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

Tese de Doutorado

ESTUDO TECNOLÓGICO PARA BENEFICIAMENTO DO CARVÃO DA CAMADA BONITO, SC

Por

Norton Ferreira Feil

Porto Alegre, 2011

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

Tese de Doutorado

ESTUDO TECNOLÓGICO PARA BENEFICIAMENTO DO CARVÃO DA CAMADA BONITO, SC

Por
Norton Ferreira Feil

Orientador: Prof. Dr.-Ing Carlos Hoffmann Sampaio

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Otávio Petter – UFRGS
Prof. Dr. Regis Sebben Paranhos – Unipampa
Prof. Dr. Rubens Müller Kautzmann – Unilasalle

Porto Alegre, 2011

Dedico em especial a Anne, Bruno, Rosane Cristina e aos meus pais, Trudel e Omar, *in memoriam.*

"Quem sabe concentrar-se numa coisa e insistir nela como único objetivo, obtém, ao fim e ao cabo, a capacidade de fazer qualquer coisa."

Mahatma Gandhi

AGRADECIMENTOS

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

Ao professor Dr.-Ing Carlos Hoffmann Sampaio pelo estímulo, escolha do tema, oportunidade de aprimoramento científico, confiança e amizade.

Ao professor Dr.-Ing Hermann Wotruba pelas sugestões e condução dos testes realizados na RWTH (*Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule*), bem como os colegas desta Universidade, em especial ao Kalle Becker e Phillip Romm que com sua paciência, espírito de colaboração e informações técnicas importantes possibilitaram o desenvolvimento do estudo na Alemanha.

Ao engenheiro José Carlos Franco Costa da Carbonífera Catarinense Ltda. pela gentileza no fornecimento das amostras, visita à mina e informações técnicas que nortearam preliminarmente este trabalho.

À SATC pelo auxílio e zelo na coleta, preparação e envio das amostras à Alemanha, em especial à geóloga Luciane Garavaglia que pelo interesse e colaboração possibilitaram o contato com as mineradoras locais e remessa das amostras, indispensáveis à realização do estudo.

Aos demais professores e colegas do LAPROM, especialmente ao professor Carlos Otávio Petter e Karime Ferreira de Souza pelas sugestões e paciência.

Ao bolsista de Iniciação Científica Felipe Goulart da Silva pelo auxílio valioso na preparação das amostras para as análises dos teores de cinzas e de enxofre.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais desta universidade pela oportunidade oferecida e aprendizado indispensável à consecução deste trabalho.

Aos professores da Banca Examinadora pela disponibilidade de tempo e valiosa contribuição ao estudo.

À CAPES e CNPq pelo aporte financeiro no Brasil e Alemanha que possibilitaram dedicação exclusiva à tese ora concluída.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS ix
LISTA DE TABELAS x
RESUMO xiv
ABSTRACT xv
1. INTRODUÇÃO 1
2. OBJETIVOS 2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3
3.1. Carvão mineral 3
3.2. Carvão no Brasil 4
3.3. Carvão sul-catarinense 5
3.3.1. Beneficiamento do carvão de 1946 até 1990 – Lavador de Capivari 8
3.3.2. Produções de carvões vendáveis em Santa Catarina 12
3.3.3. Principais empresas carboníferas catarinenses e minas em operação 12
3.3.4. Estudo anterior de caracterização dos carvões das camadas Barro Branco e Bonito 14
3.3.5. Resultado obtido no Lavador Boa Vista da Carbonífera Catarinense em 2010 referente ao beneficiamento do carvão da camada Bonito 17
3.4. Análise da dificuldade de separação – *Near-Gravity Material* (NGM) 17
3.5. Alguns estudos sobre a estratificação do leito no processo de jigagem 18
3.5.1. Parâmetros referentes à segregação do leito analisados nas pesquisas com minério de ferro e minério artificial 21
3.5.2. Critérios de avaliação de desempenho do processo de jigagem 23
3.6. Tecnologias de aproveitamento 24
3.7. Processos de beneficiamento a seco de carvão 26
3.7.1. Separador baseado em sensor de raios X 26
3.7.2. Separador gravimétrico a seco para finos (AKA-Flow) 27
4. MATERIAIS E MÉTODOS 29
4.1. Matéria-prima 29
4.2. Normas padronizadas e aplicadas no estudo 29
4.3. Metodologia aplicada no Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) da UFRGS 30
4.3.1. Estudo da primeira amostra de carvão 30
4.3.2. Caracterização do carvão 30
4.3.3. Análise do parâmetro *Near-Gravity Material* (NGM) 33
4.4. Metodologia utilizada no Laboratório (AMR) da Universidade de Aachen (RWTH) 34
4.5. Estudo da segunda amostra de carvão 34
4.5.1. Preparação da amostra conforme plano de pesquisa inicial 34
4.5.2. Ensaio no *Alljig*® (processo hidráulico) 36
4.5.3. Algumas considerações sobre os parâmetros aplicados em pesquisas anteriores e sua adequação ao estudo do carvão catarinense em processo hidráulico 37
4.5.4. Tipos de processamentos simulados no *Alljig*® 39
4.5.5. Teste preliminar com *Alljig*® 40

4.5.6. Divisão no intervalo granulométrico estudado 42
4.5.7. Investigação da frequência específica de pulsação para os novos intervalos 44
4.5.8. Ensaio no sistema de separação de materiais baseado em sensor de raios X (processo a seco) 45
4.5.9. Ensaio no separador de finos em leito fluidizado (processo pneumático) 47
4.5.10. Ensaio de finos de carvão em processos hidráulicos 48
4.6. Estudo da terceira amostra de carvão 49
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 51
5.1. Caracterização do carvão 51
5.1.1. Ensaios para a caracterização do carvão 51
5.1.2. Continuidade das características da Camada Bonito em áreas do município de Lauro Müller 56
5.2. Pesquisa de novas rotas de beneficiamento 57
5.3. Estudos realizados com a 2ª amostra de carvão no *Alljig*® para investigação da freqüência característica de operação 57
5.3.1. Resultado preliminar dos produtos obtidos após teste de aferição do *Alljig*® 57
5.3.2. Análise das frações densimétricas deslocadas no processo de jigagem 58
5.4. Testes realizados na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm 62
5.4.1. Ensaio na freqüência 80 pulsos por minuto (Teste 1) 62
5.4.2. Ensaio na freqüência 96 pulsos por minuto 62
5.4.3. Comparação entre os ensaios com 80 pulsos por minuto (Teste 1) e 96 pulsos por minuto (Teste 2) 64
5.4.4. Recomposição da fração -16 mm com descarte do intervalo 50 mm x 16 mm 65
5.4.5. Resultado das simulações do processamento principal (teste 2) e reprocessamento da fração mista (teste 3) no intervalo 16 mm x 6,3 mm 66
5.5. Testes aplicados com o reaproveitamento da fração 50 mm x 16 mm cominuída e reclassificada granulometricamente 66
5.5.1. Teste aplicado na fração 16 mm x 2 mm e freqüência 104 pulsos por minuto (Teste 4) 67
5.5.2. Reconstituição da fração 16 mm x 2 mm procedente do intervalo 50 mm x 16 mm, após classificação na peneira de 6,3 mm 67
5.5.3. Testes reconduzidos na fração 16 mm x 6,3 mm 68
5.6. Comentários sobre os testes realizados na 2ª amostra até aqui registrados no intervalo 16 mm x 6,3 mm 73
5.7. Testes realizados na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm 74
5.7.1. Ensaio na freqüência 80 pulsos por minuto (Teste 10) 74
5.7.2. Simulação do processamento principal com a adição dos intervalos 16 mm x 6,3 mm (teste 1) e 6,3 mm x 2 mm (teste 10) na freqüência 80 pulsos por minuto 74
5.7.3. Simulação de resultado considerando o processamento principal e reprocessamento da fração mista no intervalo 16 mm x 6,3 mm (testes 2 e 3) e processamento principal na fração 6,3 mm x 2,0 mm (teste 10) 75
5.7.4. Ensaios realizados em diversas freqüências com o reaproveitamento da amostra procedente da faixa original 50 mm x 16 mm reduzida para 6,3 mm x 2 mm 76
5.7.5. Simulação do reprocessamento da fração mista no intervalo 6,3 mm x 2 mm 78

5.7.6. Ensaio para confirmação da freqüência 64 pulsos por minuto como a indicada para o intervalo 6,3 mm x 2 mm e processamento principal com leito formado por 5 níveis (Teste 16) 79
5.8. Comentários sobre os testes realizados na 2ª amostra e no intervalo 6,3 mm x 2 mm .. 82
5.9. Testes realizados na faixa granulométrica 2 mm x 0,1 mm 83
5.9.1. Ensaio em mesa concentradora (Teste 17) 83
5.9.2. Ensaios em espirais 84
5.10. Comentários sobre os testes realizados na 2ª amostra e no intervalo 2 mm x 0,1 mm até aqui finalizados 85
5.11. Estudos realizados com a 3ª amostra de carvão na RWTH 86
5.11.1. Ensaios no *Alljig*® a partir da reutilização de parte de amostra testada no jigue da *All Mineral*® 86
5.12. Comentário restrito aos testes realizados na 3ª amostra e nos intervalos 16 mm x 6,3 mm e 12,5 mm x 6,3 mm 88
5.13. Comentário sobre as variações observadas nas características das três amostras estudadas 89
5.13.1. Ensaios no jigue de processamento contínuo da *All Mineral*® 91
5.14. Outros ensaios 98
5.14.1. Ensaio no separador baseado em sensor de raios X com fração 50 mm x 16 mm 99
5.14.2. Ensaio da fração -2mm no separador (gravimétrico) a seco em leito fluidizado (Teste 27) 100
6. CONCLUSÃO 102
REFERÊNCIAS 107
APÊNDICE 110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização das principais jazidas de carvão mineral no RS e SC.....5
Figura 2 - Perfil das camadas Barro Branco, Bonito e Irapuá.....6
Figura 3 – Fluxograma resumido de produção de carvão no Lavador de Capivari.....11
Figura 4 – Produção de carvão ROM e carvões vendáveis de 1990 a 2010.....12
Figura 5 – Curvas densimétricas para os carvões ROM das camadas Barro Branco e Bonito.15
Figura 6 – Curvas dos flutuados x teor de cinzas para ambas camadas. 16
Figura 7 – Regimes de freqüências para diferentes grupos de partículas.....19
Figura 8 – Parâmetros do estudo que determinaram qualidade na estratificação do leito.....23
Figura 9 – Ilustração simplificada de funcionamento do separador por sensor de raios X.....27
Figura 10 – Diagrama de separação do AKA-Flow. 28
Figura 11 – Distribuição dos intervalos para a caracterização do carvão. 31
Figura 12 - Fluxograma do plano de pesquisa inicial na RWTH. 35
Figura 13 – Vistas dos 11 elementos (os cinco mais inferiores preenchidos com carvão) e da estrutura de fixação que compõem a cuba operacional do *Alljig*®. 37
Figura 14 - Disposição dos elementos A e B na cuba do *Alljig*® na ordem de execução do ensaio. 40
Figura 15 - Disposição dos elementos B e frações estudadas na cuba do *Alljig*®. 42
Figura 16 - Esquema de ensaios após a divisão do intervalo granulométrico estudado.....44
Figura 17 – Imagens das densidades atômicas das partículas em tons de cinzas e em cores e outros parâmetros para ajuste operacional do equipamento. 47
Figura 18 – Distribuição dos testes complementares realizados na terceira amostra.....50
Figura 19 – Curvas de afundados e flutuados das faixas pesquisadas. 53
Figura 20 – Distribuição mássica dos constituintes densimétricos do ROM por intervalo estudado. 54
Figura 21 – Curvas densimétrica e de NGM dos intervalos estudados. 56
Figura 22 – Comparativo entre massas e respectivos teores nos testes 1 e 2, enfatizando a diferença ocorrida somente nos níveis 2 e 3, respectivamente. 65
Figura 23 – Comparativo entre as massas recuperadas e teor de cinzas obtidos nos testes 7 e 9, a partir de amostras com características distintas em leito do jigue composto por 4 níveis e faixa 16 mm x 6,3 mm. 72
Figura 24 – Variação dos valores nos cinco níveis dos testes 10 e 13. 78
Figura 25 – Análise da variação da qualidade das amostras constituintes dos intervalos 50 mm x 16 mm e 6,3 mm x 2 mm nos testes 13 e 16. 81
Figura 26 – Fluxo dos ensaios de acordo com os intervalos estudados e resultados promissores obtidos na segunda e terceira amostras. 88
Figura 27 – Diferença de características entre as amostras 2 (teste 10) e 3 (teste 21) em ensaios realizados na freqüência 88 min^{-1}. 91
Figura 28 - Esquema longitudinal e lateral do jigue de processamento contínuo da *All Mineral*® instalado no laboratório da RWTH com medidas aproximadas (sem escala). 95
Figura 29 – Sistemática utilizada para avaliação dos subprodutos obtidos nos seis processamentos em série. 101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados quantitativos dos recursos carboníferos no Brasil. 4
Tabela 2 – Principais carboníferas catarinenses, minas em atividade e camadas exploradas. . 13
Tabela 3 – Processos de beneficiamento utilizados nas empresas carboníferas. 14
Tabela 4 - Resumo de recuperação e cinzas dos produtos obtidos no Lavador Boa Vista oriundo do tratamento da camada Bonito. 17
Tabela 5 - Grau de dificuldade no processo de separação densimétrica. 18
Tabela 6 - Normas técnicas utilizadas no estudo para o carvão mineral. 29
Tabela 7 - Distribuição granulométrica da 2ª amostra estudada. 36
Tabela 8 - Reclassificação granulométrica em peneira de 6,3 mm. 44
Tabela 9 - Critério inicial de separação. 46
Tabela 10 - Ensaio granulométrico *versus* teor de cinzas no intervalo -50 mm + 0,1 mm. 52
Tabela 11 - Distribuição de cada intervalo granulométrico nas três faixas analisadas. 53
Tabela 12 - Teste inicial para aferição do *Alljig*® realizado na faixa granulométrica 16 mm x 2 mm, freqüência de 80 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm. 57
Tabela 13 - Análise das frações densimétricas deslocadas no teste de jigagem. 59
Tabela 14 - Critério inicial para avaliação das combinações ‘densidade *versus* teor de cinzas e massa’ por foco. 60
Tabela 15 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 1 para o intervalo 16 mm x 6,3 mm. . 62
Tabela 16 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 2. 63
Tabela 17 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 3. 63
Tabela 18 - Recomposição da fração -16 mm com descarte do intervalo 50 mm x 16 mm. ... 66
Tabela 19 - Estimativa das operações dos testes 2 e 3 no intervalo 16 mm x 6,3 mm. 66
Tabela 20 - Cominuíção da fração 50 mm x 16 mm 100% abaixo de 16 mm e classificação em 2 mm. 67
Tabela 21 - Reconstituição da fração -16 mm após classificação em 6,3 mm. 68
Tabela 22 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 9. 71
Tabela 23 - Teste 9 realizado a partir da reutilização de amostra do ensaios 5 e alíquota da mesma amostra, na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 88 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm. 71
Tabela 24 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 10 para o intervalo 6,3 mm x 2 mm. . 74
Tabela 25 – Processamento principal nas frações 16 mm x 6,3 mm do teste 1 e 6,3 mm x 2 mm do teste 10. 75
Tabela 26 - Simulação dos cortes densimétricos nos intervalos 16 mm x 6,3 mm (testes 2 e 3) e 6,3 mm x 2 mm (teste 10). 76
Tabela 27 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 13 para o intervalo 6,3 mm x 2 mm. . 77
Tabela 28 - Teste 13 realizado a partir da reutilização de amostra do ensaio 12, na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, freqüência de 64 pulsos por minuto e amplitude de 6 cm. .. 77
Tabela 29 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 16 para o intervalo 6,3 mm x 2 mm. . 80
Tabela 30 - Resumo dos parâmetros aplicados no único ensaio em mesa concentradora (Teste 17). 83

Tabela 31 - Resumo dos parâmetros aplicados no 1º teste em espirais (Teste 18). 84
Tabela 32 - Resumo dos parâmetros aplicados no 2º teste em espirais (Teste 19). 85
Tabela 33 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 20 com a 3ª amostra para o intervalo 12,5 mm x 6,3 mm.....87
Tabela 34 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 21 para o intervalo 16 mm x 6,3 mm. 87
Tabela 35 - Resumo dos parâmetros aplicados no 1º teste do jigue da *All Mineral*® para o intervalo 16 mm x 6,3 mm (Teste 22). 93
Tabela 36 - Resumo dos parâmetros aplicados no 2º teste do jigue da *All Mineral*® para o intervalo 16 mm x 6,3 mm (Teste 23). 94
Tabela 37 - Resumo dos parâmetros aplicados no 1º teste do jigue da *All Mineral*® para o intervalo 6,3 mm x 2 mm (Teste 24). 97
Tabela 38 - Resumo dos parâmetros aplicados no 2º teste do jigue da *All Mineral*® para o intervalo 6,3 mm x 2 mm (Teste 25). 98
Tabela 39 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 26 para o intervalo 16 mm x 2 mm.100
Tabela 40 – Resultado final obtido nos intervalos testados no *Alljig*® e espirais.....105
Tabela 41 - Teste 1 realizado na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 80 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm. 114
Tabela 42 - Teste 2 realizado na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 96 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm. 114
Tabela 43 - Teste 3 realizado para simulação do reprocessamento da fração mista, na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 88 pulsos por minuto e amplitude de 6 cm. 115
Tabela 44 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 4. 116
Tabela 45 - Teste 4 realizado na faixa granulométrica 16 mm x 2 mm, freqüência de 104 pulsos por minuto e amplitude de 7 cm. 117
Tabela 46 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 5. 118
Tabela 47 - Teste 5 realizado na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 92 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm. 119
Tabela 48 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 6. 120
Tabela 49 - Teste 6 realizado com amostra remanescente, na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 96 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm. 120
Tabela 50 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 7. 121
Tabela 51 - Teste 7 realizado a partir dos produtos do teste 5, na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 96 pulsos por minuto, amplitude de 5 cm e 3 níveis. 121
Tabela 52 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 8. 122
Tabela 53 - Teste 8 realizado a partir do reaproveitamento dos mesmos produtos do teste 7, na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 96 pulsos por minuto, amplitude de 2,5 cm e 3 níveis. 122
Tabela 54 - Teste 10 realizado na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, freqüência de 80 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm. 123
Tabela 55 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 11 para o intervalo 6,3 mm x 2 mm. 124
Tabela 56 - Teste 11 realizado na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, a partir da utilização de amostra reconstituída do intervalo 50 mm x 16 mm, freqüência de 88 pulsos por minuto e amplitude de 7 cm. 124

Tabela 57 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 12 para o intervalo 6,3 mm x 2 mm. 125
Tabela 58 - Teste 12 realizado a partir do reaproveitamento da amostra do ensaio 11, na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, freqüência de 72 pulsos por minuto e amplitude de 7 cm. 125
Tabela 59 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 14 para o intervalo 6,3 mm x 2 mm. 126
Tabela 60 - Teste 14 realizado para simulação do reprocessamento da fração mista do teste 13, na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, freqüência de 64 pulsos por minuto e amplitude de 4,5 cm. 126
Tabela 61 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 15 para o intervalo 6,3 mm x 2 mm. 127
Tabela 62 - Teste 15 realizado para simulação do reprocessamento da fração mista reaproveitada do teste 14, na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, freqüência de 56 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm. 127
Tabela 63 - Teste 16 realizado a partir da reutilização de amostra do ensaio 10, na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, freqüência de 64 pulsos por minuto e amplitude de 6 cm. 128
Tabela 64 - Teste 17 realizado na faixa granulométrica 2 mm x 0,1 mm e mesa concentradora. 129
Tabela 65 - Teste 18 realizado na concentração 12% de sólidos em espirais. 129
Tabela 66 - Teste 19 realizado na concentração 24% de sólidos em espirais. 129
Tabela 67 - Teste 20 realizado com amostra utilizada em teste no jigue da *All Mineral*®, na faixa granulométrica 12,5 mm x 6,3 mm, freqüência de 88 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm. 130
Tabela 68 - Teste 21 realizado com amostra anteriormente testada no jigue da *All Mineral*®, na faixa granulométrica original 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 88 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm. 131
Tabela 69 - Teste 22 (1º teste) realizado no jigue da *All Mineral*®, na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 90 pulsos por minuto e amplitude de 1,5 a 2,0 cm. 131
Tabela 70 - Teste 23 (2º teste) realizado no jigue da *All Mineral*®, na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 90 pulsos por minuto e amplitude de 1,5 a 2,0 cm. 131
Tabela 71 - Teste 24 (1º teste) realizado no jigue da *All Mineral*®, na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, freqüência de 90 pulsos por minuto e amplitude de 1,5 a 2,0 cm. 132
Tabela 72 - Teste 25 (2º teste) realizado no jigue da *All Mineral*®, na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, freqüência de 90 pulsações por minuto e amplitude de 1,5 a 2,0 cm. 132
Tabela 73 - Testes realizados no separador por sensor da *Titech* e na faixa granulométrica 50 mm x 16 mm. 132
Tabela 74 - Teste 26 realizado com amostra do produto 'leve' procedente do separador baseado em sensor, na faixa granulométrica 16 mm x 2 mm, freqüência de 88 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm. 133
Tabela 75 - Teste 27 realizado no AKA-Flow com amostra classificada no intervalo 2 mm x 0,1 mm. 133
Tabela 76 - Teste de afunda-flutua e teor de cinzas de amostra no intervalo 50 mm x 2 mm. 134
Tabela 77 - Teste de afunda-flutua e teor de cinzas de amostra no intervalo 2 mm x 0,1 mm (Faixa 50 mm x 0,1 mm). 135
Tabela 78 - Resultado final na faixa granulométrica 50 mm x 0,1 mm. 136

Tabela 79 - Teste de afunda-flutua e teor de cinzas de amostra no intervalo 9,5 mm x 2 mm. 137
Tabela 80 - Teste de afunda-flutua e teor de cinzas de amostra no intervalo 2 mm x 0,1 mm (Faixa 9,5 mm x 0,1 mm). 138
Tabela 81 - Resultado final na faixa granulométrica 9,5 mm x 0,1 mm. 139
Tabela 82 - Resultado final do teste de afunda-flutua e teor de cinzas de amostra no intervalo 2,0 mm x 0,1 mm.....140

RESUMO

O carvão da camada Barro Branco, situado na região sul do estado de Santa Catarina, tem sido amplamente estudado e utilizado, apresentando por esta razão reduzidas reservas. O carvão remanescente da camada Bonito na mesma região é menos conhecido e caracteriza-se pelo alto teor de cinzas e pela alta percentagem de partículas com densidade próxima a do concentrado. Esta peculiaridade torna difícil o seu tratamento nas usinas de beneficiamento atuais, que utilizam jigues para esta finalidade. Os requisitos técnicos do combustível (carvão) exigidos pelas usinas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, seu maior cliente, são teores de cinzas e enxofre total <43% e ≤2,3%, respectivamente. Algumas Carboníferas locais estão estudando outros processos de beneficiamento para o carvão, embora a maioria das que ainda mantêm jigue como o principal equipamento de tratamento não produza o carvão com as características exigidas pelo mercado. Este trabalho pesquisa outras rotas e melhorias para o tratamento do carvão em questão. Processamentos a seco e testes hidráulicos (jigagem) foram conduzidos na Alemanha para este objetivo. Na seqüência, testes utilizando dois intervalos granulométricos foram realizados em jigue processado por batelada para estudo da influência da freqüência de pulsação, amplitude e espessura do leito na segregação das frações de carvão, a fim de otimizar a operação de jigagem. Ao final, confirma-se que os resultados do processamento do carvão ROM nas freqüências específicas de 88 min^{-1} e 64 min^{-1} para as frações 16 mm x 6,3 mm e 6,3 mm x 2 mm, nesta ordem e com a espessura de leito em torno de 125 mm produz carvão com teores de cinzas e enxofre em torno de 43% e 2%, respectivamente e rendimento mássico de 28%. Se somados à fração 2 mm x 0,1 mm, tratada em espirais, o teor médio de enxofre mantém-se em 2% e o teor de cinzas e rendimento mássico do produto final alcançam os respectivos valores de 43,3% e 34%, embora os testes tenham sido conduzidos em laboratório.

Palavras-chave: Frequência de jigagem, separação baseada em sensor, beneficiamento de carvão, processo gravimétrico.

ABSTRACT

The coal from Barro Branco seam, which is widely used, is situated in the southern Brazil, State of Santa Catarina, and it is reaching depletion. The remaining coal from Bonito seam in the same region is less known and is characterized by the high percentage of near-gravity material and ash content. This peculiarity makes it difficult to treat in the current processing plants, which use jigs for this purpose. This product should have <43% of ash content and ≤2.3% of sulfur content for supplying Jorge Lacerda's thermal electric power plant, which uses coal as combustible. A few local coal companies are testing the dense medium process for coal beneficiation, although most of them that still maintain jigs as the main cleaning equipment do not produce the coal required by the market. This study was carried out to investigate other routes and improvements for coal cleaning. Dry processing and jigging tests were conducted in Germany for this purpose. Dry processing was done using an X-ray sorter. Tests were also performed using a batch jig to study the influence of jig frequency, amplitude and bed thickness on the separation of two coal fractions. It was found that the processing of the ROM coal in the specific frequencies of 88 min^{-1} and 64 min^{-1} to respective intervals 16 mm x 6.3 mm and 6.3 mm x 2 mm, in a bed thickness around 125 mm, produces a coal with ash content and sulfur content about 43% and 2%, respectively and 28% mass yield. If added to size fraction 2 mm x 0.1 mm, treated in spirals, the average sulfur content remains at 2%, ash content and mass yield of the final product reach the respective values of 43.3% and 34%, although the tests have been handled in laboratory.

Keywords: Jig frequency, sensor-based sorting, coal preparation, gravimetric beneficiation.

1. INTRODUÇÃO

O carvão mineral, entre os recursos energéticos não renováveis no mundo, ocupa a primeira colocação em abundância quando comparado ao petróleo e ao gás natural. Na composição da matriz energética global, o carvão se posiciona abaixo do petróleo sendo que, especificamente, na geração de energia elétrica, encontra-se na condição de principal recurso mundial.

O estado de Santa Catarina insere-se no contexto energético nacional pela ocorrência de três camadas de carvão, denominadas Irapuá, Barro Branco e Bonito. No médio e longo prazo a camada Barro Branco deverá ter declinada sua participação na matriz de fornecimento do carvão mineral, devido à exaustão de suas reservas. Este fato tem obrigado as empresas mineradoras e setores interessados locais a se voltarem ao carvão proveniente da camada Bonito para manter a atividade econômica na região sul de Santa Catarina. A camada de carvão Bonito, remanescente, é pouco conhecida e caracteriza-se pelo alto percentual de *Near-Gravity Material* (NGM), fato que dificulta seu tratamento nas atuais plantas de beneficiamento da região que utilizam jigues para esta finalidade.

As principais empresas carboníferas da região sul deste estado buscam identificar rotas alternativas de beneficiamento para o carvão desta camada e sua aplicação no curto prazo como único combustível, e desta forma, atender as especificações técnicas exigidas pelo mercado consumidor.

Este estudo foi dividido em duas partes: a caracterização do carvão ROM (*run of mine*), cujo teor médio de cinzas oscila entre 59 e 63%, e na sequência a pesquisa por novas tecnologias que otimize o processo de beneficiamento nas empresas, com foco na melhor separação da fração mista, dentro das potencialidades características do carvão da camada Bonito, obtenção de um produto com teor de cinzas <43% (cinzas a base seca) e de enxofre ≤2,3%, para atender demanda do Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda. Novos métodos de tratamento a seco para finos e graúdos utilizados no exterior foram testados no carvão e comparados. O aprimoramento do processo de jigagem voltou-se também para a identificação de fatores operacionais, cujos efeitos estabelecessem melhor segregação das frações densimétricas leves (concentrado), mistas e densas (rejeito).

2. OBJETIVOS

Geral

Caracterizar o carvão mineral da camada Bonito, a partir de amostras procedentes da região carbonífera ao sul de Santa Catarina, pesquisar e identificar tecnologias de beneficiamento disponíveis no mercado global que melhor aproveite suas potencialidades, a fim de otimizar seu tratamento para a obtenção de um produto adequado às especificações exigidas pelas usinas do Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda. O produto final deve apresentar as seguintes características entre outras:

a) Teor de cinzas (b.s.) <43%
b) Teor de enxofre ≤2,3%.

Específico

- Investigar o grau de liberação da matéria orgânica, através de estágios de cominuição do carvão em três dimensões máximas de 50,0 mm, 9,5 mm e 2,0 mm no Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), classificando ainda cada intervalo granulométrico nas telas de 2,0 mm e 0,1 mm. Posteriormente, cada fração será analisada em ensaios densimétrico e de teor de cinzas;
- Pesquisar novas rotas tecnológicas para beneficiamento das frações grosseira (+2 mm) e fina (-2 mm +0,1 mm) do carvão em processos a seco e úmido no laboratório de processamento mineral (AMR - *Aufbereitung mineralischer Rohstoffe*) da Universidade Técnica de Aachen (RWTH - *Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule*), Alemanha, com foco na recuperação mássica e teor de cinzas dos produtos obtidos e enxofre total, este último somente nos resultados promissores;
- Interpretar e comparar os resultados obtidos preliminarmente nos testes de beneficiamento a úmido no laboratório da UFRGS com os resultantes dos processos a úmido e a seco no laboratório da RWTH, buscando identificar a melhor alternativa que otimize o beneficiamento do carvão da camada Bonito, adequando-o às características exigidas para uso termoelétrico com foco na concentração da matéria orgânica, na redução do teor de enxofre e conseqüentemente na proteção do meio ambiente.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Carvão mineral

O carvão fóssil é impropriamente chamado de carvão mineral, designação incongruente, uma vez que o carvão é, pela sua própria gênese e natureza, uma rocha sedimentar orgânica formada a partir de restos vegetais que se encontram em diferentes estados de conservação, tendo sofrido soterramento, seguido de compactação. A designação "carvão mineral" tem origem meramente comercial, portanto não científica, sendo utilizada somente para contrastar com o "carvão vegetal".

O carvão é uma rocha combustível que contém mais de 50% em peso e mais de 70% em volume de material carbonoso, incluindo a umidade intrínseca, fundamentalmente derivada de restos vegetais com matéria mineral associada (ANEEL; TRACTEBEL; SATC, 2010, p. 6, Relatório 1).

Por ação de pressão e temperatura em ambiente sem contato com o ar, em decorrência de soterramento e atividade orogênica, os restos vegetais ao longo do tempo geológico se solidificam, perdem oxigênio e hidrogênio e se enriquecem em carbono, em um processo denominado carbonificação.

Quanto mais intensas a pressão e a temperatura a que a camada de matéria vegetal for submetida, e quanto mais tempo durar o processo, mais alto será o grau de carbonificação atingido, ou *rank*, e maior a qualidade do carvão. Os diversos estágios de carbonificação, do menor para o maior *rank*, são dados pelo esquema: turfa → sapropelito → linhito → carvão sub-betuminoso → carvão betuminoso → antracito. O estágio mínimo para a utilização industrial do carvão é o do linhito. Outro índice qualitativo do carvão é o *grade*, que mede de forma inversamente proporcional o percentual em massa de matéria mineral incombustível (cinzas) presente na camada carbonífera. Um baixo *grade* significa que o carvão possui um alto percentual de cinzas misturado à matéria carbonosa, consequentemente, empobrecendo sua qualidade (BORBA, 2001).

Fundamental para a economia mundial, o carvão é maciçamente empregado em escala planetária na geração de energia e na produção de aço. Na siderurgia é utilizado o carvão coqueificável, um carvão nobre, de altos *rank* e *grade*, com propriedades aglomerantes.

3.2. Carvão no Brasil

No Brasil, os recursos carboníferos estão concentrados na região sul, abrangendo os estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (figura 1). O Rio Grande do Sul é o estado que possui os maiores recursos, seguido por Santa Catarina e depois pelo Paraná (ver tabela 1).

Tabela 1 – Dados quantitativos dos recursos carboníferos no Brasil.

Rio Grande do Sul - RS	Santa Catarina - SC	Paraná - PR	Brasil
5.375,6 x 10^6 t	1.213,6 x 10^6 t	6,6 x 10^6 t	6.595,8 x 10^6 t
81,5 %	18,4 %	0,1 %	100 %

t: tonelada
Fonte: Anuário Mineral Brasileiro – AMB – 2005 – DNPM – MME.

O perfil de qualidade dos carvões brasileiros varia do sul para o norte, com a diminuição do teor de cinzas – aumento no poder calorífico, e aumento do teor de enxofre – necessidade de controle ambiental pela geração das emissões de SO_x (óxidos de enxofre – SO_2 e SO_3).

Os carvões brasileiros são similares aos sul-africanos, australianos e indianos, e, portanto, distintos dos carvões do Hemisfério Norte – Europa e Estados Unidos. Eles possuem características peculiares, que justificam as diferenças de seu comportamento durante o seu beneficiamento e aplicação industrial (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2010).

Segundo dados estatísticos preliminares (junho de 2011) do *British Petroleum*, as reservas carboníferas brasileiras até o final de 2010 encontrariam-se no patamar de 4.559 milhões de toneladas, participando com 0,5% do total mundial.

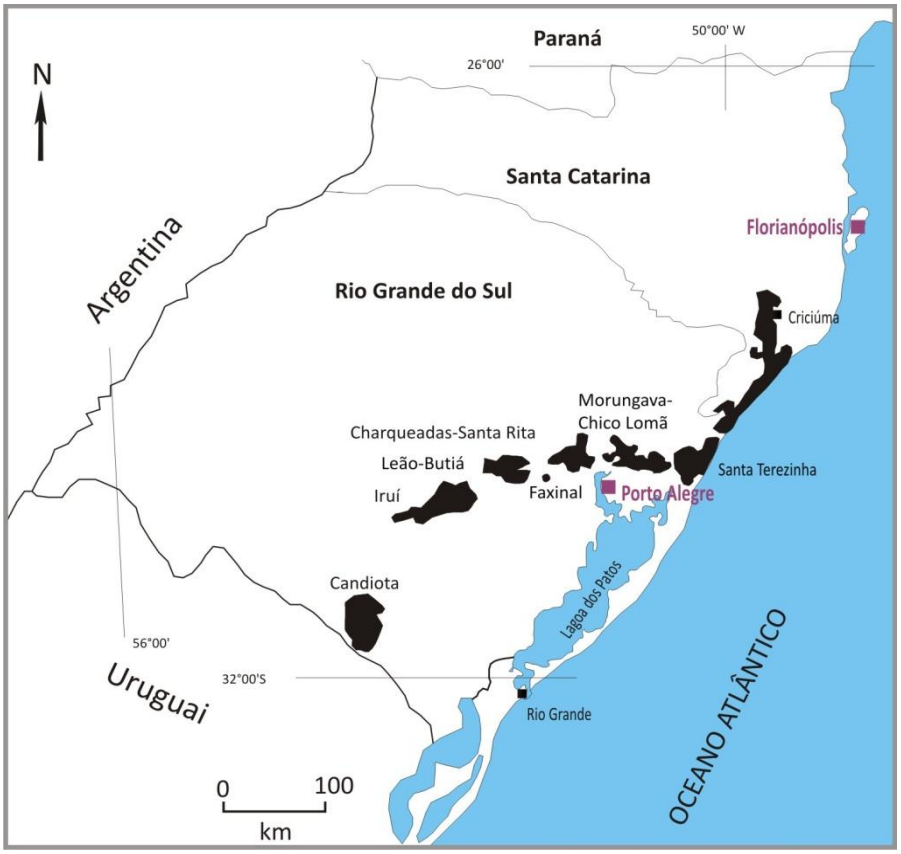

Figura 1- Localização das principais jazidas de carvão mineral no RS e SC (Süffert, 1997).

3.3. Carvão sul-catarinense

A Bacia Carbonífera de Santa Catarina é uma das mais importantes, pois encerra as maiores reservas de carvão coqueificável economicamente exploráveis do território nacional. Situa-se no flanco sudeste do estado, estendendo-se desde o sul de Araranguá até Lauro Müller, numa faixa com direção norte-sul com aproximadamente 100 km de comprimento e uma largura média de 20 km.

A jazida de carvão Sul-Catarinense estende-se pelos municípios pertencentes à Associação dos Municípios da Região Carbonífera (AMREC). São eles, Criciúma, Forquilhinha, Içara, Lauro Müller, Morro da Fumaça, Nova Veneza, Siderópolis, Treviso, Urussanga e Cocal do Sul. Atualmente os municípios da AMREC possuem cerca 27,3% das jazidas de carvão existentes no Brasil.

Nas reservas carboníferas localizadas na região sul de Santa Catarina, ocorrem basicamente três tipos de carvões (Irapuá, Barro Branco e Bonito), cada qual com propriedades físico-químicas bem distintas (teor de umidade, teor de cinzas, teor de enxofre,

poder calorífico, matéria volátil, entre outras). Os tipos de carvões sul-catarinenses possuem diferentes características, as quais estão relacionadas à localização geográfica. As camadas e as reservas destes tipos de carvões também são variadas. A quase totalidade da produção desta bacia carbonífera é destinada à utilização na geração termelétrica no Complexo Jorge Lacerda, no município de Capivari de Baixo, sul do Estado de Santa Catarina.

