Subproduto	100% abaixo de (mm)	Combinação	Faixas granulométricas combinadas						TOTAL (ponderado)	
			-103 mm + 2,0 mm			-2,0 mm + 0,1 mm			Recup.	Cinzas
			Dens.	Recup.	Cinzas	Dens.	Recup.	Cinzas		
			(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(%)	(%)
Rejeito 1 Mina Butiá Leste	103	Única	1,8	6,07	36,25	2,0	1,47	30,28	7,54	35,09

Como se observa, a recuperação teórica permanece discreta (7,54%, abaixo de 12%) na mesma densidade de corte para ambas as faixas granulométricas (Tabela 32), e o teor em cinzas superior relativamente ao produto CE-5200. Acredita-se que o teor em cinzas tenda a crescer com as combinações restantes possíveis, razão pela qual não se prossegue nesse critério para análise da amostra sem beneficiamento em laboratório. Como já fora indicado na análise do resultado total da fração -103 mm, não se recomenda o reprocessamento do subproduto nessas condições, devido ao baixo grau de liberação da matéria orgânica da ganga contidas na matriz do subproduto estudado.

#### 4.4.1.2. Amostra cominuída a -9,5 mm em laboratório (Lote II)

Observando-se as Tabelas 34, 35 e 36 que dispõem os resultados do balanço metalúrgico do subproduto Rejeito 1 com granulometria reduzida a -9,5 mm (100% passante em 9,5 mm), a posterior classificação granulométrica do subproduto nas peneiras 9,5 mm, 2,0 mm e 0,1 mm, e os correspondentes ensaios de afunda-flutua nas densidades 1,5 g/cm<sup>3</sup>, 1,8 g/cm<sup>3</sup>, 2,0 g/cm<sup>3</sup> e 2,2 g/cm<sup>3</sup>, pode-se comentar o que segue:

##### 4.4.1.2.1. Recuperação teórica total versus teor em cinzas total das faixas granulométricas estudadas no lote II do subproduto Rejeito 1, Mina Butiá Leste

**Fração granulométrica -9,5 mm +2,0 mm** com participação de 73,44% na amostra total: na densidade teórica de corte 1,8 g/cm<sup>3</sup>, pode-se verificar que a recuperação teórica acumulada na amostra total do flutuado é de 9,08% com teor em cinzas (à base seca) acumulado de 31,25% (Tabela 34). O teor em cinzas do afundado atinge 71,88%, enquanto sua participação na massa total é de 64,36%. A exemplo de outras análises, desconsidera-se o resultado obtido na densidade de corte 1,5 g/cm<sup>3</sup> por apresentar desfavorável recuperação mássica, em relação à densidade em estudo, que ainda permanece abaixo de 12%.

Tabela 34. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -9,5 mm +2,0 mm – subproduto Rejeito 1, Mina Butiá Leste.

Faixa granulométrica -9,5 mm +2,0 mm								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					Teor em cinzas		
	na faixa granulométrica 100,0%			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	73,44%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	6,20	6,20	100,00	4,55	4,55	21,10	21,10	66,85
+1,5 -1,8	6,16	12,36	93,80	4,52	<b>9,08</b>	41,46	<b>31,25</b>	69,88
+1,8 -2,0	9,49	21,85	87,64	6,97	16,05	60,78	44,08	71,88
+2,0 -2,2	20,56	42,42	78,15	15,10	31,15	71,79	57,51	73,22
+2,2	57,58	100,00	57,58	42,29	73,44	73,73	66,85	73,73

### **Comparando as faixas -9,5 mm +2,0 mm versus -103 mm +2,0 mm do subproduto Rejeito 1 da Mina Butiá Leste**

Na comparação dos resultados desse subproduto nas faixas -9,5 mm e -103 mm, frações -9,5 mm +2,0 mm (Tabela 34) e -103 mm +2,0 mm (Tabela 30), constata-se um aumento de 3,01% na massa recuperável (9,08% *versus* 6,07%) e redução de 5,0% no teor em cinzas (31,25% *versus* 36,25%), respectivamente, demonstrando a tendência de maior liberação entre a matéria carbonosa e a porção inorgânica ocorrida em 9,5 mm. No sentido da maior para a menor granulometria máxima, observam-se reduções no teor em cinzas acumulados dos flutuados desde a densidade 1,5 g/cm<sup>3</sup> até 2,2 g/cm<sup>3</sup>, ou seja, os teores diminuem de 22,23%, 36,25%, 48,91% e 63,43% para 21,10%, 31,25%, 44,08% e 57,51%, na mesma ordem. Comportamento idêntico ocorre nos teores em cinzas dos afundados que decrescem de 73,70%; 74,61%; 75,68% e 76,44% para 69,88%; 71,88%; 73,22% e 73,73%. Resultado oposto verifica-se na recuperação teórica acumulada que, mantendo a lógica, aumenta quando passa da granulometria 103,0 mm para 9,5 mm, considerando-se as mesmas densidades teóricas de corte, crescendo de 2,88%, 6,07%, 12,43% e 31,06% para 4,55%; 9,08%; 16,05% e 31,15%, de maneira recíproca. Como já ocorrera com o mesmo subproduto procedente da Mina do Faxinal, esse comportamento dos parâmetros 'recuperação teórica *versus* teor em cinzas acumulados' são decorrentes de maior grau de liberação entre as matérias orgânica e inorgânica.

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm** com participação de 23,76% na amostra total: na mesma densidade teórica de corte (1,8 g/cm<sup>3</sup>), observa-se que a recuperação teórica acumulada na amostra total do flutuado é apenas 4,94% com teor em cinzas acumulado de 23,89% (Tabela 35). A fração afundada contém 71,57% de teor em cinzas com participação de 18,82% na massa total.

Tabela 35. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, lote II – subproduto Rejeito 1, Mina Butiá Leste.

Faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm (-9,5 mm)								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					Teor em cinzas		
	na faixa granulométrica			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	23,76%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	10,58	10,58	100,00	2,51	2,51	13,33	13,33	61,65
+1,5 -1,8	10,22	20,80	89,42	2,43	<b>4,94</b>	34,82	<b>23,89</b>	67,37
+1,8 -2,0	9,29	30,09	79,20	2,21	<b>7,15</b>	56,49	<b>33,95</b>	71,57
+2,0 -2,2	17,51	47,60	69,91	4,16	11,31	68,31	46,59	73,58
+2,2	52,40	100,00	52,40	12,45	23,76	75,34	61,65	75,34

### Comparando as faixas -2,0 mm +0,1 mm nas faixas passantes em 9,5 mm *versus* 103 mm do subproduto Rejeito 1 da Mina Butiá Leste

Na verificação dessa fração granulométrica nos tamanhos 103 mm (Tabela 31) e 9,5 mm (Tabela 35), e ainda densidade de corte de 1,8 g/cm<sup>3</sup>, constata-se ganho na massa recuperável que varia de 1,05% para 4,94% (acrécimo de 3,89%), influenciado por suas participações na massa total (5,80% e 23,76%, respectivamente), porém, apresentando mínimo aumento no teor em cinzas quando passa de 22,07% para 23,89% (variação de 1,82%). Vale ressaltar que na densidade 2,0 g/cm<sup>3</sup>, cujo teor em cinzas do flutuado se aproxima de 30% na fração -103 mm, os percentuais mássicos aumentam, recuperando 1,47% *versus* 7,15% em 9,5 mm (acrécimo de 5,68%), e adicionando 3,67% de matéria inorgânica ao teor em cinzas, crescendo de 30,28% para 33,95%. Acrécimo que se justifica pelo aumento no teor em cinzas individualizado (não acumulado), na densidade considerada, que se eleva para 56,49% com recuperação individual de 2,21%, enquanto que na granulometria máxima de 103 mm alcança 50,96% com desprezível contribuição mássica individual de 0,42%. Observa-se no comportamento dos parâmetros ‘teor em cinzas e recuperação mássica’ apresentados que, possivelmente na redução da granulometria para 9,5 mm, parte do material liberado e concentrado nessa faixa granulométrica seja composto por contaminante inorgânico com densidade próxima a de corte e maior friabilidade, que provoca os acréscimos no teor em cinzas e na massa recuperável. Conseqüentemente, os teores em cinzas dos afundados decrescem da fração 103 mm para 9,5 mm, enquanto os percentuais crescem nos respectivos flutuados. Comportamento justificado pela maior diferença entre os teores em cinzas

individualizados (não acumulados) da maior para a menor densidade (até  $1,8 \text{ g/cm}^3$ ) combinada com as baixas participações na massa total em cada densidade da fração  $-103 \text{ mm}$ , motivando aparente anomalia.

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela  $-0,1 \text{ mm}$ )** com participação de 97,19% na amostra total: na mesma densidade teórica de corte ( $1,8 \text{ g/cm}^3$ ), obtém-se uma recuperação teórica total ponderada no flutuado de 14,02% com teor em cinzas total ponderado de 28,65%. A parcela afundada em  $1,8 \text{ g/cm}^3$  apresenta teor em cinzas de 71,81% e equivalente a 83,17% da massa total (Tabela 36).

Tabela 36. Resultado total dos ensaios densimétricos e análises imediatas, faixa  $-9,5 \text{ mm} +0,1 \text{ mm}$  - subproduto Rejeito 1, Mina Butiá Leste.

Faixa densimétrica ( $\text{g/cm}^3$ )	TOTAL ( $-9,5 \text{ mm} +0,1 \text{ mm}$ )					
	M a s s a			Teor em cinzas		
	97,19%		Afund.	Flutuado		Afund.
	Flutuado	acum.	acum.	Flutuado	acum.	acum.
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
-1,5	7,07	7,07	97,19	18,33	18,33	65,58
+1,5 -1,8	6,95	<b>14,02</b>	90,12	39,14	<b>28,65</b>	69,29
+1,8 -2,0	9,18	23,20	83,17	59,75	40,96	71,81
+2,0 -2,2	19,26	42,46	73,99	71,04	54,60	73,30
+2,2	54,73	97,19	54,73	74,10	65,58	74,10
	2,81		Faixa $-0,1 \text{ mm}$		66,02	

A Figura 21 mostra as curvas em função da densidade para os percentuais mássicos e dos teores em cinzas dos flutuados do subproduto considerado na faixa  $-9,5 \text{ mm} +0,1 \text{ mm}$ .