As camadas Barro Branco e Bonito são constituídas por horizontes de formato tabular com grande extensão lateral, enquanto que a camada Irapuá, depositada em uma calha na forma de lente, é lateralmente limitada. A segunda é constituída por dois leitos de carvão, com espessuras desiguais, separadas por um leito de material estéril. A porção superior, denominada camada Bonito Superior, situa-se de 0 a 15 m acima da porção inferior, denominada camada Bonito Inferior, estando separada desta pelo arenito Bonito, e sendo recoberta pelo siltito Ponte Alta, conforme figura 2.

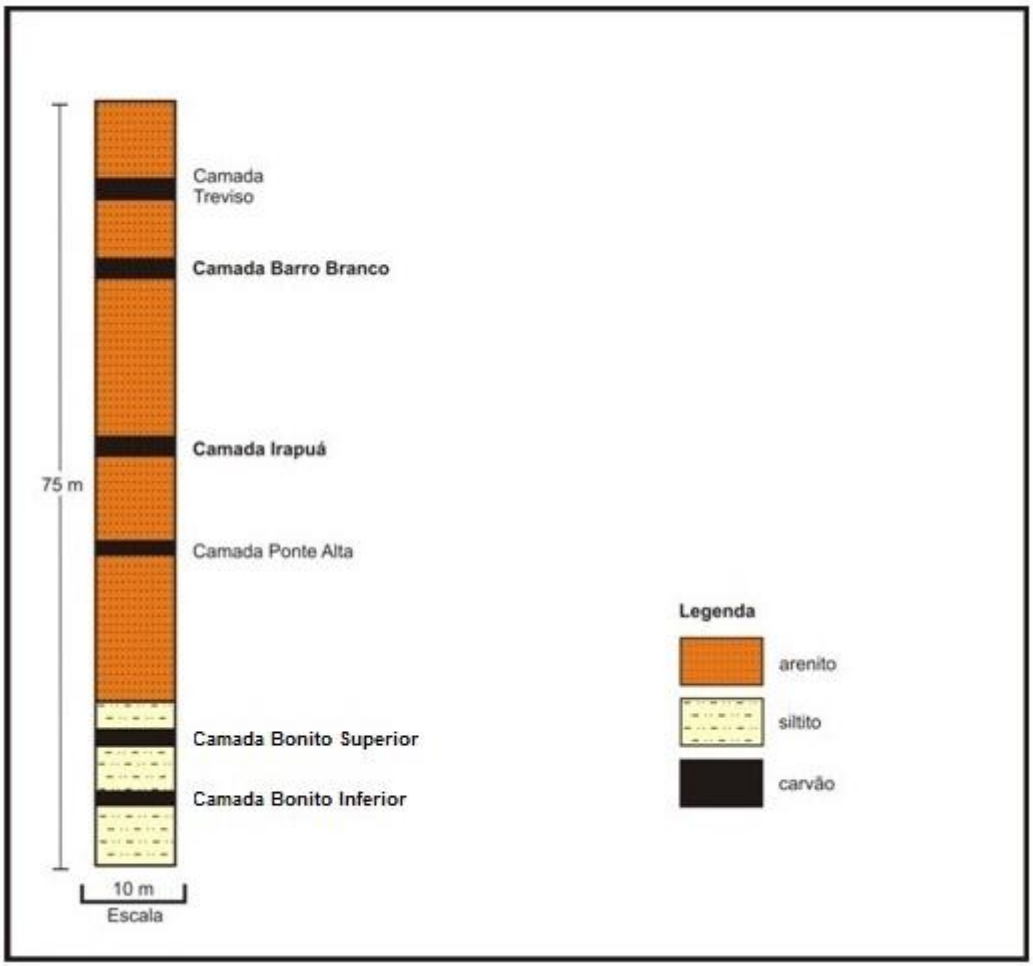

Figura 2 - Perfil das camadas Barro Branco, Bonito e Irapuá (Süffert modificado).

As camadas de carvão de todas as jazidas são partes constituintes da formação Rio Bonito, situada estratigraficamente na porção inferior do pacote de rochas sedimentares da bacia do Paraná, idade Permiana, ou seja, com cerca de 260 milhões de anos. A profundidade das camadas varia de nula até aproximadamente 1.200 m.

As diferenças significativas das características e das condições de formação dessas camadas estão relacionadas com controles geológicos e evolução tectônica favoráveis das bacias sedimentares carboníferas. Esses fatores são determinantes nas propriedades do carvão mineral gerado, seja coqueificável ou energético. Até o momento, a maior parte do carvão extraído provém da camada Barro Branco, sendo a camada Bonito considerada marginal, devido às elevadas de intercalações de estéreis, apesar desta camada apresentar em 1999, reservas 50% maiores que a camada Barro Branco (SNIEC, 2005).

A camada Barro Branco, devido às propriedades coqueificantes do carvão (fração para indústria de coque) e o consumo nas plantas termoelétricas de Tubarão, SC, é o depósito brasileiro que tem sido mais intensamente explorado nas últimas décadas. Em planta esta jazida possui a forma de um arco com convexidade apontando para leste. Seus limites sul–sudeste estão indeterminados, sendo que sondagens sob lâmina d'água na plataforma continental certamente constatariam a continuidade das camadas em subsuperfície. A porção norte do arco é aquela que tem sido intensamente pesquisada e explotada, sendo o que usualmente é conhecido como a Jazida Sul-Catarinense. Tem um comprimento que ultrapassa os 85 km e uma largura variável entre 5 e 20 km. Dez camadas de carvão ocorrem neste depósito, mas apenas duas têm importância econômica: Barro Branco e Bonito. Muito localmente, a Camada Irapuá tem sido objeto de lavra. A Camada Barro Branco possui espessuras médias nas áreas mineradas, em torno de 1,60 m. A Camada Bonito, mais espessa, mas com "grade" inferior à Barro Branco, tem sido lavrada em subsuperfície há apenas alguns anos, na parte norte da jazida. Os recursos totais da jazida atingem 4.288 Mt (milhões de toneladas), dos quais mais de 70% nas camadas Barro Branco (1.323 Mt) e Bonito (1.843 Mt). As coberturas vão de camadas aflorantes até mais de 800 m. Os setores lavráveis a céu aberto estão quase esgotados para a Camada Barro Branco, por questões econômicas e ambientais. O carvão da Camada Barro Branco é classificado pelo "*rank*" como "Betuminoso de Alto Volátil A". Na região da Jazida Sul-Catarinense existem muitas intrusões de diabásio, diques e soleiras, que afetam as camadas de carvão, estas podendo chegar ao grau de

antracito. Numa área conhecida como “Montanhão”, o carvão foi minerado para produção de antracito, com valores de venda mais elevados que os produtos usuais da Jazida.

A camada Barro Branco contém teores expressivos de macerais do grupo da exinita, podendo-se considerar que seu carvão é transicional ao fácies sapropélico. Este fato, além de sua posição no “*rank*”, explica seus altos índices de capacidade de coqueificação. Os teores de enxofre não são altos (1 a 3%) nos produtos beneficiados, e maiores ao norte da jazida.

Como a suspensão da demanda por carvão metalúrgico, no início da década de noventa, o consumo quase que exclusivo passou a ser a termoeletricidade. Produz-se carvão com poder calorífico de 4.500 kcal/kg, por beneficiamento próximo às minas, com rendimento de 30 a 35% sobre o ROM (*run of mine*). Outros mercados menores são os finos de britagem, para coque de fundição, e pequenas quantidades para diversos setores. Atualmente dez unidades mineiras encontram-se em operação, das quais três a céu aberto e as demais em subsuperfície.

A camada de carvão Bonito assume atualmente o primeiro lugar em importância na região tendo vista que abriga as maiores reservas remanescentes e conseqüentemente o maior potencial futuro. Além disso, apresenta em geral espessura superior à da camada Barro Branco e superposição de outras camadas potencialmente úteis, mas caracteriza-se pelo alto teor de cinzas e difícil lavabilidade, ocorrendo em duas áreas da bacia carbonífera de Santa Catarina:

• Área norte: englobando parte dos municípios de Orleans, Lauro Müller, Treviso, Urussanga e Siderópolis;

• Área sul: abrangendo a maior parte dos municípios de Morro da Fumaça, Criciúma, Içara, Araranguá e Jaguaruna.

No sul da bacia carbonífera a camada Bonito apresenta um perfil estratigráfico diferente daquele verificado ao norte, pois ocorre um afinamento da camada, além da sua divisão em quatro sub-leitos, a saber: Bonito Superior, Bonito Inferior (leito principal), Pré-Bonito Superior e Pré-Bonito Inferior.

3.3.1. Beneficiamento do carvão de 1946 até 1990 – Lavador de Capivari

Em virtude das necessidades da época e dos problemas no abastecimento do petróleo a nível mundial, somente após 1939 ocorreu uma política voltada à extração do carvão nacional.

Houve então um crescimento significativo da demanda de carvão mineral em termos da geração de energia elétrica, da indústria local, da navegação e do desenvolvimento de linhas férreas para escoamento da produção. Quanto ao aspecto tecnológico, estudos sobre as aplicações industriais do carvão sofreram um avanço importante no sentido de viabilizar usos alternativos para o mesmo.

O carvão com características metalúrgicas assumiu uma posição de destaque no cenário nacional tanto no consumo, quanto no desenvolvimento tecnológico, a partir de instalação da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) no ano de 1945. Posteriormente, o carvão voltou à posição que ocupava no quadro energético nacional com a normalização do comércio do petróleo. Até 1973, quando da crise do petróleo, este quadro permaneceu imutável. A partir daí, o carvão começou a despontar novamente no cenário nacional como fonte energética alternativa (ANEEL; TRACTEBEL; SATC, 2010, p. 6, Relatório 1).

O carvão catarinense divide-se em carvão metalúrgico, destinado às siderurgias para produzir o aço; carvão vapor (energético) destinado às indústrias (cimenteira, alimentícia e cerâmica) e à termoelétrica para gerar energia, além do rejeito piritoso com alto teor de enxofre.

A implantação da usina de beneficiamento de carvão em Santa Catarina, para separar o carvão metalúrgico do carvão vapor e do rejeito, deu-se concomitante à construção da CSN (Companhia Siderúrgica Nacional) em Volta Redonda, das minas de ferro em Lafaiete (MG), e da minas de carvão em Siderópolis (SC). A usina de beneficiamento de carvão da CSN em Santa Catarina foi inaugurada junto com o complexo CSN em 1946, e era composta de um lavador e uma pequena usina termoelétrica. A busca constante pelo aumento da recuperação de carvão metalúrgico levou a quatro alterações do esquema de operação da usina de beneficiamento. O último deles aconteceu no final da década de 1960 e é o maior, com a adoção da técnica de ciclones de meio denso para beneficiamento do carvão. A partir de então, as mudanças na estrutura do Lavador de Capivari foram relativas à ampliação da capacidade de processamento de carvão.

Até 1960, a grande maioria das minas fazia a mineração seletiva do banco de carvão, cujo produto continha cerca de 34% de cinzas e 8% de enxofre e era chamado de "carvão lavador", o qual era enviado por via férrea ao Lavador de Capivari. A partir de 1961, abandonada a mineração seletiva, o produto minerado continha de 60 a 65% de estéril, tornando seu transporte anti-econômico. Assim, foram instalados pré-lavadores nas bocas das

minas para produzir o chamado "carvão pré-lavado", com 28 a 32% de cinzas, o qual era enviado ao Lavador de Capivari. Os rejeitos xistoso e piritoso produzidos nos jigues dos pré-lavadores foram sendo depositados, durante décadas, próximos aos lavadores, causando grande impacto ambiental, principalmente devido à presença da pirita. Com o início das atividades da ICC (Indústria Carboquímica Catarinense) em 1979, parte do rejeito passou a ser aproveitada na produção do ácido sulfúrico, permanecendo quantidade vultuosa de rejeito depositado. Este passivo ambiental até hoje causa danos à região.

Em 1965, com a entrada em operação da Usina Termoelétrica Jorge Lacerda o carvão vapor passou a ser aproveitado.

A maior dificuldade na utilização do carvão catarinense na siderurgia decorria do seu alto teor de cinzas, em torno de 18,5% para o carvão metalúrgico. Esse teor de cinzas poderia ser diminuído desde que fosse utilizado um processo de beneficiamento mais rigoroso, o que encareceria o processo e sempre foi dispensado. Isto implicava num menor rendimento dos altos-fornos. Para compensar, era utilizado o carvão de Santa Catarina misturado ao carvão importado, que continha cerca de 6,6% de cinza.

No final da década de 1960, há uma reestruturação administrativa da CSN em Santa Catarina. A partir de então, as unidades da Companhia em operação no Estado deixam de ter o controle direto da estatal, passando a serem incorporadas pela Carbonífera Próspera S.A., subsidiária da CSN. Assim, a primeira unidade a ser incorporada é a de Siderópolis, ainda na década de 1960; a segunda foi a Carbonífera Barão do Rio Branco, em 1981, que funcionava no bairro Mineração no município de Içara e que foi adquirida pela CSN pelas reservas de carvão metalúrgico. Em 1983, foi a vez do Lavador de Capivari.

A década de 1980, foi um período conturbado para as empresas pertencentes à CSN em Santa Catarina.

Em 1988 começa o processo de privatização dessas empresas. Neste ano, a Cia. Próspera entra em processo de liquidação e o seu patrimônio passa, novamente, para o controle direto da CSN, como Superintendência Geral de Mineração. Em 1988 e 1989, são desativadas as minas de Içara e Siderópolis.

Em 1990, durante o Governo Collor, foi eliminada a obrigatoriedade do consumo de carvão nacional nas siderurgias estatais. Com a intenção de sanar as empresas estatais para depois privatizar, a política de consumo de carvão nacional, que era vista como estratégica e

de desenvolvimento industrial do país, passa a ser um entrave à rentabilidade das siderúrgicas. Sem a obrigatoriedade de consumo e sem uma política para o carvão metalúrgico, as unidades de Santa Catarina são desativadas. O Lavador de Capivari encerrou suas atividades em novembro de 1990 (GOULARTI FILHO; MORAES, 2005).

Com a privatização do complexo Siderbrás, a importação do carvão metalúrgico e a desativação da ICC, atualmente 99,0% do carvão catarinense é utilizado apenas na Usina Termoelétrica Jorge Lacerda, de propriedade da Tractebel.

A figura 3 apresenta fluxograma resumido de produção de carvão até 1990 no Lavador de Capivari. Observa-se que além do carvão metalúrgico eram produzidos carvões energéticos, tipo CE 4500[1] para a geração termoelétrica e CE 5200[2] para a indústria cimenteira, alimentícia e cerâmica.

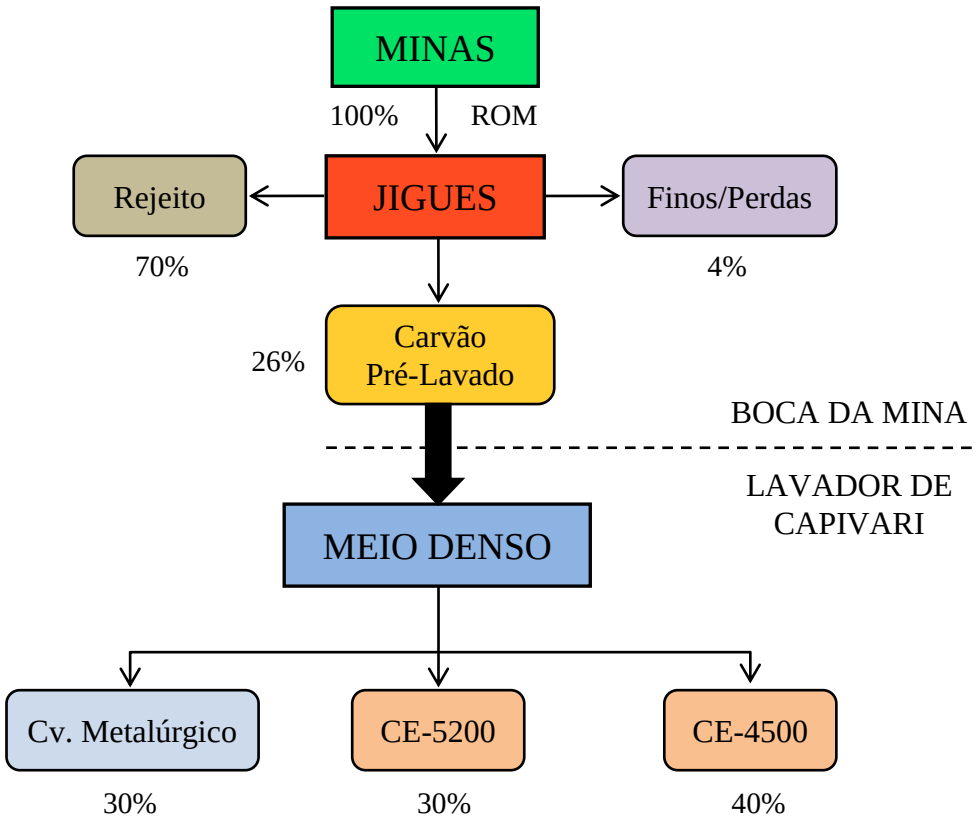

Figura 3 – Fluxograma resumido de produção de carvão no Lavador de Capivari (SIECESC modificado).

[1] Carvão Energético mineral com poder calorífico superior de 4500 kcal/kg (DNPM, 1999).
[2] Carvão Energético mineral com poder calorífico superior de 5200 kcal/kg (DNPM, 1999).

3.3.2. Produções de carvões vendáveis em Santa Catarina

Desde o encerramento das atividades do Lavador de Capivari em 1990 até 2010 o Estado de Santa Catarina produziu carvões vendáveis, segundo os tipos elencados a seguir: metalúrgico, energético, finos e antracitoso, de acordo com a figura 4. O carvão metalúrgico foi produzido até a desativação do Lavador de Capivari.

Em função da baixa escala de produção em relação aos demais tipos, o carvão antracitoso não é mostrado no gráfico, porém este foi produzido somente no período de 1992 a 1994 nas quantidades de 28.540, 15.792 e 18.759 toneladas, respectivamente.

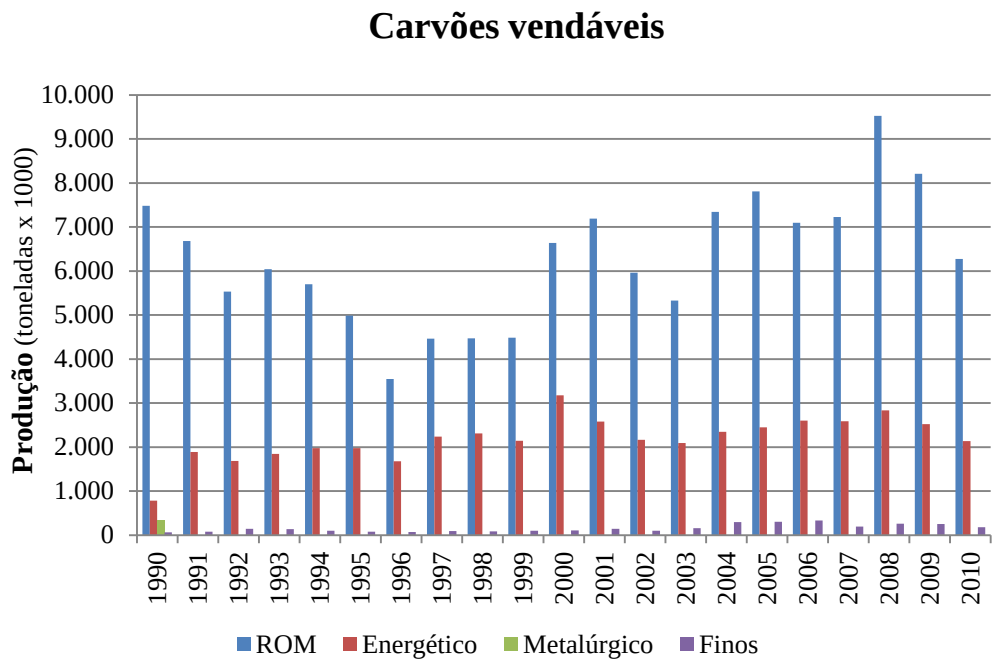

Figura 4 – Produção de carvão ROM e carvões vendáveis de 1990 a 2010.
Fonte: SIECESC.

3.3.3. Principais empresas carboníferas catarinenses e minas em operação

Em 2005, as indústrias carboníferas do estado de Santa Catarina, filiadas ao SIECESC (Sindicato das Indústrias Extrativas de Carvão do Estado de Santa Catarina), juntamente com a Tractebel Energia, realizaram um estudo com o intuito de conhecer o potencial das empresas mineradoras de carvão da Jazida Sul-Catarinense. Esse estudo foi baseado nos dados do DNPM, e em pesquisas e entrevistas realizadas nas empresas carboníferas detentoras das concessões de exploração das minas e pertencentes à AMREC (ANEEL; TRACTEBEL;

SATC, 2007, p. 16, Relatório 2). As informações sobre as empresas carboníferas que operam na região, no que tange a localização geográfica, camada explotada e unidades mineiras foram compiladas e sistematizadas na tabela 2.

A tonelagem total de carvão atualmente explotado na camada Bonito está localizada na área norte da bacia. A maior parte das jazidas concentra-se na área norte, o que é corroborado pelo fato de que as minas ativas estão localizadas nesta área.

Tabela 2 – Principais carboníferas catarinenses, minas em atividade e camadas exploradas.

Empresa	**Unidades mineiras em operação**		**Município da AMREC**
	Camada Bonito	**Camada B. Branco**	
Carbonífera Belluno Ltda.	--	Cantão SS	Siderópolis
	--	Morozini Norte	Treviso
	Lauro Müller	--	Lauro Müller
Carbonífera Catarinense Ltda.	Mina Bonito I	Mina 3G	Lauro Müller
Carbonífera Criciúma S.A.	--	Verdinho	Forquilhinha
Carbonífera Metropolitana S.A.	Fontanella	Esperança	Treviso
Carbonífera Siderópolis Ltda.	--	Mina Trevo	Urussanga
Cooperminas	--	Mina 3	Forquilhinha
Indústria Carbonífera Rio Deserto Ltda.	Barro Branco	--	Lauro Müller
	Cruz de Malta	--	Siderópolis

Fonte: SIECESC.

Constata-se que poucas mineradoras exploram e beneficiam a camada Barro Branco juntamente à camada Bonito. A camada Bonito deverá, no curto e médio prazos, substituir a camada Barro Branco, cujas reservas encontram-se próximas à exaustão. Quanto ao processo de beneficiamento, a maioria das empresas carboníferas ainda utilizam jigues em suas usinas de beneficiamento, sendo que recentemente apenas a Carbonífera Metropolitana e Rio Deserto adotaram ciclones de meio denso em seus sistemas de tratamento. A primeira

manteve jigue como processo preliminar ao circuito de meio denso já implantado, enquanto que a segunda opera unicamente com este circuito (ver tabela 3).

Tabela 3 – Processos de beneficiamento utilizados nas empresas carboníferas.

Empresa	Processo de beneficiamento	Capacidade (t/h)
Carbonífera Belluno Ltda.	Jigue Baum	4 unid. x 80
Carbonífera Catarinense Ltda.	Jigue Baum	170
Carbonífera Criciúma S.A.	Jigue Baum	2 unid. x 350
Carbonífera Metropolitana S.A.	Jigue Baum + Meio denso	350
Carbonífera Siderópolis Ltda.	Jigue Baum	2 unid. x 150
Cooperminas	Jigue Baum	350
Indústria Carbonífera Rio Deserto Ltda.	Meio denso	200

Fonte: SIECESC.

3.3.4. Estudo anterior de caracterização dos carvões das camadas Barro Branco e Bonito

No estudo da caracterização tecnológica do carvão das camadas Barro Branco e Bonito para fins energéticos na região de Criciúma, elaborado por Redivo (2002), restrito às amostras coletadas na Mina do Trevo (em Siderópolis) e Mina de Itanema (Lauro Müller), ambas da Indústria Carbonífera Rio Deserto Ltda., respectivamente, pode-se constatar diferenças entre as camadas apresentadas na sequência.

As curvas de lavabilidade obtidas a partir de amostras britadas a 12,7 mm indicaram que a recuperação da fração metalúrgica (nas densidades 1,40 e 1,50 g/cm³) do carvão da camada Barro Branco foi 8,7%, enquanto que na camada Bonito apresentou 3,3% em massa. Somando-se a fração vapor (1,60, 1,70, 1,80 e 1,90 g/cm³), observou-se que a recuperação para o carvão Bonito foi 43,3%, enquanto que o carvão Barro Branco, 14,5% em massa. Se fossem classificados os dois carvões provenientes destas camadas poder-se-ia considerar:

a) ROM camada Barro Branco: alto potencial para a produção de carvão metalúrgico e vapor (energético).

b) ROM camada Bonito: alto potencial para a produção de carvão vapor. A grande recuperação em carvão vapor e as grandes reservas existentes em Santa Catarina tornariam essa camada especialmente interessante, visando à obtenção de produtos destinados à termoelétrica e à gaseificação.

As figuras 5 e 6 comparam as curvas densimétricas e dos flutuados *versus* teores de cinzas dos carvões ROM de ambas camadas, demonstrando a viabilidade de cada camada para a produção de carvão metalúrgico e vapor.

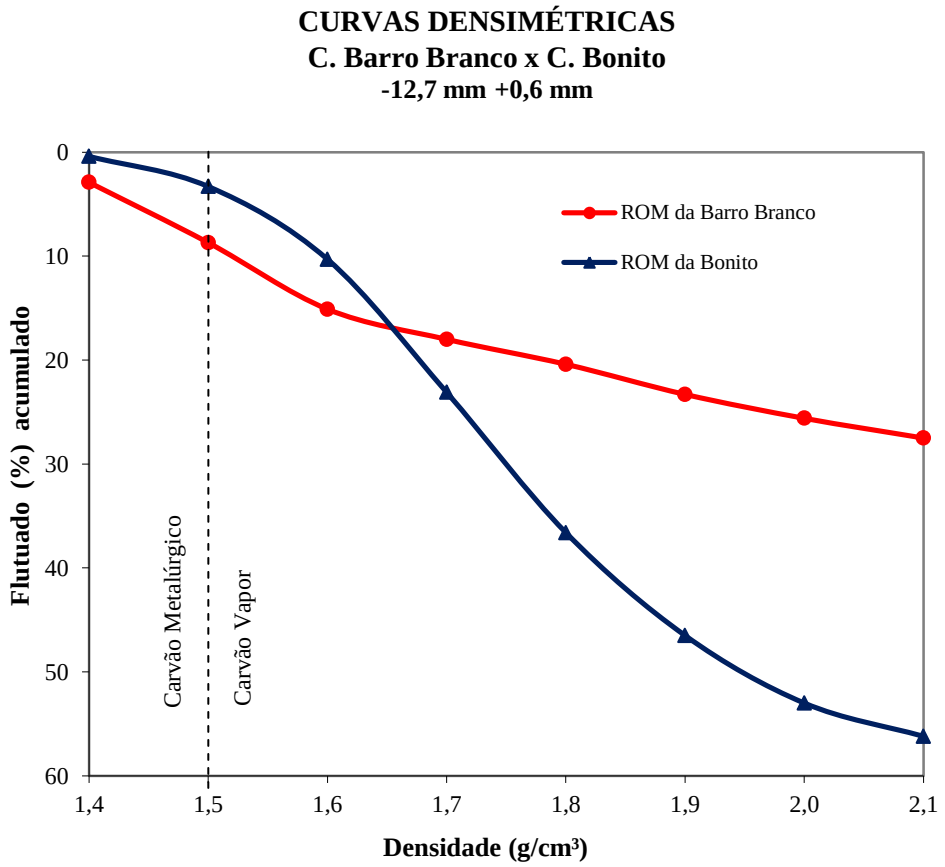

Figura 5 – Curvas densimétricas para os carvões ROM das camadas Barro Branco e Bonito.
Fonte: Redivo, 2002.

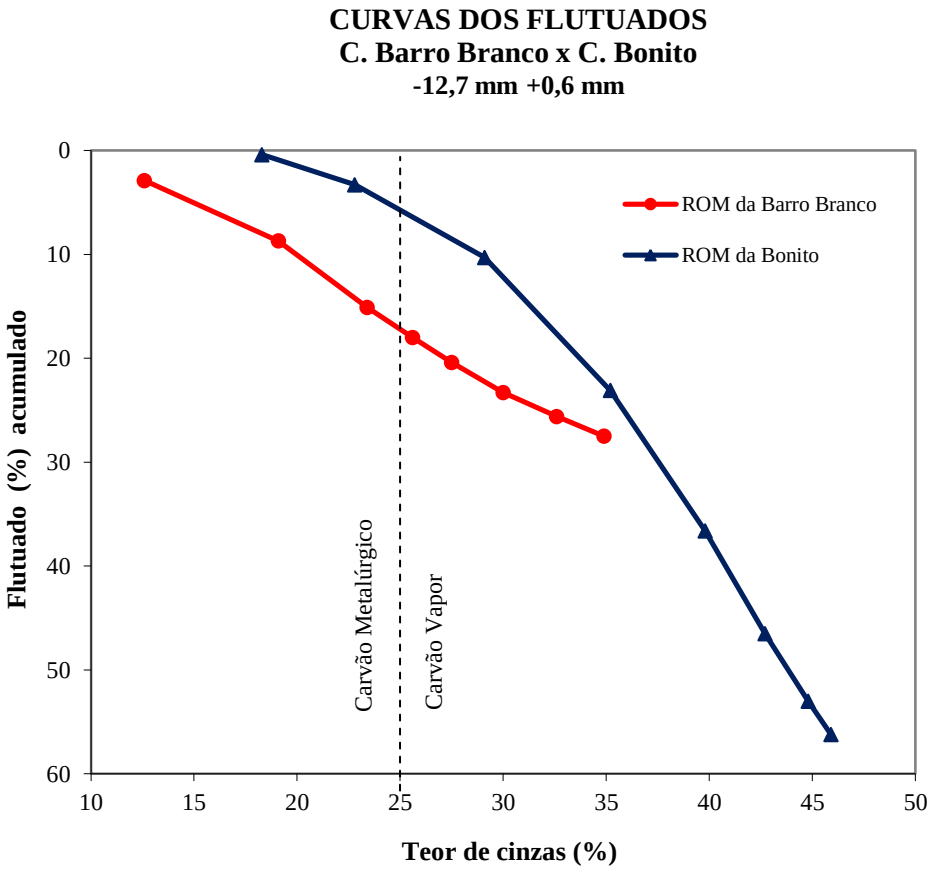

Figura 6 – Curvas dos flutuados x teor de cinzas para ambas camadas.
Fonte: Redivo, 2002.

Os resultados da caracterização das cinzas e matérias voláteis também confirmam que o rendimento da camada Bonito para obtenção de produtos com 25% de cinzas e 30% de matérias voláteis foi tão baixo que se tornaria inviável estabelecer uma exploração industrial baseada na obtenção de carvão "metalúrgico". Enquanto que um circuito destinado a produzir carvão "vapor", com percentuais de cinzas de 42 a 46% e matérias voláteis em torno de 20%, teria um rendimento em massa de 46 a 56% para esta camada.

Quanto ao teor de enxofre, observou-se que o carvão da camada Barro Branco na fração metalúrgica (1,40 e 1,50 g/cm³) alcançou teor de enxofre 30% inferior ao da camada Bonito. Resultados de testes demonstraram que o CE 4500 da camada Bonito apresentou valores de enxofre superiores aos da camada Barro Branco, indicando a ocorrência de cerca de 10% a mais de sulfetos na forma de pirita (FeS_2) nessa camada do que o mesmo produto da camada Barro Branco.

O parâmetro *Near-Gravity Material*, definido na seção 3.4, não foi analisado neste trabalho.

3.3.5. Resultado obtido no Lavador Boa Vista da Carbonífera Catarinense em 2010 referente ao beneficiamento do carvão da camada Bonito

No ano de 2010, a Carbonífera Catarinense obteve no Lavador Boa Vista (usina de beneficiamento) da Mina Bonito I, cuja capacidade é de 70 t/h, em média, os produtos listados na sequência, discriminados por recuperação mássica real e teor de cinzas, segundo os equipamentos de tratamento existentes.

Na tabela 4 seguinte, observa-se que a recuperação mássica de cada produto é significativa, conforme o equipamento utilizado, porém os teores de cinzas, à exceção da fração granulométrica 1,6 mm x 0,5 mm, supera o teor-alvo (43%) em mais de 5 pontos percentuais, afetando o teor de cinzas ponderado final que ultrapassa 48%. Considerando os resultados, as faixas granulométricas e características técnicas da atual planta de beneficiamento, verifica-se a dificuldade de se tratar o carvão da camada Bonito em processo gravimétrico sem adaptações que priorize à caracterização tecnológica do carvão estudado.

Tabela 4 - Resumo de recuperação e cinzas dos produtos obtidos no Lavador Boa Vista oriundo do tratamento da camada Bonito.

LAVADOR BOA VISTA - dados médios						
Produto	**Intervalo**	**Equipamento**	**Massa (%)**	**Massa acum. (%)**	**Cinzas (%)**	**Cinzas acum. (%)**
P1	25,4 x 1,6 mm	jigue	32,76	32,76	48,47	48,47
P2	1,6 x 0,5 mm	espirais	2,86	35,62	43,19	48,05
P3	0,5 x 0,15 mm	espirais	1,53	37,15	55,64	48,36

Fonte: Carbonífera Catarinense.

3.4. Análise da dificuldade de separação – *Near-Gravity Material* (NGM)

Estudos de lavabilidade são conduzidos preliminarmente para determinar a quantidade e qualidade do carvão que pode ser produzido a uma determinada densidade e qual a dificuldade de separação de suas frações densimétricas existentes.

Em processos gravimétricos partículas com densidades muito próximas à densidade de separação apresentam maior probabilidade de se reportar ao produto impróprio, causando a

contaminação do produto flutuado por partículas densas e vice-versa. Além disso, estas partículas exercem grande influência no rendimento e no teor dos produtos, quando ocorrem oscilações na densidade de separação no processo de concentração.

A variação da proporção de partículas com densidades próximas à densidade de separação (ou corte) é conhecida como curva de tolerância densimétrica ou *Near-Gravity Material*, ou NGM. O percentual mássico acumulado correspondente ao intervalo densimétrico ±0,1 g/cm³, em relação à densidade de corte, indica o grau de dificuldade esperado para o processo gravimétrico analisado, conforme Mitchell (1950) e apresentado na tabela 5.

Tabela 5 - Grau de dificuldade no processo de separação densimétrica.

Proporção entre ±0,1 g/cm³ da densidade de separação	**Grau de dificuldade esperado**
0-7%	simples
7-10%	moderadamente difícil
10-15%	difícil
15-20%	muito difícil
20-25%	excessivamente difícil
>25%	impraticável

Fonte: Coal Preparation, 2nd edition, 1950.

3.5. Alguns estudos sobre a estratificação do leito no processo de jigagem

No processo de jigagem, a pulsação de um leito de partículas por uma corrente de água resulta na estratificação de partículas minerais de diferentes densidades. O processo de estratificação das partículas durante os ciclos de jigagem resulta da conjugação de diversos fenômenos físicos. Embora a jigagem seja um dos mais antigos processos minerais, até o presente momento, não existe uma análise teórica completamente convincente nem um equacionamento matemático rigoroso, a fim de explicar o comportamento do leito durante a jigagem.

Diversos pesquisadores e autores têm procurado simular, através de modelamentos matemáticos e ensaios-piloto e de laboratório, os complexos mecanismos envolvidos na

expansão do leito e sua relação com a segregação das partículas (estratificação) nos processos gravimétricos. Mishra e Mehrotra (1998) e Bhattacharjee, Mukherjee e Mishra (2006a,b) têm estudado os parâmetros operacionais que influenciam a estratificação do leito na jigagem. Estes são:

- ✓ Amplitude e frequência de pulsação
- ✓ Espessura do leito
- ✓ Características da alimentação (distribuição granulométrica, razão de diâmetros entre partículas densas e leves).

Outros autores afirmam em seus trabalhos que adequados valores dos parâmetros amplitude e frequência de pulsação, entre outros, devem assegurar maior eficiência do jigue. A figura 7 apresenta resumo dos regimes de freqüência e amplitude, segundo os diferentes grupos de partículas e estudo de Bhattacharjee, Mukherjee e Mishra (2006).

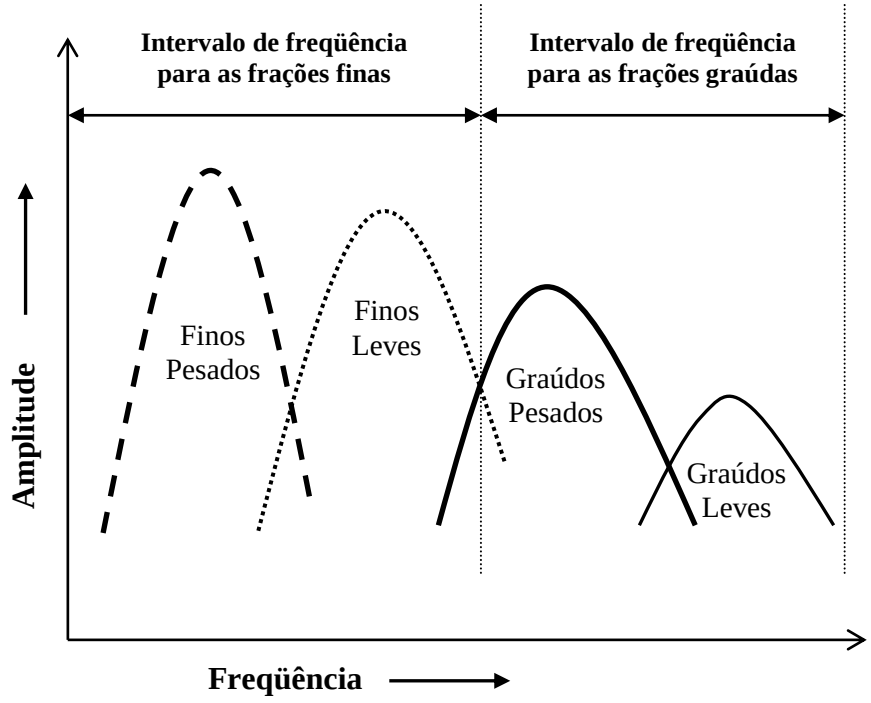

Figura 7 – Regimes de freqüências para diferentes grupos de partículas.
Fonte: Bhattacharjee, Mukherjee e Mishra, 2006.

Em seu estudo, Schneider (1987) especifica os fatores operacionais envolvidos no controle operacional e na eficiência dos jigues, apresentados na seqüência:

a) Fatores relativos à alimentação

Homogeneização: a alimentação do jigue deve ser a mais homogênea possível, de forma que o aparelho possa ser regulado para um material de características bem definidas.

Molhamento: o molhamento do carvão é fundamental para evitar que ocorra uma diminuição da densidade real das partículas, em função do ar aprisionado no interior da matriz sólida.

Taxa de alimentação: a taxa de alimentação deve ser a mais uniforme possível, proporcionando condições para que o número de pulsações por unidade de massa seja igualmente uniforme. Deste modo, assegura-se melhor estratificação do leito e maior aproveitamento da capacidade nominal de jigagem.

Granulometria: a distribuição granulométrica e a proporção de finos devem ser mantidas a mais constante possível. O objetivo é manter a regulagem do jigue a mais adequada possível a uma determinada distribuição granulométrica da alimentação. A friabilidade do carvão, neste aspecto, também é muito importante e deve ser avaliada para se manter esta proporção de finos inalterada. Quando o percentual de finos (-1 mm) é superior a 5%, esta fração deve ser desviada para circuito de tratamento de finos antes de ingressar no jigue.

Distribuição: a homogeneidade da alimentação em toda a extensão da largura do jigue é fundamental para que não haja problemas localizados de mobilidade, propiciando melhor aproveitamento da capacidade nominal do aparelho.

Proporção de material denso (rejeito): o processo de jigagem de um determinado carvão deve otimizar a proporção entre a área de jigagem e a tonelagem horária de rejeito, em função de possíveis variações da altura do leito de rejeito e sobrecarga dos elevadores de rejeito.

b) Fatores relativos ao leito

Mobilidade: o leito deve estar em constante movimentação. Na etapa de impulsão, o leito deve-se abrir completamente para movimentar inclusive as partículas mais densas (mobilidade). Esta abertura do leito é possível através da administração ótima de ar e

água. Por outro lado, uma impulsão muito intensa pode acarretar a ruptura do leito, destruindo a estratificação.

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

c) Fatores relativos aos mecanismos de impulsão e sucção

Uma correta estratificação do carvão ROM pode ser obtida através de um acertado ajuste das válvulas de ar e água no jigue. A freqüência e o tipo de ciclo (modelo de onda) devem ser otimizados de modo que se obtenha a maior eficiência possível.

3.5.1. Parâmetros referentes à segregação do leito analisados nas pesquisas com minério de ferro e minério artificial

Neste subítem, apresenta-se resumo dos parâmetros avaliados em testes preliminares realizados por Mishra e Mehrotra (1998), Bhattacharjee, Mukherjee e Mishra (2006) e comentários sobre seus resultados. Os materiais de alimentação utilizados foram 'minério composto de ferro' (sendo o concentrado constituído por ferro e a ganga por alumina, sílica e fósforo) e uma 'mistura de sólidos com densidades variadas' simulada por *software*. Os intervalos granulométricos aplicados nos ensaios foram estreitos com dimensões máximas de -10 mm; -8 mm e -6 mm, para o minério e tamanhos 3,1 mm, 3,25 mm e 5,1 mm para os minerais artificiais, respectivamente. No estudo com minério de ferro, o efeito da distribuição de tamanho (diâmetro) das partículas foi avaliado em três tipos de alimentação (A, B e C), cada uma constituída por três intervalos granulométricos muito estreitos (-10 +8 mm; -8 +6 mm e -6 +3 mm), cujas participações foram de 25 e 50%. As densidades das partículas constituintes da mistura artificial e minério oscilaram de 1,5 a 4,4 g/cm³. Os valores aplicados na amplitude foram 14 e 18 cm na simulação por *software* e 7,6; 8,9 e 11,4 cm para o minério. Quanto às frequências de pulsação, foram utilizadas 2,23 e 2,5 Hz na simulação, bem como 50, 65 e 75 ciclos por minuto no ensaio com minério de ferro. A espessura do leito variou de 2 a 18 cm com melhor separação em 11 cm na simulação e 10 cm no teste com minério real.

O desempenho do teste com minério de ferro foi avaliado pela grandeza 'eficiência de separação' que analisou o efeito dos diferentes parâmetros operacionais aplicados na jigagem. Neste ensaio, a segregação densimétrica foi monitorada pela composição química das partículas. Partículas com maior teor de alumina, sendo leve, segregavam no topo do leito,

reportando-se à ganga (rejeito). A constituição do concentrado, acomodado no fundo do leito, era rica em partículas de ferro. A extensão desta segregação foi analisada pela eficiência de separação. Maior valor de eficiência de separação indicaria maior segregação de partículas baseada em suas densidades. O cálculo da eficiência de separação é apresentado no Apêndice.

No experimento realizado com minério de ferro, observou-se maior eficiência de separação no tipo de alimentação que continha maior participação da fração fina ("A" constituído por 50% do intervalo -6 +3 mm e 25% pelos demais) e na configuração de baixa amplitude (8,9 cm), cujo resultado alcançou eficiência de 35,12%. No estudo é introduzida a grandeza denominada "velocidade máxima da água", definida como o produto da 'amplitude' pela 'frequência de pulsação' da água e controlada pela amplitude de pulsação.

Para maior entendimento do papel da amplitude e frequência na segregação da partícula fina, novos ensaios foram conduzidos apenas na fração "A", implementando-se maior valor para o parâmetro velocidade máxima da água. Ao final do mesmo estudo, conclui-se que a segregação de partículas baseada por densidade é induzida no estado de fluidização (expansão) e que no estado seguinte de desfluidização (contração) a condição de sedimentação impedida facilita a rápida sedimentação das partículas finas densas sobre as graúdas leves que juntas estratificam sobre as partículas graúdas densas. Teste na mesma fração e à baixa velocidade máxima da água indica que a segregação de partículas ocorre primeiramente de acordo com seus tamanhos e à alta velocidade máxima da água a mesma alimentação segrega segundo a densidade. Foi observado que as partículas graúdas leves segregam no topo do leito a uma frequência de pulsação maior. A figura 8 apresenta resumo dos parâmetros mais promissores que aplicados ao ensaio produziram o melhor resultado de estratificação do leito constituído pelo minério de ferro.

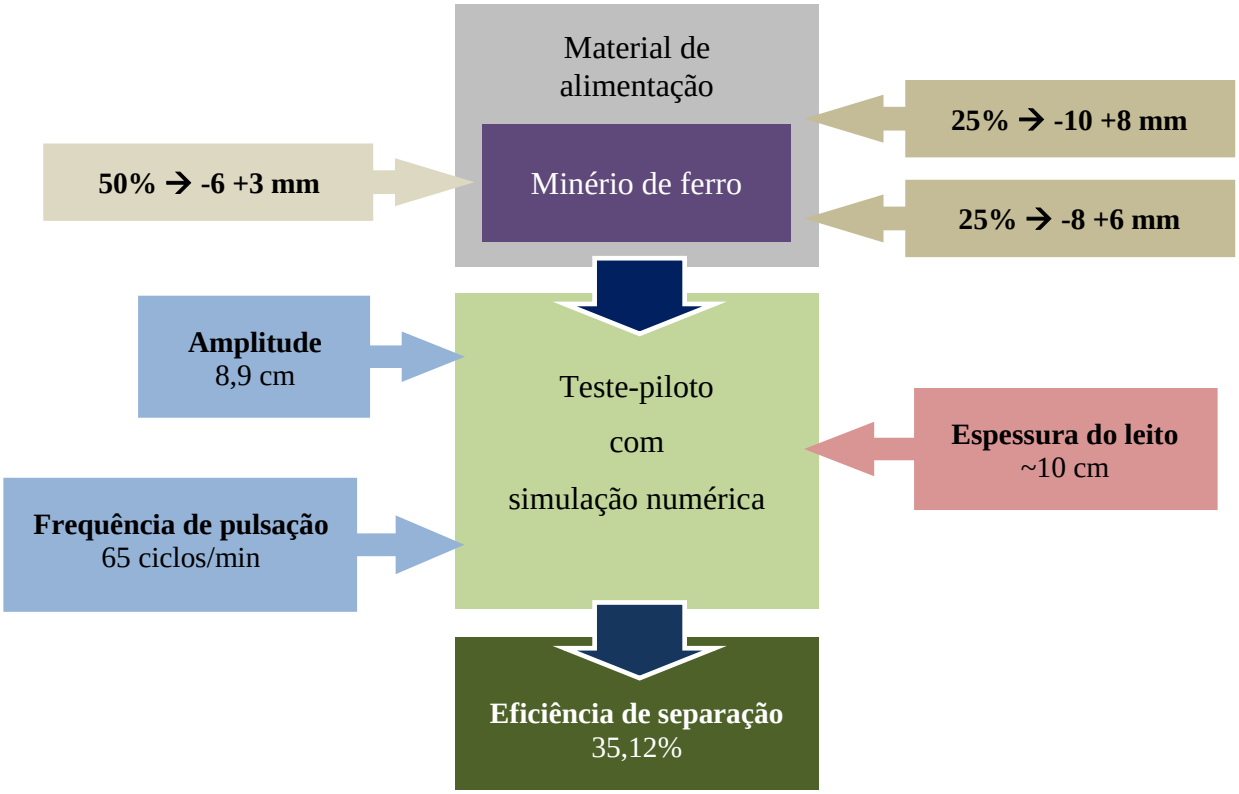

Figura 8 – Parâmetros do estudo que determinaram qualidade na estratificação do leito.

3.5.2. Critérios de avaliação de desempenho do processo de jigagem

A avaliação do desempenho de uma unidade de jigagem pode ser realizada através do cálculo de uma série de índices que medem a eficiência e a nitidez de separação do processo. Deste modo, a eficiência e precisão de um jigue, ou qualquer unidade de beneficiamento gravimétrico, pode ser medida através dos seguintes critérios:

3.5.2.1. Critérios dependentes

São, de um modo geral, definidos tanto pelas características do carvão da alimentação, como pelas características da unidade de beneficiamento utilizada. Assim sendo, duas unidades de beneficiamento exatamente iguais poderão apresentar índices de eficiência diferentes se estiverem lavando carvões distintos. Os principais parâmetros, entre outros, que definem estes critérios são:

Material deslocado total: define-se como material deslocado total a quantidade de material de rejeito presente no carvão lavado somado à quantidade de carvão lavado presente no rejeito,

guardando-se as proporções de carvão lavado e rejeito. As quantidades são medidas em percentuais. Quanto menores as proporções de material deslocado, melhor o desempenho do equipamento.

Material "Near-Gravity": embora normalmente não classificado na literatura como critério dependente, mas utilizado na avaliação de unidades de jigagem, este índice é definido como uma medida do grau de dificuldade de separação de um determinado carvão para uma dada densidade de corte.

3.5.2.2. Critérios independentes

Os critérios independentes de desempenho característicos de uma unidade de beneficiamento não dependem significativamente da composição densimétrica do carvão da alimentação nem da densidade de separação. Estes critérios são derivados da curva de partição do aparelho, também conhecida como curva de Tromp, curva de distribuição, curva de recuperação e curva de erro. Os principais parâmetros, entre outros, derivados da curva de partição, são: a Densidade de Separação ou de Corte, o Erro Provável, a Imperfeição e a Área de Erro (SCHNEIDER, 1987). A Imperfeição mede a imprecisão de separação do aparelho para um determinado carvão, em função da densidade de corte e erro provável. Com este parâmetro é definida a recuperação mássica real esperada para o carvão.

3.6. Tecnologias de aproveitamento

Para assegurar a importância do carvão na matriz energética mundial, atendendo principalmente às metas ambientais, tem-se pesquisado e desenvolvido tecnologias de remoção de impurezas (limpeza) e de combustão eficiente do carvão (*Clean Coal Technologies*). Essas tecnologias podem ser instaladas em qualquer um dos quatro estágios da cadeia do carvão, como descrito a seguir (Agência Internacional de Energia – AIE, 1997):

1. Remoção de impurezas antes da combustão;
2. Remoção de poluentes durante o processo de combustão;
3. Remoção de impurezas após a combustão;
4. Conversão em combustíveis líquidos (liquefação) ou gasosos (gaseificação).

Remoção de Impurezas antes da Combustão: Trata-se de um conjunto de técnicas destinadas à remoção de grandes proporções de enxofre e outras impurezas antes da

combustão, visando a reduzir a produção de cinzas e SO_x durante o estágio de combustão. Após a remoção dessas impurezas, o carvão pode ser usado não somente para a geração de energia elétrica, mas também em processos industriais que requeiram combustíveis sólidos de melhor qualidade. Atualmente, utilizam-se processos físicos e químicos de remoção de impurezas, mas nova tecnologia de remoção biológica, por meio de técnicas enzimáticas e microbiológicas, tem sido desenvolvida. Os processos físicos, comercialmente disponíveis, removem cerca de 30% a 50% do enxofre orgânico (10% a 30% do total) do carvão e cerca de 60% dos compostos minerais que formam as cinzas durante a combustão. Tais processos incluem a flotação, a separação gravimétrica, a aglomeração seletiva, a separação magnética e separação eletrostática.

Combustão Pulverizada: Nos processos atuais de combustão pulverizada (CP), o carvão é queimado como partículas pulverizadas, aumentando substancialmente a eficiência da combustão e da conversão. A maioria das tecnologias modernas de CP atinge 99% de eficiência na combustão. A eficiência de conversão da energia térmica em energia elétrica pode chegar a 43%, no caso de plantas com ciclo a vapor supercrítico (temperatura entre 700 °C e 720 °C). Ganhos adicionais de eficiência podem ser alcançados, mas atualmente o encarecimento do sistema não os justifica. Esperam-se, porém, melhoramentos futuros, elevando a eficiência a 50%, sem aumento de custo.

Combustão em Leito Fluidizado: A tecnologia de combustão em leito fluidizado permite a redução de enxofre (até 90%) e de NO_x (70-80%), pelo emprego de partículas calcárias e de temperaturas inferiores ao processo convencional de pulverização. Uma das vantagens em relação à combustão pulverizada convencional é a redução de enxofre sem perdas de eficiência térmica. Outra vantagem dessa tecnologia é que ela pode queimar resíduos e carvões de baixa qualidade, com baixo índice de emissões, sendo, portanto, adequada também a sistemas de incineração.

Gaseificação Integrada a Ciclos Combinados: A tecnologia de gaseificação integrada do carvão é recente e consiste na reação do carvão com vapor de alta temperatura e um oxidante (processo de gaseificação), dando origem a um gás combustível sintético de médio poder calorífico. Esse gás pode ser queimado em turbinas a gás, onde o calor residual dos gases de exaustão pode ser recuperado e aproveitado por meio de uma turbina a vapor (ciclo combinado). Isso possibilita a remoção de cerca de 95% do enxofre e a captura de 90% do nitrogênio.

3.7. Processos de beneficiamento a seco de carvão

3.7.1. Separador baseado em sensor de raios X

O método de varredura por transmissão de raios X é amplamente utilizado para inspeção de bagagem nos aeroportos. Ultimamente esta tecnologia tem sido aplicada para separação de materiais com características distintas detectáveis por sensor, incluindo o beneficiamento de carvão.

Funcionamento

Uma banda larga de radiação proveniente de uma fonte elétrica de raios X é aplicada no material de alimentação que se move através de um transportador de correia a uma taxa de 3 m/s. Esta radiação atravessa o material a ser separado e é captada pela câmera de raios X equipada com sensores compostos por dois canais independentes, cada um capturando a imagem do material em diferentes níveis (alto e baixo) de energia de raios X. Cada partícula atenua a radiação de raios X recebida, diminuindo assim a modulação de amplitude do sensor em diferentes graus, de modo que essas imagens aparecem em diferentes tons de cinza. A atenuação depende da espessura e densidade atômica do material. Imagens de diferentes densidades atômicas são transformadas em imagens de diferentes faixas espectrais, que tornam possível classificar pixels de cores diferentes, de acordo com suas densidades atômicas. Com base nas informações do sensor, a unidade de controle do classificador ativa as respectivas válvulas de ar, que estão posicionadas na barra pneumática de ejeção. O jato de ar comprimido desvia a direção do fluxo das partículas indesejáveis, de modo que elas são deslocadas para a fração rejeitada. O método já é largamente aplicado na mineração para frações graúdas e em usinas de reciclagem. Este processo tem sido aplicado no tratamento de carvão. A figura 9 apresenta sistema simplificado de funcionamento deste equipamento.

Figura 9 – Ilustração simplificada de funcionamento do separador por sensor de raios X.
Fonte: *Site* da *Titech*.

3.7.2. Separador gravimétrico a seco para finos (AKA-Flow)

Este novo tipo de separador gravimétrico a seco para finos foi desenvolvido pela *AKW Apparate+Verfahren GmbH* na Alemanha. Este sistema (AKA-Flow) supre uma lacuna no processamento com alta produção para minerais finos <1 mm.

A recente descoberta surgiu a partir do leito de ar fluidizado em combinação com uma peneira, especialmente desenvolvida para esta finalidade. Os últimos testes realizados confirmaram a sua eficiência excepcional.

A faixa ideal de trabalho contempla grãos menores que 3 mm. Os ensaios também mostraram que bons resultados são alcançados com diferenças de densidade inferior a 0,3 g/cm^3, por exemplo, feldspato e quartzo. Capacidades entre 5-25 t/h podem ser atingidas com as unidades de 1.200 mm de largura.

Funcionamento

A figura 10 apresenta o diagrama do separador gravimétrico a seco para finos. Este utiliza o princípio do leito fluidizado seco para a separação. O material é alimentado sobre uma calha horizontal crivada com vibração linear, através da qual o ar é injetado pelo fundo.

Deste modo o material de alimentação é fluidizado e estratifica, segundo as densidades das partículas contidas. A vibração suporta e transporta o material, além de garantir uma distribuição uniforme do ar no leito do material. Na direção do fluxo existem várias descargas intermediárias, controladas por portões rotativos, através dos quais o material mais denso é descarregado. O material de baixa densidade pode ser removido por meio de calhas de sucção dispostas acima da superfície. Antes de ser alimentado neste sistema, o material deve passar por uma pré-classificação a seco, uma vez que durante o processo de separação finos menores que 40 mμ são reportados à fração poeirenta. Dependendo do material de alimentação, o separador AKA-Flow pode alcançar taxas de produção de 10 a 20 t/(h.m largura).

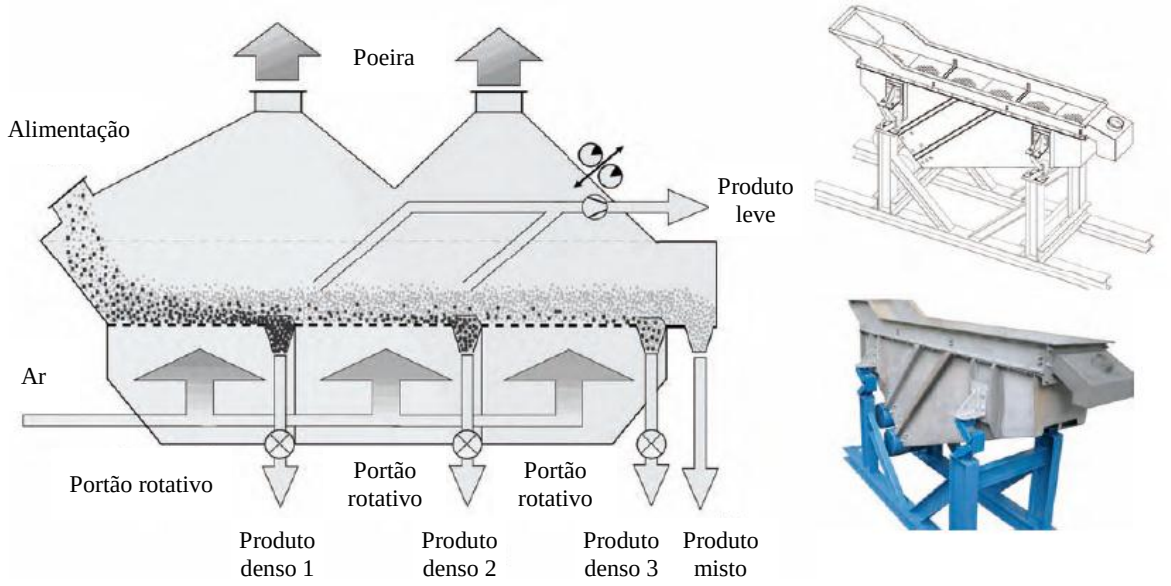

Figura 10 – Diagrama de separação do AKA-Flow.
Fonte: S*ite* da AKW.

As vantagens do AKA-Flow são:

a) separação eficaz e econômica para maiores capacidades
b) baixo consumo de energia
c) processo completamente seco, sem necessidade de água
d) permite a mineração em áreas áridas e de subsolos permanentemente congelados
e) pré-concentração no local da mina para reduzir os custos de transporte
f) permite mineração ambientalmente amigável.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados a metodologia e os equipamentos que foram aplicados no estudo, possibilitando a análise final. Os requisitos técnicos para o carvão exigidos pelas usinas do Complexo termelétrico Jorge Lacerda identificados nos teores de cinzas e enxofre serão avaliados neste trabalho, sendo os demais desconsiderados.

4.1. Matéria-prima

O carvão mineral da camada Bonito coletado, preparado e empregado no estudo foi fornecido gentilmente pela Carbonífera Catarinense, em duas amostras na granulometria de desmonte com emprego de explosivos, a partir de frentes de lavra, e uma terceira britada, mantendo dentro do possível a representatividade do carvão minerado por esta carbonífera às épocas e áreas das amostragens. As coletas e preparação dos lotes das amostras foram realizadas pelo pessoal técnico do Laboratório de Análise e Ensaios de Carvão (LAEC) da SATC (Sociedade de Assistência ao Trabalhador do Carvão - SC), localizada no município de Criciúma, SC, tendo em vista a sua grande experiência e confiabilidade na execução dos ensaios e análises de carvão.

4.2. Normas padronizadas e aplicadas no estudo

Os ensaios e outras análises foram padronizados, segundo normas brasileiras, conforme as relacionadas na tabela 6.

Tabela 6 - Normas técnicas utilizadas no estudo para o carvão mineral.

Norma	Procedimento para
NBR 8629 (ABNT, 1984)	análise granulométrica
NBR 8738 (ABNT, 1985)	ensaio densimétrico
NBR 8289 (ABNT, 1983a)	determinação do teor de cinzas
NBR 8293 (ABNT, 1983c)	determinação de umidade

4.3. Metodologia aplicada no Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) da UFRGS

A etapa inicial de caracterização do carvão foi realizada no LAPROM para análise preliminar do ‘grau de liberação’ e ‘fracionamento densimétrico’ das porções constituintes do carvão para a viabilidade de sua separação.

4.3.1. Estudo da primeira amostra de carvão

A amostra de carvão inicialmente analisada no LAPROM foi enviada pelo LAEC na granulometria usual de extração (ROM) nas frentes de lavra com peso total aproximado de 300 kg.

4.3.2. Caracterização do carvão

O grau de liberação dos constituintes do carvão (matéria orgânica + contaminantes minerais), a primeira meta do estudo, foi investigado em laboratório através de sucessivas etapas de cominuição de alíquotas constituídas por partículas nas dimensões máximas de -50,0 mm; -9,5 mm e -2,0 mm (ver esquema na figura 11) e respectivas classificações nas peneiras de 2,0 mm e 0,1 mm. As faixas granulométricas de investigação foram escolhidas, em função dos intervalos de tamanho aplicáveis nos processos de concentração gravimétrica utilizados a nível mundial para o beneficiamento de carvão.

Segundo Sampaio e Tavares (2005), o processo de jigagem admite carvão no intervalo de 2,0 mm até 300 mm e espirais processam carvão na faixa entre 0,15 mm a 1,2 mm (abaixo de 2 mm). Portanto, as faixa granulométricas acima de 2,0 mm poderiam ser tratadas em jigue ou outro processo de beneficiamento que admitisse este intervalo e as partículas classificadas na fração situada entre 2,0 mm e 0,1 mm, em espirais. O intervalo abaixo de 0,1 mm, faixa granulometrica tratada em processo de flotação, não foi alvo desse trabalho, sendo descartado.

A granulometria -50 mm (100% <50 mm), além de estar em uso nas unidades de tratamento de carvão das companhias mineradoras locais, foi mantida como ponto de partida para comparações com as demais dimensões estudadas. A faixa -9,5 mm foi adotada com a finalidade de aumentar o grau de liberação da fração orgânica, aproximando-se da dimensão sugerida (<12,7 mm) no estudo de caracterização tecnológica realizado anteriormente com o carvão da mesma camada (REDIVO, 2002), bem como por situar-se ainda no intervalo de operação de jigagem, método de concentração mais utilizado na região. Com o intervalo

-2,0 mm buscou-se liberar a fração carbonosa não alcançada nas dimensões anteriormente testadas, sendo o mesmo aplicado em processos de concentração para partículas finas, larga e mundialmente utilizados (mesas, espirais e outros concentradores), embora a cominuição nesta dimensão não seja economicamente aconselhável.

Posteriormente, cada intervalo granulométrico constituinte das faixas –50 mm; 9,5 mm e 2 mm foi analisado em 'ensaios de afunda-flutua' (fracionamento densimétrico) com avaliação da massa e teor de cinzas correspondente a cada densidade. Adotou-se nos testes as densidades 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,2 e 2,4 g/cm³, obtidas a partir da mistura de líquidos orgânicos: Benzeno (C_6H_6 – 0,9 g/cm³), Tetracloroetileno (C_2Cl_4 – 1,6 g/cm³) e Bromofórmio ($CHBr_3$ – 2,9 g/cm³).

A figura 11 apresenta sistemática adotada nos três intervalos granulométricos para a caracterização do carvão.

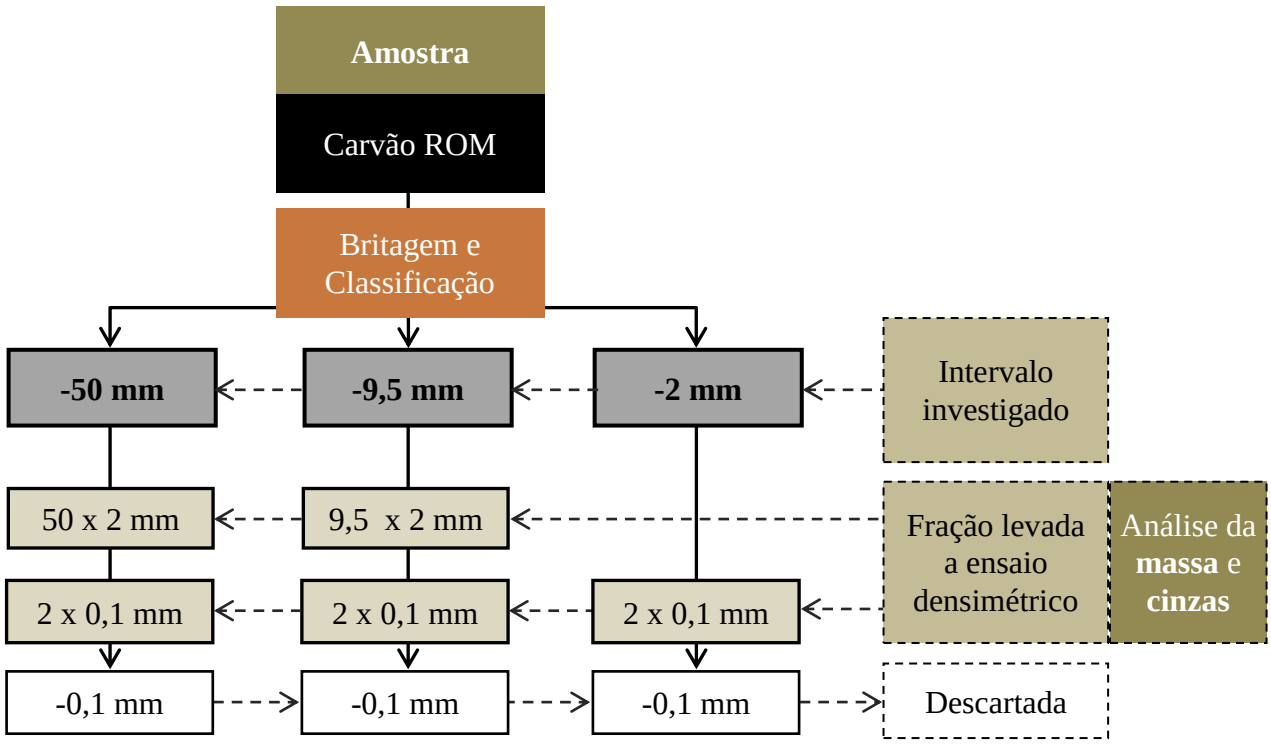

Figura 11 – Distribuição dos intervalos para a caracterização do carvão.

4.3.2.1. Fração –50 mm

Toda a amostra enviada ao LAPROM pelo LAEC foi reduzida à granulometria -50 mm. Objetivando não gerar maior percentual da fração fina, preparou-se a alíquota, rebritando somente a fração retida nas respectivas telas estudadas.

Então, tomaram-se duas alíquotas do carvão para os ensaios descritos na sequência.

Fracionamento granulométrico *versus* teor em cinzas por fração

Objetivou-se na primeira alíquota correlacionar os referidos parâmetros para análise da faixa granulométrica em que se encontrariam as massas (percentuais em peso) dos constituintes orgânico e inorgânico existentes no carvão, auxiliando na identificação da granulometria de liberação das matérias carbonosa e mineral. No subitem 5.1.1.1 (tabela 10) é apresentado o resultado do ensaio, cujos intervalos granulométricos foram constituídos a partir de peneiras previamente escolhidas, dentro do possível, à razão de $\sqrt{2}$ entre as aberturas das telas.

Ensaio densimétrico *versus* teor em cinzas das frações 50,0 mm x 2,0 mm e 2,0 mm x 0,1 mm

A segunda alíquota foi classificada nas telas 2,0 mm e 0,1 mm, gerando as frações 50 mm x 2,0 mm; 2,0 mm x 0,1 mm e -0,1 mm. Como já mencionado, a fração menor que 0,1 mm, não contemplada no referido ensaio, foi desprezada.

As duas frações maiores que 0,1 mm foram submetidas a ensaios de afunda-flutua nas densidades detalhadas anteriormente.

Buscou-se identificar no teste, a partir do cálculo das massas dos flutuados e afundado (+2,4 g/cm³) e respectivos teores de cinzas, a densidade teórica de separação (ou densidade de corte) entre o carvão com teor (ponderado) de cinzas de ≈43% e a ganga existentes no carvão bruto (ROM), bem como os demais produtos obtidos por fracionamento densimétrico, e por fim, o grau de dificuldade de beneficiamento do carvão em processos gravimétricos, avaliado através do parâmetro *Near-Gravity Material* (NGM).

Para elaboração das curvas de lavabilidade (“curva densimétrica e de NGM” e “curvas dos flutuados e afundados”), utilizou-se os resultados das “massas flutuadas e respectivos teores de cinzas *versus* densidade”.

4.3.2.2. Fração –9,5 mm

A segunda amostra para ensaios foi reduzida (100% da massa) à faixa granulometrica -9,5 mm no LAPROM. Posteriormente foi classificada nas telas de abertura 2 mm e 0,1 mm. Utilizou-se mesma sistemática, a fim de não gerar maior percentual da fração fina, rebritando apenas a fração retida nesta peneira.

Ensaio densimétrico *versus* teor em cinzas das frações 9,5 mm x 2,0 mm e 2,0 mm x 0,1 mm

As frações 9,5 mm x 2,0 mm e 2,0 mm x 0,1 mm, a exemplo do intervalo -50 mm, foram analisadas em testes de afunda-flutua com o fim de identificar a densidade de corte para a obtenção do carvão almejado, as demais frações densimétricas e o parâmetro NGM. O intervalo -0,1 mm foi desprezado. Os resultados obtidos neste intervalo foram plotados em gráfico para efeito de comparação e comentários apresentados na seção 5.1.1.2 e Apêndice.

4.3.2.3. Fração –2 mm

Como última granulometria para avaliação do grau de liberação da matéria orgânica, reduziu-se nova alíquota à granulometria -2,0 mm, classificando-a somente na peneira 0,1 mm com a finalidade de separar a parcela da fração mais fina a ser descartada por não constituir escopo deste estudo.

Ensaio densimétrico *versus* teor em cinzas da fração 2,0 mm x 0,1 mm

Esta fração teve seu fracionamento por densidade analisado em testes para fins de comparação com os resultados obtidos nos intevalos -50 mm e -9,5 mm anteriormente estudados.

4.3.3. Análise do parâmetro *Near-Gravity Material* (NGM)

Para a avaliação do parâmetro NGM, foram mensuradas as massas situadas no intervalo densimétrico ±0,1 g/cm³ entre as densidades analisadas para conhecimento do percentual de partículas mistas existentes no carvão e identificar o grau de dificuldade de sua separação no processo de jigagem.

4.4. Metodologia utilizada no Laboratório (AMR) da Universidade de Aachen (RWTH)

Com base nos resultados obtidos nas três faixas granulométricas testadas (50; 9,5 e 2 mm) no LAPROM-UFRGS, foram discutidas na RWTH outras rotas para o estudo do carvão catarinense, tendo em vista novos processos e equipamentos desenvolvidos na Alemanha. Para a análise da distribuição granulométrica do carvão, visando os testes no laboratório AMR-RWTH, foram mantidas as peneiras com abertura próxima das estudadas no LAPROM, não somente em razão da possibilidade de comparação posterior dos resultados, mas da adequação aos intervalos operacionais dos equipamentos disponíveis naquele laboratório. Assim, optou-se por manter as telas de 50 mm e 2,0 mm, adicionando a peneira de 16 mm, uma vez que a liberação entre a matéria orgânica e mineral, como já mencionado anteriormente, não ocorreu em nenhuma faixa testada, o que inclui a malha de 9,5 mm. A tela de 16 mm foi introduzida, a fim de se manter as partículas de carvão numa dimensão mais compatível para o processamento gravimétrico, outros métodos de concentração existentes, bem como considerar o menor custo operacional para sua cominuíção. Mantiveram-se as análises dos teores de cinzas em todos os processos testados, estudando-se o teor de enxofre total somente em ensaios, cujos resultados aproximaram-se do carvão-alvo (43% base seca). O equipamento utilizado para análise do teor de enxofre foi o CHNOS Elemental Analyzer, modelo vario MACRO cube, fornecido pela empresa *Elementar Analysensysteme GmbH* com sede na Alemanha, cujas análises foram realizadas na UFRGS. Na seqüência são descritos os estudos de beneficiamento propostos no plano de pesquisa.

Ressalta-se aqui que em todas as fases da investigação e nas rotas testadas, buscou-se, sempre que possível, manter o foco na exeqüibilidade operacional do beneficiamento em escala industrial.

4.5. Estudo da segunda amostra de carvão

4.5.1. Preparação da amostra conforme plano de pesquisa inicial

No final de abril de 2010, iniciou-se a preparação da amostra de carvão, no total 330 kg, visando sua utilização nos testes no laboratório da RWTH, conforme fluxograma inicial sugerido (figura 12) e a seguir descrito.