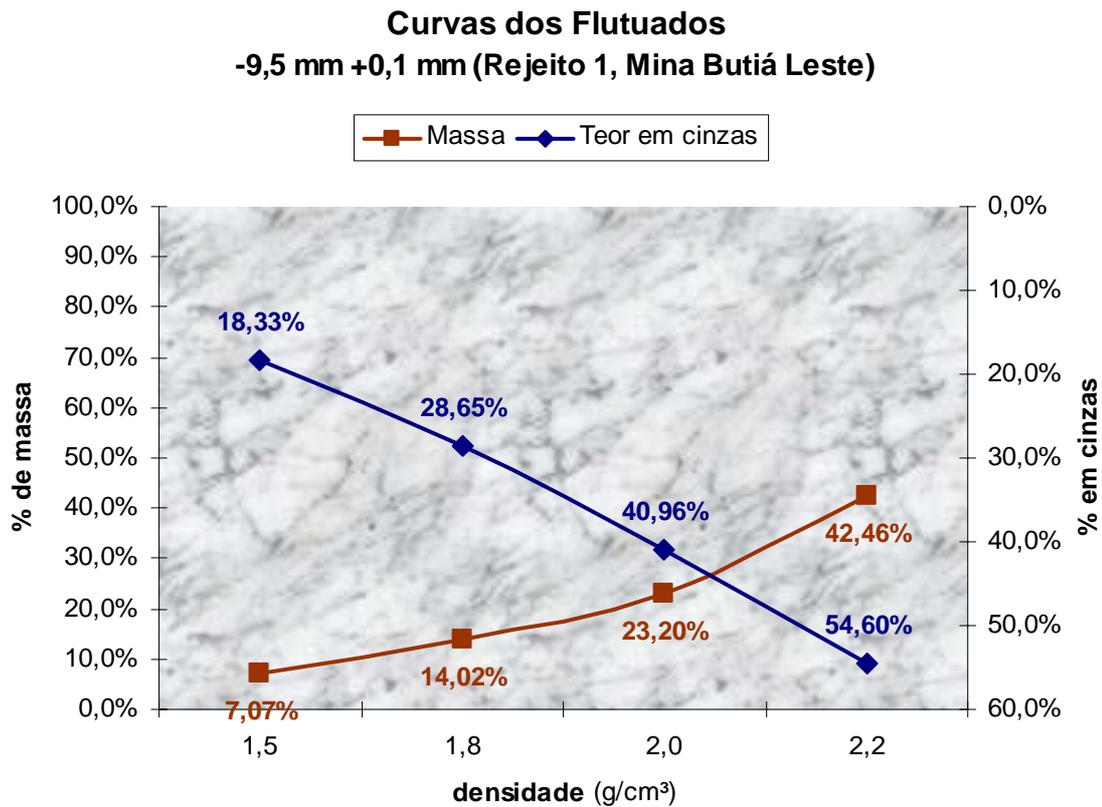


Figura 21. Curvas dos flutuados para a faixa -9,5 mm +0,1 mm do Rejeito 1, Mina Butiá Leste.

### **Confrontando os resultados totais ponderados das faixas passante em 9,5 mm versus passante em 103 mm do subproduto Rejeito 1 da Mina Butiá Leste**

Observa-se que, na densidade 1,8 g/cm<sup>3</sup> e granulometria 9,5 mm (Tabela 36), o teor em cinzas se aproxima de 30% (28,65%) da operação CE-5200, além de a recuperação teórica ser acrescida em 6,90%, em relação à mesma densidade teórica de corte da amostra sem beneficiamento em laboratório (100% passante em 103 mm - Tabela 32), que corresponde a 34,17% e 7,12%, respectivamente.

Deve-se ressaltar a maior liberação entre as frações carbonosa e inorgânica nesse subproduto motivada pela redução das partículas para a granulometria 9,5 mm, se comparado com o tamanho máximo 103 mm. Consta-se que, nas densidades de corte 1,5 g/cm<sup>3</sup> e 1,8 g/cm<sup>3</sup>, as recuperações mássicas individuais (não acumuladas) crescem significativamente, além de seus teores em cinzas individualizados reduzirem-se razoavelmente, com maior ênfase na densidade 1,8 g/cm<sup>3</sup> que decai para 39,14% em 9,5 mm,

após atingir 46,42% em 103 mm, ratificando a separação dos materiais constituintes da matriz carbonosa no subproduto Rejeito 1 estudado. Os afundados apresentam teor em cinzas inferiores quando se analisam as frações -103 mm e -9,5 mm, demonstrando coerência com os flutuados.

### **Confrontando os resultados totais ponderados das faixas -9,5 mm dos subprodutos Rejeito 1 da Mina Butiá Leste *versus* Mina do Faxinal**

O principal objetivo da presente comparação é confirmar a ligeira superioridade em termos de matéria orgânica contida no subproduto Rejeito 1 produzido na Mina Butiá Leste (Tabela 36), em relação ao gerado na Mina do Faxinal (Tabela 19), porém a partir do material 100% passante em 9,5 mm, fator determinante para acréscimo no grau de liberação da matéria carbonosa do contaminante inorgânico.

Na análise das referidas tabelas, constata-se que as massas acumuladas dos flutuados do subproduto de Butiá Leste, em todas as densidades de corte, são inferiores às recuperações do mesmo subproduto procedente da Mina do Faxinal, semelhante comportamento ocorrendo nos teores em cinzas que decrescem com maior variação mensurada na densidade de 1,8 g/cm<sup>3</sup>, cujo teor individualizado (não acumulado) reduz-se de 42,34% (Faxinal) para 39,14% (Butiá Leste), impactando nos teores em cinzas acumulados que correspondem a 28,65% do Butiá Leste (abaixo dos 30%) contra 31,48% do Faxinal. Quando se avaliam as possíveis recuperações mássicas com os respectivos teores em cinzas mais próximos de 30%, verifica-se na ‘terceira combinação’ do Rejeito 1 da Mina do Faxinal (Tabela 20) na mesma granulometria, que a recuperação teórica decresce de 17,74% (resultado total ponderado na mesma densidade) para 14,83%, reduzindo seu teor em cinzas para 29,77% contra a massa recuperável de 14,02% e teor de 28,65%, mesmos parâmetros verificados no resultado total ponderado do subproduto procedente da Mina Butiá Leste. Há acréscimo discretíssimo de 0,81% na massa em favor do Rejeito 1 do Faxinal, enquanto o teor em cinzas eleva-se 1,12% em relação ao produzido no Butiá Leste. Comportamento que ratifica mínima vantagem na concentração carbonosa residual para o Rejeito 1 da Mina Butiá Leste. Os teores em cinzas dos afundados mantêm-se coerentes com os teores dos flutuados respectivos, apresentando ligeira elevação nos percentuais quando se trata da Mina do Faxinal.

#### **4.4.1.2.2. Combinações de recuperação teórica e teores em cinzas por faixa granulométrica *versus* recuperação teórica total e teor em cinza total em densidades de corte distintas no lote II do subproduto Rejeito 1 Mina Butiá Leste**

Na busca de alternativa satisfatória que esgote as possibilidades mais promissoras, realiza-se uma combinação entre as faixas granulométricas estudadas para a análise do resultado (Tabela 37).

##### **Única Combinação**

**Fração granulométrica -9,5 mm +2,0 mm:** mantendo-se na densidade teórica de corte de 1,8 g/cm<sup>3</sup>, recuperação teórica de 9,08% e teor em cinzas acumulado de 31,25%;

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm:** na densidade teórica de corte de 2,0 g/cm<sup>3</sup>, considera-se a recuperação teórica de 7,15% e teor em cinzas acumulado de 33,95%.

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm) na combinação estudada:** na ponderação dessas frações, obtém-se uma recuperação teórica total de 16,23%, ligeiramente superior à situação original, porém, com teor em cinzas de 32,44%, superando o patamar de 30%. Essa possível combinação ‘recuperação *versus* teor em cinzas’ seria descartada pelo critério aqui adotado, em virtude de não superar o resultado obtido pelo conjunto na mesma densidade de 1,8 g/cm<sup>3</sup>. Porém, considera-se como uma alternativa variante para situações (temporárias) comerciais que devam priorizar mais o volume produzido em detrimento do poder calorífico, até em caso de *blending*.

Tabela 37. Combinações de faixas granulométricas e densimétricas, na fração abaixo de 9,5 mm, Rejeito 1, Mina Butiá Leste.

Subproduto	100% abaixo de (mm)	Combinação	Faixas granulométricas combinadas						TOTAL (ponderado)	
			-9,5 mm + 2,0 mm			-2,0 mm + 0,1 mm			Recup.	Cinzas
			Dens.	Recup.	Cinzas	Dens.	Recup.	Cinzas		
			(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(%)	(%)
<b>Rejeito 1</b> Mina Butiá Leste	9,5	Única	1,8	9,08	31,25	2,0	7,15	33,95	16,23	32,44

Nas combinações possíveis seguintes, percebe-se uma tendência de aumento no teor em cinzas total, motivo pelo qual não serão consideradas na presente análise.

#### 4.4.1.3. Amostra cominuída a -2,0 mm em laboratório (Lote III)

A Tabela 38 apresenta o balanço metalúrgico do subproduto Rejeito 1 com granulometria reduzida a -2,0 mm (100% passante em 2,0 mm), a classificação granulométrica desse produto nas peneiras 2,0 mm e 0,1 mm, e os ensaios de afunda-flutua nas densidades 1,5 g/cm<sup>3</sup>; 1,8 g/cm<sup>3</sup>; 2,0 g/cm<sup>3</sup> e 2,2 g/cm<sup>3</sup> para análise:

#### Recuperação teórica total *versus* teor em cinzas total das faixas granulométricas estudadas no lote III do subproduto Rejeito 1, Mina Butiá Leste

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm (desprezada a fração -0,1 mm)** com participação de 88,27% na amostra total: verifica-se que na densidade teórica de corte 2,0 g/cm<sup>3</sup>, superior a das análises anteriores, a recuperação teórica atinge 12,99%, ligeiramente menor que 14,02% alcançada pela amostra cominuída a -9,5 mm e com teor em cinzas de 32,63%, superior aos 28,65% na mesma granulometria.

Esse resultado demonstra que a redução da amostra a -2,0 mm não apresentou acréscimo suposto na recuperação teórica, além de haver majorado o teor em cinzas da mesma. Como se não bastasse tal fato, a redução de granulometria a -2,0 mm com o fim de liberar o carvão contido no Rejeito 1 não é usualmente aplicada por acarretar maior investimento e majoração nos custos operacionais de seu beneficiamento e manuseio. A

análise de possíveis combinações neste item não é possível por avaliar-se uma única faixa granulométrica.

Tabela 38. Resultado total do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm – subproduto Rejeito 1, Mina Butiá Leste.

<b>TOTAL (-2,0 mm +0,1 mm)</b>								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					Teor em cinzas		
	na faixa granulométrica			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	88,27%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	5,00	5,00	100,00	4,42	4,42	13,57	13,57	69,48
+1,5 -1,8	4,94	9,94	95,00	4,36	8,78	32,04	22,75	72,43
+1,8 -2,0	4,77	14,71	90,06	4,21	<b>12,99</b>	53,24	<b>32,63</b>	74,65
+2,0 -2,2	15,79	30,51	85,29	13,94	26,93	69,75	51,85	75,84
+2,2	69,49	100,00	69,49	61,34	88,27	77,23	69,48	77,23
Faixa granulométrica -0,1 mm					11,73	70,04		

### Confrontando os resultados das faixas -2,0 mm +0,1 mm nos lotes I, II e III do subproduto Rejeito 1 da Mina Butiá Leste

Restritamente à faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, presente em todos os lotes examinados, observa-se em todas as densidades de corte um ligeiro acréscimo nos teores em cinzas acumulados dos flutuados na granulometria abaixo de 9,5 mm (Tabela 35), quando comparado com as partículas até 103 mm (Tabela 31); e uma discreta variação quando se relacionam com a fração passante em 2,0 mm (Tabela 38). Cabe ressaltar que os percentuais do presente parâmetro são baixos na faixa e granulometria menor que 103 mm, possivelmente por tratar-se de carvões que, pela ineficiência normal nos processos de beneficiamento, tenham sido desviados aos afundados, vindo a enriquecê-los em matéria carbonosa. Na medida em que as partículas do subproduto Rejeito 1 têm suas dimensões reduzidas, demonstrado nas crescentes participações da faixa (-2,0 mm +0,1 mm) nas massas totais, ou seja, 5,80%, 23,76% e 88,27%, na ordem da maior para a menor granulometria alguma parcela friável do contaminante inorgânico com densidade próxima a de corte e presente na fração -103 mm +2,0 mm, anterior à cominuição, converge para tamanhos inferiores. Como conseqüência desse fato, verifica-se, nas faixas -2,0 mm +0,1 mm dos lotes passantes em

9,5 mm e 2,0 mm, como já comentado, acréscimos nos percentuais do parâmetro considerado, com maior variação em 9,5 mm.

Precisamente na fração abaixo de 2,0 mm, na mesma faixa (-2,0 mm +0,1 mm), o grau de liberação das frações carbonosa e inorgânica é mais acentuado, convergindo a porção carbonosa mais aos fluviados (teor em cinzas ligeiramente inferior em relação ao material passante em 9,5 mm) e a inorgânica mais aos afundados nas densidades estudadas, como pode ser constatado quando se relacionam os teores em cinzas apenas dos afundados nessas duas frações; 72,43%; 74,65%; 75,84% e 77,23% (2,0 mm) *versus* 67,37%; 71,57%; 73,58% e 75,34% (9,5 mm). Convém salientar que na faixa -2,0 mm +0,1 mm, existente em todos os lotes, as frações afundadas em 2,2 g/cm<sup>3</sup> já apresentam recuperações mássicas acima de 50%, confirmando a concentração preferencial do contaminante inorgânico. Quanto à recuperação teórica acumulada, verifica-se que na granulometria 103 mm esse parâmetro é baixíssimo (0,52%; 1,05%; 1,47% e 2,11%) nas respectivas densidades de corte, iniciando uma ascensão em 9,5 mm (2,51%; 4,94%; 7,15% e 11,31%) e tornando-se significativo em 2,0 mm (4,42%; 8,78%; 12,99% e 26,93%), influenciado pela participação na massa total que se eleva em cada lote, recém comentada.

#### 4.4.2. Subproduto Intermediário

##### 4.4.2.1. Amostra sem beneficiamento em laboratório

Nas Tabelas 39, 40 e 41, encontra-se o balanço metalúrgico do subproduto Intermediário sem beneficiamento em laboratório (100% passante em 103 mm), classificado granulometricamente nas peneiras 2,0 mm e 0,1 mm, e levado a ensaios de afunda-flutua nas densidades 1,5 g/cm<sup>3</sup>, 1,8 g/cm<sup>3</sup>, 2,0 g/cm<sup>3</sup> e 2,2 g/cm<sup>3</sup>, os resultados são analisados por faixa granulométrica separadamente e pelo total ponderado como já realizado com o Rejeito 1:

##### 4.4.2.1.1. Recuperação teórica total *versus* teor em cinzas total das faixas granulométricas estudadas no lote I do subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste

**Fração granulométrica -103 mm +2,0 mm** com participação de 92,90% na amostra total: na densidade teórica de corte 1,8 g/cm<sup>3</sup>, pode-se verificar que a recuperação teórica acumulada na amostra total do flutuado é de 22,88% com um teor em cinzas acumulado de 33,09%. A fração afundada na mesma densidade apresenta teor em cinzas de 69,63%, contribuindo com 70,02% da massa total.

Tabela 39. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -103 mm +2,0 mm, lote I – subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste.

Faixa granulométrica -103 mm +2,0 mm								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					Teor em cinzas		
	na faixa granulométrica			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	92,90%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	8,66	8,66	100,00	8,04	8,04	20,60	20,60	60,63
+1,5 -1,8	15,97	24,63	91,34	14,84	<b>22,88</b>	39,86	<b>33,09</b>	64,42
+1,8 -2,0	22,56	47,19	75,37	20,96	43,84	53,97	43,07	69,63
+2,0 -2,2	15,71	62,90	52,81	14,60	58,44	69,81	49,75	76,31
+2,2	37,10	100,00	37,10	34,46	92,90	79,07	60,63	79,07

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm** com participação de 6,62% na amostra total: na mesma densidade teórica de corte (1,8 g/cm<sup>3</sup>), observa-se que a recuperação teórica

acumulada na amostra total é apenas 1,44%, situando-se bem abaixo do percentual mínimo de 12%, com teor em cinzas acumulado de 23,49%.

Tabela 40. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, lote I – subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste.

Faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm (-103 mm)								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					Teor em cinzas		
	na faixa granulométrica			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	6,62%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	11,77	11,77	100,00	0,78	0,78	14,02	14,02	62,01
+1,5 -1,8	9,99	21,77	88,23	0,66	<b>1,44</b>	34,65	<b>23,49</b>	68,41
+1,8 -2,0	9,16	30,93	78,23	0,61	2,05	54,23	32,60	72,72
+2,0 -2,2	13,97	44,90	69,07	0,92	2,97	67,53	43,47	75,18
+2,2	55,10	100,00	55,10	3,65	6,62	77,12	62,01	77,12

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm)** com participação de 99,52% na amostra total: ainda na mesma densidade teórica de corte (1,8 g/cm<sup>3</sup>), obtém-se uma recuperação teórica total ponderada do flutuado de 24,32% com teor em cinzas total ponderado de 32,52%. A fração afundada em 1,8 g/cm<sup>3</sup> atinge teor em cinzas de 69,84%, participando com 75,20% na massa total. Nesta faixa granulométrica, o teor em cinzas supera ligeiramente os 30% da operação original (CE-5200).

Tabela 41. Resultado total dos ensaios densimétricos e análises imediatas, faixa -103 mm +0,1 mm - subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste.

Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	TOTAL (-103 mm +0,1 mm)					
	M a s s a		99,52%	Teor em cinzas		
	Flutuado		Afund.	Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	8,82	8,82	99,52	20,02	20,02	60,72
+1,5 -1,8	15,50	<b>24,32</b>	90,70	39,64	<b>32,52</b>	64,68
+1,8 -2,0	21,57	45,89	75,20	53,98	42,61	69,84
+2,0 -2,2	15,52	61,41	53,63	69,68	49,45	76,22
+2,2	38,11	99,52	38,11	78,88	60,72	78,88
		0,48	Faixa -0,1 mm		62,17	

#### Confrontando os resultados totais ponderados das faixas passantes em 103 mm dos subprodutos Intermediário *versus* Rejeito 1 da Mina Butiá

O subproduto Intermediário apresenta melhores recuperação teórica e teor em cinzas (Tabela 41), se comparado ao Rejeito 1 (Tabela 32) da mesma unidade mineradora, na mesma fração passante em 103 mm e densidade de corte de 1,8 g/cm<sup>3</sup>, ou seja, massa recuperável de 24,32% *versus* 7,12% (acrécimo de 17,2%) e teor em cinzas 32,52% *versus* 34,17% (redução de 1,65%), indicando conter maior parcela da matéria carbonosa ainda presente no subproduto em questão. Os afundados apresentam teores em cinzas de 69,84% e 74,52%, respectivamente, acompanhando a lógica de superioridade da fração orgânica no Intermediário.

#### 4.4.2.1.2. Combinações de recuperação teórica e teores em cinzas por faixa granulométrica *versus* recuperação teórica total e teor em cinza total em densidades de corte distintas no lote I do subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste

Seguindo a mesma linha de raciocínio, pesquisa-se na combinação a seguir exposta (Tabela 42) alternativa mais promissora, a fim de se esgotar as possibilidades proveitosas na obtenção de um produto energético vendável.

### Única Combinação

**Fração granulométrica -103 mm +2,0 mm:** mantendo-se na densidade teórica de corte de 1,8 g/cm<sup>3</sup>, recuperação teórica de 22,88% e teor em cinzas acumulado de 33,09%;

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm:** na densidade teórica de corte de 2,0 g/cm<sup>3</sup>, considera-se a recuperação teórica de 2,05% e teor em cinzas acumulado de 32,60%.

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm) na combinação estudada:** na ponderação dessas frações, obtém-se uma recuperação teórica total de 24,93%, acréscimo desprezível em relação ao resultado da situação original (24,32%), e com teor em cinzas maior (33,05%), ultrapassando o limite de 30%.

Tabela 42. Combinações de faixas granulométricas e densimétricas, na fração abaixo de 103 mm, Intermediário, Mina Butiá Leste.

Subproduto	100% abaixo de (mm)	Combinação	Faixas granulométricas combinadas						TOTAL (ponderado)	
			-103 mm + 2,0 mm			-2,0 mm + 0,1 mm			Recup.	Cinzas
			Dens.	Recup.	Cinzas	Dens.	Recup.	Cinzas		
			(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(%)	(%)
Intermediário Mina Butiá Leste	103	Única	1,8	22,88	33,09	2,0	2,05	32,60	24,93	33,05

O ganho em termos de recuperação mássica é desprezível, além de não haver redução no teor em cinzas nessa combinação, fato que desaprova sua aplicação. Como já ocorrera anteriormente, percebe-se na análise das combinações possíveis seguintes uma tendência de aumento no teor em cinzas total e na recuperação teórica de forma discreta, motivo pelo qual serão desconsideradas no presente estudo.

#### 4.4.2.2. Amostra cominuída a -9,5 mm em laboratório

As Tabelas 43, 44 e 45 apresentam os resultados do balanço metalúrgico do subproduto Intermediário com granulometria reduzida a -9,5 mm (passante em 9,5 mm),

classificado nas telas de 9,5 mm, 2,0 mm e 0,1 mm e analisado (ensaios de afunda-flutua) nas densidades anteriores (1,5 g/cm<sup>3</sup>; 1,8 g/cm<sup>3</sup>; 2,0 g/cm<sup>3</sup> e 2,2 g/cm<sup>3</sup>).

#### 4.4.2.2.1. Recuperação teórica total *versus* teor em cinzas total das faixas granulométricas estudadas no lote II do subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste

**Fração granulométrica -9,5 mm +2,0 mm** com participação de 70,87% na amostra total: na densidade teórica de corte 1,8 g/cm<sup>3</sup>, pode-se verificar que a recuperação teórica acumulada na amostra total é de 9,97% com um teor em cinzas (à base seca) acumulado de 28,12%. A massa recuperável não alcança o mínimo de 12% adotados no critério de avaliação proposto. O afundado corresponde a 60,90% da massa total, contendo teor em cinzas de 73,96%, ambos os parâmetros considerados na mesma densidade teórica de corte (Tabela 43).

Tabela 43. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -9,5mm + 2,0 mm – subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste.