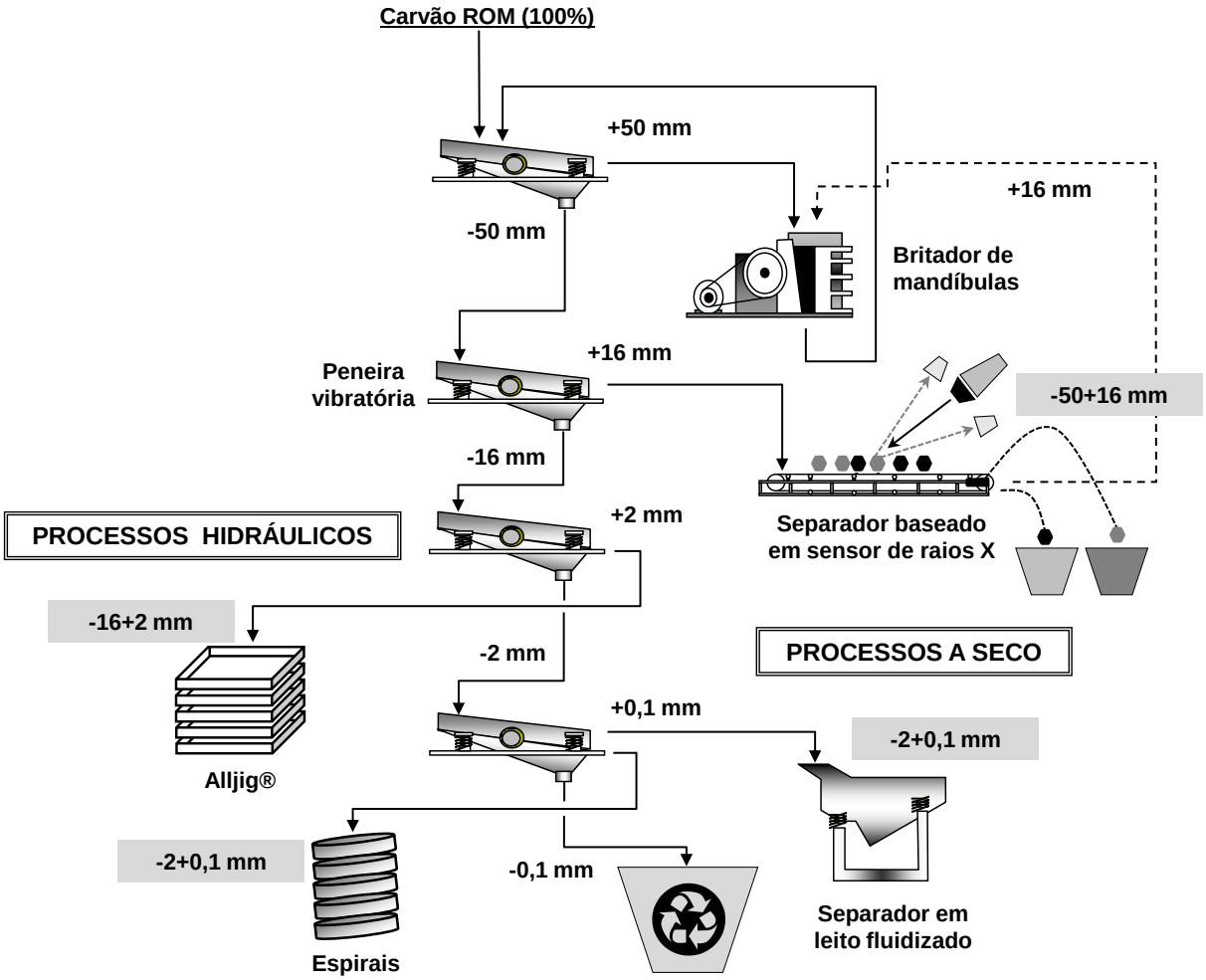

Figura 12 - Fluxograma do plano de pesquisa inicial na RWTH.

Primeiramente a amostra foi seca a 50 °C em estufa, fornecida pela Heraeus Instruments, modelo Thermo Scientific UT 12 e com capacidade máxima de 250 °C. Após o carvão foi distribuído em caixas de aço inox para posterior classificação nas peneiras de 50 mm, 16 mm e 2 mm e cominuição apenas das partículas retidas na malha de 50 mm, com o fim de não gerar maior percentual de finos.

Na seqüência toda a amostra foi classificada na tela de abertura 50 mm. As partículas retidas nesta malha foram cominuidas em britador de mandíbulas, com a finalidade de que 100% da amostra se situasse abaixo de 50 mm. As especificaçoes técnicas do britador não foram disponibilizadas (ausência de selo de identificação na máquina).

A seguir, utilizando-se a peneira vibratória circular, fabricada por Vibrowest Italiana, modelo MR. 16", foi realizada a classificação do carvão nas telas de 16 mm e 2 mm em duas

operações distintas. Embora o equipamento permitisse a classificação simultânea em duas telas por ensaio, optou-se por realizar o teste em duas etapas, a fim de se garantir melhor eficiência no peneiramento. O resultado do referido ensaio encontra-se na tabela 7.

Tabela 7 - Distribuição granulométrica da 2ª amostra estudada.

Faixa	**Peso** (kg)	**Peso Retido** (%)	**Retido acum.** (%)	**Passante acum.** (%)
-50 mm + 16 mm	155,80	47,33	47,33	52,67
-16 mm + 2 mm	136,05	41,33	88,66	11,35
-2 mm	37,35	11,34	100,00	--
Total	329,20	100,00	--	--

O intervalo -16 mm +2 mm, cujo percentual mássico respondeu por 41,33% da amostra inicial, destinou-se aos testes hidráulicos no jigue de laboratório processado por batelada, enquanto que as frações restantes -50 mm +16 mm (47,33%) e -2 mm (11,34%) foram separadas para testes em outros processos: a seco para a fração mais grosseira (separação baseada em sensor) e fina (separação em leito fluidizado) e hidráulico para finos (mesa concentradora e espirais), respectivamente.

4.5.2. Ensaio no *Alljig*® (processo hidráulico)

Primeiramente optou-se pelo ensaio em jigue pela disponibilidade do aparelho no laboratório da RWTH e por sua importância, uma vez que este tipo de equipamento ainda é empregado na maioria das empresas de Santa Catarina e o teste contemplaria um intervalo granulométrico relevante e mais adequado ao carvão desta camada. Este jigue, disponível nesta Universidade e apresentado na figura 13, é o denominado *Alljig*®, desenvolvido pela empresa alemã *All Mineral Aufbereitungstechnik GmbH & Co*. Caracteriza-se por ser do tipo Baum com pulsação lateral, controle de variação da freqüência e amplitude de pulsação, cujo processamento ocorre em bateladas. Sua cuba operacional (leito) é constituída por 11 elementos (ou gabaritos) construídos em acrílico nas dimensões 400 mm x 400 mm, sendo 5 peças com altura 50 mm (A) e 6 peças de 25 mm (B). Os elementos "A" destinam-se a partículas mais grosseiras, enquanto que os "B", às mais finas. Ao término do teste, estes gabaritos são retirados frontalmente, semelhante a gavetas sem fundo, permitindo avaliar porções de diferentes espessuras do leito estratificado durante a operação.

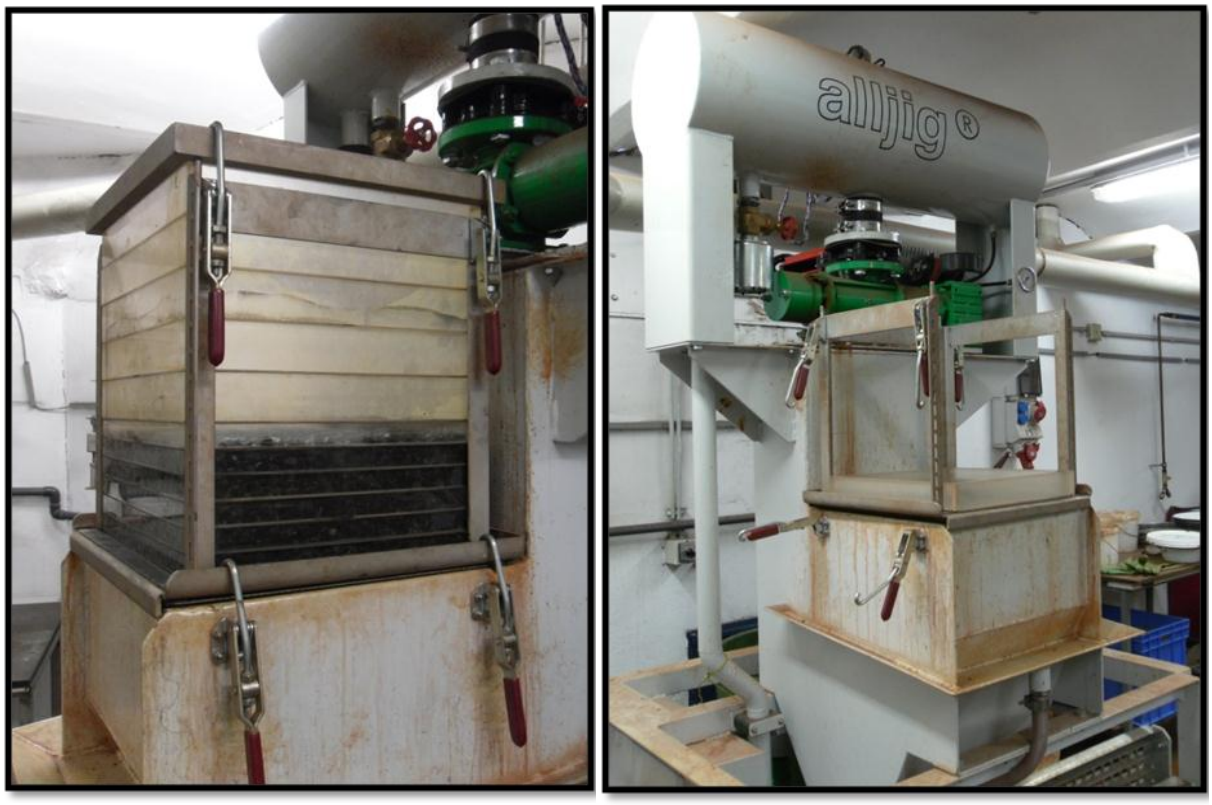

Figura 13 – Vistas dos 11 elementos (os cinco mais inferiores preenchidos com carvão) e da estrutura de fixação que compõem a cuba operacional do *Alljig*®.

O objetivo de ensaios neste dispositivo foi de conhecer mais detalhadamente a influência de alguns fatores sobre a estratificação no processo de jigagem e consequentemente melhorar a separação das frações densimétricas contituintes do carvão nas operações de beneficiamento das Carboníferas catarinenses.

4.5.3. Algumas considerações sobre os parâmetros aplicados em pesquisas anteriores e sua adequação ao estudo do carvão catarinense em processo hidráulico

Pode-se observar pelos estudos apresentados (subítem 3.5.1) que as características de alimentação integra o rol dos fatores que afetam a estratificação. Constata-se que cada carvão estratifica melhor quando são aplicados determinados valores de amplitude, frequência e espessura de leito, segundo a distribuição de tamanho e forma das partículas da alimentação entre outros fatores. Em nenhum estudo anteriormente pesquisado e relacionado no referido subítem, observa-se a abordagem do parâmetro NGM e sua análise nos minérios examinados.

4.5.3.1. Parâmetros adotados nos testes com *Alljig*®

Os parâmetros a serem utilizados nos testes com o carvão da camada Bonito deverão seguir, dentro do possível e a partir de resultados preliminares (pesquisa exploratória), as faixas operacionais e principalmente as variáveis amplitude, frequência de pulsação e espessura do leito adotadas nas pesquisas conduzidas por Mishra *et al.* (1998 e 2006), cujos resultados apresentaram melhor estratificação.

4.5.3.2. Eficiência de separação

Quanto à lógica que embasa o cálculo da "eficiência de separação" adotada em um dos estudos anteriores (apresentado no Apêndice), esta parece consistente, prestando-se bem a comparações e ao fim por que foi criado. Seu resultado transmite idéia de relatividade, uma vez que a eficiência de separação de 35% é o máximo valor obtido nas condições operacionais analisadas. Pelo fato dos percentuais resultantes deste parâmetro afastarem-se demasiadamente de 100% - valor máximo de referência - perde-se, à primeira vista, a noção de quanto efetivamente uma eficiência de separação foi melhor em relação às demais.

Inicialmente buscou-se utilizar a grandeza 'eficiência de separação' para avaliação do desempenho da estratificação nos testes hidráulicos em jigue processado por batelada. Considerou-se primeiramente o teor de cinzas como 'contaminante' e em segundo lugar o teor de carbono como 'concentrado' para o cálculo deste parâmetro, porém os valores situaram-se abaixo de 10% e 0 (zero), respectivamente. Acredita-se que este raciocínio se aplique melhor a minérios metálicos, restrito às condições peculiares verificadas nestes experimentos.

Por sua vez, a curva de imperfeição Tromp do *Alljig*® não foi plotada, em razão de as massas resultantes de cada teste serem insuficientes para esta análise e a avaliação da performance do aparelho alcançar jigue processado por batelada ao invés de equipamento caracterizado por regime operacional contínuo, similar aos utilizados nas Carboníferas de Santa Catarina.

Em função do exposto, os resultados dos testes conduzidos no *Alljig*® foram avaliados apenas pelo 'teor de cinzas e recuperação mássica' de cada fração densimétrica obtida após os ensaios.

Cabe ressaltar que a imperfeição no processo de jigagem é resultado das ineficiências operacionais conjuntas ocorridas durante a estratificação (movimento vertical de expansão e compactação) e ao final do aparelho no momento da separação entre as frações leves e densas

(regime contínuo). Considerando que o *Alljig*® caracteriza-se por processamento descontínuo (regime de batelada), as massas recuperadas ao fim dos testes refletem a imperfeição deste aparelho, inferindo um índice parcial, se comparado ao sistema contínuo e usual de jigagem, uma vez que elas se referem somente à imprecisão causada na estratificação do leito. Portanto, as massas recuperadas no *Alljig*® e registradas neste estudo não contemplam a imperfeição global de um jigue, caracterizado pelo processamento em regime contínuo e em escala industrial, limitando-se a indicar percentuais aproximados, usualmente superiores aos das recuperações reais.

4.5.4. Tipos de processamentos simulados no *Alljig*®

No item 5 - Resultados e Discussão, são descritas as simulações realizadas neste equipamento para análise da eficiência de separação dos constituintes densimétricos do carvão em dois tipos de processamento: o 'processamento principal' e o 'reprocessamento das frações mistas'. Convencionou-se aqui 'processamento principal' como aquele que é usualmente realizado nos jigues das empresas carboníferas catarinenses, onde são efetuados dois ou mais cortes densimétricos, gerando um produto (concentrado) e subprodutos (mistos e rejeitos). Por outro lado, definiu-se 'reprocessamento das frações mistas' como sendo um processamento secundário, onde se busca obter um produto de melhor qualidade, em nova operação de jigagem para aumento da eficiência de separação, a partir de um ou mais subprodutos gerados anteriormente no processamento principal.

Dentro do objetivo específico de pesquisar nova técnica que otimizasse a operação de beneficiamento do carvão em estudo, realizaram-se ensaios com alíquotas a partir do intervalo 16 mm x 2 mm no *Alljig*®, uma vez que este aparelho gera movimentos de expansão e contração em leito constituído por minério, simulando com boa margem de acerto a etapa de estratificação de uma operação de jigagem para posterior análise de seu resultado.

A figura 14 ilustra os elementos (gabaritos de seção quadrada) que compõem a cuba do *Alljig*®, dispostos na ordem em que foram montados para a consecução dos testes.

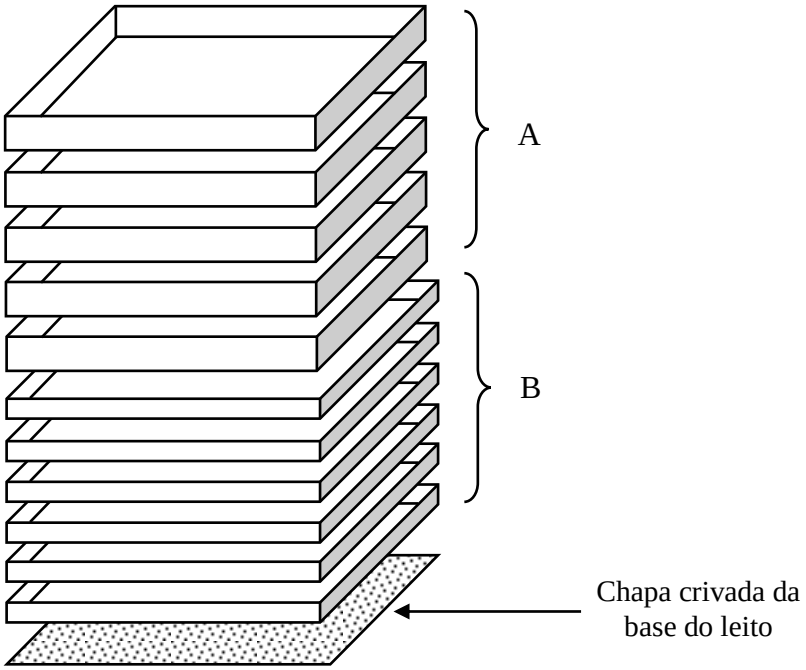

Figura 14 - Disposição dos elementos A e B na cuba do *Alljig*® na ordem de execução do ensaio.

Devido a escassez de estudos sobre o tema (características dos fatores determinantes da estratificação no processo de jigagem), realiza-se neste equipamento uma pesquisa exploratória, com o objetivo de identificar padrões e tendências que pudessem nortear a busca por melhores ajustes dos parâmetros que afetam a segregação da fração mista peculiar a este carvão.

Nos primeiros testes, seguindo a caracterização tecnológica do carvão estudado, buscou-se avaliar três produtos no *Alljig*®: carvão, mistos e rejeito, segundo seus teores de cinzas.

4.5.5. Teste preliminar com *Alljig*®

4.5.5.1. Aferição do equipamento

Com o objetivo de calibrar o equipamento, o primeiro teste com carvão serviu para acerto preliminar dos parâmetros operacionais, a partir da observação do comportamento do carvão na cuba do jigue. Buscou-se empreender uma boa mobilidade ao leito (quando em expansão) com ajustamentos das variáveis freqüência e amplitude de pulsação que permitissem gerar tal resultado e observar o nível de estratificação do carvão na referida

operação. Considerou-se como ‘amplitude’ a distância entre as medidas máxima atingidas pelo nível de água na etapa de expansão e mínima na de compactação. A faixa granulométrica inicialmente utilizada no teste foi -16 mm +2 mm.

Adotaram-se inicialmente os seguintes valores para os parâmetros elencados a seguir:

- Tela de base do leito crivada (400 mm x 400 mm): com diâmetro de 1 mm
- Freqüência: 80 pulsos/min
- Amplitude: 5,0 cm (pressão de ar: 0,1 bar)
- Duração do teste: 15 min
- Altura total do leito (ao final do ensaio): 15 cm
- Massa de carvão consumida: 22 kg

A tela crivada não se apresentava vazada nos primeiros 7 mm no lado que continha 226 fileiras de furos (diâmetro 1 mm), dispondo 395 linhas de furos na outra dimensão. A tela crivada com furos de diâmetro 2 mm apresentava 113 fileiras numa dimensão e 198 linhas na outra.

A mobilidade do leito durante a operação (expansão e sucção) apresentou-se boa, demonstrando acerto na escolha dos parâmetros “amplitude” e “freqüência de pulsação” utilizados inicialmente neste quesito.

Os gabaritos foram retirados após o ensaio, como ilustrado na seqüência, com o objetivo de se obter frações de carvão, mistos e rejeito. Na figura 15, visualiza-se nos elementos B o carvão (concentrado) disposto no segmento mais superior, os mistos 1 e 2, situados nas porções mediana superior e inferior, respectivamente, e por fim, o rejeito no elemento mais inferior (sobre a tela crivada). Os elementos A no referido teste tiveram função única de permitir a expansão do leito.

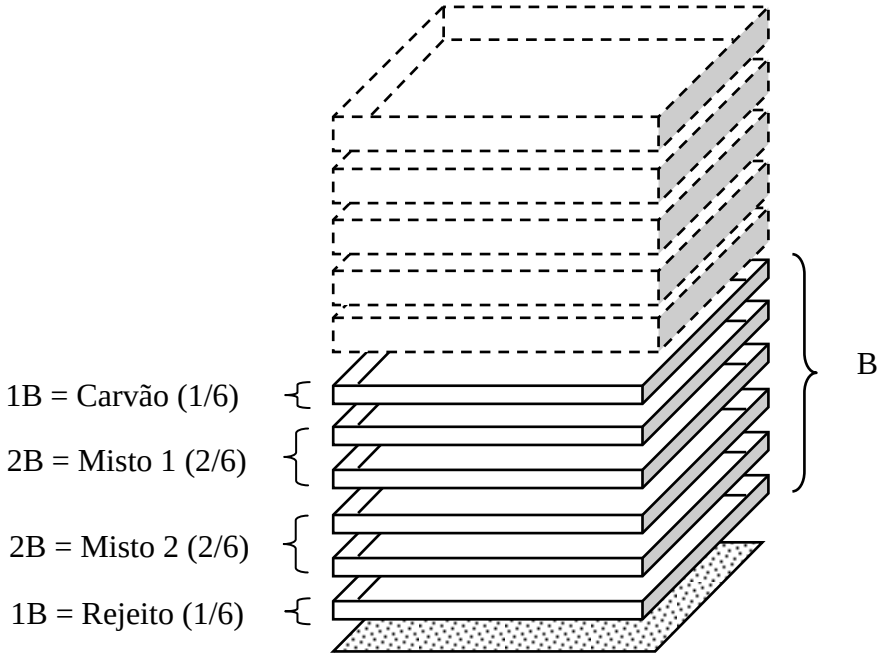

Figura 15 - Disposição dos elementos B e frações estudadas na cuba do *Alljig*®.

4.5.5.2. Preparação das alíquotas das frações do teste preliminar para análise

Na seqüência, cada fração, após seca e pesada para quantificação de sua massa, foi preparada para a determinação do respectivo teor em cinzas e avaliação da qualidade dos produtos obtidos. Primeiramente, as frações foram quarteadas até constituirem alíquotas de aproximadamente 150 gramas e após armazenadas para ensaios posteriores. Na seqüência, separou-se metade do peso de cada alíquota para sua cominuição em moinho, a fim de que 100% da massa estivesse abaixo de 200 mμ. A seguir foram realizados os ensaios para a determinação da umidade higroscópica e teor de cinzas. Determinou-se o teor de enxofre somente nos testes com resultados próximos da meta.

4.5.6. Divisão no intervalo granulométrico estudado

A partir do resultado obtido no primeiro teste no *Alljig*®, cujos teores de cinzas, quando bem próximos da meta, apresentavam recuperações teóricas mínimas, buscou-se estudar o comportamento do carvão em 2 faixas granulométricas distintas a partir da granulometria máxima de 16 mm, embora a liberação dos minerais da matriz carbonífera não se alterariam significativamente com tal reclassificação, segundo os resultados preliminares

obtidos no LAPROM. Esta decisão teve por meta dois resultados que pudessem impactar no desempenho do processo gravimétrico:

I. Tentar reduzir uma das dimensões discrepantes para diminuir a lameralidade (caracterizada por duas dimensões muito maiores que a terceira) das partículas;

II. Reduzir o intervalo granulométrico das partículas por ocasião dos testes posteriores.

Apenas a amostra na faixa -16 mm +2 mm remanescente foi reclassificada na tela de 6,3 mm, constituindo 2 frações com intervalos granulométricos respectivos de -16 mm +6,3 mm e -6,3 mm +2 mm. Na seqüência foram realizados novos testes no *Alljig*® com tais frações, sendo processadas separadamente e seus resultados analisados, conforme figura 16. Alterando-se a freqüência e amplitude de pulsação, buscou-se conhecer o comportamento dos estratos na cuba do equipamento nas duas novas faixas. Os resultados dos ensaios validados estão apresentados no Apêndice.

Considerando que a proporção entre as frações granulométricas manteriam-se constantes, realizou-se no decorrer dos novos testes e quando necessário, a recontituição da fração granulométrica original 16 mm x 6,3 mm, após o descarte da faixa 50 mm x 16 mm, além da inclusão das peneiras 6,3 mm e 2 mm nos intervalos amostrais para sua adequação à granulometria indicada no curso dos ensaios.

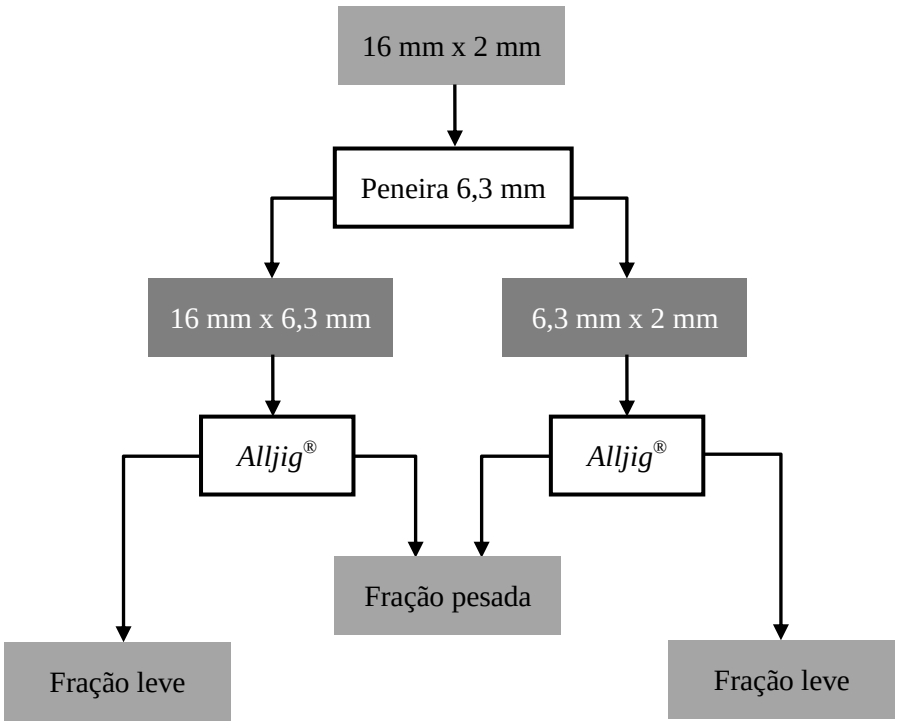

Figura 16 - Esquema de ensaios após a divisão do intervalo granulométrico estudado.

A reclassificação granulométrica do intervalo inicial -16 mm +2 mm, após separação na peneira 6,3 mm, é apresentada na tabela 8.

Tabela 8 - Reclassificação granulométrica em peneira de 6,3 mm.

Faixa	Peso (kg)	Peso Retido (%)	Retido acum. (%)	Passante acum. (%)
-16 mm + 6,3 mm	61,06	68,45	68,45	31,55
-6,3 mm + 2 mm	28,14	31,55	100,00	--
Total	89,20	100,00	--	--

4.5.7. Investigação da frequência específica de pulsação para os novos intervalos

A partir desta divisão, iniciou-se no *Alljig*® a pesquisa exploratória da frequência específica de pulsação nos intervalos -16 mm +6,3 mm e -6,3 mm +2 mm em faixa pré-definida de freqüências de 56 a 120 min^{-1}, conforme estudo realizado por Mishra e

Mehrotra (2006b), com análises da massa recuperada e teor de cinzas dos níveis formados após a estratificação do leito.

O estudo das freqüências de pulsação específicas para as frações mencionadas iniciou pelo valor de 80 pulsos por minuto. Fixou-se como critério de variação para a pesquisa nas demais freqüências o percentual de 10% (8 min^{-1}). Alterou-se a altura de leito, quando necessário, a fim de se alcançar a melhor estratificação das frações mistas. Todos os parâmetros utilizados nos ensaios e resultados obtidos são apresentados e discutidos no ítem "Resultados e Discussão".

Na medida que os testes de investigação foram realizados, os resultados 'recuperação mássica *versus* teor de cinzas' indicaram tendências e a necessidade de aplicação de ensaios adicionais para se atingir a qualidade do produto final almejado, em função do alto percentual de NGM contido no carvão ROM. Com os resultados promissores (teor de cinzas das frações mais leves próximos da meta) encontrados, foram simuladas operações de processamento principal e/ou reprocessamento da fração mista, buscando-se sempre que possível o melhor equilíbrio metalúrgico entre a qualidade e quantidade, como critério de comparação e avaliação do desempenho de cada conjunto de parâmetros operacionais adotados (ver tabelas 14, 19, 25 e 26).

4.5.8. Ensaio no sistema de separação de materiais baseado em sensor de raios X (processo a seco)

Na busca de alternativas que melhorassem o beneficiamento do carvão da camada Bonito, realizaram-se ensaios no 'separador baseado em sensor de raios X', fornecido pela companhia alemã *Titech GmbH* nas suas instalações de testes em Wedel. O modelo e demais especificações técnicas do equipamento não foram disponibilizadas pelo fabricante.

4.5.8.1. A amostra para os testes

A fração -50 mm +16 mm, preparada no laboratório da universidade alemã, correspondeu a 47,33% da massa da amostra inicial (≈150 kg) e destinou-se ao teste para separar a matéria carbonosa da inorgânica em sistema de classificação a seco baseado em sensor (raios X), bastante utilizado na Europa. Seu resultado está descrito no item "Outros Testes".

4.5.8.2. Critério inicial para a separação das frações leves, mistas e pesadas no separador baseado em sensor de raios X

A matéria mineral presente no carvão ocorre em grãos finos disseminados em toda a matriz orgânica. Esta característica produz um aspecto homogêneo no carvão, tornando difícil separar visualmente suas frações constituintes (concentrado, mistos e rejeito). Este carvão nunca havia sido testado em equipamento que utilizasse este dispositivo de separação (sensor). Por esta razão, foi necessário adotar um critério inicial para separação das frações e assim possibilitar a calibragem do sensor de raios X. Decidiu-se classificar os constituintes do carvão pela diferença de densidades entre si por tratar-se de um parâmetro físico possível e fácil de se avaliar. Após ensaios de afunda-flutua, realizados em partículas de várias dimensões, dentro do intervalo 50 mm x 16 mm, determinou-se o critério necessário, conforme mostrado na tabela 9.

Tabela 9 - Critério inicial de separação.

Densidade (g/cm³)	**Fração constituinte**
-1,8	Concentrado
+1,8-2,0	Mistos
+2,0	Rejeito

4.5.8.3. Testes com o separador baseado em sensor de raios X

Inicialmente, as partículas constituintes das três frações foram dispostas em filme plástico para a varredura de inspeção necessária à aferição do equipamento. Após, quatro testes foram conduzidos com a amostra, a fim de se investigar o progresso resultante da separação, a partir de reajustes sucessivos nos parâmetros da máquina. Após os testes, os teores de cinzas e massas recuperadas foram analisados.

Lamentavelmente o equipamento da *Titech* classificava apenas dois produtos por ensaio: um concentrado e um rejeito. Por esta razão a fração mista não foi considerada separadamente nos ensaios, exceto no quarto teste, quando este foi conduzido em duas etapas para simular a retirada desta fração em segundo corte.

Os testes preliminares mostraram que o critério de separação inicial (diferença de densidades) não foi bem sucedido, uma vez que o princípio técnico utilizado pelo

equipamento (densidade atômica) não produziu os mesmos resultados. As partículas pequenas (~<25 mm) de siltito não foram detectadas pelo sensor de raios X durante os ensaios, reduzindo a eficiência do processo. Em decorrência disso, foi adotado novo critério de separação com foco na recuperação mássica do produto 'leve'. Então a unidade foi configurada, a fim de se obter diferentes recuperações do referido produto em novos testes, procurando identificar a melhor relação 'massa/teor de cinzas' para a produção de um concentrado mais promissor. Estes resultados são apresentados no Apêndice. Na figura 17, vê-se a tela do computador com o *software* que conduz o equipamento, contemplando as imagens em tons de cinza e coloridas das densidades atômicas das partículas, tomadas como padrão para aferição dos parâmetros operacionais, com o respectivo gráfico alta *versus* baixa intensidades de radiação, cujos ajustes podem ser efetuados a partir de cliques no *mouse*.

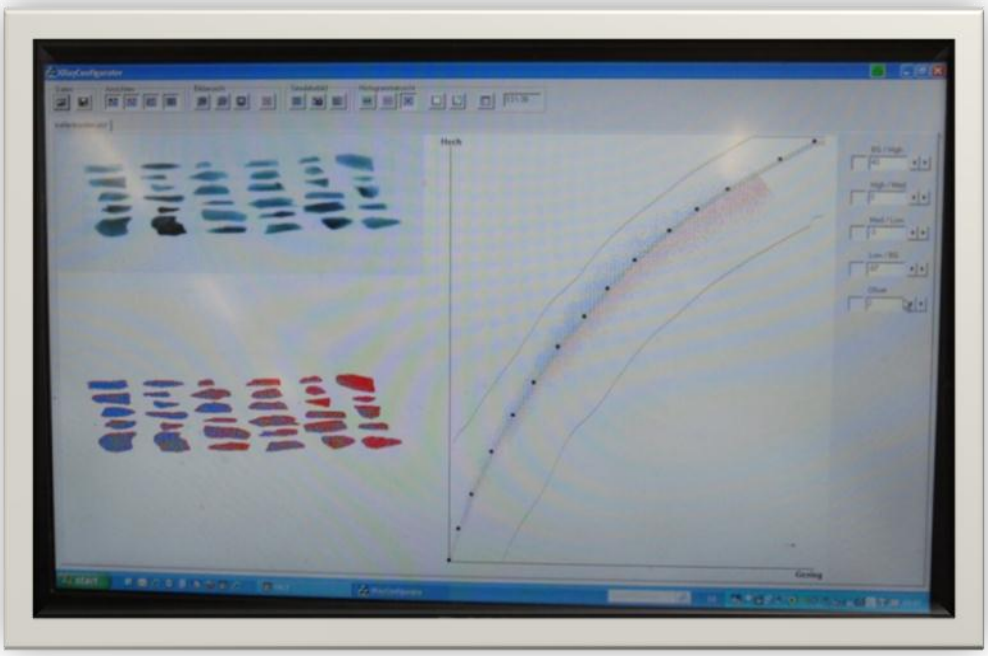

Figura 17 – Imagens das densidades atômicas das partículas em tons de cinzas e em cores e outros parâmetros para ajuste operacional do equipamento.

4.5.9. Ensaio no separador de finos em leito fluidizado (processo pneumático)

A fração -2 mm +0,1 mm (11,34% da massa total da amostra) foi inicialmente testada em processo a seco no separador de finos em leito fluidizado. Tal ensaio teve por meta experimentar nova tecnologia de processamento a seco disponível e aplicável em situações quando há**:**

i. Limitada disponibilidade de água em regiões áridas;
ii. Restrições ambientais de suprimento de água e disposição de lamas;
iii. Possibilidade de formação de drenagem ácida de minas na presenca de enxofre e água.

O equipamento foi fornecido pela empresa alemã *Amberger Kaolinwerke Eduard Kick GmbH & Co.* - AKW. Demais especificações não foram disponibilizadas pelo fabricante.

Tendo em vista que seu resultado não foi satisfatório, optou-se por testar esta fração em processo hidráulico, cujo meio utilizado apresenta maior eficiência de separação.

4.5.10. Ensaio de finos de carvão em processos hidráulicos

Em função do resultado não satisfatório obtido na fração -2 mm +0,1 mm estudada em processo pneumático, optou-se por ensaios em meio hidráulico com o mesmo intervalo, inicialmente em mesa concentradora para análise da viabilidade de concentração do carvão desejado e, se exitoso, posteriormente em espirais.

4.5.10.1. Ensaio de finos de carvão em mesa concentradora

Considerando que a mesa admite menor quantidade de amostra que outros equipamentos afins, realizou-se neste, teste preliminar para avaliar a exeqüibilidade de concentração de produto com as características exigidas pelo mercado termelétrico local. Utilizou-se mesa concentradora fornecida pela inglesa *Holman Wilfley Ltd.*, modelo 2000.

O resultado positivo apresentado no item “Resultados e Discussão” motivou os ensaios seguintes em espirais.

4.5.10.2. Ensaio de finos em espirais

A produção de carvão com teor de cinzas próximo a 43% obtida no teste em mesa concentradora incentivou o prosseguimento dos ensaios em espirais para análise do comportamento dos finos neste equipamento.

O estudo em espirais contemplou duas concentrações de sólidos: 12% e 24%. O equipamento utilizado foi fornecido pela empresa *Multotec Cyclones Ltd.*, modelo SC 18/4/A/3, fabricado em 1996. As análises estão expostas no item “Resultados e Discussão”.

4.6. Estudo da terceira amostra de carvão

A terceira amostra de carvão, procedente de área minerada na Mina Bonito I e necessária para complementação dos testes, foi solicitada à Carbonífera Catarinense, cuja coleta e preparação foram realizadas por técnicos do LAEC-SATC. Tendo em vista os testes promitentes aplicados na segunda amostra e *Alljig*® terem sidos conduzidos na granulometria máxima de 16 mm, a terceira amostra teve sua massa britada e totalmente passante em 16 mm previamente ao envio para a Alemanha. Tal alíquota foi recebida na universidade na segunda quinzena de outubro, sendo seca, homogenizada e reclassificada granulometricamente no início de novembro, objetivando os testes complementares, conforme esquema na figura 18.

A alíquota menor que 16 mm foi reclassificada nas telas de 6,3 mm e 2 mm para a constituição das frações 16 mm x 6,3 mm e 6,3 mm x 2 mm que posteriormente foram ensaiadas no jigue de processamento contínuo da *All Mineral*®. Após os testes neste aparelho, os produtos ‘leve’ e ‘pesado’ obtidos foram analisados e na seqüência misturados. Parte deste material foi ensaiado no *Alljig*® e outra reclassificada nas telas de 12,5 mm, conforme sugestão de Redivo (2002), e de 6,3 mm para posterior teste no *Alljig*® com vistas à comparação dos resultados nos intervalos 16 mm x 6,3 mm e 12,5 mm x 6,3 mm.

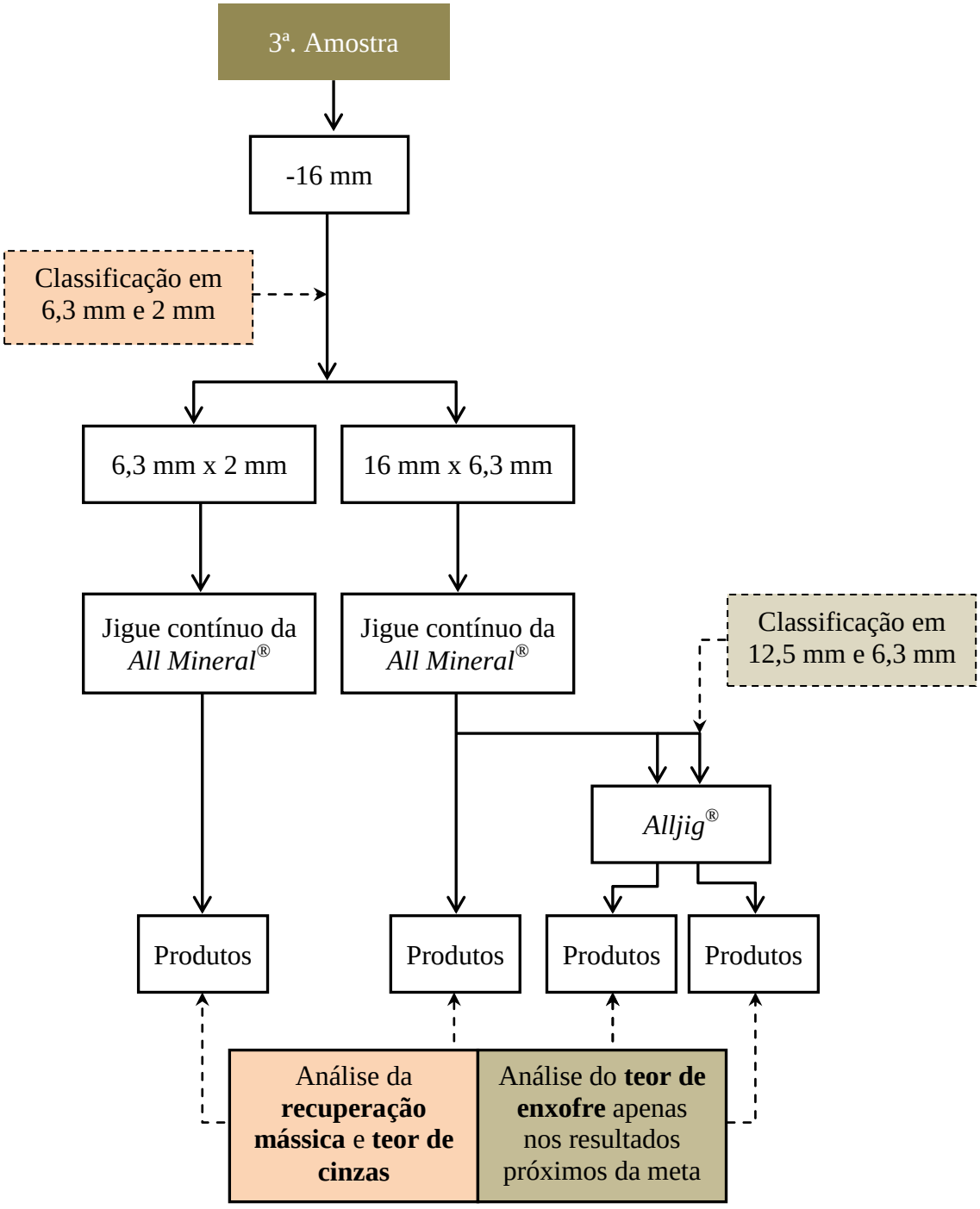

Figura 18 – Distribuição dos testes complementares realizados na terceira amostra.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ressalta-se que os resultados aqui apresentados e discutidos baseam-se nas características dos carvões coletados restritamente em frentes de lavra e áreas do jazimento na Mina Bonito I da Carbonífera Catarinense, não se estendendo além deste limite.

5.1. Caracterização do carvão

Os parâmetros operacionais utilizados e resultados dos ensaios realizados no LAPROM-UFRGS são apresentados e discutidos neste ítem.

5.1.1. Ensaios para a caracterização do carvão

A caracterização tecnológica do carvão da camada Bonito foi realizada através da análise do grau de liberação conjuntamente ao fracionamento densimétrico das frações constituintes do carvão.

5.1.1.1. Análise do grau de liberação do carvão

Fracionamento granulométrico *versus* teor em cinzas por fração

A separação da amostra em três intervalos granulométricos para análise do grau de liberação possibilitou, restritamente ao intervalo -50 mm +0,1 mm em função de ter a maior dimensão, estudo para analisar a separação dos constituintes do carvão por granulometria, bem como investigar o tamanho das partículas em que haveria melhor liberação destas frações, relacionando faixas granulométricas com teores de cinzas. Os teores de cinzas obtidos oscilaram de 59 a 64% sem redução significativa em alguma fração, resultado que inviabilizou sua aplicação, conforme valores apresentados na tabela 10.

Tabela 10 - Ensaio granulométrico *versus* teor de cinzas no intervalo -50 mm + 0,1 mm.

Fração (mm)	**Peso retido** (%)	**Teor de cinzas** (%)
-50,00 +37,50	6,71	60,74
-37,50 +25,40	27,74	62,99
-25,40 +15,90	22,48	60,42
-15,90 +12,70	6,00	61,12
-12,70 +8,00	11,93	62,13
-8,00 +6,35	2,72	62,70
-6,35 +4,75	2,54	62,30
-4,75 +2,00	8,17	64,11
-2,00 +1,68	1,20	62,42
-1,68 +1,00	2,38	62,13
-1,00 +0,84	0,72	61,51
-0,84 +0,50	1,76	60,86
-0,50 +0,10	3,88	59,30
-0,10	1,77	61,01

A baixa redução do teor de cinzas obtida no fracionamento granulométrico direcionou a investigação para a análise das frações existentes no carvão através de fracionamento densimétrico (testes de afunda-flutua).

5.1.1.2. Fracionamento densimétrico do carvão

Verifica-se na figura 19 que não houve significativa liberação da matéria orgânica em nenhuma das três faixas estudadas, uma vez que as curvas quase se sobrepõem sem variação relevante, acompanhando a dificuldade de separação apresentada no resultado do fracionamento granulométrico. A curva do flutuado correspondente à faixa -2 mm +0,1 mm separa-se levemente das demais, porém não apresenta melhor balanceamento nos parâmetros ‘recuperação mássica teórica *versus* teor de cinzas’ que a mesma curva referente ao intervalo -9,5 mm +0,1 mm; a curva de maiores percentuais mássicos até atingir o teor de cinzas próximo de 47%.

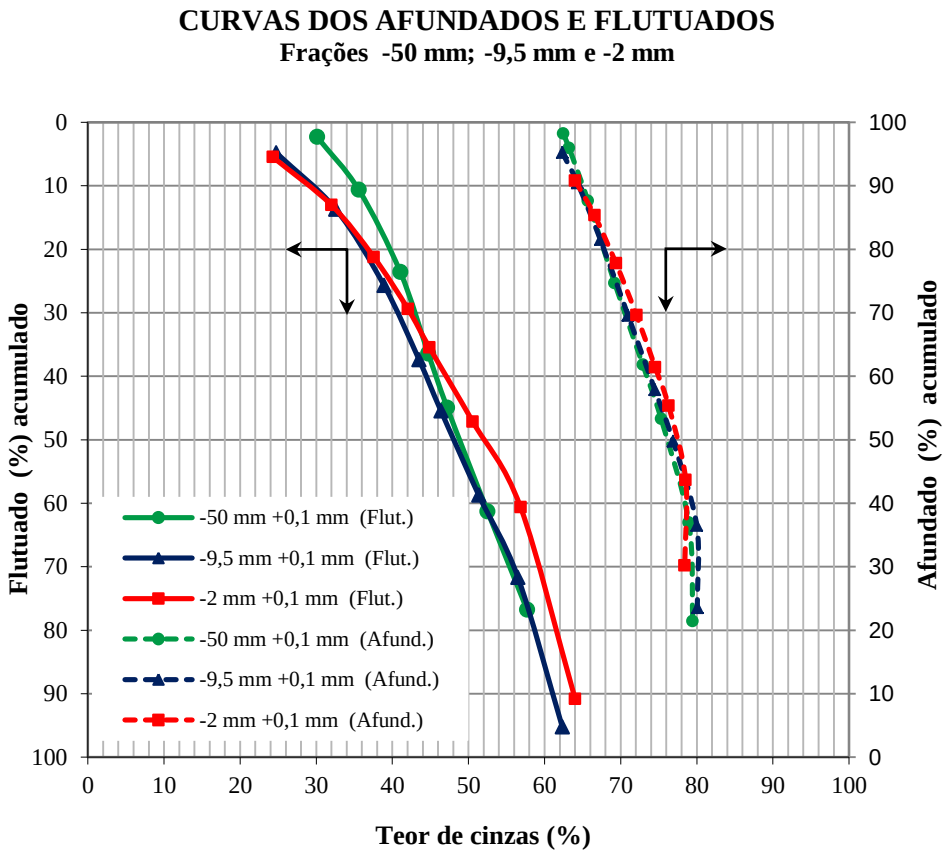

Figura 19 – Curvas de afundados e flutuados das faixas pesquisadas.

A tabela 11 apresenta resumo da participação dos intervalos em cada faixa granulométrica estudada, enquanto que as tabelas 76 a 82, inseridas no Apêndice, apresentam os resultados dos teores de cinzas discriminados por intervalo.

Tabela 11 - Distribuição de cada intervalo granulométrico nas três faixas analisadas.

Faixa (mm)	**Intervalos** (mm)	**Massa** (%)	**Massa acum.** (%)
-50,0	-50,0 + 2,0	88,29	88,29
	-2,0 + 0,1	9,94	**98,23**
	-0,1	1,77	100,00
-9,5	-9,5 + 2,0	55,01	55,01
	-2,0 + 0,1	40,22	**95,23**
	-0,1	4,77	100,00
-2,0	-2,0 + 0,1	90,83	**90,83**
	-0,1	9,17	100,00

Com base na tabela, especificamente a faixa -9,5 mm e intervalo -2,0 mm +0,1 mm, constata-se que se trata de carvão com relevante grau de friabilidade, uma vez que seu percentual mássico atinge 40,22%.

Suplementarmente, a figura 20 atesta a dificuldade de separação observada na distribuição das massas do ROM por densidade. Constata-se que os menores percentuais mássicos (<10%) situam-se nas densidades 1,6 g/cm³ e 1,7 g/cm³, enquanto que os percentuais relevantes (>10%) concentram-se nas densidades mais elevadas (1,8 g/cm³; 1,9 g/cm³; 2,2 g/cm³ e 2,4 g/cm³), alterando-se pouco, segundo o intervalo granulométrico. Esta distribuição, caracterizada por grande parte (>70%) das massas apresentarem densidades elevadas (≥1,8 g/cm³), peculiaridade dos carvões nacionais, impõe uma sobrecarga ao processo de jigagem, prejudicando alguns fatores operacionais como a mobilidade do leito, a extração de material denso (rejeito) e velocidade de jigagem.

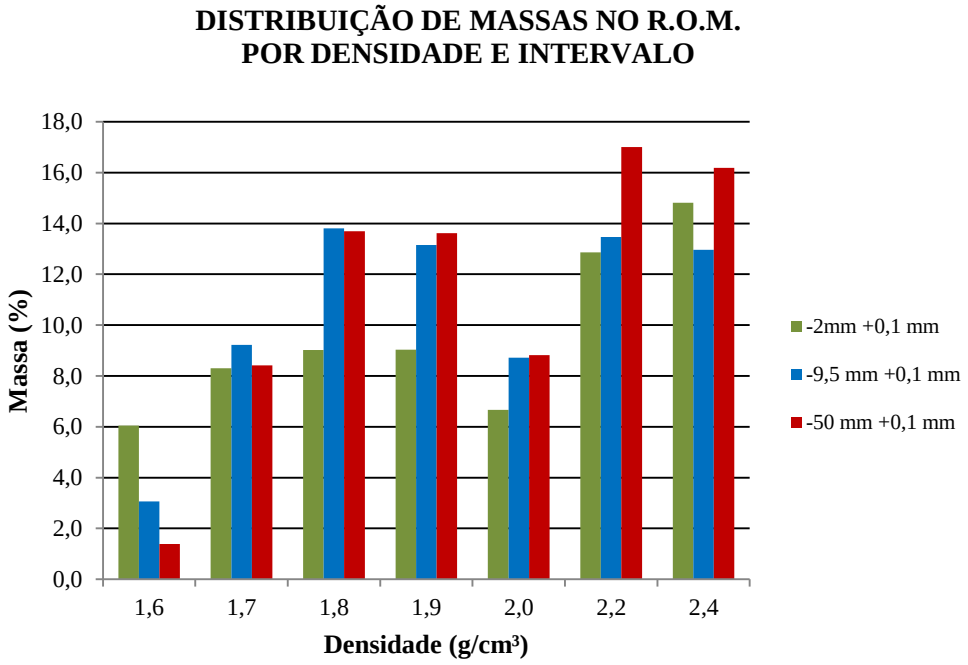

Figura 20 – Distribuição mássica dos constituintes densimétricos do ROM por intervalo estudado.

5.1.1.3. Análise da variável *Near-Gravity Material* (NGM)

A figura 21 que apresenta as curvas densimétrica e de NGM. As curvas densimétricas não registram relevante diferença entre as granulometrias de liberação estudadas. A faixa granulométrica -2,0 mm +0,1 mm apresentou percentuais de massa flutuada inferiores aos demais intervalos estudados, em função de que aproximadamente 30% de sua massa total constituiu a fração afundada em 2,4 g/cm³ (ganga). As curvas NGM destacam as massas acumuladas em torno da densidade 1,9 g/cm³, relativamente às faixas -50 mm, -9,5 mm e -2 mm, cujos percentuais atingem respectivamente 21,39%, 19,79% e 14,26%. O cálculo do NGM da fração -9,5 mm foi obtido pela diferença entre as massas acumuladas na densidade 2,0 g/cm³, 45,46% e 25,67% na correspondente 1,8 g/cm³ registradas na tabela 81.

Segundo Mitchell (1950), carvões com percentuais mássicos entre 15 e 20%, dentro do intervalo densimétrico de ±0,1 g/cm³ em relação à densidade de corte, são classificados como de separação “muito difícil”.

Os percentuais mássicos de NGM tendem a aumentar com as densidades mais altas, determinando a baixa precisão de separação, segundo atesta a mesma figura.

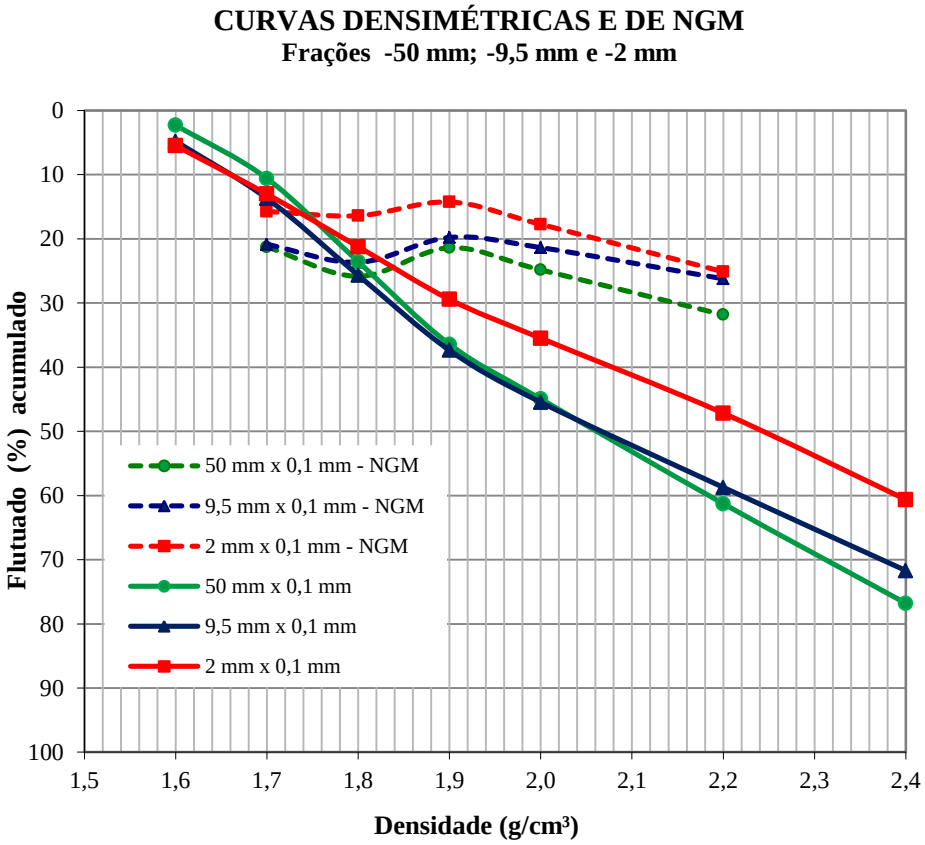

Figura 21 – Curvas densimétrica e de NGM dos intervalos estudados.

Com a finalidade de superar esta característica inadequada ao processo de jigagem, buscam-se novas alternativas de beneficiamento para viabilizar a produção do carvão exigido pelo mercado consumidor.

5.1.2. Continuidade das características da Camada Bonito em áreas do município de Lauro Müller

Embora os intervalos granulométricos e densimétricos analisados não sejam idênticos, as curvas densimétricas dos carvões ROM da camada Bonito procedente da Carbonífera Catarinense, apresentado aqui, e o da Indústria Carbonífera Rio Deserto, estudado por Redivo (2002), mantêm bom paralelismo entre si, indicando a continuidade das características desta camada em áreas distintas e pertencentes ao município de Lauro Müller.

5.2. Pesquisa de novas rotas de beneficiamento

Tendo por meta a busca de novas rotas tecnológicas para o beneficiamento do carvão da camada Bonito, pesquisou-se na RWTH-Aachen novos processos a seco e úmido que possibilitassem melhorar o nível de separação dos constituintes e concentração de fração mais rica em matéria carbonosa existentes no ROM.

5.3. Estudos realizados com a 2ª amostra de carvão no *Alljig*® para investigação da freqüência característica de operação

O critério inicialmente adotado para esta investigação teve por meta simular a operação em um corte densimétrico (o primeiro) e, posteriormente, nos testes mais promissores, estimar o segundo corte, como tradicionalmente é realizado no beneficiamento das mineradoras na região carbonífera em questão. Estudaram-se a partir desta etapa todos os níveis estratigráficos, segundo a altura pré-definida dos elementos constituintes da cuba do equipamento. Os teores de cinzas e respectivas recuperações mássicas de cada nível foram avaliados, bem como os principais parâmetros operacionais adotados em cada ensaio, conforme descrito na sequência. Cabe ressaltar que nesta etapa inicial as massas calculadas referiram-se restritamente à faixa granulométrica estudada (base 100%), desconsiderando-se as participações percentuais dos níveis na alimentação total de uma usina de beneficiamento.

5.3.1. Resultado preliminar dos produtos obtidos após teste de aferição do *Alljig*®

Após realizado teste inicial para aferição do *Alljig*®, seu resultado é apresentado na tabela 12.

Tabela 12 - Teste inicial para aferição do *Alljig*® realizado na faixa granulométrica 16 mm x 2 mm, freqüência de 80 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm.

Produtos	Peso (kg)	Massa (%)	Massa acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)
Carvão	2,350	10,68	10,68	39,09	39,09
Misto 1	6,175	28,07	38,76	52,11	48,52
Misto 2	6,425	29,21	67,97	62,21	54,40
Rejeito	5,390	24,51	92,48	75,92	60,11
Passante nos crivos	1,655	7,52	100,00	58,93	60,02

Pode-se verificar que o teor de cinzas da fração considerada ‘carvão’ ficou abaixo de 43% (meta), porém com recuperação mássica teórica baixíssima (≈10%), resultado que sugere a união desta fração com a denominada ‘misto 1’, visando ganho de massa e maior aproximação do teor de cinzas da meta pré-estabelecida. Com isso, obtém-se um produto com teor em torno de 48%, produto da média ponderada destas frações, entretanto acima da meta. Possivelmente o teor de cinzas do carvão ROM estivesse próximo de 60%.

5.3.2. Análise das frações densimétricas deslocadas no processo de jigagem

Buscou-se avaliar os possíveis deslocamentos entre as frações de carvão e de seus contaminantes ocorridos no processo anterior no intervalo 16 mm x 2 mm, ou seja, a parcela de carvão (fração menos densa) que foi deslocada para as posições inferiores, constituídas por frações mais densas, bem como os contaminantes com densidade próxima as do carvão deslocados para as posições superiores, onde se concentram as frações mais leves (carvão). Para este fim, realizaram-se ensaios de afunda/flutua nas densidades 1,6; 1,8; 2,0 e 2,2 g/cm³ dos produtos resultantes, utilizando-se como líquido denso o brometo de zinco ($ZnBr_2$). As densidades assemelham-se em parte com as utilizadas nos ensaio realizados no LAPROM para possibilitar melhor comparação dos resultados. A tabela 13 apresenta resumidamente os dados obtidos.

Tabela 13 - Análise das frações densimétricas deslocadas no teste de jigagem.

Produtos	Densidade (g/cm³)	Massa (%)	Massa acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)
CARVÃO Participação mássica de 10,68%	1,6	3,89	3,89	28,53	28,53
	1,8	5,15	9,04	40,59	35,41
	2,0	1,17	10,21	54,34	37,58
	2,2	0,23	10,44	64,59	38,18
	+2,2	0,24	10,68	78,20	39,09
MISTO 1 Participação mássica de 28,07%	1,6	2,40	2,40	30,79	30,79
	1,8	11,83	14,23	42,88	40,84
	2,0	7,79	22,02	54,74	45,76
	2,2	2,35	24,36	65,46	47,65
	+2,2	3,71	28,07	81,35	52,11
MISTO 2 Participação mássica de 29,21%	1,6	0,59	0,59	29,35	29,35
	1,8	6,10	6,69	42,55	41,38
	2,0	9,11	15,80	56,27	49,96
	2,2	4,23	20,03	66,02	53,36
	+2,2	9,18	29,21	81,53	62,21
REJEITO Participação mássica de 24,51%	1,6	0,00	0,00	--	--
	1,8	0,12*	0,12	--	--
	2,0	0,74	0,86	58,79	58,79
	2,2	2,00	2,87	63,07	61,78
	+2,2	21,64	24,51	77,79	75,92

(*) Massa insuficiente para o ensaio.

A fração passante nos crivos da chapa de base do leito do *Alljig*® participou com 7,52% da massa e com 58,93% no teor em cinzas.

Pode-se constatar pelas tabelas apresentadas, e conforme esperado, que houve deslocamentos de frações leves e densas entre si, embora em percentuais baixos, além de confirmar que:

a. A densidade teórica de corte para o carvão-meta (teor em cinzas <43%) é aproximadamente 1,8 g/cm³;

b. Além do produto ‘carvão’, os ‘mistos’ apresentam frações com teor de cinzas abaixo de 43%, na densidade de corte, com recuperações mássicas de ≈14% e ≈7% para ‘misto 1’ e ‘misto 2’, respectivamente, que reunidas constituiriam um produto com teor médio de cinzas em torno de 41% e recuperação próxima de 21%, se liberadas das frações mais densas, ascendessem ao nível do ‘carvão’ (primeiro);

c. O produto ‘misto 1’ contém ≈6% de massa (densidades -2,2 g/cm³ e +2,2 g/cm³) com teor ponderado de cinzas de ≈75%, fração que deveria constituir parte do ‘rejeito’.

Considerando as combinações possíveis no agrupamento das frações ‘carvão’, ‘misto 1’ e ‘misto 2’ por densidade e teor de cinzas próximo à meta (<43%), simulam-se em uma separação ideal os resultados ‘recuperação mássica teórica *versus* teor de cinzas’. A tabela 14 apresenta o cenário dos resultados mais promissores inicialmente obtidos, com base no critério de melhor equilíbrio metalúrgico entre a qualidade e quantidade:

Tabela 14 - Critério inicial para avaliação das combinações ‘densidade *versus* teor de cinzas e massa’ por foco.

Foco	Produto	Densidade	Teor de cinzas	Massa
Qualidade	Carvão	todas	43,21%	39,39%
	Misto 1	-2,0 g/cm³		
	Misto 2	-1,8 g/cm³		
Quantidade	Carvão	todas	45,66%	48,50%
	Misto 1	-2,0 g/cm³		
	Misto 2	-2,0 g/cm³		
Variação baseada em ‘qualidade’			5,68%	23,13%

Constata-se com base no que foi apresentado até aqui que as frações densimétricas constituintes dos produtos misto 1 e misto 2 podem impactar significativamente na relação quantidade-qualidade do produto final, desde que seja possível manter as frações menos densas nos níveis mais superiores do leito. Em função disto, um segundo teste foi realizado, mantendo-se a maioria dos parâmetros anteriores, com o foco apenas no reprocessamento da fração mista (mistos 1 e 2), com o fim de analisar seu comportamento isoladamente.

No segundo teste, aplicaram-se os mesmos parâmetros do primeiro, não acarretando alterações significativas no resultado com pequenas variações nos percentuais mássicos e teores de cinzas nas mesmas frações e conseqüente baixa recuperação mássica do produto-meta.

Para o seguinte teste, foram aglutinadas as frações ‘misto 1’ e ‘misto 2’ provenientes dos dois testes anteriores, objetivando simular no *Alljig*® a operação de segundo corte densimétrico somente nestes subprodutos, aplicando-se os mesmos parâmetros operacionais. Com este evento, buscou-se recuperar maior massa de carvão com teor de cinzas próximo a 43%, que por ventura as frações mistas ainda contivessem. Com a massa disponível para o teste, pode-se formar um leito após o ensaio no *Alljig*® com seis níveis. Assim formaram-se seis subprodutos mistos (mistos I a VI), segundo seu nível na cuba do aparelho. Com objetivo de conhecer os resultados em cada nível estratigráfico, as massas e respectivos teores de cinzas de cada um foram analisados separada e conjuntamente. O teor de cinzas mais próximo de 43% alcançou 45,04% com massa de 5,33%.

Nos próximos itens, são descritos os testes realizados nos intervalos 16 mm x 6,3 mm e 6,3 mm x 2 mm. Os referidos ensaios, suas características, objetivos e comentários são apresentados na seqüência em que foram conduzidos com a finalidade de descrever a linha de pesquisa (exploratória) empregada, sendo os mais relevantes e promissores apresentados no corpo da tese, enquanto que as particularidades e comentários dos testes não satisfatórios estão no Apêndice. Esta sistemática tem a pretensão de proporcionar uma leitura menos cansativa. As tabelas contendo os resultados dos testes de jigagem e conjuntos de parâmetros operacionais adotados, exceto os de resultados satisfatórios e de ensaios granulométricos apresentados no corpo da tese, estão disponíveis no Apêndice. Cabe registrar que todos os testes realizados tiveram a duração de 15 minutos.

5.4. Testes realizados na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm

Iniciaram-se os testes neste intervalo por ser o maior e teoricamente mais difícil de beneficiar, em função da menor liberação entre a matéria orgânica e a mineral obtida em ensaios preliminares, observada pelo percentual significativo da fração mista.

5.4.1. Ensaio na freqüência 80 pulsos por minuto (Teste 1)

O ensaio na freqüência 80 pulsos por minuto teve por objetivo avaliar o comportamento da estratificação no intervalo -16 mm +6,3 mm, logo após sua adoção, em função dos percentuais das frações deslocadas terem sidos baixos nesta freqüência. Os resultados e comentários são descritos a seguir e na tabela 41, apresentada no Apêndice.

Em função da reduzida altura do primeiro nível, após o encerramento do teste, adicionou-se este ao seguinte (segundo nível), constituindo o nível 1, a fim de se atingir a totalidade da altura do elemento (2,5 cm). Embora a recuperação mássica tenha aumentado (adição dos 2 níveis) no nível 1, o teor de cinzas de 44,26% ficou ainda acima do desejado. A massa utilizada no teste constituiu leito de quatro estratos. O teor de enxofre total nos níveis 1+2 registrou 2,17%, inferior ao limite máximo de 2,3%. Demais parâmetros são apresentados na tabela 15.

Tabela 15 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 1 para o intervalo 16 mm x 6,3 mm.

Parâmetros	Unidades	Valores
Freqüência	min^{-1}	80
Amplitude	medida no nível de água, cm	5,0
Altura total do leito	cm	11,5

5.4.2. Ensaio na freqüência 96 pulsos por minuto

Na seqüência dos testes e objetivando conhecer a melhor combinação dos parâmetros ‘freqüência’ e ‘amplitude’ para o intervalo -16 mm +6,3 mm, adotou-se a freqüência de 96 pulsos por minuto (+20%) e amplitude de 5 cm no ensaio seguinte. Simularam-se no primeiro ensaio o processamento principal nesta frequência e na continuidade o reprocessamento em outro teste na freqüência de pulsação de 88 min^{-1}, utilizando-se os níveis 2, 3 e 4 (fração mista) obtidos no ensaio anterior (96 min^{-1}).

5.4.2.1. Simulação do processamento principal na freqüência 96 pulsos por minuto (Teste 2)

O ensaio realizado nesta frequência de pulsação teve massa e teor de cinzas, até o nível 2, bem próximos ao nível 1 do teste 1, quando o primeiro nível foi constituído pela adição dos dois primeiros elementos. O resultado dos níveis 1+2 deste teste aproxima-se do nível 1 do ensaio anterior, conforme é mostrado na tabela 42 no Apêndice.

Os parâmetros aplicados no teste foram resumidos na tabela 16, apresentada a seguir.

Tabela 16 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 2.

Parâmetros		**Valores**
Freqüência	min^{-1}	96
Amplitude	medida no nível de água, cm	5,0
Altura total do leito	cm	12,5

5.4.2.2. Simulação do reprocessamento dos níveis 2, 3 e 4 (fração mista) do teste 2 na freqüência 88 pulsos por minuto (Teste 3)

A massa disponível dos níveis de 2 a 4 para este ensaio totalizou aproximadamente 8 kg, fato que acarretou uma redução significativa na altura total do leito. Além deste parâmetro, foram alteradas a ‘freqüência’ e ‘amplitude’, esta última para a manutenção da mobilidade do leito durante o 3º teste, apresentado na tabela 43 (Apêndice).

Com a reduzida massa disponível para o ensaio, somente dois estratos (níveis) foram formados e a altura total do leito, após o teste, atingiu apenas 5 cm, conforme os parâmetros discriminados na tabela 17.

Tabela 17 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 3.

Parâmetros		**Valores**
Freqüência	min^{-1}	88
Amplitude	medida no nível de água, cm	6,0
Altura total do leito	cm	5,0

Com dois níveis apenas, perde-se o referencial para comparação com outros testes, quando o total de níveis formados alcançou 4 e 5 estratos. A massa total do experimento foi de 7,9 kg e sua participação no processamento principal totalizou 47%. Considerando esta participação mássica, o percentual de 43,94% do nível 1 equivaleria a 20,65% (0,47 x 43,94%) do total processado somente no intervalo 16 mm x 6,3 mm. Acredita-se que o teor de cinzas de 45,19%, acima da meta, possa ser ainda reduzido, se a altura total do leito comportar mais um ou dois níveis, onde se posicionariam as frações mistas mais densas, permitindo que o carvão remanescente e/ou mistos menos densos fossem melhor separados, mantendo-os em níveis mais altos.

5.4.3. Comparação entre os ensaios com 80 pulsos por minuto (Teste 1) e 96 pulsos por minuto (Teste 2)

Como critério para comparação entre os testes realizados somente no intervalo 16 mm x 6,3 mm e nas freqüências 80 e 96 min^{-1}, Tabelas 41 e 42, respectivamente, estimou-se que o nível 1 do teste ensaiado na freqüência 80 min^{-1}, devido à adição de massa que fora insuficiente para constituir a plenitude do primeiro estrato, equivaleria aos níveis 1 e 2 do estudado na freqüência 96 min^{-1}. Com isso, observa-se que o teste na freqüência 96 min^{-1} apresentou valores próximos nos parâmetros qualidade (teor em cinzas) e quantidade (recuperação mássica), porém com uma pequena melhora no teor de cinzas no nível 3 (51,92%) quando comparado ao nível 2 (54,56%) do teste realizado na freqüência 80 min^{-1}, seu equivalente, segundo o critério adotado. Tal resultado sugere que uma freqüência intermediária poderia trazer melhores valores em termos de ‘qualidade e quantidade’ para o processamento principal e talvez para o reprocessamento da fração mista (níveis 2 a 4). Por esta razão, novo teste foi realizado reprocessando-se os níveis 2, 3 e 4 na freqüência de 88 min^{-1}, conforme já mencionado. Adotou-se freqüência menor que a do processamento principal, em função de que a operação na freqüência anterior ou superiores, teoricamente, priorizaria a separação por diferença densimétrica entre as frações remanescentes. Procedimento desaconselhável, quando há significativo percentual de materiais mistos com densidades próximas a do carvão, devido à possibilidade de ascensão destas partículas aos níveis mais altos do leito, contaminando a fração mais leve. O nível 1 não tomou parte deste novo experimento, uma vez que se buscava melhorar a separação entre as frações densimétricas (mistas) próximas da densidade de corte do produto-alvo. A figura 22 ilustra a pequena diferença de desempenho nos resultados da estratificação quando se comparam os

testes, segundo seus valores acumulados, com destaque para a variação ocorrida apenas nos teores de cinzas nos níveis 2 e 3 dos testes 1 e 2, respectivamente.

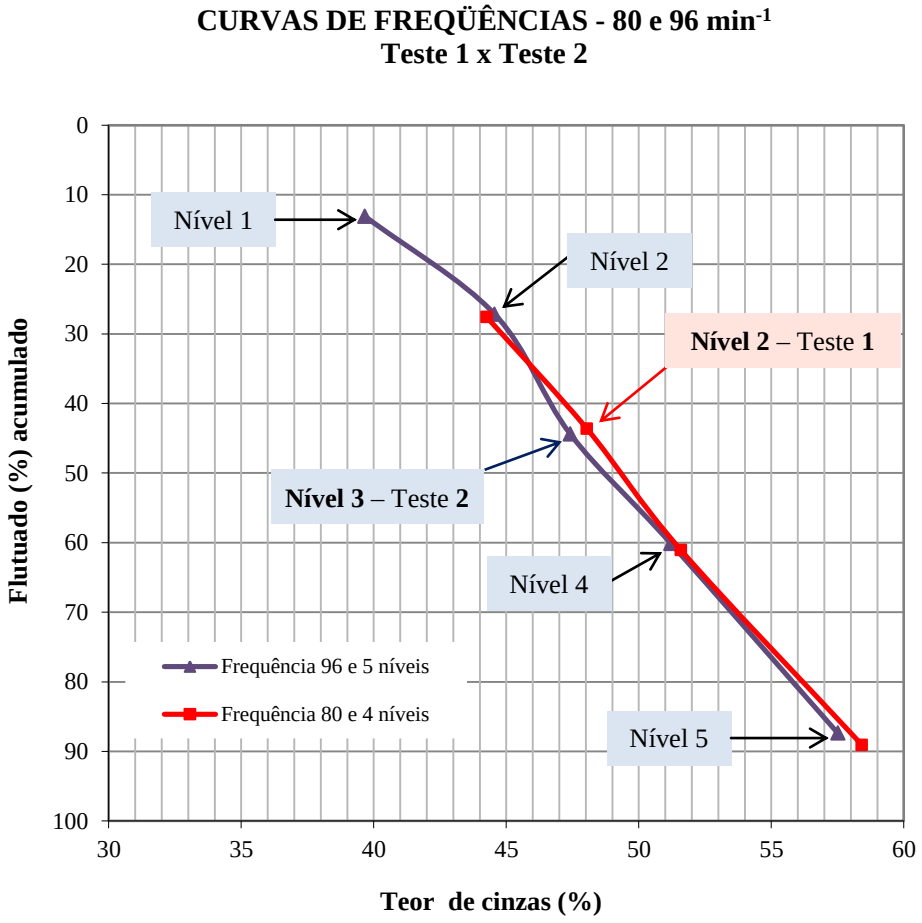

Figura 22 – Comparativo entre massas e respectivos teores nos testes 1 e 2, enfatizando a diferença ocorrida somente nos níveis 2 e 3, respectivamente.

5.4.4. Recomposição da fração -16 mm com descarte do intervalo 50 mm x 16 mm

Admitindo ser adequado o intervalo granulométrico -16 mm ao tratamento do carvão em jigue e com a finalidade de estimar a participação somente das frações 16 mm x 2 mm e -2 mm na alimentação (100% <16 mm) do processo de beneficiamento, recompõe-se a distribuição granulométrica da amostra inicial, mantendo-se a mesma proporcionalidade entre estes intervalos após descarte da faixa 50 mm x 16 mm. O resultado é mostrado na tabela 18.