Faixa granulométrica -9,5 mm +2,0 mm								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					Teor em cinzas		
	na faixa granulométrica			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	70,87%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	7,34	7,34	100,00	5,20	5,20	18,76	18,76	67,52
+1,5 -1,8	6,72	14,06	92,66	4,76	<b>9,97</b>	38,36	<b>28,12</b>	71,38
+1,8 -2,0	9,91	23,97	85,94	7,02	16,99	62,07	42,16	73,96
+2,0 -2,2	22,20	46,17	76,03	15,73	32,72	72,92	56,95	75,51
+2,2	53,83	100,00	53,83	38,15	70,87	76,58	67,52	76,58

#### Comparando as faixas -9,5 mm +2,0 mm *versus* -103 mm +2,0 mm do subproduto Intermediário da Mina Butiá Leste

Na avaliação do impacto causado nos parâmetros considerados pela redução da granulometria de 103 mm para 9,5 mm (Tabelas 39 e 43), constata-se que, especificamente nas densidades 1,5 g/cm<sup>3</sup>; 1,8 g/cm<sup>3</sup> e 2,0 g/cm<sup>3</sup>, há um ligeiro decréscimo no teor em cinzas acumulado, mas uma significativa diminuição na massa recuperável acumulada, tanto em cada faixa granulométrica individual, como em relação às respectivas massas totais (92,90%

*versus* 70,87%). Verifica-se que na densidade 1,5 g/cm<sup>3</sup> a recuperação mássica individual na massa total é de 8,04% (8,66% somente na massa da faixa granulométrica) na fração passante em 103 mm, enquanto 5,20% (7,34% somente na massa da faixa granulométrica) em 9,5 mm; na densidade 1,8 g/cm<sup>3</sup>, a recuperação individual na massa total alcança 14,84% (15,97% somente na massa da faixa granulométrica) na granulometria maior, enquanto apenas 4,76% (6,72% somente na massa da faixa granulométrica) na menor, permanecendo essa tendência na densidade seguinte (2,0 g/cm<sup>3</sup>). É importante observar que os respectivos teores em cinzas individuais apresentam o seguinte comportamento: na faixa abaixo de 103 mm e nas densidades de 1,5 g/cm<sup>3</sup> a 2,0 g/cm<sup>3</sup> alcançam 20,60%; 39,86% e 53,97%, respectivamente, enquanto que em 9,5 mm e mesmas densidades, 18,76%; 38,36% e 62,07%, isto é, há redução discreta nesse teor até a densidade 1,8 g/cm<sup>3</sup>, aumentando significativamente na 2,0 g/cm<sup>3</sup>. Acredita-se que provavelmente a matéria carbonosa contida na matriz do subproduto analisado, quando cominuída a -9,5 mm libera-se parcialmente de seus contaminantes e que uma parte de sua massa desloca-se para a fração de menor granulometria (-2,0 mm +0,1 mm), tornando seu efeito pouco sentido na variação dos teores em cinzas, porém com maior impacto nas massas recuperáveis, como demonstrado na densidade 1,8 g/cm<sup>3</sup>, onde a recuperação individual passa de 14,84% (teor em cinzas 39,86%) para 4,76% (teor em cinzas 38,36%), redução de 10,08%. Como reflexo dessa característica, tem-se acréscimo relevante nos teores em cinzas e respectivas massas das porções afundadas em 9,5 mm, ou seja, 71,38%; 73,96%; 75,51% e 76,58% *versus* 64,42%; 69,63%; 76,31% e 79,07% da fração abaixo de 103 mm.

### **Comparando as faixas -9,5 mm +2,0 mm dos subprodutos Intermediário *versus* Rejeito 1 da Mina Butiá Leste**

Na análise comparativa entre os subprodutos Rejeito 1 (Tabela 34) e Intermediário da unidade Butiá Leste (Tabela 43), especificamente na densidade 1,8 g/cm<sup>3</sup>, observa-se que além de a recuperação mássica ter aumentado de 9,08% para 9,97% (acrécimo mínimo de 0,89%), o teor em cinzas decresce de 31,25% para 28,12% (redução de 3,13%), motivado pelos menores teores em cinzas individuais (não acumulados), nas densidades de corte 1,5 g/cm<sup>3</sup> e 1,8 g/cm<sup>3</sup>, que decaem de 21,10% e 41,46% para 18,76% e 38,36%, em ordem crescente de densidades, ratificando tratar-se de subproduto ainda com relevante fração carbonosa contida, uma vez que o Intermediário apresenta aumento na massa e na concentração em matéria orgânica. Pode-se verificar que a maior diferença entre os teores em

cinzas individualizados (não acumulados) dos afundados do Intermediário supera as mesmas diferenças entre os teores do Rejeito 1, vindo a determinar percentuais maiores no primeiro, haja vista suas participações individuais na massa total serem aproximadas e os teores dos afundados em  $2,2 \text{ g/cm}^3$  no Intermediário e Rejeito 1 serem, respectivamente, 76,58% e 73,73%.

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm** com participação de 26,71% na amostra total: na mesma densidade teórica de corte ( $1,8 \text{ g/cm}^3$ ), observa-se que a recuperação teórica acumulada na amostra total é apenas 6,11% com teor em cinzas acumulado de 23,57% (Tabela 44). A parcela afundada nessa densidade de corte representa 20,60% da massa total e contém teor em cinzas de 72,06%.

Tabela 44. Resultado do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, lote II – subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste.

Faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm (-9,5 mm)								
Faixa densimétrica ( $\text{g/cm}^3$ )	M a s s a					T e o r e m c i n z a s		
	na faixa granulométrica 100,0%			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	26,71%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	12,33	12,33	100,00	3,29	3,29	14,59	14,59	60,96
+1,5 -1,8	10,56	22,88	87,67	2,82	6,11	34,06	23,57	67,49
+1,8 -2,0	7,54	30,42	77,12	2,01	<b>8,13</b>	54,88	<b>31,33</b>	72,06
+2,0 -2,2	15,87	46,29	69,58	4,24	12,37	68,48	44,07	73,92
+2,2	53,71	100,00	53,71	14,35	26,71	75,53	60,96	75,53

#### **Comparando as faixas -2,0 mm +0,1 mm nas frações passante em 9,5 mm versus passante em 103 mm do subproduto Intermediário da Mina Butiá Leste**

A partir das Tabelas 40 e 44, podem-se comparar os parâmetros ‘recuperação versus teor em cinzas’ nos tamanhos 103 mm e 9,5 mm, nas densidades de corte mais favoráveis à obtenção do carvão CE-5200, a fim de se mensurarem suas alterações. Na densidade teórica de  $1,8 \text{ g/cm}^3$ , constata-se na faixa abaixo de 103 mm que a recuperação mássica é de apenas 1,44% com teor em cinzas de 23,49%, enquanto que em 9,5 mm, a massa recuperável aumenta para 6,11% (variação de 4,67%) e o teor em cinzas mantém-se sem alteração

significativa em seu percentual (23,57%), situando-se abaixo de 30%. Na avaliação dos mesmos parâmetros na densidade  $2,0 \text{ g/cm}^3$ , verifica-se que no material passante em 103 mm, a recuperação individual (não acumulada) tem acréscimo desprezível de 0,61%, contribuindo muito pouco para a massa acumulada que atinge 2,05% e o teor em cinzas eleva-se para 32,60%, enquanto que na granulometria menor (9,5 mm), a massa recuperável individual alcança 2,01%, determinando acréscimo na massa acumulada que totaliza 8,13% e com teor em cinzas de 31,33%, inferior ao anterior, mas superior ao percentual de 30%. Os teores em cinzas dos flutuados se aproximam nos subprodutos comparados, acarretando o mesmo comportamento nos teores dos afundados.

Salienta-se que mais uma vez o resultado obtido na fração abaixo de 9,5 mm indica as melhorias possíveis perdas operacionais da granulometria ora utilizada nas Plantas de Beneficiamento das unidades produtoras da COPELMI nas faixas e parâmetros estudados.

#### **Comparando as faixas -2,0 mm +0,1 mm nas frações passantes em 9,5 mm dos subprodutos Intermediário *versus* Rejeito 1 da Mina Butiá Leste**

Quando se comparam as faixas -2,0 mm +0,1 mm dos subprodutos Intermediário (Tabela 44) e Rejeito 1 (Tabela 35), ambos da Mina Butiá Leste e na granulometria 9,5 mm, observa-se grande proximidade entre os percentuais dos teores em cinzas de seus flutuados nas densidades de corte  $1,8 \text{ g/cm}^3$  e  $2,2 \text{ g/cm}^3$ , juntamente com o afundado em  $2,2 \text{ g/cm}^3$ , bem como pequena redução no mesmo parâmetro na densidade  $1,5 \text{ g/cm}^3$ , a favor do Rejeito 1, e na densidade  $2,0 \text{ g/cm}^3$  favorecendo o Intermediário. As massas recuperáveis não alteram muito entre si, com ligeira vantagem para o Intermediário, de tal forma que a melhor relação ‘recuperação teórica acumulada *versus* teor em cinzas acumulado’ está na densidade  $2,0 \text{ g/cm}^3$  (superior à densidade preferencial de  $1,8 \text{ g/cm}^3$ ), apresentando os respectivos percentuais de recuperação mássica de 8,13% e teor em cinzas de 31,33% *versus* 7,15% e teor de 33,95% (Rejeito 1). Comportamento semelhante se verifica nos teores em cinzas dos afundados que praticamente não variam.

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1mm) com participação de 97,58% na amostra total: na mesma densidade teórica de corte ( $1,8 \text{ g/cm}^3$ ), obtém-se uma recuperação teórica total ponderada de 16,08% com teor em cinzas total**

ponderado de 26,39%. A fração afundada em 1,8 g/cm<sup>3</sup> registra teor em cinzas de 73,48%, com participação de 81,50% na massa total (Tabela 45).

Tabela 45. Resultado total dos ensaios densimétricos e análises imediatas, faixa -9,5 mm +0,1 mm - subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste.

Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	TOTAL (-9,5 mm +0,1 mm)					
	M a s s a 97,58%			Teor em cinzas		
	Flutuado		Afund.	Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	8,50	8,50	97,58	17,14	17,14	65,72
+1,5 -1,8	7,58	<b>16,08</b>	89,09	36,76	<b>26,39</b>	70,36
+1,8 -2,0	9,04	25,12	81,50	60,47	38,65	73,48
+2,0 -2,2	19,97	45,09	72,47	71,98	53,41	75,11
+2,2	52,50	97,58	52,50	76,29	65,72	76,29
		2,42	Faixa -0,1 mm	67,13		

Na Figura 22 são apresentadas as curvas dos percentuais mássicos e dos teores em cinzas em função da densidade para os flutuados do subproduto Intermediário na faixa ensaiada.

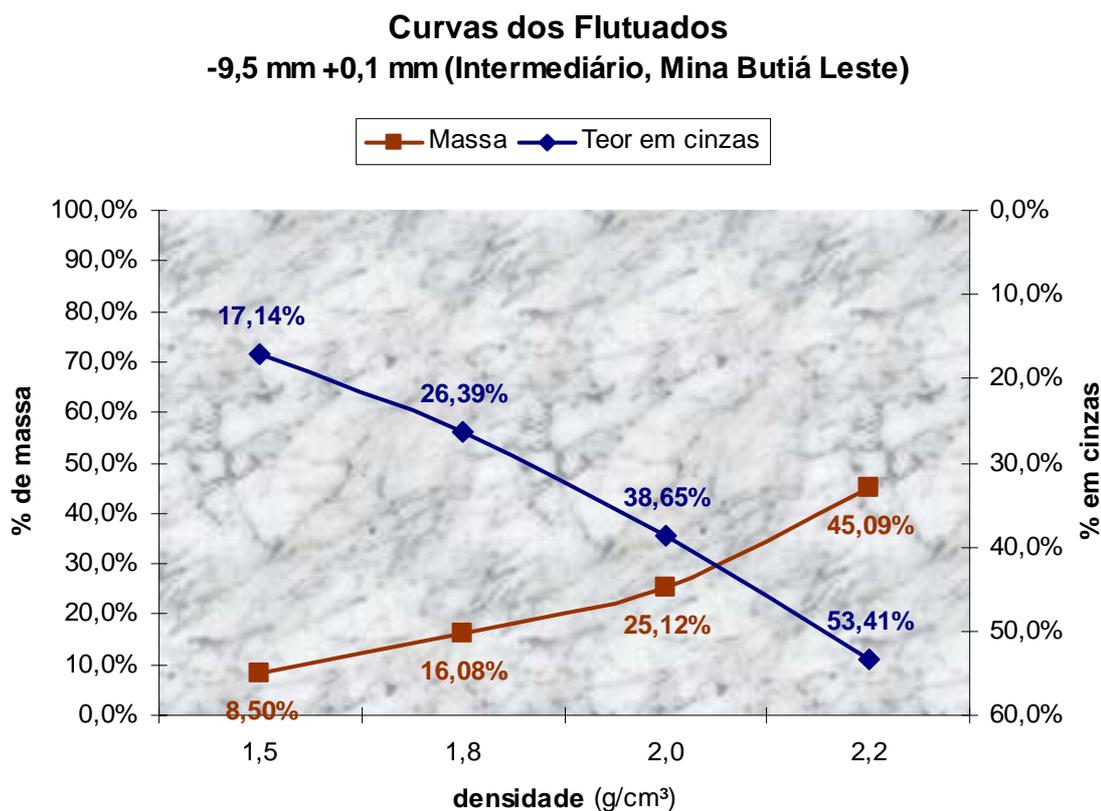


Figura 22. Curvas dos flutuados para a faixa -9,5 mm +0,1 mm do Intermediário, Mina Butiá Leste.