Tabela 18 - Recomposição da fração -16 mm com descarte do intervalo 50 mm x 16 mm.

Faixa	Peso Retido (%)	Retido acum. (%)
-16 mm + 2 mm	78,46	78,46
-2 mm	21,54	100,00
Total	100,00	--

5.4.5. Resultado das simulações do processamento principal (teste 2) e reprocessamento da fração mista (teste 3) no intervalo 16 mm x 6,3 mm

Conforme listado na tabela 19 seguinte, simula-se o resultado teórico da reunião dos níveis 1 do processamento principal e reprocessamento da fração mista, considerando-se a participação mássica do intervalo 16 mm x 6,3 mm de 53,71% na faixa granulométrica 100% abaixo de 16 mm, calculada a partir dos respectivos teores médios de cinzas.

Tabela 19 - Estimativa das operações dos testes 2 e 3 no intervalo 16 mm x 6,3 mm.

Produto	Teste	Frequência aplicada (min^{-1})	% mássico no teste	Participação (%) em -16 mm	Teor de cinzas (%)
Níveis 1	2	96	13,10	7,04	39,66
	3	88	43,94	11,09	45,19
Total/Média	--	--	--	18,13	43,05

Embora seja um resultado estimado, em função de as recuperações mássicas não serem reais e refira-se aos dois processos simulados somente no intervalo 16 mm x 6,3 mm, percebe-se que o teor de cinzas 43,05% calculado aproxima-se mais do teor almejado, embora a recuperação mássica ainda permaneça abaixo de 20%. O resultado final da simulação encorajou a continuidade dos testes na busca pela freqüência característica deste intervalo.

5.5. Testes aplicados com o reaproveitamento da fração 50 mm x 16 mm cominuída e reclassificada granulometricamente

Para os testes posteriores no intervalo 16 mm x 2 mm, reutilizou-se a fração granulométrica 50 mm x 16 mm, anteriormente testada em processo de separação a seco por sensor, seguindo o plano de pesquisa inicial na RWTH (figura 12). Com exceção da massa de

amostra processada no *Alljig*®, após ter sido utilizada no processo de separação a seco baseado em sensor de raios X (descrito no item "Outros Testes"), e que tornou-se inadequada para testes posteriores, o restante foi rebritado (britador de mandíbulas) com a finalidade de adequar 100% da massa amostral disponível à dimensão menor que 16 mm. Após a cominuíção, a amostra foi classificada na tela de 16 mm e somente o material retido foi rebritado até que a massa total estivesse abaixo desta medida. Ao final da etapa de rebritagem, esta fração ainda foi reclassificada na peneira de 2 mm, cujo resultado é apresentado na tabela 20.

Tabela 20 - Cominuíção da fração 50 mm x 16 mm 100% abaixo de 16 mm e classificação em 2 mm.

Faixa	Peso (kg)	Peso Retido (%)	Retido acum. (%)	Passante acum. (%)
-16 mm + 2 mm	88,45	79,54	79,54	20,46
-2 mm	22,75	20,46	100,00	--
Total	111,20	100,00	--	--

5.5.1. Teste aplicado na fração 16 mm x 2 mm e freqüência 104 pulsos por minuto (Teste 4)

Com o objetivo de preservar quantidade suficiente de amostra para o ensaio, antes da divisão granulométrica na malha 6,3 mm, e manter a linha de investigação, tomou-se parte da alíquota disponível no intervalo 16 mm x 2 mm e realizou-se mais um teste no *Alljig*®, o de número 4, para avaliação de seu comportamento quando freqüência 30% maior (104 min^{-1}) fosse aplicada. O resultado não foi animador, conforme consta na tabela 45 (Apêndice). Possivelmente o aumento da frequência causou perturbação no leito, deslocando parte da fração mista com maior teor mineral para o primeiro nível, além de variação observada nas características da amostra reaproveitada do intervalo 50 mm x 16 mm, inicialmente adotado no teste com separador baseado em sensor.

5.5.2. Reconstituição da fração 16 mm x 2 mm procedente do intervalo 50 mm x 16 mm, após classificação na peneira de 6,3 mm

Findo o referido teste, reclassificou-se o restante da amostra do intervalo -16 mm +2 mm na tela de 6,3 mm com a finalidade de retomar os ensaios nas duas frações

anteriores. Partindo-se da massa total de 79,54% deste intervalo, calcularam-se os percentuais das frações situadas acima e abaixo da tela de 6,3 mm, reconstituindo-se o ensaio granulométrico total do intervalo anteriormente analisado (tabela 20). A tabela 21 apresenta a redistribuição granulométrica final da amostra.

Tabela 21 - Reconstituição da fração -16 mm após classificação em 6,3 mm.

Faixa	Peso Retido (%)	Retido acum. (%)	Passante acum. (%)
-16 mm + 6,3 mm	46,19	46,19	53,81
-6,3 mm + 2 mm	33,35	79,54	20,46
-2 mm	20,46	100,00	--

5.5.3. Testes reconduzidos na fração 16 mm x 6,3 mm

Com base no resultado não satisfatório do teste 4, quando se investigou a faixa granulométrica 16 mm x 2 mm, retomou-se à fração 16 mm x 6,3 mm, reconstituída a partir do reaproveitamento do intervalo original -50 mm +16 mm, para aplicação em novos ensaios.

5.5.3.1. Ensaio na freqüência 92 pulsos por minuto (Teste 5)

Adotou-se no quinto ensaio uma freqüência intermediária às anteriormente estudadas, cujos resultados obtidos não foram satisfatórios (80 e 96 pulsos por minuto), com o fim de avaliar o comportamento do carvão dentro de uma faixa de frequência mais restrita, buscando-se o melhor desempenho operacional. Neste ensaio aplicou-se freqüência 15% maior (92 min^{-1}) que a inicialmente utilizada (80 min^{-1}) e seu resultado é apresentado na tabela 47 (Apêndice).

Os produtos deste ensaio não confirmaram a expectativa de maior recuperação mássica de carvão com o teor de cinzas igual ou inferior à meta para uma freqüência intermediária às que obtiveram resultados frustrantes.

5.5.3.2. Novos ensaios na freqüência 96 pulsos por minuto

Tendo por meta analisar o efeito da espessura do leito no desempenho operacional da jigagem, uma vez que o resultado do teste 2 (mesma faixa granulométrica) não foi satisfatório, novos ensaios foram aplicados nesta freqüência com alturas do leito constituídas

de 3 e 4 níveis para avaliação de seu impacto na nitidez de separação dos constituintes densimétricos do carvão.

O teste 6 utilizou a única amostra remanescente no intervalo original 16 mm x 6,3 mm. O sexto experimento apresentou resultado satisfatório, como atestam as tabelas 48 e 49 (Apêndice) que registram os parâmetros aplicados e os produtos obtidos ao término do ensaio.

Sabe-se que os fundamentos teóricos envolvidos na jigagem (Sampaio & Tavares, 2005) são inúmeros e que a freqüência, embora seja um parâmetro importantíssimo no mecanismo da aceleração diferencial, não deve ser o único a ser considerado neste estudo. A altura total do leito, evidenciada pelo resultado obtido, tem papel importante e decisivo sob determinadas condições e contribui para uma melhor estratificação e consequente combinação 'quantidade e qualidade' do carvão estudado. Conforme estudo realizado por Schneider (1987), a proporção elevada de rejeito na alimentação prejudica a mobilidade do leito, cuja altura deve ser cuidadosamente ajustada para manter-se a movimentação das partículas adequada na etapa de expansão.

Os testes 7 e 8 reaproveitaram os produtos do testes 5 e tiveram por meta analisar o comportamento do leito constituído por 3 níveis, avaliando-se conjuntamente à influência das amplitudes de 2,5 cm e 5,0 cm, respectivamente, no processo. No que se refere ao teor de cinzas os resultados obtidos foram bons, porém as massas recuperadas foram baixas em ambos ensaios. Possivelmente a reduzida altura do leito adotada no ensaio impediu que frações mistas mais leves, acomodadas no 2º nível, alcançassem posição mais elevada, contribuindo na recuperação mássica. Uma alternativa para aumentar a massa recuperada, mantendo o teor de cinzas em patamar aceitável, estaria no acréscimo da altura do leito, de acordo com a espessura e posicionamento das frações densimétricas de interesse na cuba do jigue, desprezando-se a altura (2,5 cm) fixada pelos gabaritos do *Alljig*®.

Os parâmetros do ensaio e resultados da investigação estão registrados nas tabelas 50, 51, 52 e 53 (Apêndice).

O último teste nesta freqüência, conduzido em leito composto por 4 níveis, teve seu resultado igualmente reprovado, mesmo que a altura do leito se mantivesse mais baixa. Observou-se a partir de então que os experimentos conduzidos com a amostra procedente da fração 50 mm x 16 mm apresentaram os piores desempenhos no que se refere à massa e teor de cinzas encontrados principalmente nos dois primeiros níveis, indicando alterações

significativas nos constituintes densimétricos do referido intervalo. Acredita-se que a maior proporção de partículas minerais (material denso) mais grosseiras (>16 mm), geradas no particionamento inicial das frações de estudo, tenha-se concentrado na fração 50 mm x 16 mm, em função de sua menor friabilidade em relação à matéria carbonosa, liberando-se após nova cominuição e integrando o intervalo 16 mm x 2 mm. Por esta razão, o intervalo reconstituído apresentou acréscimo na proporção de material denso, acarretando prejuízos à nitidez de separação nos ensaios em que tomou parte e ao direcionamento e seqüência dos experimentos restantes.

5.5.3.3. Ensaio na freqüência 88 pulsos por minuto (Teste 9)

A partir do resultado não satisfatório obtido nos testes realizados na freqüência 96 min^{-1} e anteriores, retomou-se a investigação na freqüência 88 min^{-1}.

Para comparação entre resultados dos ensaios realizados nas freqüências anteriores e restritos à amostra constituída a partir o intervalo original 50 mm x 16 mm, reprocessaram-se os mesmos produtos do teste 5, porém desta vez acrescido de alíquota (pequena massa) da mesma amostra apenas para completar a espessura do leito até 10 cm (4 níveis), a fim de se atingir uma condição favorável de estratificação e melhor relação 'massa/teor de cinzas' dos produtos.

Embora o teor de cinzas do carvão reprocessado neste ensaio tenha-se reduzido e atingido apenas 54,60%, devido aos descartes da fração passante nos crivos do leito da amostra constituída a partir do intervalo original 50 mm x 16 mm, pode-se observar que o teor de cinzas do primeiro nível, pela primeira vez na referida amostra, situa-se abaixo de 40%, com redução em sua massa. Possivelmente tal fato tenha sido motivado por uma maior separação entre as frações mista e a leve (nível 1). Nos níveis 2 e 3, constatam-se maiores recuperações, mantendo-se os teores de cinzas levemente baixos em comparação com os testes anteriores. Ainda percebe-se que a recuperação mássica acumulada no nível 2 alcança 39,90%, a mais alta, considerando-se somente os ensaios realizados com esta amostra e em leitos formados por 4 e 5 níveis e o respectivo teor de cinzas ponderado atinge 43,33%, a melhor relação quantidade/qualidade obtida até então. O teor de enxofre (total) ponderado até o segundo nível atingiu 2,04%, ainda abaixo de 2,3%. Neste ensaio buscou-se mensurar a amplitude, quando possível, também a partir do nível de carvão nas etapas de expansão e compactação do leito, a fim de se obter outra medida de conferência. Os parâmetros adotados e os produtos obtidos no referido teste são apresentados nas tabelas 22 e 23, respectivamente.

Tabela 22 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 9.

Parâmetros		**Valores**
Freqüência	min-¹	88
Amplitude	medida no nível de água, cm	5,0
	medida no nível de carvão, cm	4,0
Altura total do leito	cm	10,0

Tabela 23 - Teste 9 realizado a partir da reutilização de amostra do ensaios 5 e alíquota da mesma amostra, na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 88 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm.

Produtos	**Massa (%)**	**Massa acum. (%)**	**Teor de cinzas (%)**	**Cinzas acum. (%)**	**Teor de enxofre (%)**
Nível 1	20,83	20,83	39,10	39,10	2,16
Nível 2	19,07	39,90	47,96	43,33	1,90
Nível 3	17,80	57,70	55,43	47,07	2,17
Nível 4	39,40	97,10	64,13	53,99	21,90
Passante nos crivos	2,90	100,00	74,93	54,60	2,83
Massa ensaiada (kg)	15,80	Tela crivada de diâmetro 2 mm			

A figura 23 apresenta a curva de ‘recuperação mássica *versus* teor de cinzas’ para comparação dos resultados deste ensaio com o teste 7 que utilizou a mesma altura de leito, porém freqüência de 96 min-¹ e amostra oriunda do intervalo original 16 mm x 6,3 mm. Tal análise visou registrar a variação ocorrida entre os constituintes densimétricos das alíquotas de carvão estudadas nos respectivos experimentos. O ensaio 9, embora utilizasse amostra constituída a partir de carvão ROM com maior proporção de material denso, apresentou, em decorrência da menor altura de leito adotada, resultado levemente superior ao obtido no teste 7, cuja amostra aplicada teria, supostamente, menor percentual deste material em sua matriz carbonosa e por isso o melhor resultado esperado.

Esta peculiaridade definiu a frequência de 88 min-¹ como a indicada para se atingir um bom nível de segregação da fração mista neste intervalo.

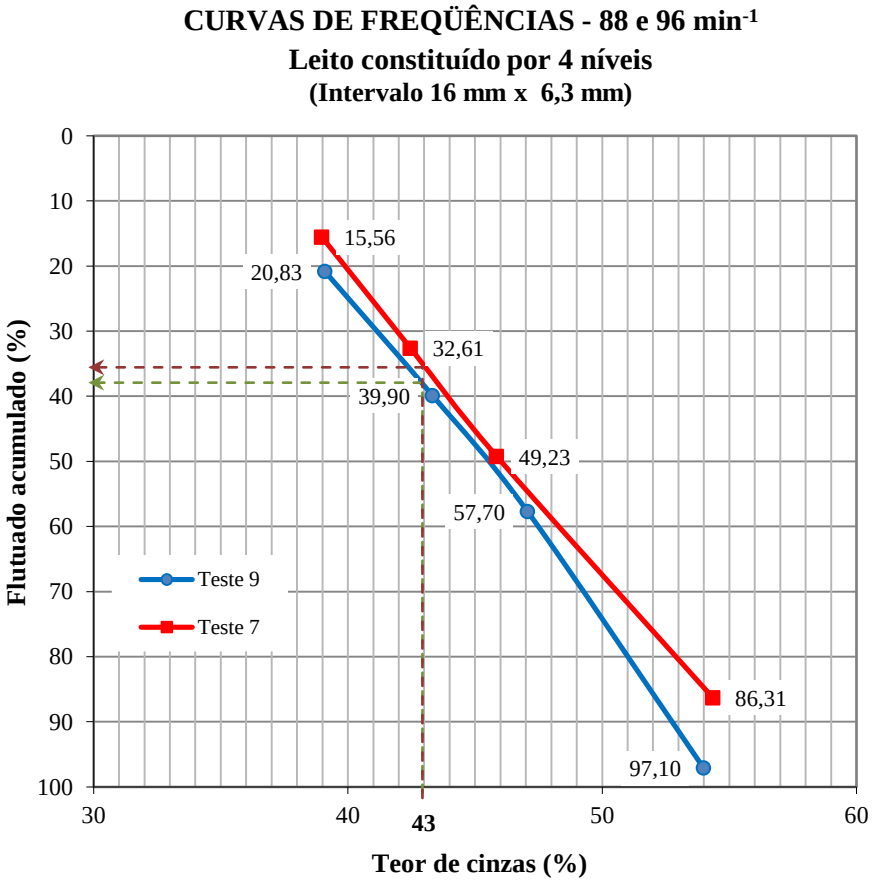

Figura 23 – Comparativo entre as massas recuperadas e teor de cinzas obtidos nos testes 7 e 9, a partir de amostras com características distintas em leito do jigue composto por 4 níveis e faixa 16 mm x 6,3 mm.

A partir do término da amostra de carvão que mantivesse as características originais para testes neste intervalo granulométrico, optou-se por solicitar nova amostra de carvão da mesma empresa carbonífera, com o fim de dar continuidade aos ensaios para definição da melhor freqüência e demais parâmetros operacionais.

5.6. Comentários sobre os testes realizados na 2ª amostra até aqui registrados no intervalo 16 mm x 6,3 mm

Observa-se pelos resultados dos testes que houve alterações nos constituintes densimétricos das amostras procedentes das faixas granulométricas originais 16 mm x 6,3 mm e 50 mm x 16 mm com impacto na precisão de separação do *Alljig*®. Esta oscilação na qualidade do carvão deve ser minimizada, empregando-se uma adequada homogeneização no carvão de alimentação, como adverte Schneider (1987) em seu estudo, a fim de reduzir seu efeito na nitidez de separação do processo, uma vez que o aparelho é regulado para um material de características bem definidas. Ainda segundo o mesmo autor, a elevada proporção de material denso (rejeito), característica dos carvões brasileiros, agrava as condições operacionais já adversas do processo de jigagem, pois afeta diretamente a mobilidade do leito e a velocidade de remoção deste material, entre outros parâmetros. Por esta razão, a operação de jigagem em leito com menor espessura pode ser uma alternativa para atenuar a sobrecarrega motivada pela elevada proporção de rejeito no ROM com reflexos na qualidade de separação. Mesmo com a variação ocorrida nos constituintes das frações amostrais estudadas, com maior imprecisão de separação verificada nos testes com o intervalo 50 mm x 16 mm cominuído e classificado em 16 mm x 6,3 mm, o processamento na freqüência 88 min^{-1} e leito composto por 4 níveis (teste 9) apresentou resultado bastante promissor para aplicação em carvões ROM com elevada proporção de rejeito, sinalizando uma alternativa para a otimização da operação de jigagem nas Carboníferas de Santa Catarina.

O teste 9, cuja massa acumulada nos dois primeiros níveis totalizou 39,90%, equivalente a 18,43%, segundo a participação de 46,19% do intervalo na alimentação total, produziu um carvão com teores de cinzas e enxofre de 43,33% e 2,04%, respectivamente.

Os ensaios realizados neste intervalo e no *Alljig*®, considerando os apresentados neste estudo e os desprezados, conduzidos no processamento principal e no reprocessamento da fração mista, totalizaram 14 experimentos. Todos os testes de alguma forma contribuiram para direcionar a pesquisa exploratória até se atingirem os resultados aqui apresentados.

5.7. Testes realizados na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm

A partir deste item analisa-se o desempenho dos testes aplicados no *Alljig*® em diferentes frequências, exclusivamente na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm. Os resultados e observações são apresentados na seqüência.

5.7.1. Ensaio na freqüência 80 pulsos por minuto (Teste 10)

A exemplo da sistemática adotada no intervalo -16 mm +6,3 mm, iniciam-se os testes da faixa granulométrica -6,3 mm +2 mm no referido equipamento e na freqüência 80 min^{-1} com seu resultado apresentado na tabela 54 (Apêndice).

Neste teste utilizou-se massa suficiente para compor cinco estratos. Outros parâmetros aplicados estão resumidos na tabela 24. O teor de cinzas do nível 1 situou-se abaixo de 38%, encorajando novos testes neste intervalo pelo percentual promissor alcançado. O teor resultante de 43,3% verificado nos níveis 1+2 aproximou-se mais do valor almejado e a recuperação mássica foi relevante (≈28%), possivelmente devido à redução do intervalo granulométrico processado e provavelmente pela maior segregação entre os constituintes orgânicos e minerais do carvão ocorrida no teste. O diâmetro dos crivos da base da cuba foi alterado para 1 mm, devido à granulometria mais fina predominante nesta fração.

Tabela 24 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 10 para o intervalo 6,3 mm x 2 mm.

Parâmetros (unidades)		**Valores**
Freqüência	min^{-1}	80
Amplitude	medida no nível de água, cm	5,0
Altura total do leito	cm	12,5

5.7.2. Simulação do processamento principal com a adição dos intervalos 16 mm x 6,3 mm (teste 1) e 6,3 mm x 2 mm (teste 10) na freqüência 80 pulsos por minuto

Na simulação do resultado final, quando se adicionam estas duas frações, considerando a participação de ambas na alimentação do processo de jigagem de 53,71% e 24,75% para as faixas -16 mm +6,3 mm e -6,3 mm +2 mm, respectivamente, obtém-se um produto com teor de cinzas médio ponderado de 43,95% e recuperação mássica de 21,78%. Na comparação desta simulação com a anterior, que uniu os primeiros níveis dos testes 2 e 3

(tabela 19) realizados somente no intervalo 16 mm x 6,3 mm, observa-se que houve ganho na massa (18,13% *versus* 21,78%), ocorrendo o mesmo comportamento com o teor de cinzas que aumentou levemente de 43,05% para 43,95%.

A tabela 25 seguinte apresenta resumidamente os resultados da referida simulação.

Tabela 25 – Processamento principal nas frações 16 mm x 6,3 mm do teste 1 e 6,3 mm x 2 mm do teste 10.

Produto	Massa acumulada	Teor de cinzas acumulado	Parâmetro
Fração -16 mm + 6,3 mm (teste 1)			Crivo da tela: 2 mm
Nível 1 somente	27,60%	44,26%	Freqüência: 80 min-¹ Amplitude: 5,0 cm
Fração -6,3 mm + 2 mm (teste 10)			
Níveis 1+2	28,12%	43,30%	Crivo da tela: 1 mm

5.7.3. Simulação de resultado considerando o processamento principal e reprocessamento da fração mista no intervalo 16 mm x 6,3 mm (testes 2 e 3) e processamento principal na fração 6,3 mm x 2,0 mm (teste 10)

Na continuidade, simula-se o resultado final da correlação ‘recuperação *versus* teor de cinzas’, quando se unem as frações -16 mm +6,3 mm (testes 2 e 3) e -6,3 mm +2 mm (teste 10), conforme tabela 26. Vale lembrar que a participação mássica do intervalo -6,3 mm +2 mm na faixa -16 mm totalizou 24,75%.

O resultado exposto na tabela sugere a possibilidade de se concentrar um produto com teor de 43,11%, próximo da especificação exigida pelo mercado, e recuperação de 25,09%, considerando as frequências de jigagem específicas do carvão em cada intervalo testado. Nesta estimativa considerou-se o reprocessamento da fração mista (teste 3).

Tabela 26 - Simulação dos cortes densimétricos nos intervalos 16 mm x 6,3 mm (testes 2 e 3) e 6,3 mm x 2 mm (teste 10).

Produto	Teste	Frequência aplicada (min-¹)	% mássico no teste	Participação (%) em -16 mm	Teor de cinzas (%)
Níveis 1	2	96	13,10	7,04	39,66
	3	88	43,94	11,09	45,19
Níveis 1+2	10	80	28,12	6,96	43,30
Total/Média	--	--	--	25,09	43,11

5.7.4. Ensaios realizados em diversas freqüências com o reaproveitamento da amostra procedente da faixa original 50 mm x 16 mm reduzida para 6,3 mm x 2 mm

Utilizou-se nos próximos ensaios amostra oriunda da cominuição e reclassificação (em 6,3 mm e 2 mm) da parcela inicialmente testada no separador baseado em sensor de raios X e intervalo original -50 mm +16 mm. Este reaproveitamento teve a finalidade de analisar o impacto das oscilações verificadas na qualidade da mesma amostra, aplicada anteriormente ao intervalo 16 mm x 6,3 mm, na performance da estratificação do leito e, conseqüentemente, de identificar os parâmetros operacionais adequados para minimizar tal peculiaridade.

5.7.4.1. Ensaios nas freqüências 88 pulsos por minuto (Teste 11) e 72 pulsos por minuto (Teste 12)

Os resultados dos testes 11 e 12, realizados respectivamente nas freqüência 88 min-¹ e 72 min-¹ foram péssimos, embora o ensaio conduzido na menor freqüência, cuja amostra foi reaproveitada do ensaio 11, tenha apresentado algum progresso na qualidade dos produtos, porém insuficiente para alcançar a meta. As tabelas 55, 56, 57 e 58 do Apêndice registram os parâmetros operacionais utilizados e os resultados obtidos de ambos ensaios.

5.7.4.2. Ensaio na freqüência 64 pulsos por minuto (Teste 13)

Tendo em vista as características dos produtos obtidos nos testes anteriores não se aproximarem do produto-alvo, buscou-se investigar em ensaio conduzido na freqüência 64 min-¹ com a reutilização dos produtos do teste 12 e pequena participação do 11, o comportamento da amostra de carvão oriunda do intervalo original 50 mm x 16 mm, uma vez que não se confirmaram nos testes anteriores (freqüências >64 min-¹) o desempenho aceitável obtido no primeiro ensaio (teste 10) nesta granulometria e freqüência de 80 min-¹. A massa

disponível para o ensaio constituiu cinco níveis ao fim do teste e seu resultado é mostrado na tabela 28.

Observa-se que este ensaio realizado na freqüência 64 pulsos por minuto assemelha-se muito ao primeiro teste, tanto na recuperação como no teor de cinzas. A massa recuperada nos dois primeiros níveis praticamente é a mesma (28,15% contra 28,12%) e o teor de cinzas fica próximo de 43% (43,06% contra 43,30%), nesta ordem. A partir do 3° nível os teores de cinzas diferem levemente, fato possivelmente motivado pelos sucessivos descartes das frações passantes nos crivos do leito até este ensaio, uma vez que os teores de cinzas calculados do carvão que abasteceria o jigue diferirem quase 6 pontos percentuais: 55,17% e 60,95%; respectivamente. O teor de enxofre ponderado nos dois primeiros níveis alcança valor de 2,0%, inferior ao limite máximo.

Os principais parâmetros aplicados neste ensaio são apresentados na tabela 27 seguinte.

Tabela 27 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 13 para o intervalo 6,3 mm x 2 mm.

Parâmetros (unidades)		**Valores**
Freqüência	min^{-1}	64
Amplitude	medida no nível de água, cm	6,0
Altura total do leito	cm	12,5

Tabela 28 - Teste 13 realizado a partir da reutilização de amostra do ensaio 12, na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, freqüência de 64 pulsos por minuto e amplitude de 6 cm.

Produtos	**Massa (%)**	**Massa acum. (%)**	**Teor de cinzas (%)**	**Cinzas acum. (%)**	**Teor de enxofre (%)**
Nível 1	11,66	11,66	38,64	38,64	2,13
Nível 2	16,49	28,15	46,18	43,06	1,91
Nível 3	16,88	45,03	49,67	45,54	1,88
Nível 4	19,28	64,31	55,03	48,38	2,03
Nível 5	33,38	97,69	66,50	54,57	16,62
Passante nos crivos	2,31	100,00	80,59	55,17	1,98
Massa ensaiada (kg)	16,50	Tela crivada de diâmetro 1 mm			

Para efeito de comparação, a figura 24 ilustra os resultados dos testes 10 e 13, enfatizando a pequena variação nos primeiros dois níveis (grande proximidade dos pontos no 2º nível - teor de 43%) e aumento significativo a partir do 3º nível, com menores teores de cinzas dos produtos obtidos no teste 13 (maior inclinação com a horizontal e aproximação com o eixo das ordenadas), cuja frequência 64 min^{-1} apresentou melhor desempenho. Em decorrência do resultado animador, novo teste foi realizado na mesma freqüência e espessura de leito para análise e confirmação destes parâmetros como os adequados para o intervalo considerado.

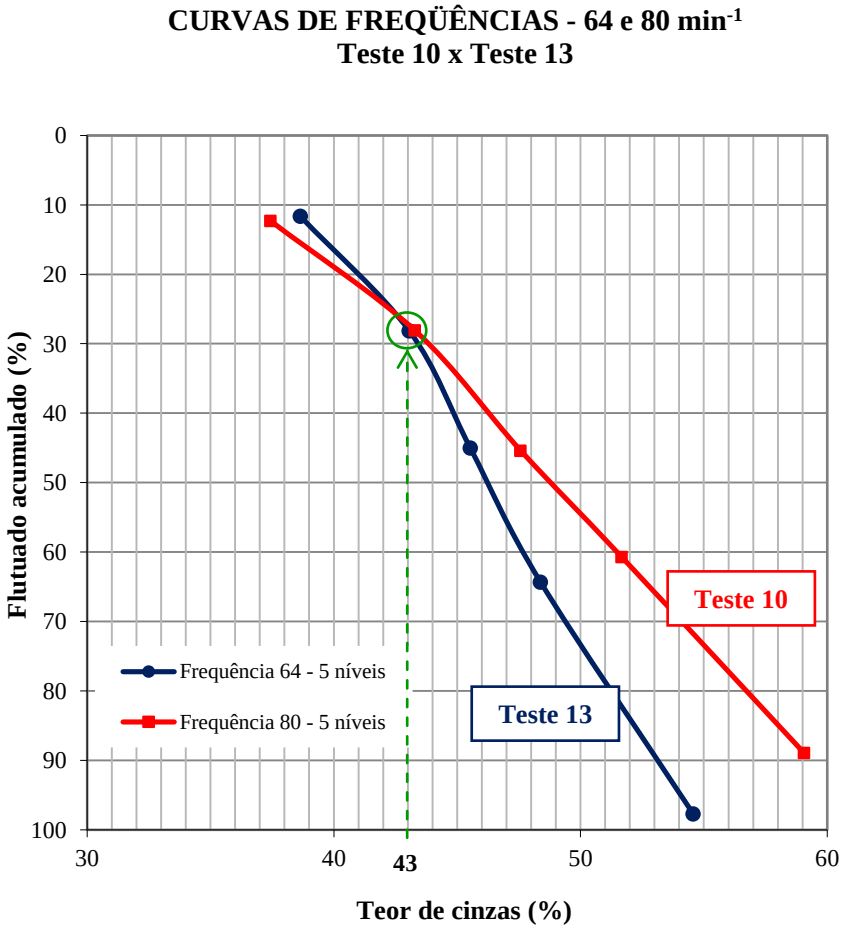

Figura 24 – Variação dos valores nos cinco níveis dos testes 10 e 13.

5.7.5. Simulação do reprocessamento da fração mista no intervalo 6,3 mm x 2 mm

Reaproveitam-se os produtos dos níveis 3 e 4 (fração mista) do teste 13 para simulação de seu reprocessamento no intervalo -6,3 mm +2 mm, com objetivo de identificar subprodutos

com potencial de aproveitamento. Tal fração mista seria constituída por um ou mais subprodutos originários da coleta do sistema de remoção de frações densas (2º e/ou 3º rejeito) de uma operação em escala industrial.

Estes dois níveis foram reprocessados em dois estudos, onde se aplicaram duas freqüências: 64 (teste 14) e 56 min-¹ (teste 15) para se estimar o resultado 'recuperação mássica' e 'teor de cinzas' em cada operação. Foram estudadas freqüências inferiores à aplicada no processamento principal, uma vez que se fossem utilizadas freqüências superiores, estaria-se priorizando teoricamente a separação por densidade, procedimento desaconselhável quando se processam frações (mistas) de carvão com densidades aproximadas.

5.7.5.1. Estudo na freqüência 64 pulsos por minuto (Teste 14)

Por tratar-se de processamento de fração mista (subproduto do processamento principal) em leito constituído por apenas dois níveis, foi produzido um carvão com teor de cinzas aproximado de 48%, inadequado para fornecimento ao Complexo Jorge Lacerda. Talvez este produto fora de especificação possa ser reaproveitado em misturas combustíveis ou novas aplicações. As tabelas 59 e 60 resumem os detalhes operacionais e resultados.

5.7.5.2. Estudo na freqüência 56 pulsos por minuto (Teste 15)

Possivelmente pelas mesmas razões, produziu-se ao fim do teste, carvão com características semelhantes ao produto obtido no ensaio 14. Para maiores detalhes, consultar as tabelas 61 e 62.

5.7.6. Ensaio para confirmação da freqüência 64 pulsos por minuto como a indicada para o intervalo 6,3 mm x 2 mm e processamento principal com leito formado por 5 níveis (Teste 16)

Finalizados os experimentos no intervalo granulométrico -6,3 mm +2 mm da primeira amostra recebida na RWTH (2ª amostra ensaiada), reprocessam-se os produtos do teste 10, o primeiro neste intervalo, com a finalidade de confirmar a freqüência 64 min-¹ como a indicada para o teste seguinte no jigue de maior porte. Tal equipamento foi fornecido pela *All Mineral Aufbereitungstechnik GmbH & Co.*, cujo sistema de alimentação é contínuo, assemelha-se aos equipamentos que operam em escala industrial. Convém salientar que a massa ensaiada foi insuficiente para preencher a totalidade da altura do primeiro nível (gabarito), restando 1 cm

para completá-lo, razão pela qual sua recuperação mássica permaneceu aquém das anteriores, quando tal particularidade não ocorreu. Este fato impactou no resultado demonstrado na tabela 63 (Apêndice). A recuperação mássica poderá ser maior em operação na qual a massa amostral preencha a totalidade das alturas pré-definidas dos respectivos gabaritos ou outras medidas que contemplem as frações de interesse.

Os principais parâmetros aplicados neste ensaio são apresentados na tabela 29.

Tabela 29 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 16 para o intervalo 6,3 mm x 2 mm.

Parâmetros		**Valores**
Freqüência	min-¹	64
Amplitude	medida no nível de água, cm	6,0
	medida no nível de carvão, cm	4,0
Altura total do leito	cm	12,5

Na comparação do resultado deste teste (16) com o de número 10, e nesta seqüência, constata-se que os teores de cinzas mostram-se inferiores nos 5 níveis, sendo maior somente na fração passante nos crivos do leito. Com exceção dos níveis 1 e 3, nos demais as recuperações mássicas do teste 16 ultrapassam as do 10. Acreditou-se, após este teste, que a freqüência 64 min-¹ poderia implementar bom resultado 'massa/teor de cinzas', se aplicada no jigue da *All Mineral*®. Os teores de enxofre ponderados dos testes 16 e 10 igualaram-se nos dois primeiros níveis atingindo 2,17% e 2,16%, respectivamente.

Confrontando-se igualmente o resultado do teste 16 com o ensaio 13, evidencia-se a variação ocorrida na constituição densimétrica das amostras procedentes originalmente dos intervalos 6,3 mm x 2 mm e 50 mm x 16 mm, respectivamente, através do rebaixamento dos teores de cinzas favorável aos produtos do ensaio 16, embora as massas do outro teste sejam levemente superiores. Como se observa na figura 25, as linhas tracejadas após interceptarem as curvas e atingirem o eixo das ordenadas destacam a variação obtida na recuperação mássica das duas amostras. Esta oscilação indica maior concentração da fração densa na amostra avaliada no teste 13, originada de possível segregação desta fração ocorrida na constituição da faixa granulométrica 50 mm x 16 mm.

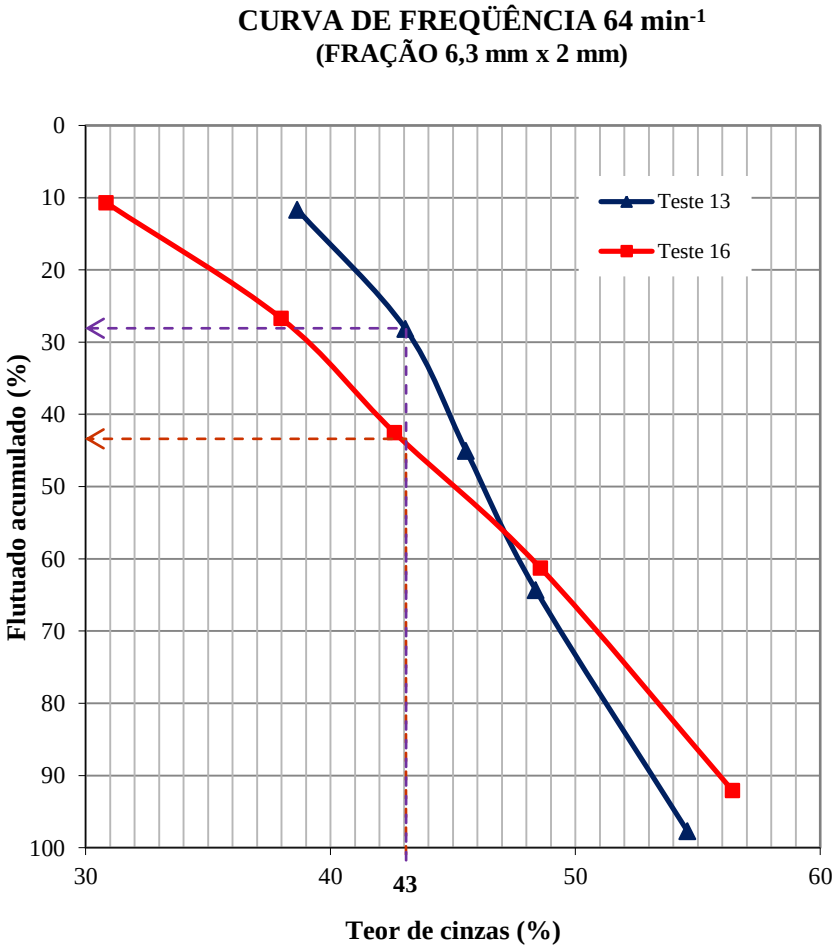

Figura 25 – Análise da variação da qualidade das amostras constituintes dos intervalos 50 mm x 16 mm e 6,3 mm x 2 mm nos testes 13 e 16.

5.8. Comentários sobre os testes realizados na 2ª amostra e no intervalo 6,3 mm x 2 mm

Mais uma vez, verificou-se que a variação ocorrida na qualidade das amostras particionadas originalmente nos intervalos 6,3 mm x 2 mm e 50 mm x 16 mm (posteriormente reduzido para 6,3 mm x 2 mm) da segunda amostra, afetou os produtos dos testes, porém com menor impacto na fração 6,3 mm x 2 mm, uma vez que seu melhor resultado foi obtido em ensaio, cuja altura de leito manteve-se em 5 níveis e a freqüência em 64 min^{-1}. Ao contrário do resultado satisfatório obtido no teste com a fração 16 mm x 6,3 mm, na segunda amostra, somente quando este foi conduzido em leito formado por 4 níveis e na freqüência 88 min^{-1}.

O resultado do teste 13 realizado com o reaproveitamento de produtos oriundos do intervalo original 50 mm x 16 mm, a pior situação entre as demais alíquotas testadas, uma vez que apresentou maior proporção de material denso, foi alentador. A massa acumulada nos dois primeiros níveis do teste atinge o percentual de 28,15%, correspondendo a 9,39% em relação à participação deste intervalo na alimentação total (33,35%) e os teores de cinzas e enxofre registram 43,06% e 2,0%, respectivamente.

O teste 16, conduzido na mesma freqüência e com reaproveitamento de alíquota procedente do intervalo original 16 mm x 6,3 mm, situação aparentemente mais favorável, assinala desempenho superior ao ensaio 13 na medida que a massa acumulada nos três primeiros níveis alcança 42,53%, equivalente a 10,53% do total de 24,75% do intervalo na composição da alimentação global de processamento. Os teores de cinzas e enxofre situam-se abaixo dos índices limítrofes, 42,61% e 2,17%, nesta seqüência. Salienta-se, contudo, que a alíquota reutilizada no respectivo ensaio já fora reaproveitada em outros experimentos, cujas frações passantes nos crivos do jigue foram sucessivamente descartas, fato que reduziu significativamente o teor de cinzas total de cada alíquota testada e pode ter impactado nesta performance.

Os ensaios conduzidos neste intervalo, considerando os não apresentados neste trabalho, totalizou 11 testes.

5.9. Testes realizados na faixa granulométrica 2 mm x 0,1 mm

Para o estudo deste intervalo granulométrico, primeiramente separou-se a fração -0,1 mm por não integrar o tema abordado neste trabalho e ser tratada em processo de flotação e secundariamente conduziram-se 3 ensaios, conforme apresentado a seguir.

5.9.1. Ensaio em mesa concentradora (Teste 17)

Secundaria e preliminarmente, investigou-se a exeqüibilidade técnica de concentração de carvão com teor de cinzas até 43% no mesmo intervalo em mesa concentradora. Para esta finalidade realizou-se um único teste neste equipamento. Os parâmetros adotados para o ajuste do equipamento encontram-se discriminados na tabela 30.

Tabela 30 - Resumo dos parâmetros aplicados no único ensaio em mesa concentradora (Teste 17).

Parâmetros (unidades)		**Valores**
Freqüência	min^{-1}	280
Amplitude	mm	10
Vazão de água	l/min	25,0
Ângulo de operação	°	3,0
Produção	kg/h	70,0
Nº de ciclos de amostragem	unid	2
Duração de cada coleta	s	20

A operação na mesa concentradora possibilitou a separação de seis frações no teste 17, cujo resultado é apresentado na tabela 64 exposta no Apêndice.

O intervalo granulométrico -2 mm +0,1 mm da primeira amostra estudada correspondeu a 18,66% da massa total. A recuperação da fração 4, considerada como concentrado, uma vez que seu teor de cinzas permaneceu abaixo de 43%, foi equivalente a 3,9% (20,75% x 0,1866).

Face à exeqüibilidade atingida no ensaio, deu-se continuidade ao estudo da mesma fração em espirais.

5.9.2. Ensaios em espirais

Foram utilizados nos dois testes o total de 24 kg de amostra na faixa granulométrica -2 mm +0,1 mm remanescente. No final da última espiral do referido equipamento acoplavam-se 6 desviadores (repartidores), possibilitando a separação e análise de 6 produtos distintos, denominados neste estudo de frações A, B, C, D, E e F, com início no centro da espiral e final na extremidade de seu raio, respectivamente. As frações que fluiam nas proximidades do centro reportavam às bandas mais densas, tornando-se mais leves na medida que se aproximavam de sua extremidade. A fração F, a mais extrema, constituída pela banda mais leve, apresentou maior concentração de argilo-minerais, razão pela qual seu teor de cinzas atingiu percentual alto. As frações A e B foram aglutinadas, em função de sua semelhança em termos de densidade, facilitando a análise dos produtos.

5.9.2.1. Concentração 12% em sólidos (Teste 18)

A tabela 65 apresenta o resultado do teste 18, cujo resultado apresentou-se promissor, uma vez que o processamento em concentrações baixas frequentemente apresenta melhor eficiência. Foram utilizados no ensaio 12 kg de amostra de carvão.

Lembrando que 18,66% da massa amostral refere-se à fração -2 mm +0,1 mm, as frações E e D recuperam, nesta ordem, aproximadamente 2,6% e 3,6%, cujo teor de cinzas ponderado deve-se aproximar de 43%. Os teores de enxofre das frações D e E atingiram 2,11% e 2,13%, respectivamente, com média de 2,12%.

Para estudo do desempenho do processo nesta concentração foram utilizados os parâmetros, conforme especificado na tabela 31.

Tabela 31 - Resumo dos parâmetros aplicados no 1º teste em espirais (Teste 18).

Parâmetros (unidades)		**Valores**
Massa de carvão	kg	11,9
Volume de água	l	100
Concentração	%	12,0
Vazão aproximada	m³/h	5,0
Nº de ciclos de amostragem	unid	1
Duração de cada coleta	s	10

5.9.2.2. Concentração 24% em sólidos (Teste 19)

A tabela 66 apresenta o resultado do ensaio 19 que consumiu 12 kg de amostra, a exemplo do teste realizado na concentração de 12%. Percebe-se aumentos no teor de cinzas e massa da fração E.

Com o acréscimo na concentração de sólidos, verifica-se que o teor de cinzas da fração E aumenta, situando-se acima de 39%. Como já informado, o intervalo granulométrico estudado contribui em massa com 18,66% do total da amostra, transformando as recuperações das frações D e E em 3,1% e 3,6%, respectivamente, com teores de cinzas dos mesmos produtos superiores aos do teste 18, porém com teores de enxofre levemente inferiores (1,93% e 2,06%, nesta sequência).

O ensaio realizado nesta concentração considerou os parâmetros elencados na tabela 32.

Tabela 32 - Resumo dos parâmetros aplicados no 2º teste em espirais (Teste 19).

Parâmetros (unidades)		**Valores**
Massa de carvão	kg	12,1
Volume de água	l	50
Concentração	%	24,0
Vazão aproximada	m³/h	5,0
Nº de ciclos de amostragem	unid	1
Duração de cada coleta	s	10

5.10. Comentários sobre os testes realizados na 2ª amostra e no intervalo 2 mm x 0,1 mm até aqui finalizados

O intervalo 2 mm x 0,1 mm analisado em testes a seco (separador em leito fluidizado) e úmido (mesa e espirais concentradoras) foi procedente apenas da segunda amostra, inviabilizando, portanto, a comparação de suas características com as das demais amostras. O desempenho do intervalo em espirais apresentou resultado animador pelo teor de cinzas aquém e próximo da meta e vultosa recuperação apresentados, contribuindo de forma significativa para o promissor resultado final obtido.

5.11. Estudos realizados com a 3ª amostra de carvão na RWTH

A terceira amostra solicitada à Carbonífera Catarinense e SATC necessária aos testes complementares na RWTH-Aachen teve por finalidade avaliar o desempenho da estratificação do leito nos intervalos granulométricos -16 mm +6,3 mm e -6,3 mm +2 mm em jigue de processamento contínuo da *All Mineral*®, disponível nesta Universidade, para confirmação dos melhores parâmetros de frequência, amplitude e altura de leito testados no *Alljig*®, bem como a aproximação da recuperação real obtida em regime operacional contínuo.

Primeiramente são apresentados os resultados dos ensaios conduzidos no *Alljig*®, a partir do reaproveitamento de parte de amostra utilizada em testes no jigue da *All Mineral*®. Tais testes visaram a comparação de desempenho entre ambos equipamentos e seus regimes de processamento (batelada *versus* contínuo), bem como a análise do comportamento de carvão minerado em área distinta das amostras anteriores (primeira e segunda), a fim de torná-la mais abrangente para a operação em escala industrial. Posteriormente são mostrados os resultados dos ensaios processados em regime contínuo (jigue da *All Mineral*®).

5.11.1. Ensaios no *Alljig*® a partir da reutilização de parte de amostra testada no jigue da *All Mineral*®

Na continuidade, procederam-se os testes na freqüência 88 min-¹ e intervalos 12,5 mm x 6,3 mm e 16 mm x 6,3 mm para fins de comparação.

5.11.1.1. Ensaio na freqüência 88 pulsos por minuto a partir de amostra reclassificada em 12,5 mm x 6,3 mm (Teste 20)

Com a finalidade de ratificação da freqüência 88 pulsos por minuto como a mais promissora e abrangente, reprocessou-se no *Alljig*® parte da amostra reclassificada em -12,5 mm +6,3 mm para investigação do efeito deste intervalo na qualidade da estratificação do leito. A tabela 67 apresenta os resultados obtidos do teste 20.

Neste ensaio, o nível 1 também repete a menor altura observada nos testes anteriores, penalizando a recuperação mássica em 0,5 cm desta dimensão.

Os principais parâmetros aplicados no referido teste encontram-se listados na tabela 33.

Tabela 33 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 20 com a 3ª amostra para o intervalo 12,5 mm x 6,3 mm.

Parâmetros		**Valores**
Freqüência	min-¹	88
Amplitude	medida no nível de água, cm	5,0
	medida no nível de carvão, cm	4,0
Altura total do leito	cm	12,0

5.11.1.2. Ensaio na freqüência 88 pulsos por minuto para sua confirmação a partir de amostra testada originalmente no intervalo 16 mm x 6,3 mm (Teste 21)

Por fim, estudou-se o carvão no intervalo -16 mm +6,3 mm, originalmente testado no jigue de processamento contínuo da *All Mineral*®, ora na freqüência 88 pulsos por minuto, a fim de ratificá-la como a indicada para este intervalo e processamento principal com leito formado por 5 níveis, a partir de amostra de carvão procedente de área distinta.

A altura total do nível 1, ao término do teste, alcançou aproximadamente 1,5 cm da altura total do primeiro elemento. Em função desta particularidade, acredita-se que em situação de preenchimento total deste nível a recuperação final ainda possa ser maior. O resultado alentador está descrito na tabela 68 (Apêndice).

Os principais parâmetros estão discriminados na tabela 34 seguinte.

Tabela 34 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 21 para o intervalo 16 mm x 6,3 mm.

Parâmetros		**Valores**
Freqüência	min-¹	88
Amplitude	medida no nível de água, cm	5,0
	medida no nível de carvão, cm	4,0
Altura total do leito	cm	11,5

A figura 26 resume a sequência dos testes realizados no *Alljig*® com a segunda e terceira amostra nos intervalos pesquisados, enfatizando os que apresentaram resultados promissores.

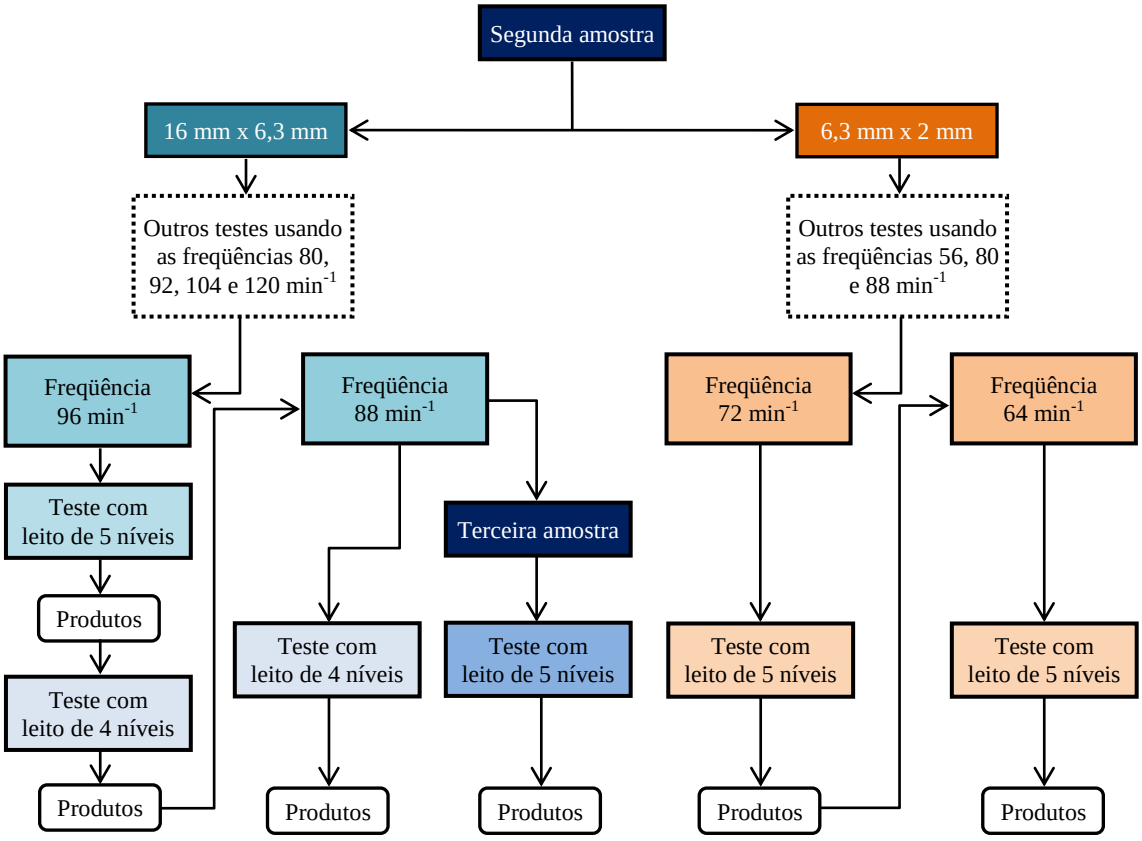

Figura 26 – Fluxo dos ensaios de acordo com os intervalos estudados e resultados promissores obtidos na segunda e terceira amostras.

5.12. Comentário restrito aos testes realizados na 3ª amostra e nos intervalos 16 mm x 6,3 mm e 12,5 mm x 6,3 mm

Os dois testes realizados na terceira amostra e referidos intervalos visaram comparar os resultados obtidos na faixa 16 mm x 6,3 mm com a fração menor que 12,7 mm (12,5 mm x 6,3 mm), conforme sugerido por Redivo (2002). Baseado nas características da referida amostra, observa-se que não houve relevante diferença nos produtos (massa x teor de cinzas) procedentes dos ensaios, mantendo o intervalo maior como o indicado para o processo de jigagem com base no menor custo de cominuição. Possivelmente a constituição

densimétrica desta amostra, lavrada em outra região, sofreu redução na proporção da fração mista, favorecendo o resultado obtido.

5.13. Comentário sobre as variações observadas nas características das três amostras estudadas

As amostras empregadas nos ensaios coletadas em frentes de lavra e áreas distintas apresentaram oscilações em algumas de suas características, afetando diretamente os fatores condicionantes ligados à estratificação do leito e conseqüente o desempenho operacional do jigue. Considerando que a primeira amostra, avaliada em testes de afunda-flutua, não foi analisada em leito pulsante (processo de jigagem), torna inadequada sua comparação às demais. Por outro lado, as variações ocorridas na qualidade da segunda amostra são evidenciadas quando se comparam os resultados dos testes, cujas alíquotas foram constituídas a partir do intervalo 50 mm x 16 mm (separador baseado em sensor) com os dos experimentos iniciais, onde alíquotas oriundas da fração original 16 mm x 6,3 mm foram empregadas. A dificuldade de se obter um produto com as especificações exigidas pelo mercado a partir do processamento das alíquotas procedentes do intervalo 50 mm x 16 mm foi maior, devido a possível concentração da fração densa mais graúda, segregada em decorrência de sua menor friabilidade. Portanto, a faixa 16 mm x 2 mm resultante da cominuição e reclassificação do intervalo 50 mm x 16 mm manteria tais características, razão pela qual a maioria dos testes que utilizaram tais alíquotas apresentaram desempenhos operacionais irregulares e adversos, configurando a pior situação entre as características das demais alíquotas estudadas.

Fica evidente que o processamento do carvão com tais características requeira alguns cuidados, partindo de uma operação que utilize menor altura do leito, acertos da freqüência e amplitude, além de outros ajustes, a fim de proporcionar melhores condições para uma adequada estratificação.

A terceira amostra apresentou aparentemente melhor nível de separação entre as frações densimétricas leves e densas conjuntamente à provável menor proporção de material denso, características que favoreceram seu maior rendimento no que se refere ao acréscimo da massa recuperada e à redução do teor de cinzas registrado na fração leve obtido no melhor ensaio conduzido no intervalo 16 mm x 6,3 mm. A figura 27 ilustra a diferença de características entre as amostras 2 (teste 10) e 3 (teste 21) em ensaios realizados na frequência 88 min^{-1}, parâmetro operacional que implementou os melhores níveis de estratificação no leito do jigue. Constata-se que:

a) ambas curvas encontram-se no ponto, cuja abscissa situa-se muito próxima de 43%, embora a proporção de seus constituintes densimétricos sejam distintas;

b) o 2º nível da terceira amostra processada com leito formado por 5 níveis apresenta ganho de massa em relação ao 1º nível da segunda amostra, constituída a partir do intervalo original 50 mm x 16 mm e leito composto de 4 níveis;

c) os teores de cinzas nos níveis 4 e 5 da terceira amostra superam os níveis 3 e 4 da segunda amostra, sugerindo menor proporção de material com densidade próxima a do carvão (fração mista).

Por questão de incompatibilidade experimental, uma vez que a primeira amostra não foi classificada na mesma faixa granulométrica nem submetida a ensaios no *Alljig*®, esta não foi incluída na análise gráfica registrada na figura 27.

Mesmo que haja atenção na preparação e homogeneização do carvão ROM antes de ingressar na unidade de beneficiamento, condições adversas e falhas podem ocorrer no decurso desta etapa, dificultando a preservação das características pré-definidas e esperadas do carvão bruto. Esta situação acarreta riscos ao desempenho do processo de jigagem, razão pela qual os parâmetros operacionais adotados devem oscilar dentro de intervalos estreitos, a fim de atenuar tal particularidade.

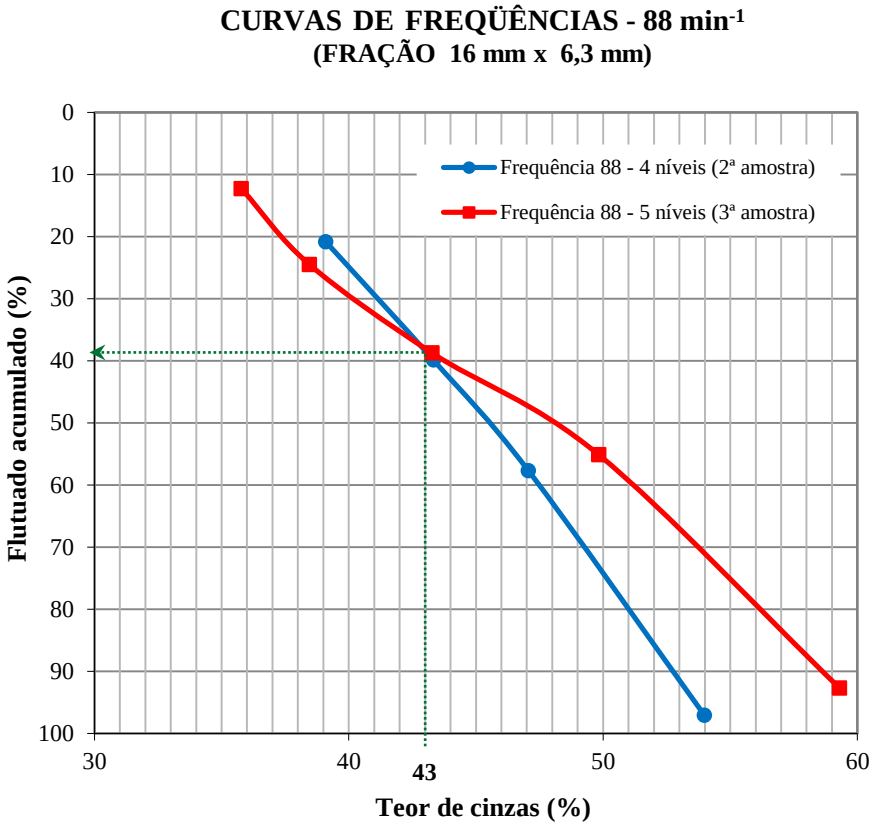

Figura 27 – Diferença de características entre as amostras 2 (teste 10) e 3 (teste 21) em ensaios realizados na freqüência 88 min^{-1}.

5.13.1. Ensaios no jigue de processamento contínuo da *All Mineral*®

Como parte integrante dos testes destinados à 3ª amostra, realizaram-se dois ensaios em cada um dos dois intervalos granulométricos tratados no jigue de maior porte da *All Mineral*® (16 mm x 6,3 mm e 6,3 mm x 2 mm). O objetivo foi estudar o comportamento dos carvões em equipamento com processamento contínuo e maior escala, simulando uma operação similar à industrial em 4 experimentos para análise de seu rendimento operacional.

5.13.1.1. Estudo da fração 16 mm x 6,3 mm

Neste ensaio buscou-se a confirmação dos resultados preliminares obtidos no *Alljig*®. Convém enfatizar que, devido à dificuldade de se alterar a freqüência exigida pelo *software* que controla a operação do jigue, a freqüência de 90 pulsos por minuto previamente ajustada neste foi mantida.

O referido intervalo granulométrico contribuiu com 54,89% da massa total da fração original -16 mm desta amostra estudada.

Este equipamento caracteriza-se por permitir em único corte densimétrico a separação de dois produtos: um leve e outro denso. A retirada da fração mais densa é realizada por um dispositivo denominado ‘portão-estrela’. Este assemelha-se a um eixo metálico de pequeno diâmetro com pás dispostas radialmente que ao girar traciona o material mais denso depositado sobre a chapa crivada e o conduz até o duto de saída. Neste ensaio adotou-se o acionamento manual do ‘portão-estrela’, aconselhável em testes preliminares, onde sua rotação é determinada previamente segundo porcentagem de sua potência nominal. Tendo em vista a limitação do jigue na separação de somente dois produtos e a característica do sistema de remoção da fração densa, adotaram-se os seguintes critérios para a realização dos dois testes neste intervalo:

a) Remover maior quantidade da fração densa, promovendo melhor qualidade ao produto leve, embora com menor recuperação mássica deste último;

b) Remover maior quantidade da fração leve, promovendo melhor qualidade ao produto denso, embora com menor recuperação mássica deste último.

1º Ensaio (Teste 22)

Para o referido ensaio foram adotados os seguintes parâmetros, conforme listados na tabela 35.

Tabela 35 - Resumo dos parâmetros aplicados no 1º teste do jigue da *All Mineral*® para o intervalo 16 mm x 6,3 mm (Teste 22).

Parâmetros		**Valores**
Freqüência	min^{-1}	90
Amplitude	medida no nível de água, cm	1,5 a 2,0
Portão-estrela	potência nominal, %	75
Altura total do leito	cm	~15
Taxa de alimentação	kg/hora	370
Duração de cada coleta	min	2
Abertura dos crivos	mm	1,0

O resultado do ensaio 22 pode ser analisado na tabela 69 (Apêndice).

Pelos dados da tabela, constata-se que houve a concentração de carvão com teor de cinzas abaixo de 43%, porém em quantidade insignificante (9,89%), se comparada às dos outros ensaios no *Alljig*®, quando percentuais mais vultosos e promissores foram obtidos.

2º Ensaio (Teste 23)

Neste ensaio foram considerados os seguintes parâmetros, de acordo com o critério para se recuperar maior massa da fração leve, listados na tabela 36. Alteraram-se apenas o percentual do portão-estrela e a taxa de alimentação do jigue.

Tabela 36 - Resumo dos parâmetros aplicados no 2º teste do jigue da *All Mineral*® para o intervalo 16 mm x 6,3 mm (Teste 23).

Parâmetros		**Valores**
Freqüência	min^{-1}	90
Amplitude	medida no nível de água, cm	1,5 a 2,0
Portão-estrela	potência nominal, %	68
Altura total do leito	cm	~15
Taxa de alimentação	kg/hora	277
Duração de cada coleta	min	2
Abertura dos crivos	mm	1,0

O resultado do ensaio 23 é apresentado na tabela 70 (Apêndice).

Constata-se na observação da tabela que as alterações implementadas não foram adequadas para a obtenção de um produto leve com teor de cinzas próximos a 43%. Produziu-se no ensaio uma fração com teor de cinzas muito acima do percentual almejado e recuperação vultosa (42,99%), esta última previsível pelo alto teor obtido.

A figura 28 apresenta esquema com as vistas longitudinal e transversal do jigue com medidas aproximadas.

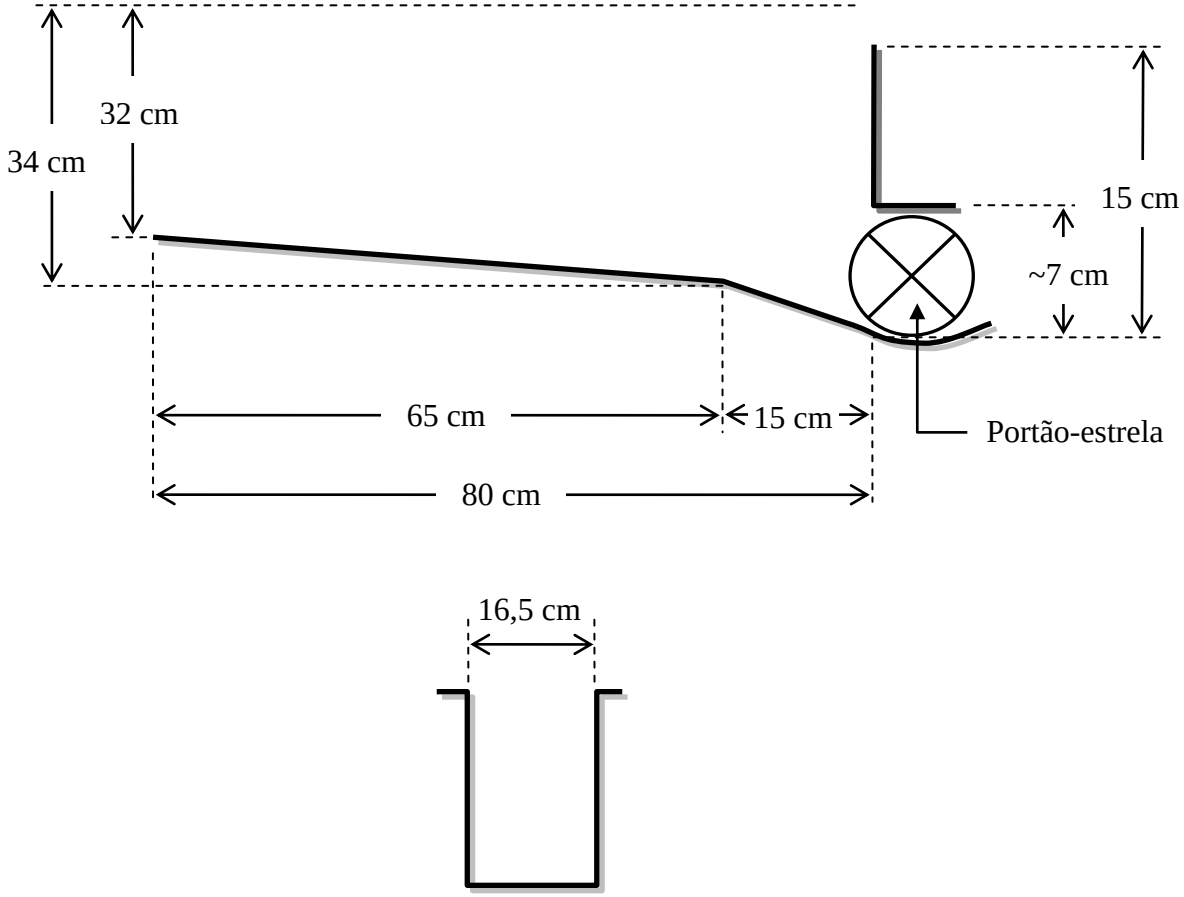

Figura 28 - Esquema longitudinal e lateral do jigue de processamento contínuo da *All Mineral*® instalado no laboratório da RWTH com medidas aproximadas (sem escala).

5.13.1.2. Restrições operacionais aos ensaios no jigue de processamento contínuo da *All Mineral*® e intervalo 16 mm x 6,3 mm

Acredita-se que algumas limitações operacionais impostas pelo equipamento da *All Mineral*® possam ter impactado negativamente nos resultados obtidos nos testes realizados com a fração -16 mm +6,3 mm e restrições de ordem espacial prejudicaram a realização de outros testes:

a) Fixação da frequência de pulsação em 90 min^{-1}, devido à dificuldade de ajuste do *software* que controla todos os parâmetros;

b) A altura do leito é determinada por chapas de ferro encaixadas nas laterais do leito com alturas pré-determinadas, dificultando a adoção de alturas com dimensões intermediárias;

c) A largura do leito do jigue é estreita para o intervalo -16 mm +6,3 mm, podendo ter dificultado a estratificação devido ao atrito entre as paredes do leito e o material processado;

d) Os equipamentos auxiliares e periféricos que possibilitam a operacionalidade do jigue (alimentador vibratório, correia transportadora e peneira vibratória) demandavam alterações na disposição de outros equipamentos e dispositivos que situavam-se na mesma sala, restringindo o acesso de amostras e equipamentos à parte subterrânea do laboratório, obrigando que os testes fossem realizados em dias pré-determinados e segundo a prioridade de outros estudos que ocorriam simultaneamente.

5.13.1.3. Estudo da fração 6,3 mm x 2 mm

Seguindo os mesmos critérios dos testes aplicados ao intervalo -16 mm +6,3 mm, deu-se continuidade nos ensaios com a faixa granulométrica -6,3 mm +2 mm. Enfatiza-se que pela mesma razão observada nos testes com o intervalo -16 mm +6,3 mm, manteve-se a freqüência de 90 min-¹ nos dois ensaios que seguem.

Cabe ressaltar que a faixa 6,3 mm x 2 mm participou com 28,36% da massa total da fração original -16 mm.

1º Ensaio (Teste 24)

Os seguintes parâmetros conduziram o 1° teste na faixa estudada, conforme apresenta a tabela 37.

Tabela 37 - Resumo dos parâmetros aplicados no 1º teste do jigue da *All Mineral*® para o intervalo 6,3 mm x 2 mm (Teste 24).

Parâmetros		**Valores**
Freqüência	min-¹	90
Amplitude	medida no nível de água, cm	1,5 a 2,0
Portão-estrela	potência nominal, %	66
Altura total do leito	cm	~15
Taxa de alimentação	kg/hora	467
Duração de cada coleta	min	2
Abertura dos crivos	mm	1,0

A tabela 71 (Apêndice) apresenta o resultado do teste 24.

O ajuste da potência do portão-estrela em 66% possivelmente foi o principal motivo por se ter atingido um teor de cinzas tão elevado (50,27%). Com base neste resultado, buscou-se no 2° teste um melhor ajuste deste parâmetro.

2º Ensaio (Teste 25)

Almeja-se no referido ensaio, a obtenção de um produto compatível com o teor de cinzas de 43%, uma vez que não ocorreu resultado satisfatório no 1° ensaio. A tabela 38 ilustra os ajustes dos parâmetros que conduziram o 2° teste.

Tabela 38 - Resumo dos parâmetros aplicados no 2º teste do jigue da *All Mineral*® para o intervalo 6,3 mm x 2 mm (Teste 25).

Parâmetros		**Valores**
Freqüência	min^{-1}	90
Amplitude	medida no nível de água, cm	1,5 a 2,0
Portão-estrela	potência nominal, %	68
Altura total do leito	cm	~15
Taxa de alimentação	kg/hora	390
Duração de cada coleta	min	2
Abertura dos crivos	mm	1,0

A tabela 72 (Apêndice) registra o resultado do teste 25.

A pequena variação adotada no portão-estrela respondeu positivamente no 2° teste, quando se analisa o resultado da tabela 82, mesmo com a aplicação de uma frequência não adequada. O produto ‘leve’ atinge uma recuperação de 14,66% e teor de cinzas de 42,69%. Verifica-se pelos valores encontrados que o fator atrito entre o material e as paredes do jigue provavelmente não impactou no desempenho da estratificação nesta faixa granulométrica.

5.14. Outros ensaios

Embora a eficiência de beneficiamento dos processos a seco seja inferior aos métodos hidráulicos, buscou-se reduzir o teor de cinzas no carvão desta camada, com a utilização das novas tecnologias de beneficiamento a seco, atualmente aplicadas na Alemanha e Europa. Realizaram-se testes em dois intervalos granulométricos: -50 mm +16 mm no separador baseado em sensor de raios X e -2 mm +0,1 mm no separador gravimétrico a seco para finos (AKA-Flow), previamente preparados para esta finalidade.

5.14.1. Ensaio no separador baseado em sensor de raios X com fração 50 mm x 16 mm

Este ensaio foi realizado na sede da *Titech* em Wedel. Utilizou-se no estudo somente a fração -50 mm +16 mm. Foram classificados previamente três produtos, tomando-se por critério a densidade: leve, misto e pesado, a fim de que fossem identificados e separados no equipamento que classifica o minério por sensor de raios X. Porém, tal classificador por sensor separa somente dois produtos, os quais foram denominados ‘leve’ e ‘pesado’.

Após ajustes e testes preliminares efetuados no primeiro dia, realizou-se no seguinte quatros experimentos, cujos resultados encontram-se na tabela 73. O critério baseado na densidade não apresentou resultados satisfatórios nos ensaios preliminares. Então, adotou-se nos testes subseqüentes novo critério com base nas massas recuperadas do produto ‘leve’, segundo ajustes nos parâmetros do equipamento, visando identificar através desta análise um produto aceitável.

Constata-se pela análise da tabela que houve redução significativa dos teores de cinzas na grande maioria dos testes, exceção ao experimento 2, cujo decréscimo foi insignificante na qualidade, porém expressivo na recuperação mássica. O teste 4 foi ensaiado em duas etapas para a obtenção de um produto com melhor qualidade, produzindo-se uma fração ‘mista’ na segunda fase. Em nenhum dos experimentos atingiu-se o teor de 43%. Em vista deste resultado e com a finalidade de analisar sua viabilidade como equipamento pré-concentrador, testou-se no *Alljig*® o produto ‘leve’ obtido do ensaio que apresentou o melhor valor de recuperação/teor de cinzas, na busca de um produto adequado à aplicação no complexo termoelétrico. Escolheu-se o experimento 3 (ver tabela 73), cujos percentuais de massa e teor de cinzas alcançaram 57,63% e 54,32%, respectivamente.

Ensaio no *Alljig*® com fração ‘leve' obtida no experimento 3 do separador baseado em sensor de raios X (Teste 26)

A quantidade da fração ‘leve’ obtida no experimento 3 e disponível para teste, equivalente a 57,63% da massa ensaiada, foi rebritada 100% abaixo de 16 mm. Em virtude da baixa massa remanescente (12,3 kg), optou-se por ampliar o intervalo granulométrico até 2 mm para não se reduzir ainda mais a massa e para manter altura mínima (três níveis) no leito, constituindo a faixa 16 mm x 2 mm. Após a classificação granulométrica em 2 mm, constituiu-se o referido intervalo, cuja massa atingiu 9,3 kg, o equivalente a 75,64% da massa total disponível. A tabela 74 (Apêndice) apresenta o resultado do referido ensaio.

Considerando-se que as massas obtidas nos níveis e fração passante nos crivos participaram com 43,59% (75,64% x 0,5763) da massa ensaiada, a recuperação dos dois primeiros níveis totalizou 21,97%. A referida massa reduz-se ainda mais quando leva-se em conta a participação de 47,33% (tabela 7) da fração 50 mm x 16 mm no total da primeira amostra. Este baixíssimo percentual conjuntamente ao teor de cinzas de 46,14% produziram um resultado final desalentador.

A tabela 39 resume os parâmetros aplicados no teste 26.

Tabela 39 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 26 para o intervalo 16 mm x 2 mm.

Parâmetros (unidades)		**Valores**
Freqüência	min^{-1}	88
Amplitude	medida no nível de água, cm	5,0
Altura total do leito	cm	7,5

5.14.2. Ensaio da fração -2mm no separador (gravimétrico) a seco em leito fluidizado (Teste 27)

Para este ensaio foi separada a fração -0,1 mm da faixa abaixo de 2 mm, consituindo o intervalo -2 mm +0,1 mm.