### **Confrontando os resultados totais ponderados das faixas passante em 9,5 mm *versus* passante em 103 mm do subproduto Intermediário da Mina Butiá Leste**

Na fração -9,5 mm (Tabela 45) e densidade de corte 1,8 g/cm<sup>3</sup>, o teor em cinzas situa-se ligeiramente abaixo dos 30% da operação original (CE-5200), embora a recuperação teórica tenha decrescido 8,24%, em relação à mesma densidade teórica de corte da amostra sem beneficiamento em laboratório (100% passante em 103 mm – Tabela 41). Como ponderação das frações anteriores, observa-se que o resultado total na granulometria 103 mm, comparado com 9,5 mm, praticamente se repete, prevalecendo o primeiro em termos de massa recuperável, porém cedendo espaço para o segundo (-9,5 mm), quando o parâmetro teor em cinzas é avaliado. Ainda na densidade de 1,8 g/cm<sup>3</sup> e mesma seqüência, constata-se que há uma contribuição individual (não acumulada) maior na recuperação mássica que atinge 15,50%, enquanto o mesmo parâmetro é de 7,58% (decrécimo de 7,92%), quando se comparam na ordem os tamanhos 103 mm e 9,5 mm. O diferencial situa-se no teor em cinzas

que é superior (32,52%) e inferior (26,39%) a 30%, respectivamente, redução de 6,13%. Acredita-se que a redução verificada no teor em cinzas e recuperação teórica se deva ao maior grau de liberação entre a matéria orgânica e ganga estabelecida em 9,5 mm, confirmada também pelo acréscimo dos teores em cinzas das frações afundadas e nos respectivos percentuais de massa, em relação à granulometria máxima de 103 mm.

Na presente avaliação, o resultado da fração abaixo 103 mm também se constitui satisfatório, haja vista que a relação ‘recuperação *versus* teor em cinzas’ perde um pouco na qualidade (32,52%), mas ganha na quantidade, transformando-se em boa alternativa, caso a obtenção do produto CE-5200 não seja prioritária.

#### **Confrontando os resultados totais ponderados das faixas passantes em 9,5 mm dos subprodutos Intermediário *versus* Rejeito 1 da Mina Butiá Leste**

Analisando as Tabelas 36 (Rejeito 1) e 45 (Intermediário), pode-se verificar a grande semelhança que há entre os resultados totais ponderados de ambos subprodutos. Especificamente na densidade de corte 1,8 g/cm<sup>3</sup>, o parâmetro recuperação mássica tem ligeiro acréscimo quando se compara Rejeito 1 com Intermediário, variando de 14,02% para 16,08% (acrécimo de 2,06%), bem como pequena alteração no teor em cinzas que decai de 28,65% para 26,39% (redução de 2,26%). Possivelmente o conjunto ‘recuperação *versus* teor em cinzas’ individualizado (não acumulado), na densidade preferencial de 1,8 g/cm<sup>3</sup>, tenha sido decisivo para a discreta melhoria no resultado ponderado do Intermediário, haja vista os respectivos percentuais variarem de 6,95% para 7,58% (massa recuperável), apresentando teor em cinzas decrescente de 39,14% para 36,76%, na mesma ordem de Rejeito 1 para Intermediário. Os teores em cinzas dos afundados são discretamente superiores no Intermediário, confirmando maior liberação da matéria carbonosa da inorgânica nesse subproduto.

#### **Confrontando os resultados totais ponderados das faixas passantes em 9,5 mm dos subprodutos Intermediário da Mina Butiá Leste *versus* Mina do Faxinal**

Quando o mesmo subproduto Intermediário produzido nas Minas Butiá Leste (Tabela 45) e do Faxinal (Tabela 28) se relacionam, podem-se verificar diferenças entre os parâmetros de recuperação teórica e teor em cinzas estudados. Confirma-se nos resultados

totais ponderados apresentados na seqüência a superioridade do subproduto Intermediário produzido na Mina Butiá Leste em relação ao análogo da Mina do Faxinal, semelhante ao que ocorrera na comparação envolvendo os subprodutos Rejeito 1, porém com acentuada vantagem no teor em cinzas observado na densidade de corte  $1,8 \text{ g/cm}^3$ , que na mesma ordem seqüencial alcança 26,39% *versus* 35,60%, enquanto suas recuperações mássicas se confundem (16,13% e 16,08%). Há maior variação na recuperação teórica entre os subprodutos das duas unidades produtivas, quando se relacionam a ‘primeira combinação’ do Intermediário da Mina Butiá Leste (Tabela 46 seguinte) com teor em cinzas próximo a 30% (29,56%) e massa recuperável de 18,10% contra o teor de 35,60% e massa de 16,13% do mesmo subproduto procedente do Faxinal. Constata-se que os teores em cinzas dos afundados diferem-se, variando mais intensamente a partir da densidade  $1,8 \text{ g/cm}^3$  com percentuais mais elevados no subproduto da Mina do Faxinal.

#### **4.4.2.2.2. Combinações de recuperação teórica e teores em cinzas por faixa granulométrica *versus* recuperação teórica total e teor em cinza total em densidades de corte distintas no lote II do subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste**

Buscando otimizar a relação ‘recuperação *versus* teor em cinzas’ até aqui estudada, pesquisa-se alternativa mais promissora nas combinações possíveis e comentadas na seqüência (Tabela 46).

##### **Primeira Combinação**

**Fração granulométrica -9,5mm +2,0mm:** mantém-se na densidade teórica de corte de  $1,8 \text{ g/cm}^3$ , recuperação teórica de 9,97% e teor em cinzas acumulado de 28,12%;

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm:** na densidade teórica de corte de  $2,0 \text{ g/cm}^3$ , considera-se a recuperação teórica de 8,13% e teor em cinzas acumulado de 31,33%.

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1mm) na combinação estudada:** na ponderação dessas frações, obtém-se uma recuperação teórica total de 18,10 %, acréscimo de 2,02% em relação ao resultado total da situação original (Tabela 45), e teor em cinzas 29,56%, atendendo o percentual almejado (30%) da operação CE-5200. O referido conjunto de parâmetros transforma a relação ‘recuperação *versus* teor em

cinzas' na melhor alternativa quando se busca o teor de 30%, respaldado pela maior recuperação mássica para a granulometria em análise.

Tabela 46. Combinações de faixas granulométricas e densimétricas, na fração abaixo de 9,5 mm, subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste.

Subproduto	100% abaixo de (mm)	Combinação	Faixas granulométricas combinadas						TOTAL (ponderado)	
			-9,5 mm + 2,0 mm			-2,0 mm + 0,1 mm			Recup.	Cinzas
			Dens.	Recup.	Cinzas	Dens.	Recup.	Cinzas		
			(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(%)	(%)
Intermediário Mina Butiá Leste	9,5	1ª	1,8	9,97	28,12	2,0	8,13	31,33	18,10	29,56
		2ª				2,2	12,37	44,07	22,34	36,95

### Segunda Combinação

**Fração granulométrica -9,5 mm +2,0 mm:** mantém-se na densidade teórica de corte de 1,8 g/cm<sup>3</sup>, recuperação teórica de 9,97% e teor em cinzas acumulado de 28,12%;

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm:** na densidade teórica de corte de 2,2 g/cm<sup>3</sup>, considera-se a recuperação teórica de 12,37% e teor em cinzas acumulado de 44,07%.

**Total das duas frações granulométricas anteriores (desprezada a parcela -0,1 mm) na combinação estudada:** na ponderação dessas frações, obtém-se uma recuperação teórica total de 22,34%, acréscimo de 6,26% em relação ao resultado da situação original (Tabela 45), porém com teor em cinzas de 36,95%, o que não atende o percentual almejado (30%) da operação CE-5200, mas poderá ser considerado, caso haja mercado favorável para esse produto ou interesse que o mesmo integre *blending* com outros produtos.

#### **4.4.2.3. Amostra cominuída a -2,0 mm em laboratório (Lote III)**

A Tabela 47 apresenta o balanço metalúrgico do subproduto Intermediário com granulometria reduzida a -2,0mm (100% passante em 2,0 mm), a classificação granulométrica desse produto nas peneiras 2,0 mm e 0,1 mm, e os ensaios de afunda-flutua nas mesmas densidades anteriores (1,5 g/cm<sup>3</sup>, 1,8 g/cm<sup>3</sup>, 2,0 g/cm<sup>3</sup> e 2,2 g/cm<sup>3</sup>):

#### **Recuperação teórica total *versus* teor em cinzas total das faixas granulométricas estudadas no lote III do subproduto Intermediário1, Mina Butiá Leste**

**Fração granulométrica -2,0 mm +0,1 mm (desprezada a fração -0,1 mm)** com participação de 87,62% na amostra total: observa-se na mesma tabela e faixa granulométrica -2,0 mm + 0,1 mm que, na busca do teor em cinzas próximo a 30%, a densidade teórica de corte aumenta para 2,0 g/cm<sup>3</sup>, a recuperação teórica atinge 22,61%, com teor em cinzas de 31,66%, superiores aos 18,10% e 29,56% calculados, respectivamente, na primeira combinação da amostra cominuída a -9,5 mm, resultado mais promissor até então. A fração respectiva afundada apresenta teor em cinzas de 74,44%, participando com 65,01% na massa total.

Se a fração -2,0 mm fosse usualmente aplicada em operações de beneficiamento, os valores de massa recuperável e teor em cinzas encontrados seriam válidos.

Tabela 47. Resultado total do ensaio densimétrico e análise imediata na faixa granulométrica -2,0 mm + 0,1 mm – subproduto Intermediário, Mina Butiá Leste.

TOTAL (-2,0 mm +0,1 mm)								
Faixa densimétrica (g/cm <sup>3</sup> )	M a s s a					Teor em cinzas		
	na faixa granulométrica			na amostra total		na faixa granulométrica		
	Flutuado		Afundado	87,62%		Flutuado		Afund.
	(%)	acum. (%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	(%)	acum. (%)	acum. (%)
-1,5	9,92	9,92	100,00	8,69	8,69	13,68	13,68	63,40
+1,5 -1,8	8,55	18,47	90,08	7,49	16,18	31,99	22,15	68,87
+1,8 -2,0	7,34	25,81	81,53	6,43	22,61	55,56	31,66	72,74
+2,0 -2,2	17,60	43,40	74,19	15,42	38,03	67,80	46,31	74,44
+2,2	56,60	100,00	56,60	49,59	87,62	76,50	63,40	76,50
Faixa granulométrica -0,1 mm					12,38	61,65		

### Confrontando os resultados das faixas -2,0 mm +0,1 mm nos lotes I, II e III do subproduto Intermediário da Mina Butiá Leste

Especificamente na faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm, presente em todos os lotes examinados, a exemplo do resultado no subproduto Rejeito 1, constata-se que a participação de cada uma na massa total cresce de 6,62% (Tabela 40), para 26,71% (Tabela 44) e 87,62% (Tabela 47), na seqüência do menor para o maior lote. Ainda na mesma ordem, as recuperações mássicas (flutuados), também influenciadas pela participação na massa total, crescem nas densidades 1,5 g/cm<sup>3</sup> até 2,2 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, de 0,78%; 1,44%; 2,05% e 2,97% para 3,29%; 6,11%; 8,13% e 12,37% e por fim 8,69%; 16,18%; 22,61% e 38,03%. Na avaliação do parâmetro teor em cinzas, pode-se observar nas densidades e lotes considerados que os percentuais dos flutuados apresentam discreta variação da fração -103 mm para -9,5 mm (excepcionalmente na densidade 1,8 g/cm<sup>3</sup>, pois se confundem), reduzindo ligeiramente o teor quando se vai de -9,5 mm para -2,0 mm, nas duas primeiras densidades de corte. Detendo-se na faixa -2,0 mm +0,1 mm gerada na redução a -9,5 mm, constata-se, em relação à fração abaixo de 2,0 mm, que o teor em cinzas acumulado é superior, mesmo que de modo discreto, nas densidades 1,5 g/cm<sup>3</sup> e 1,8 g/cm<sup>3</sup>, porém confundindo-se na densidade 2,0 g/cm<sup>3</sup>, quando na fração -2,0 mm sua contribuição mássica individual (não acumulada) atinge 6,43% com teor igualmente individualizado de 55,56% *versus* apenas 2,01% e teor 54,88% nas granulometrias abaixo de 9,5 mm. Mesmo que a faixa

-2,0 mm +0,1 mm esteja presente em ambas frações (-9,5 mm e -2,0 mm), cabe ressaltar que a liberação da matéria orgânica da inorgânica é mais acentuada em 2,0 mm, em virtude de sua elevada participação (87,62% passante em 2,0 mm) na massa total contra 26,71% em 9,5 mm (70,87% restantes encontram-se na faixa -9,5 mm +2,0 mm), fato que justifica a superioridade de 14,48% na recuperação mássica sem penalizar o teor em cinzas que apresenta 31,66% na porção abaixo de 2,0 mm.

Na comparação das frações menores que 9,5 mm e 2,0 mm do subproduto em análise, deve-se ressaltar que os teores em cinzas dos afundados, em cada densidade e na faixa específica, situam-se muito próximos, mantendo a lógica dos teores dos flutuados que não se alteram significativamente.

## 5. COMENTÁRIOS FINAIS

### 5.1. CONCLUSÕES

Tendo por objetivo a recuperação de carvões a partir do reprocessamento de rejeitos carbonosos gerados nas operações de beneficiamento das Minas do Faxina e Butiá Leste, e a conseqüente avaliação das perdas operacionais envolvidas nesses processos, baseadas nos resultados teóricos apresentados e discutidos no item 4, constata-se que os subprodutos estudados demonstram comportamentos distintos, quando em laboratório avaliam-se suas características de lavabilidade.

Pode se observar a existência de carvões energéticos aceitáveis remanescentes nos subprodutos estudados, de proporções variadas em massa e teor carbonoso, possíveis de recuperação em circuito convencional de beneficiamento, desde que adaptado às características de lavabilidade de cada subproduto.

Evidencia-se, com base nos critérios adotados na avaliação dos teores em cinzas (30%) e recuperação mássica (mínima de 12%), que os subprodutos gerados na Mina do Faxinal apresentam maior concentração da fração inorgânica, resultando produtos com teores em cinzas totais ponderados superiores a 30%, embora suas recuperações teóricas situem-se acima de 15%.

Da mesma forma, no que se refere aos subprodutos procedentes da Mina Butiá Leste, observa-se maior percentual de matéria orgânica contida nas matrizes carbonosas, gerando produtos com teores em cinzas abaixo de 30% e recuperações mássicas teóricas próximas a 15%.

É fundamental salientar os parâmetros operacionais preferenciais que no decorrer dos ensaios tornaram-se evidentes, devendo ser aplicados, respeitadas as peculiaridades de cada subproduto, com a finalidade de viabilizar seus reprocessamentos e resultados alcançados, elencados a seguir:

- a) 100% da massa passante em 9,5 mm, melhor grau de liberação entre a matéria carbonosa e o contaminante inorgânico, bem como aplicabilidade operacional no beneficiamento;
- b) Faixa granulométrica -9,5 mm +2,0 mm para tratamento em jig e -2,0 mm +0,1 mm em espirais concentradoras ou equipamento para concentração de finos afim; e
- c) Densidades teóricas de corte de 1,8 g/cm<sup>3</sup> para o reprocessamento das frações superiores a 2 mm, e 1,5 g/cm<sup>3</sup>; 1,8 g/cm<sup>3</sup> e 2,0 g/cm<sup>3</sup> para as frações finas (-2 mm), determinando as maiores recuperações teóricas e mantendo os teores em cinzas próximos a 30%.

Somente na ‘terceira combinação’ das duas faixas granulométricas (ponderadas), a partir do subproduto Rejeito 1 da Mina do Faxinal, produz-se carvão CE-5200. O subproduto Intermediário procedente da mesma Mina, em virtude dos teores em cinzas dos seus produtos situarem-se acima de 30%, como já comentado, pode ser uma boa alternativa para a obtenção de carvões com poderes caloríficos levemente inferiores, tais como carvão CE-4700 (teor em cinzas de 35%) de aceitação comercial.

Referente aos subprodutos gerados na operação de beneficiamento da Mina Butiá Leste, pode-se obter o carvão CE-5200 a partir de ambos com recuperações teóricas razoáveis (em torno de 15%). Como afirmado anteriormente, ressalta-se o maior teor de matéria orgânica residual nos subprodutos, sendo mais acentuado no Intermediário que, excepcionalmente, possibilita a produção de carvão com poder calorífico pouco abaixo de 5200 kcal/kg e recuperação acima de 20%, na granulometria máxima de 103 mm.

A Tabela 48 apresenta, de forma resumida, os principais parâmetros operacionais nas respectivas faixas granulométricas que avalizam a produção de carvões energéticos no equipamento de jigagem e em circuito de finos, dentro da peculiaridade de cada subproduto e segundo os resultados teóricos obtidos, contemplando as combinações mais promissoras que utilizam densidades de corte distintas.

Tabela 48. Resumo dos principais parâmetros operacionais para tratamento de grossos e finos e combinações alternativas entre faixas granulométricas dos subprodutos estudados para viabilização de seu reprocessamento.

SUBPRODUTO	100% passante em (mm)	Combinação	FAIXAS GRANULOMÉTRICAS ESTUDADAS						RESULTADO (ponderado)	
			-9,5 mm + 2,0 mm *			-2,0 mm + 0,1 mm			Recup. (%)	Cinzas (%)
			Dens.	Recup.	Cinzas	Dens.	Recup.	Cinzas		
			(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(%)	(%)
<b>Rejeito 1</b> Mina do Faxinal	9,5	---	1,8	11,56	34,44	1,8	6,18	25,94	17,74	31,48
		3ª				1,5	3,27	13,27	14,83	29,77
<b>Intermediário</b> Mina do Faxinal	9,5	---	1,8	9,98	39,95	1,8	6,15	28,56	16,13	35,60
<b>Rejeito 1</b> Mina Butiá Leste	9,5	---	1,8	9,08	31,25	1,8	4,94	23,89	14,02	28,65
		Única				2,0	7,15	33,95	16,23	32,44
<b>Intermediário</b> Mina Butiá Leste	9,5	---	1,8	9,97	28,12	1,8	6,11	23,57	16,08	26,39
		1ª				2,0	8,13	31,33	18,10	29,56
	103	---	1,8	22,88	33,09	1,8	1,44	23,49	24,32	32,52

(\*) Na granulometria 100% abaixo de 103 mm, esta faixa refere-se a -103 mm +2,0 mm.

Analisando-se os resultados constantes na Tabela 48, pode-se concluir que:

1. É possível produzir carvão CE-5200 a partir do subproduto Rejeito 1 da Mina do Faxinal com recuperação mássica teórica de 14,83% (superior a 12%), utilizando-se a densidade teórica de corte 1,8 g/cm<sup>3</sup> na operação de jigagem (fração -9,5 mm +2,0 mm) e densidade 1,5 g/cm<sup>3</sup> no ajuste operacional das espirais concentradoras (-2,0 mm), existentes na Planta de beneficiamento local. Havendo necessidade de se priorizar a produção de carvão energético em detrimento de um poder calorífico inferior, mas bem próximo a 5200 kcal/kg (teor em cinzas de 31,48%), a opção que se utiliza das densidades teóricas de corte 1,8 g/cm<sup>3</sup> para aplicação em jigagem e operação das espirais concentradoras parece suprir essa demanda, contemplando recuperação teórica ligeiramente superior de 17,74%. Ressalta-se o teor em cinzas do produto a ser gerado na operação de jigagem que apresenta percentual superior a 30% (34,44%), devendo ser blendado com a fração mais fina após o tratamento em espirais concentradoras, aumentando o teor carbonoso do *mix* (ou *blending*) e possibilitando, dessa forma, sua comercialização.

2. O subproduto Intermediário proveniente da Mina do Faxinal apresenta sérias restrições para a obtenção de carvão com características próximas do CE-5200, a partir de sua matriz pouco carbonosa, possibilitando apenas a produção de carvão com poder calorífico inferior, ou seja, CE-4700, teor em cinzas de 35,60% e recuperação mássica teórica de 16,13%. Constata-se, a exemplo do subproduto Rejeito 1 de mesma procedência, que a fração a ser beneficiada em jigue apresenta maior teor em matéria inorgânica (39,95%) do que 30%, sendo imperativo que seu produto junte-se ao carvão tratado em espirais concentradoras, objetivando redução relevante no teor em cinzas do *mix* final, possibilitando então seu aproveitamento comercial.
3. Referente ao subproduto Rejeito 1, agora procedente da Mina Butiá Leste, observa-se a possibilidade de se obter carvão CE-5200 com teor em cinzas ligeiramente abaixo de 30% (28,65%) e recuperação teórica de 14,02%, quando a densidade teórica de corte de 1,8 g/cm<sup>3</sup> é empregada nos circuitos de graúdos (jigue) e finos (espirais concentradoras). A blendagem das frações graúda e fina faz-se necessário no Rejeito 1 em questão, a fim de que se alcancem a recuperação mássica teórica e teor acima referenciados. A partir do subproduto analisado ainda há a alternativa de se produzir carvão com maior recuperação teórica (16,23% *versus* 14,02%, variação de 2,21%), porém com teor em cinzas pouco superior a 30%, para fins estratégicos na obtenção de outros produtos comerciais.
4. Na análise do subproduto Intermediário oriundo da Mina Butiá Leste, encontra-se o melhor resultado total ponderado ‘recuperação *versus* teor em cinzas’, em relação aos demais estudados. Na combinação que utiliza a densidade teórica de corte de 1,8 g/cm<sup>3</sup> na jigagem da fração grosseira (+2,0 mm) e 2,0 g/cm<sup>3</sup> para a concentração da fina (-2,0 mm) em espirais, obtém-se recuperação mássica teórica de 18,10% e teor em cinzas 29,56%, praticamente o valor almejado. Alternativamente, mantendo-se a mesma densidade de corte 1,8 g/cm<sup>3</sup> em ambos os circuitos (graúdo + fino), é possível a produção de carvão com teor em cinzas inferior a 30% (26,39%), e recuperação teórica de 16,08%, embora menor em massa que na referida combinação. Esse produto poderia integrar *blending* com carvões menos favorecidos em teor carbonoso, ‘produzindo’ carvões com poder calorífico mais adequado e vultosa recuperação mássica. Por fim, verifica-se que alternativamente, em função de seu maior conteúdo carbonoso residual, é possível também produzir carvão com poder calorífico

discretamente inferior a 5200 kcal/kg, teor em cinzas de 32,52%, porém com maior recuperação mássica teórica até então (24,32%), na fração -103 mm, aliás, a única opção proveitosa na granulometria em questão. A vantagem maior dessa opção (fração 100% abaixo de 103 mm) situa-se na recuperação mássica, contrastando com o teor em cinzas da fração graúda que atinge 33,09% e a contribuição mássica ínfima da porção -2,0 mm (1,44%).

Os carvões resultantes do reprocessamento dos subprodutos provenientes na Mina Butiá Leste, devido ao maior conteúdo carbonoso existente, permitem ainda a blendagem de suas alternativas combinadas, aproximando mais seus teores em cinzas do limítrofe com elevação da massa recuperável. Pode-se constituir *mix* da operação conjunta das frações acima e abaixo de 2,0 mm na densidade 1,8 g/cm<sup>3</sup> do Rejeito 1, juntamente com a primeira combinação do Intermediário, produzindo carvão com teor em cinzas de 29,16% e massa recuperável de 32,12%, o equivalente a 7,56% da massa total que alimenta a planta de beneficiamento atual  $[(37\% \times 0,1402) + (17\% \times 0,181)]$ . Embora a blendagem dos carvões gerados no reprocessamento dos subprodutos procedentes da Mina do Faxinal não produzam o carvão CE-5200, em função do teor em cinzas do Intermediário estar acima de 30%, essa operação não deve ser descartada, uma vez que pode atender o mercado de carvão CE-4700.

As conclusões expostas até aqui, baseadas nos resultados estudados, bom senso e na promessa de melhor reaproveitamento de carvões remanescentes nos subprodutos, ora refugados, não se esgotam no presente trabalho, haja vista o tema ser novo e extenso.

Uma criteriosa análise de viabilidade econômica do reprocessamento aqui discutido faz-se indispensável para a determinação de sua implantação a nível industrial nas unidades produtoras da COPELMI.

Por fim, nos apêndices, analisa-se o impacto ocorrido nas receitas das Minas do Faxinal e Butiá Leste, a partir de cenários nos quais outros carvões existentes nos subprodutos são aproveitados na operação de reprocessamento, e ilustra-se o balanço metalúrgico proposto no reprocessamento do subproduto Intermediário da Mina Butiá Leste, considerando o resultado da ‘primeira combinação’, por se tratar do mais promissor na produção do CE-5200.

## 5.2. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Por oportuno cabe sugerir, na presente seção, que os estudos elencados a seguir sejam realizados objetivando complementar e dar suporte ao trabalho iniciado aqui.

É fundamental que se realize, como já comentado, a análise de viabilidade econômica do reprocessamento aqui tratado para embasar decisão criteriosa sobre sua implantação nas unidades produtoras da COPELMI Mineração, haja vista haver grande quantidade dos subprodutos estocados, determinando maior credibilidade ao estudo. Confirmada a viabilidade esperada, os resultados obtidos e revelados no estudo seriam aproveitados e propiciariam ganhos, na medida em que recuperariam carvões (fonte de energia não renovável) atualmente refugados, e reduziriam custos de manuseio pós-tratamento dos rejeitos, agora produzidos em menor volume (transporte, deposição e acondicionamento sem riscos ao meio circundante), bem como amenizariam os impactos ao ambiente, não apenas pela retirada da fração combustível contida no rejeito, mas pela possibilidade de maiores investimentos na prevenção de riscos ambientais motivada pelo acréscimo no lucro obtido.

Findo o trabalho de caracterização dos subprodutos gerados na operação de beneficiamento para a obtenção do produto (principal) CE-5200, torna-se evidente pelos resultados apresentados dar-se continuidade e complementação ao tema, aplicando a mesma sistemática na análise do comportamento do carvão CE-5200, quando testada a totalidade da massa na granulometria abaixo de 9,5 mm. Com este estudo seriam avaliados os parâmetros ‘recuperação *versus* teor em cinzas’, após a redução na granulometria original, analisando-se as perdas do processo atual bem como os demais aspectos técnicos envolvidos, vislumbrando a otimização do tratamento na busca por resultados mais promissores. Confirmando-se a melhoria dos parâmetros quando se reduz o carvão lavado 100% abaixo de 9,5 mm, a exemplo dos subprodutos, poder-se-iam produzir novos tipos de carvões com maior poder calorífico dentro de recuperações mássicas significativas, além de gerar subprodutos com reduzido teor carbonoso com vantagens financeira e ambiental.

## REFERÊNCIAS

- Luz da, A.B., Sampaio, J.A., Almeida de, S.L.M. **Tratamento de Minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MVT, 2004. 867 p.
- Miltzarek, G.L. **Estudo Organo-petrográfico e Organo-geoquímico das Frações de Beneficiamento do Carvão da Jazida do Faxinal, Arroio dos Ratos, RS**. Dissertação (Mestrado em Geociências). Curso de Pós-Graduação em Geociências. Porto Alegre, 1991.
- Müller, A.A., coord. **Perfil Analítico do Carvão**. 2. ed. Porto Alegre: DNPM, 1987. 140 p., il. (DNPM. Boletim, 6)
- Rubio, J. **Carvão Mineral**. Porto Alegre: Nova Linha Artes Gráficas, 1988. v 1. 240 p.
- Sampaio, C.H., Tavares, L.M.M. **Beneficiamento Gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade**. 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 603 p.
- DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral, **Anuário Mineral Brasileiro 2006** (ano-base 2005). Parte I - Estatística Brasil. Disponível no site: [http://www.dnpm.gov.br/portal/assets/galeriaDocumento/AMB2006/I\\_2006.pdf](http://www.dnpm.gov.br/portal/assets/galeriaDocumento/AMB2006/I_2006.pdf) Acesso em: 15 de junho de 2007.
- MME – Ministério das Minas e Energia, **Plano Nacional de Energia 2030**. Disponível no site: <http://www.mme.gov.br/download.do?attachmentId=6762&download>. Acesso em: 19 de junho de 2007.

ANEXO I

## **SUGESTÕES PARA A OBTENÇÃO DE OUTROS CARVÕES BASEADOS NOS RESULTADOS DO ESTUDO**

Neste apêndice, analisam-se combinações das faixas -9,5 mm +2,0 mm e -2,0 mm +0,1 mm (desprezando-se a fração -0,1 mm), fracionadas em densidades diferentes e geradas a partir de um reprocessamento estimado dos subprodutos, para a obtenção de outros carvões, além do CE-5200, de poder calorífico inferior, porém com ênfase no acréscimo da massa recuperável. Nessa análise vislumbra-se aumento nas receitas anuais das unidades produtoras, mesmo que a partir de recuperações teóricas, por ocasião da possível comercialização de carvões energéticos tipo CE-4700 e CE-4200 nos mercados existentes ou na busca de novos e de maior abrangência.

### **a) Período anual possível para reprocessamento dos subprodutos**

O período destinado ao reprocessamento deve seguir o regime de operacional de cada unidade, ou seja, três turnos de 8 horas para o lavador do Faxinal e turnos de 12 horas e 8 horas para o beneficiamento do Butiá Leste, ambos seis dias por semana. Sendo assim, operando 52 semanas têm-se 312 dias possíveis de processamento no ano. Considerando ainda 11 dias de feriados e quatro dias de paradas e interrupções não previstas anualmente, chega-se ao total de 297 dias. Abatendo-se 0,6 hora de intervalo para refeições e 0,2 hora nas trocas de turno em cada turno de 8 horas (3 x 0,6 h + 2 x 0,2 h), obtém-se 21,8 horas possíveis de operação por dia no reprocessamento na Mina do Faxinal e 17,8 horas (3 x 0,6 h + 0,2 h) na Mina Butiá Leste, perfazendo um total de 6.474,6 e 5.286,6 horas anuais, respectivamente. Por fim, aplicando uma eficiência operacional estimada de 85% para as usinas de beneficiamento, os respectivos totais são alterados para 5.503 h e 4.494 h.

### **b) Capacidade horária dos circuitos de graúdos e finos do reprocessamento**

Com base na capacidade horária das plantas de beneficiamento em operação nas minas da COPELMI e respectivas recuperações no mesmo processo dos subprodutos estudados, apresentam-se as estimativas para o reprocessamento da faixa -9,5 mm +2,0 mm em jigues e da faixa -2,0 mm em espirais tanto para os subprodutos da Mina do Faxinal como da Mina Butiá Leste.

A Tabela 49 apresenta os cálculos das capacidades horárias esperadas para o reprocessamento do Rejeito 1 e Intermediário, segundo suas participações na massa total do carvão que abastece os jigues e nas faixas granulométricas adotadas, considerando ainda as mesmas taxas de alimentação do beneficiamento atual em cada unidade produtora.

Tabela 49. Taxas teóricas de reprocessamento dos subprodutos por Mina.

Subproduto	Capacidade horária do beneficiamento atual	Participação na alimentação do beneficiamento	Taxa de reprocessam.
			t/h
<b>Rejeito 1</b> Mina do Faxinal	200 t/h	42%	84,0
<b>Intermediário</b> Mina do Faxinal	200 t/h	22%	44,0
<b>Rejeito 1</b> Mina Butiá Leste	350 t/h	32%	112,0
<b>Intermediário</b> Mina Butiá Leste	350 t/h	17%	59,5

**c) Combinações entre as faixas granulométricas para a obtenção dos carvões CE-4700, CE-4200 e ainda CE-5200**

▪ **Carvão CE-4700**

Nas combinações seguintes (Tabelas 50 e 51), apresentam-se as recuperações mássicas dos carvões existentes, quando os teores em cinzas individualizados e ponderados, a partir dos fracionamentos granulométricos e densimétrico, atingem o percentual especificado para o carvão energético tipo CE-4700, ou seja, 35% (ver Tabela 2).

Tabela 50. Produção de carvão CE-4700 a partir dos subprodutos da Mina do Faxinal.

CARVÃO CE 4700 (35% c.b.s.)								
Subproduto	Faixas granulométricas combinadas						TOTAL (ponderado)	
	-9,5 mm +2,0 mm			-2,0 mm +0,1 mm			Recup. (%)	Cinzas (%)
	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	Recup. (%)	Cinzas (%)	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	Recup. (%)	Cinzas (%)		
Rejeito 1	1,8	11,56	34,44	2,0	9,14	36,89	20,70	35,52
Intermediário	1,8	9,98	39,95	1,8	6,15	28,56	16,13	35,60
Total em relação ao R.O.M.							<b>12,24</b>	<b>35,54</b>

Observa-se da Tabela 50 que teoricamente 12,24% da massa total que alimenta a planta de tratamento atual  $[(42\% \times 0,207) + (22\% \times 0,1613)]$  refere-se aos subprodutos (Rejeito 1 + Intermediário) procedentes da Mina do Faxinal (8,69% e 3,55%, na mesma ordem), com teor em cinzas ponderado ligeiramente acima de 35% (35,54%), sendo possível a partir desta blendagem produzir-se carvão tipo CE-4700.

Tabela 51. Produção de carvão CE-4700 a partir dos subprodutos da Mina Butiá Leste.

CARVÃO CE 4700 (35% c.b.s.)								
Subproduto	Faixas granulométricas combinadas						TOTAL (ponderado)	
	-9,5 mm +2,0 mm			-2,0 mm +0,1 mm			Recup. (%)	Cinzas (%)
	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	Recup. (%)	Cinzas (%)	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	Recup. (%)	Cinzas (%)		
Rejeito 1	1,8	9,08	31,25	2,0	7,15	33,95	16,23	32,44
Intermediário	1,8	9,97	28,12	2,2	12,36	44,07	22,33	36,95
Total em relação ao R.O.M.							<b>8,99</b>	<b>34,35</b>

Da Tabela 51, constata-se no resultado total dos subprodutos Rejeito 1 e Intermediário procedentes da Mina Butiá Leste que a recuperação mássica decaiu para 8,99% da massa total que abastece o jigge (5,19% e 3,80%, respectivamente), em função de menor participação de cada subproduto no R.O.M. (32% e 17%, respectivamente) com teor em cinzas abaixo de 35%, possibilitando a obtenção do carvão CE-4700.

▪ **Carvão CE-4200**

Com o mesmo procedimento adotado na pesquisa do carvão CE-4700, buscaram-se nos teores em cinzas próximos de 40% (Tabelas 52 e 53), percentual especificado para o carvão CE-4200, as respectivas recuperações mássicas desse produto, identificando as combinações mais promissoras.

Tabela 52. Produção de carvão CE-4200 a partir dos subprodutos da Mina do Faxinal.

<b>CARVÃO CE 4200 (40% c.b.s.)</b>								
<b>Subproduto</b>	<b>Faixas granulométricas combinadas</b>						<b>TOTAL</b> (ponderado)	
	<b>-9,5 mm +2,0 mm</b>			<b>-2,0 mm +0,1 mm</b>			Recup. (%)	Cinzas (%)
	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	Recup. (%)	Cinzas (%)	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	Recup. (%)	Cinzas (%)		
Rejeito 1	---	---	---	---	---	---	---	---
Intermediário	1,8	9,98	39,95	2,0	9,65	39,55	19,63	39,75
Total em relação ao R.O.M.							<b>4,32</b>	<b>39,75</b>

Tendo em vista que o subproduto Rejeito 1 não apresenta teor em cinzas próximo ao especificado para o carvão CE-4200, esse não está indicado na Tabela 52. Quanto ao Intermediário, obtém-se carvão com teor em cinzas de 40% e massa de 4,32% em relação ao total que ingressa no beneficiamento.

Tabela 53. Produção de carvão CE-4200 a partir dos subprodutos da Mina Butiá Leste.

<b>CARVÃO CE 4200 (40% c.b.s.)</b>								
<b>Subproduto</b>	<b>Faixas granulométricas combinadas</b>						<b>TOTAL</b> (ponderado)	
	<b>-9,5 mm +2,0 mm</b>			<b>-2,0 mm +0,1 mm</b>			Recup. (%)	Cinzas (%)
	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	Recup. (%)	Cinzas (%)	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	Recup. (%)	Cinzas (%)		
Rejeito 1	1,8	9,08	31,25	2,2	11,31	46,59	20,39	39,76
Intermediário	2,0	16,99	42,16	2,0	8,13	31,33	25,12	38,65
Total em relação ao R.O.M.							<b>10,79</b>	<b>39,32</b>

Conforme Tabela 53, verifica-se a possibilidade de produção do carvão CE-4200 (teor em cinzas de 39,32%) com massa recuperável de 10,79% do total de carvão que alimenta a planta de concentração.

▪ **Carvão CE-5200**

Tendo por objetivo quantificar na seqüência as cifras advindas da recuperação do carvão CE-5200, a partir dos subprodutos originados na mesma operação, apresentam-se nas Tabelas 54 e 55 as perspectivas de produção em cada Mina.

Tabela 54. Produção de carvão CE-5200 a partir dos subprodutos da Mina do Faxinal.

<b>CARVÃO CE 5200 (30% c.b.s.)</b>								
<b>Subproduto</b>	<b>Faixas granulométricas combinadas</b>						<b>TOTAL</b> (ponderado)	
	<b>-9,5 mm +2,0 mm</b>			<b>-2,0 mm +0,1 mm</b>			<b>Recup.</b> (%)	<b>Cinzas</b> (%)
	<b>Dens.</b> (g/cm <sup>3</sup> )	<b>Recup.</b> (%)	<b>Cinzas</b> (%)	<b>Dens.</b> (g/cm <sup>3</sup> )	<b>Recup.</b> (%)	<b>Cinzas</b> (%)		
Rejeito 1	1,8	11,56	34,44	1,5	3,27	13,27	14,83	29,77
Intermediário	---	---	---	---	---	---	---	---
Total em relação ao R.O.M.							<b>6,23</b>	<b>29,77</b>

Conforme a Tabela 48, o subproduto Intermediário da Mina do Faxinal não apresenta teor em cinzas próximo a 30% para produzir o carvão desejado. Do Rejeito 1 apenas recupera-se carvão CE-5200 na ponderação das faixas -9,5 mm +2,0 mm e -2,0 mm com teor de 29,77% e massa de 6,23% em relação à participação no carvão R.O.M..

O resultado das combinações dos subprodutos gerados na Mina Butiá Leste apresentado na Tabela 55 é mais favorável, devido à participação do Intermediário, elevando a recuperação mássica para 7,56% do total processado com teor em cinzas abaixo dos 30%.

Tabela 55. Produção de carvão CE-5200 a partir dos subprodutos da Mina Butiá Leste.

CARVÃO CE 5200 (30% c.b.s.)								
Subproduto	Faixas granulométricas combinadas						TOTAL (ponderado)	
	-9,5 mm +2,0 mm			-2,0 mm +0,1 mm			Recup. (%)	Cinzas (%)
	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	Recup. (%)	Cinzas (%)	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	Recup. (%)	Cinzas (%)		
Rejeito 1	1,8	9,08	31,25	1,8	4,94	23,89	14,02	28,65
Intermediário	1,8	9,97	28,12	2,0	8,13	31,33	18,10	29,56
Total em relação ao R.O.M.							<b>7,56</b>	<b>29,02</b>

#### d) Aumentos obtidos na receita das Minas a partir da produção dos carvões energéticos

Com a finalidade de projetar acréscimos nas receitas das Minas da COPELMI, decorrentes da produção de cada carvão energético obtido a partir do reprocessamento dos subprodutos aqui estudados, apresentam-se na continuidade os cálculos que visam quantificar o montante desta estimativa.

Conforme a avaliação exposta na alínea “a” e regime operacional do reprocessamento dos subprodutos que contempla apenas um corte densimétrico (operações distintas para Rejeito 1 e Intermediário), verifica-se a necessidade de os totais de horas anuais possíveis para o tratamento de cada Mina serem distribuídos a esses subprodutos, de acordo com o critério de proporcionalidade entre ambos. Na Mina do Faxinal as recuperações mássicas dos subprodutos Rejeito 1 e Intermediário são na mesma ordem 42% e 22%, ou seja, estão na razão de 1:0,5238 (uma tonelada processada de Rejeito 1 equivale a pouco mais de 0,5 tonelada para o Intermediário). Aplicando o mesmo raciocínio aos subprodutos da Mina Butiá Leste (32% do Rejeito 1 e 17% do Intermediário), chega-se à proporção de 1:0,531 (uma tonelada processada do primeiro corresponde à quase 0,5 tonelada do segundo). A Tabela 56 demonstra as produções horárias dos carvões energéticos discriminados por tipo, origem e circuito.

Tabela 56. Produção horária dos carvões CE-4200, CE-4700 e CE-5200 por Mina.

Subproduto	Reprocessamento		Produção horária (t/h)		
	Circuito	Taxa (t/h)	CE-4200	CE-4700	CE-5200
<b>Rejeito 1</b> Mina do Faxinal	Jigue	61,85	---	9,71	9,71
	Espirais	22,14	---	7,67	2,75
	<b>Subtotal</b>		---	<b>17,38</b>	<b>12,46</b>
<b>Intermediário</b> Mina do Faxinal	Jigue	31,61	4,39	4,39	---
	Espirais	12,38	4,25	2,70	---
	<b>Subtotal</b>		<b>8,64</b>	<b>7,09</b>	---
<b>Rejeito 1</b> Mina Butiá Leste	Jigue	82,25	10,17	10,17	10,17
	Espirais	29,74	12,66	8,00	5,53
	<b>Subtotal</b>		<b>22,83</b>	<b>18,17</b>	<b>15,70</b>
<b>Intermediário</b> Mina Butiá Leste	Jigue	42,16	10,11	5,93	5,93
	Espirais	17,33	4,83	7,35	4,84
	<b>Subtotal</b>		<b>14,94</b>	<b>13,28</b>	<b>10,77</b>

Na Tabela 57, apresenta-se a produção anual estimada para os carvões energéticos tipo CE-4200, CE-4700 e CE-5200, considerando as proporcionalidades nas massas de cada subproduto, em cada unidade produtora.

Tabela 57. Produção anual dos carvões CE-4200, CE-4700 e CE-5200 por origem.

Subproduto	Tempo anual de processamento (horas)	Produção anual (toneladas)		
		CE-4200	CE-4700	CE-5200
<b>Rejeito 1</b> Mina do Faxinal	3.611	---	62.789	44.988
<b>Intermediário</b> Mina do Faxinal	1.891	16.340	13.429	---
<b>Rejeito 1</b> Mina Butiá Leste	2.934	67.007	53.331	46.079
<b>Intermediário</b> Mina Butiá Leste	1.559	23.301	20.719	16.787

Para finalizar, são apresentados na Tabela 58 os montantes obtidos na receita quando se produz cada tipo de carvão energético, objetivando auxiliar à tomada de decisão para a implantação das medidas sugeridas no presente estudo.

Tabela 58. Receita anual por tipo de carvão energético produzido.

Subproduto	Receita anual (R\$ x 1000)		
	CE-4200	CE-4700	CE-5200
	Preço por tonelada (sem ICMS)		
	R\$ 85,30 *	R\$ 95,45 **	R\$ 105,61 **
<b>Rejeito 1</b> Mina do Faxinal	---	5.993,51	4.751,16
<b>Intermediário</b> Mina do Faxinal	1.393,80	1.281,86	---
<b>TOTAL - Faxinal</b>	<b>1.393,80</b>	<b>7.275,37</b>	<b>4.751,16</b>
<b>Rejeito 1</b> Mina Butiá Leste	5.715,70	5.090,70	4.866,38
<b>Intermediário</b> Mina Butiá Leste	1.987,58	1.977,73	1.772,87
<b>TOTAL – Butiá Leste</b>	<b>7.703,27</b>	<b>7.068,43</b>	<b>6.639,25</b>

(\*) Preço real (sem ICMS) praticado em dezembro/2006.

(\*\*) Preço calculado (sem ICMS) com base no valor unitário da kcal do carvão CE-4200 (≈R\$ 0,02031).

ANEXO II

## Balçoço metalúrgico da 'primeira combinação' do Intermediário, Mina Butiá Leste