O separador a seco em leito fluidizado para finos, disponível no laboratório AMR, permitiu a separação de duas frações, uma leve e outra pesada. No teste 27 simulou-se a separação das frações leves e pesadas em várias etapas como se o processamento se realizasse em equipamentos dispostos em série. Cada operação completa durou cerca de 40 segundos, possibilitando a coleta de amostras da fração pesada (subproduto) neste intervalo com a realimentação do equipamento pelas frações mistas remanescentes de cada etapa em circuito fechado (figura 29). Optou-se pelo reprocessamento da amostra original em seis etapas, coletando-se, a cada 40 segundos, seis subprodutos densos distintos com o fim de se concentrar um produto mais nobre ao final da operação no AKA-Flow. A amostra ensaiada pesou 22,6 kg, o equivalente a 10,35% da massa da fração -2 mm +0,1 mm.

O resultado do teste 27 encontra-se na tabela 75.

Como se observa na tabela, nenhum subproduto nem o concentrado alcançaram o teor de cinzas de 43%, indicando que o beneficiamento a seco pelo método e etapas adotados não

atingiu resultado satisfatório, possivelmente pela baixa eficiência do meio utilizado na separação: o ar. Em função da baixa redução obtida no teor de cinzas do concentrado, não se realizaram análises do teor de enxofre neste produto e nos demais subprodutos.

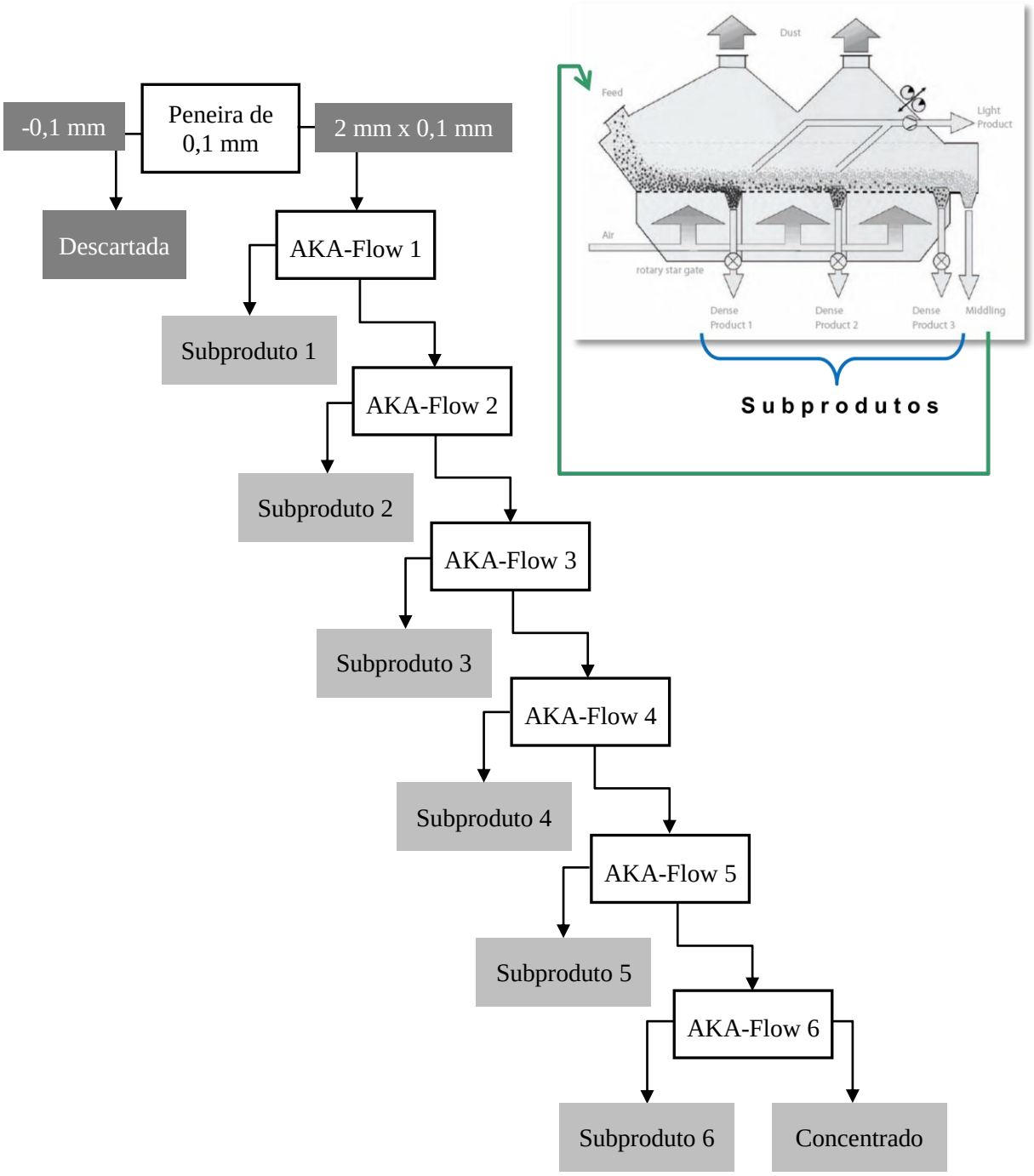

Figura 29 – Sistemática utilizada para avaliação dos subprodutos obtidos nos seis processamentos em série.

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados de ensaios e impressões técnicas observados ao longo do estudo do carvão da camada Bonito, restritos às áreas de coletas das amostras na Mina Bonito I, conclui-se o que segue:

O grau de liberação obtido a partir da cominuição do carvão nas granulometrias -50 mm; -9,5 mm e -2 mm no Brasil foi insignificante, contribuindo para aumento na dificuldade de separação das frações (leve, mista e densa) constituintes do carvão. A baixa liberação aliada ao expressivo percentual de NGM, como esperado, afetaram a estratificação do leito no processo de jigagem, a partir do deslocamento indesejável de parte da fração mista para o produto leve, determinando sua qualidade, recuperação e eficiência de separação.

Os processos de beneficiamento a seco pesquisados na Alemanha e realizados, respectivamente, pelo 'separador baseado em sensor de raios X', para intervalos granulométricos maiores que 12 mm (partículas graúdas) e 'separador gravimétrico a seco para finos' utilizado nas faixas menores que 3 mm (partículas finas), foram analisados, buscando-se cumprir o objetivo traçado no início deste estudo. Houve redução de até 7% e 5% nos teores de cinzas dos produtos "leve" e "concentrado" (o de menor densidade), em relação ao teor do ROM, nas separações obtidas com as faixas graúda e fina, nesta sequência. Tais reduções foram insuficientes para atender um dos principais requisitos técnicos demandados pelo mercado consumidor (teor de cinzas). Estes métodos podem ser utilizados em estágios de pré-concentração, melhorando o rendimento operacional final dos processos principais nos intervalos avaliados, além de reduzir custos de transporte, uma vez que a pré-concentração poderia ser realizada no local da mina.

Com base nos resultados não satisfatórios obtidos nos ensaios utilizando processos de separação a seco, o foco da pesquisa voltou-se para a investigação da frequência de pulsação e espessura do leito no *Alljig*® (processo hidráulico), de modo a melhorar as condições de estratificação dos níveis por densidade. As reduções nos teores de cinzas obtidos nos ensaios de jigagem, restritos às frequências específicas de cada intervalo analisado, foram mais relevantes e promissoras que os alcançados nos métodos a seco, em virtude de uma melhor estratificação e conseqüente eficiência de separação.

A espessura do leito afetou a estratificação do carvão no processo de jigagem, principalmente no intervalo -16 mm +6,3 mm, cujo grau de liberação das frações constituintes

aparentemente foi menor que o da faixa -6,3 mm +2 mm. A altura operacional do leito do jigue deverá ser definida pelo teor de matéria mineral contido no ROM, intervalo granulométrico da alimentação e o tipo de equipamento utilizado para seu beneficiamento. Porém, não é aconselhável, pelos resultados obtidos e condições analisadas, utilizar espessuras de leitos superiores a 12,5 cm (ou 5 níveis) e menores que 10 cm, ou 4 níveis para ambas faixas. Nos ensaios em que as alturas de leito foram constituídas de três ou dois níveis (na simulação do reprocessamento da fração mista) por insuficiência de material que elevasse a espessura do leito, verificou-se que os resultados conjuntos "massa - teor de cinzas" não foram exitosos (recuperações abaixo de 13% e teores de cinzas acima de 43%), possivelmente por não constituir outro(s) nível(is) que pudesse(m) acomodar adequadamente a fração mista mais densa. Uma possível solução estaria em aumentar a altura do leito, porém de acordo com a espessura e posicionamento das frações densimétricas de interesse na cuba do aparelho. O produto obtido no reprocessamento da fração mista e nos ensaios com três níveis, cujos parâmetros 'recuperação mássica' e 'teor de cinzas' atingiram em média valores aproximados de 3% e 48%, respectivamente, poderia integrar *blending* com outro mais nobre ou buscar mercado próprio que fosse compatível a este teor.

Quando se comparam os resultados dos testes realizados no *Alljig*® com a 3ª amostra nos intervalos de 16 mm x 6,3 mm (teste 21) e 12,5 mm x 6,3 mm (teste 20), quanto às massas e respectivos teores de cinzas e enxofre, verifica-se que estes assemelham-se, sugerindo que a faixa maior (teste 21) deva ser mantida em prol do menor custo de cominuíção, embora haja leve aumento dos percentuais de enxofre neste mesmo intervalo.

Observa-se na continuidade dos testes realizados no *Alljig*® variação significativa na constituição densimétrica das três amostras estudadas, destacando-se a segunda amostra, especificamente o intervalo de investigação inicial 50 mm x 16 mm que ao ser constituído possivelmente concentrou a fração densa mais graúda segregada pela sua baixa friabilidade das demais faixas granulométricas (-16 mm +2 mm e -2 mm). A faixa 16 mm x 2 mm resultante da cominuição e reclassificação do intervalo 50 mm x 16 mm manteve as características do intervalo original, fato que dificultou a pesquisa exploratória, em função da ocorrência de resultados aparentemente anômalos e incoerentes que alteraram o curso do plano da investigação. Na medida que a lavra se desenvolve podem surgir alterações nas características do ROM, mesmo que aplicada apropriada homogeneização antes de seu ingresso na unidade de beneficiamento, razão pela qual os valores dos parâmetros

operacionais aqui registrados devem sofrer pequenos ajustes com o fim de apropriar a operação de jigagem à peculiaridade do jazimento carbonífero em uso.

Os testes conduzidos no jigue de processamento contínuo da *All Mineral*® apresentaram resultados distintos nas faixas 16 mm x 6,3 mm e 6,3 mm x 2 mm estudadas. Acredita-se que esta diferença esteja ligada à restrição imposta pelos parâmetros adotados nos ensaios, que limitaram o desempenho operacional do equipamento com impacto maior na fração 16 mm x 6,3 mm. Em razão disso, o resultado obtido nos dois testes com este intervalo não foi satisfatório, em função de não haver sido encontrada a melhor regulagem do 'portão-estrela' para aumento na massa recuperada, fato que viabilizaria seu processamento em maior escala e definiria sua eficiência operacional. No melhor resultado obteve-se recuperação mínima de 9,89% (em relação à alimentação total de 54,89%) e teor de cinzas de 40,71%. Ainda restrito a este intervalo, é possível que a relação entre a estreita largura do leito (165 mm) e a dimensão máxima da faixa (16 mm) tenha sido inadequada e contribuído para o atrito excessivo entre as partículas e suas paredes, impactando negativamente na estratificação e resultado atingidos. Acredita-se que a frequência fixada em 90 min^{-1}, mais próxima de 88 min^{-1}, não tenha afetado o resultado. Quanto aos dois ensaios referentes a faixa de 6,3 mm x 2 mm, obtém-se surpreendente resultado no segundo teste, quando o teor de cinzas alcança 42,69% e a recuperação mássica atinge 14,66% (referente à alimentação total de 28,36%) na frequência de 90 min^{-1}, superando em 5 pontos percentuais o melhor resultado obtido no *Alljig*® e na frequência de 64 min^{-1} até então: teor de 43,06% e massa de 9,39% (em relação ao total de 33,35%). Fica evidente neste ensaio que os parâmetros "massa" e "teor de cinzas" podem diferir, quando se comparam os resultados dos ensaios processados por batelada (*Alljig*®) com os obtidos em processo contínuo (jigue da *All Mineral*®). Ressalta-se que o tipo de sistema para descarte da fração densa no processo contínuo tem, entre outros fatores, papel decisivo na eficiência de separação.

Após investigação da frequência específica de pulsação para cada intervalo analisado no *Alljig*®, foram obtidos nos testes com as faixas granulométricas de 16 mm x 6,3 mm e 6,3 mm x 2 mm carvões com teores de cinzas próximos a 43% e relevantes recuperações mássicas nas frequências de 88 min^{-1} e 64 min^{-1}, respectivamente, ainda que os resultados provenham de ensaios processados por batelada em laboratório. Referente ao parâmetro 'amplitude', aconselha-se, com base na comparação entre os resultados obtidos nos testes 7 e 8, que se adote, sempre que possível, amplitude menor, a fim de se dificultar o deslocamento

da fração mista mais densa para níveis superiores, comprometendo a qualidade da estratificação no processo.

O teor de enxofre total mensurado nos ensaios mais promissores (testes 9, 13 e 16) apresentou comportamento constante, superando um pouco os 2 pontos percentuais nos níveis 1 (primeiros), situando-se levemente abaixo de 2% nos níveis 2 (segundos) na segunda amostra. Esta oscilação do teor de enxofre nos níveis 1 e 2 manteve a média ponderada próxima a 2%. Os percentuais de enxofre total da terceira amostra (testes 20 e 21) superaram os da primeira, ultrapassando o teor máximo de 2,3% nos dois primeiros níveis (1 e 2), exceto no nível 1 do teste 20. Tal resultado indica que determinadas características do carvão ROM variam conforme a região de extração.

Quando se comparam os resultados teóricos obtidos no Brasil (caracterização do carvão) com aqueles observados e ensaiados na Alemanha (testes no *Alljig*®), constata-se que a fração 9,5 mm x 0,1 mm, a que melhor nível de liberação apresentou entre as demais estudadas, atinge recuperação mássica teórica de 37,3% (em relação ao total de 95,23% da amostra) e teor de cinzas de 43,5%. Por outro lado, nos ensaios em que se utilizou a fração 16 mm x 2 mm (união dos dois intervalos testados no *Alljig*®), correspondente a 79,54% da alimentação total de uma planta de beneficiamento, a recuperação e o teor atingiram 27,8% e 43,2%, nesta ordem. O intervalo 2 mm x 0,1 mm (equivalente a 18,66% da alimentação total), tratado em espiral, apresentou recuperação de 6,18% e teor de 43,66%. O produto final concentrado em espirais e *Alljig*® caracterizou-se pelos teores de cinzas de 43,4% e enxofre total de 2,04%, e ainda massa recuperada de 34% com base em 98,20% do total processado, conforme atesta a tabela 40.

Tabela 40 – Resultado final obtido nos intervalos testados no *Alljig*® e espirais.

Intervalo	**Teste nº**	**Massa acum. no teste** (%)	**Participação da faixa na alimentação** (%)	**Massa acumulada final** (%)	**Teor de cinzas** (%)	**Teor de enxofre** (%)
-16 mm + 6,3 mm	9	39,90	46,19	18,43	43,33	2,04
-6,3 mm + 2 mm	13	28,15	33,35	9,39	43,06	2,00
-2 mm + 0,1 mm	18	33,14	18,66	6,18	43,66	2,12
-0,1 mm	--	--	1,80	--	--	--
Total/Média	--	--	100,00	34,00	43,32	2,04

Na comparação dos resultados obtidos nos intervalos 9,5 mm x 0,1 mm e 16 mm x 0,1 mm verifica-se grande aproximação nos parâmetros ‘recuperação’ e ‘teor de cinzas’ encontrados, ratificando o acerto dos procedimentos adotados nesta investigação com o benefício de se processar o carvão em uma faixa granulométrica maior (-16 mm *versus* -9,5 mm). Acredita-se que a divisão da amostra remanescente em duas frações granulométricas com intervalos mais restritos e a investigação do comportamento da estratificação do carvão em leitos constituídos por 4 e 5 níveis, variando-se as frequências de pulsação nos ensaios, foram decisivos para a obtenção destes resultados.

Possivelmente produtos de melhor qualidade poderão ser obtidos a partir deste carvão em novos ensaios, utilizando-se parâmetros operacionais semelhantes e coerentes, com foco na qualidade da alimentação, constituída por intervalos granulométricos mais estreitos e características bem definidas (homogeneização adequada), em prol de uma significativa melhora nas condições de estratificação da fração mista, abrandando variações que possam ocorrer nas frações constituintes do carvão processado.

Cabe lembrar que os resultados (teor de cinzas e recuperação mássica) obtidos nos testes em laboratório poderão diferir dos alcançados em processamento contínuo, uma vez que a imperfeição operacional do *Alljig*® reflete somente a ineficiência operacional ocorrida na etapa de estratificação (movimento vertical), enquanto que no processo contínuo a imperfeição é determinada cumulativamente na estratificação do leito e ao final do jigue, estágio em que as frações leves e densas são separadas e deixam a cuba do aparelho.

Os resultados da pesquisa utilizada neste estudo para a identificação dos principais parâmetros que afetam o nível de segregação de frações densimétricas do carvão da camada Bonito (intervalo granulométrico da alimentação, frequência específica de pulsação, amplitude e espessura do leito) podem contribuir para a melhoria da estratificação no processo de jigagem, embasar projetos para adequação dos circuitos de beneficiamento remanescentes e novos, condicionados a realização de estudo técnico-econômico complementar pelas empresas interessadas, a fim de definir sua aplicabilidade.

Este estudo buscou adequar aspectos operacionais e limitantes do processo de jigagem às características peculiares do carvão da camada Bonito, seguindo o entendimento de que a máquina, com base na técnica, deve adaptar-se à Natureza.

REFERÊNCIAS

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Avaliação Tecnológica para Emprego do Carvão Mineral da Camada Bonito nas Usinas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda**, Formulário de Projeto, 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA; TRACTEBEL ENERGIA e FACULDADE SATC. **Avaliação Tecnológica para Emprego do Carvão Mineral da Camada Bonito nas Usinas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda**, Relatório 1 – Revisão Bibliográfica, 2010.

_____. Relatório 2 - Estudo das Jazidas da Camada Bonito Existentes na AMREC, 2010.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Ministério das Minas e Energia. **Informativo anual da Indústria Carbonífera**. Brasília, 1999.

GOMES, A.P.; FERREIRA, J.A.F.; ALBUQUERQUE, L.F.; SÜFFERT, T. **Carvão Fóssil.** Estudos Avançados, v. 12, n. 33. São Paulo, 1998.

GOULARTI Fº, A., MORAES, F.F. **A Companhia Siderúrgica Nacional na formação do complexo carbonífero catarinense.** In: Anais do VI Congresso Brasileiro de História Econômica e VII Conferência Internacional de História de Empresas. Conservatória (RJ): ABPHE, 2005.

KETELHODT, L. von. **Deshaling of Coal by Dual Energy X-Ray Transmission Sorting**, XVI International Coal Preparation Congress, Lexington, Kentucky, USA, 2010.

KLEINE, C. **Dry Destoning of ROM coal using XRT-Sorting [Report]** – Arnot Mine and Power Station, South Africa; RWTH Aachen University, Germany, 2010.

LAWRENCE, W.F., McCURDY, W.A. In **Coal Preparation**, 4th edition, Leonard, J.W. (Ed.). Cap. 3, New York, 1979.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Emissões de Gases de Efeito Estufa no Setor Energético: Emissões Fugitivas na Mineração e Beneficiamento do Carvão Mineral**. Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa: Relatórios de Referência, 2010.

MISHRA, B.K., MEHROTRA, S.P. **A jig model based on the discrete element method and its experimental validation**, International Journal of Mineral Processing: Elsevier, p. 177-189, 2001.

_____. **Modelling of particle stratification in jigs by the discrete element method**, Minerals Engineering, p. 511-522, 1998.

MITCHELL, D.R. (Ed.). **Coal Preparation**, 2nd edition, AIME, New York, 1950, p.785.

MUKHERJEE, A.K.; BHATTACHARJEE, D.; MISHRA, B.K. **Role of water velocity for efficient jigging of iron ore**, Mineral Engineering: Elsevier, p. 952-959, 2006.

MUKHERJEE, A.K. e MISHRA,B.K. **An integral assessment of the role of critical process parameters on jigging**, International Journal of Mineral Processing: Elsevier, p. 187-200, 2006.

REDIVO, R.V. **Caracterização Tecnológica do Carvão das Camadas Barro Branco e Bonito para Fins Energéticos na Região de Criciúma – SC**. Dissertação de Mestrado, Área de Concentração: Engenharia Mineral. USP, 2002.

SAMPAIO, C.H. e TAVARES, L.M.M. **Beneficiamento Gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade**. 1ª. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

SCHIFFERS, A.; JUNGMANN, A.; WOTRUBA, H.; STEINBERG, M. **Dry gravity separation in the fines range with the CDF Separator**, Aufbereitungs Techniks 49 Nr. 5, 2008.

SIECESC - SINDICATO DA INDÚSTRIA DE EXTRAÇÃO DE CARVÃO DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Dados Estatísticos - Ano 2010**. Disponível em http://www.satc.edu.br/siecesc/conteudo/estatisticas/estatisticas_2010.pdf. Acesso em: 06/04/2011.

SCHNEIDER, C.L. **Caracterização do Beneficiamento de Carvão por Jigagem no Brasil**. Dissertação de Mestrado, Área de Concentração: Metalurgia Extrativa. UFRGS, 1987.

SNIEC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE EXTRAÇÃO DE CARVÃO MINERAL. **Dados Estatísticos – 2005**.

SÜFFERT, T. **Carvão nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: CPRM, 1997.

WILLS, B.A. **Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. 7th edition. Oxford, UK: Elsevier. 2006.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 2ª ed, 2005. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm. Acesso em: 08/11/2010.

AKW – EQUIPMENT AND PROCESS DESIGN. Disponível em http://www.akwauv.com/xist4c/web/Dryseparator---AKA---FLOW--dry-gravity-separator-for-fines---_id_21318_.htm. Acesso em 11/05/2010.

BORBA, R.F. **Carvão Mineral**. Balanço Mineral Brasileiro 2001. Disponível em http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/carvao.pdf. Acesso em 25/01/2011.

BRITISH PETROLEUM. **Statistical Review of World Energy 2011**. Disponível em http://www.bp.com/sectiongenericarticle800.do?categoryId=9037183&contentId=7068609. Acesso em 20/07/2011.

COMMODAS ULTRASORT. Disponível em http://www.commodas-ultrasort.com/ore-sorting-equipment. Acesso em 13/08/2010.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Ministério das Minas e Energia. **Anuário Mineral Brasileiro de 2006** (ano-base 2005). Partes I e II. Disponível em http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/AMB2006/II_2006.pdf. Acesso em 18/01/2011.

STEINER. Disponível em http://www.steinert.de/home/products/x-ray-sorting-system-xssr/. Acesso em 22/09/2010.

TITECH – INNOVATION IN GLOBAL RECYCLING. Disponível em http://br.titech.com. Acesso em 14/05/2010.

APÊNDICE

Estudo de jigagem utilizando minério de ferro realizado por Bhattacharjee, Mishra e Mukherjee (2006)

Cálculo da "Eficiência de Separação"

Cálculo da "Eficiência de Separação"

A seguir é apresentado o cálculo da eficiência de separação passo a passo:

Primeiramente é calculado o rendimento do processo pela equação:

$$Y = \frac{(a-g)}{(c-g)} \times 100$$

onde Y é o rendimento do processo, a, c e g são os teores de alumina na alimentação, concentrado e ganga, respectivamente. Após, calcula-se o teor de alumina no concentrado pela relação:

$$A_c = Y \times \frac{c}{a}$$

sendo A_c o teor de alumina no concentrado. A seguir, calcula-se a recuperação da fração que não contém alumina (não-alumina, A_{nc}) dada pela equação:

$$A_{nc} = Y \times \frac{(100-c)}{(100-a)}$$

Por fim, a eficiência de separação (X) é avaliada pela diferença entre as concentrações de alumina e não-alumina:

$$X = A_{nc} - A_c$$

Estudos realizados com a 2ª amostra de carvão na RWTH

Estudos no intervalo 16 mm x 6,3 mm original

Teste 1 - Freqüência 80 pulsos por minuto

Tabela 41 - Teste 1 realizado na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 80 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm.

Produtos	Massa (%)	Massa acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	Teor de enxofre (%)
Nível 1*	27,60	27,60	44,26	44,26	2,30
Nível 2	16,06	43,66	54,56	48,05	1,96
Nível 3	17,44	61,10	60,47	51,59	2,03
Nível 4	27,99	89,09	73,33	58,42	19,20
Passante nos crivos	10,91	100,00	82,15	61,01	1,53
Massa ensaiada (kg)	18,00	Tela crivada de diâmetro 2 mm			

(*) Nível constituído pela adição dos dois primeiros, devido à reduzida altura do primeiro nível.

Teste 2 - Freqüência 96 pulsos por minuto

Tabela 42 - Teste 2 realizado na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 96 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm.

Produtos	Massa (%)	Massa acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)
Nível 1	13,10	13,10	39,66	39,66
Nível 2	14,07	27,17	49,12	44,56
Nível 3	17,23	44,40	51,92	47,41
Nível 4	15,70	60,10	61,92	51,20
Nível 5	27,28	87,38	71,40	57,51
Passante nos crivos	12,62	100,00	82,01	60,60
Massa ensaiada (kg)	19,00	Tela crivada de diâmetro 2 mm		

Teste 3 - Freqüência 88 pulsos por minuto – reprocessamento da fração mista

Tabela 43 - Teste 3 realizado para simulação do reprocessamento da fração mista, na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 88 pulsos por minuto e amplitude de 6 cm.

Produtos	Massa (%)	Massa acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)
Nível 1	43,94	43,94	45,19	45,19
Nível 2	47,75	91,69	57,75	51,73
Passante nos crivos	8,31	100,00	76,33	53,77
Massa ensaiada (kg)	7,90	Tela crivada de diâmetro 2 mm		

Estudo no intervalo 16 mm x 2 mm constituído a partir da fração 50 mm x 16 mm

Teste 4 - Freqüência 104 pulsos por minuto

A amostra utilizada neste ensaio, oriunda da redução da faixa granulométrica original 50 mm x 16 mm, não apresentou resultado final satisfatório. Observa-se na tabela 45 que o teor de cinzas do primeiro nível já ultrapassa o teor almejado e a recuperação em massa mantém-se baixa. O teor de cinzas do nível 3 (51,59%) mantém-se próximo dos valores obtidos em testes anteriores no intervalo 16 mm x 6,3 mm, porém sua massa reduz-se para ≈14%, enquanto que no primeiro estrato este parâmetro atinge ≈17%, indicando provável elevação da fração mista. Acredita-se que o resultado medíocre obtido foi motivado pela freqüência adotada que desordenou o leito com reflexo na estratificação inadequada.

A tabela 44 informa os parâmetros aplicados neste ensaio.

Tabela 44 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 4.

Parâmetros		**Valores**
Freqüência	min^{-1}	104
Amplitude	medida no nível de água, cm	7,0
Altura total do leito	cm	12,5

Tabela 45 - Teste 4 realizado na faixa granulométrica 16 mm x 2 mm, freqüência de 104 pulsos por minuto e amplitude de 7 cm.

Produtos	**Massa (%)**	**Massa acum. (%)**	**Teor de cinzas (%)**	**Cinzas acum. (%)**
Nível 1	17,07	17,07	44,02	44,02
Nível 2	14,01	31,08	48,68	46,12
Nível 3	14,36	45,44	51,59	47,85
Nível 4	16,55	61,99	65,73	52,63
Nível 5	29,15	91,14	70,81	58,44
Passante nos crivos	8,86	100,00	79,39	60,30
Massa ensaiada (kg)	20,50	Tela crivada de diâmetro 2 mm		

Demais estudos no intervalo 16 mm x 6,3 mm constituído a partir da faixa 50 mm x 16 mm

Teste 5 - Freqüência 92 pulsos por minuto

A recuperação mássica de 18,88% obtida neste ensaio foi inferior às produzidas (≈27%) nas freqüências 80 e 96 min-¹, nível 1 e níveis 1+2, respectivamente, com teor levemente superior aos obtidos nos mesmos testes. A partir deste resultado, procurou-se investigar as possíveis causas de tal anomalia. Acredita-se que uma delas possa estar relacionada com maior concentração das partículas mistas com teores de cinzas próximos a 50% na fração -50 mm +16 mm da amostra. Este intervalo, após a cominuição, pode ter provocado uma maior liberação destas frações mistas com densidades próximas a do produto-alvo, disseminando-as nos níveis superiores do leito. Supostamente por esta razão, haveria acréscimo na massa e nos teores de cinzas (de materiais mistos) nos níveis mais elevados, observado na igualdade dos teores de cinzas dos segundos níveis deste ensaio e do obtido no teste anterior, cuja freqüência foi maior.

Os parâmetros aplicados encontram-se resumidos na tabela 46 e os produtos obtidos na tabela 47.

Tabela 46 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 5.

Parâmetros		Valores
Freqüência	min-¹	92
Amplitude	medida no nível de água, cm	5,0
Altura total do leito	cm	12,5

Tabela 47 - Teste 5 realizado na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 92 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm.

Produtos	Massa (%)	Massa acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)
Nível 1	18,88	18,88	44,83	44,83
Nível 2	13,33	32,21	51,02	47,39
Nível 3	15,66	47,87	53,78	49,48
Nível 4	14,60	62,47	65,04	53,12
Nível 5	31,39	93,86	70,98	59,09
Passante nos crivos	6,14	100,00	82,29	60,52
Massa ensaiada (kg)	20,00	Tela crivada de diâmetro 2 mm		

Teste 6 – Freqüência 96 pulsos por minuto - amostra remanescente do intervalo 16 mm x 6,3 mm original

Com o fim de analisar o efeito da altura do leito no desempenho da estratificação na jigagem em freqüência de 96 min^{-1}, como já registrado, reaproveitou-se a única alíquota remanescente na faixa -16 mm +6,3 mm original para esta finalidade, uma vez que o resultado anterior (teste 2), conduzido em 5 níveis, não foi animador. Esta alíquota, constituída por *blending* dos produtos de teste anteriormente invalidado sem a fração passante nos crivos do jigue, embora não mantivesse suas características originais, foi tomada como base de comparação para tal análise em um novo ensaio realizado com leito formado por 4 níveis.

A tabela 49 apresenta os resultados para avaliação desta investigação. Nesta pode-se observar que o teor de cinzas médio de 58,14% do carvão ensaiado foi menor que os valores anteriores (≈60%), devido ao descarte da fração passante nos crivos do leito, cujo teor oscilara em 82%. O nível 2 apresenta pela primeira vez teor de cinzas abaixo de 46% (45,64%), que juntamente ao carvão do nível 1 produziria um produto com teor médio de cinzas de 42,46%, inferior ao valor do teor-alvo. O teor de enxofre total obtido nos dois primeiros níveis atinge 2,41%, percentual levemente superior ao limite máximo de 2,3%.

Na Tabela 48 seguinte são apresentados os parâmetros aplicados no referido ensaio.

Tabela 48 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 6.

Parâmetros/unidades		**Valores**
Freqüência	min-¹	96
Amplitude	medida no nível de água, cm	5,0
Altura total do leito	cm	10,0

Tabela 49 - Teste 6 realizado com amostra remanescente, na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 96 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm.

Produtos	**Massa (%)**	**Massa acum. (%)**	**Teor de cinzas (%)**	**Cinzas acum. (%)**	**Teor de enxofre (%)**
Nível 1	15,56	15,56	38,98	38,98	2,17
Nível 2	17,05	32,61	45,64	42,46	2,64
Nível 3	16,62	49,23	52,50	45,85	2,24
Nível 4	37,08	86,31	65,64	54,35	13,52
Passante nos crivos	13,69	100,00	82,03	58,14	0,83
Massa ensaiada (kg)	15,00	Tela crivada de diâmetro 2 mm			

Testes 7 e 8 – Freqüência 96 pulsos por minuto – análises da altura do leito e amplitude com reutilização dos produtos do teste 5

Dando continuidade à investigação da influência produzida pela altura de carvão no leito do jigue, realizaram-se mais dois testes com apenas três níveis para análise, utilizando-se parte da amostra procedente do ensaio 5. No primeiro ensaio (teste 7) aplicou-se uma amplitude de 5 cm e no seguinte (teste 8) o valor de 2,5 cm para averiguação do impacto desta variável também no resultado final, cujos produtos são apresentados nas tabelas 50 e 51, respectivamente.

A recuperação mássica do teste 7 foi muito baixa, atingindo 27% (12,57% em relação à participação de 46,19% no intervalo e amostra ensaiada), porém o teor de cinzas do primeiro nível situou-se abaixo de 43% (41,95%). O nível 2 acomoda a fração mista e possivelmente por esta razão aparta-se da porção mais leve, otimizando a separação destas frações com

densidades aproximadas em detrimento da massa recuperada. Os parâmetros que motivaram este resultado encontram-se na tabela 27 seguinte:

Tabela 50 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 7.

Parâmetros		**Valores**
Freqüência	min-¹	96
Amplitude	medida no nível de água, cm	5,0
Altura total do leito	cm	7,5

Tabela 51 - Teste 7 realizado a partir dos produtos do teste 5, na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 96 pulsos por minuto, amplitude de 5 cm e 3 níveis.

Produtos	**Massa (%)**	**Massa acum. (%)**	**Teor de cinzas (%)**	**Cinzas acum. (%)**
Nível 1	27,21	27,21	41,95	41,95
Nível 2	20,31	47,52	55,48	47,73
Nível 3	44,49	92,01	67,11	57,10
Passante nos crivos	7,99	100,00	80,98	59,01
Massa ensaiada (kg)	13,80	Tela crivada de diâmetro 2 mm		

Reaproveitam-se os produtos obtidos no teste 7 para se estudar no teste seguinte (8° ensaio) o comportamento do leito quando se reduz a ‘amplitude’ para 2,5 cm, mantendo-se as demais variáveis. Seu resultado, conforme já mencionado, é mostrado na tabela 53.

Observa-se na referida tabela uma leve otimização do teor de cinzas com a modificação implementada, embora com maior redução na recuperação mássica, indicando que menor amplitude pode favorecer a segregação da fração mista com densidade próxima a do carvão. É possível que outro fator tenha impactado neste resultado: a remoção da fração passante nos crivos da base do jigue, que apresenta teores de cinzas elevados, o que pode ter provocado a redução do teor de matéria mineral no carvão ensaiado de 59% para 56%, também observado nos níveis 2 (decréscimo de 55,48% para 51,17%) e 3 (redução de 67,11% para 63,82%). A baixa recuperação mássica obtida no concentrado (1º nível), a exemplo do parâmetro do teste anterior, atingiu 11,40%, inviabilizando a continuidade do processamento em três níveis.

A tabela 52 registra os principais parâmetros relacionados neste ensaio.

Tabela 52 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 8.

Parâmetros		**Valores**
Freqüência	min^{-1}	96
Amplitude	medida no nível de água, cm	2,5
Altura total do leito	cm	7,5

Tabela 53 - Teste 8 realizado a partir do reaproveitamento dos mesmos produtos do teste 7, na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 96 pulsos por minuto, amplitude de 2,5 cm e 3 níveis.

Produtos	**Massa (%)**	**Massa acum. (%)**	**Teor de cinzas (%)**	**Cinzas acum. (%)**
Nível 1	24,68	24,68	41,16	41,16
Nível 2	22,84	47,52	51,17	45,97
Nível 3	46,39	93,91	63,82	54,79
Passante nos crivos	6,09	100,00	82,49	56,48
Massa ensaiada (kg)	12,80	Tela crivada de diâmetro 2 mm		

Teste 9 – Freqüência 88 pulsos por minuto – reutilização dos produtos do teste 5 conjuntamente à alíquota da mesma amostra

TABELA APRESENTADA NO CORPO DA TESE

Estudos no intervalo 6,3 mm x 2 mm

Teste 10 – Freqüência 80 pulsos por minuto

Tabela 54 - Teste 10 realizado na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, freqüência de 80 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm.

Produtos	Massa (%)	Massa acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	Teor de enxofre (%)
Nível 1	12,34	12,34	37,44	37,44	2,25
Nível 2	15,78	28,12	47,87	43,30	2,09
Nível 3	17,30	45,42	54,56	47,58	1,99
Nível 4	15,32	60,74	63,83	51,68	1,66
Nível 5	28,23	88,96	74,99	59,08	14,30
Passante nos crivos	11,04	100,00	76,08	60,95	2,41
Massa ensaiada (kg)	18,40	Tela crivada de diâmetro 1 mm			

Teste 11 - Freqüência 88 pulsos por minuto – amostra reconstituída a partir do reaproveitamento do intervalo original -50 mm +16 mm

A exemplo do procedimento adotado nos estudos da fração -16 mm +6,3 mm e em função não somente da inexistência de amostra neste intervalo como da necessidade de se estudar possíveis variações ocorridas nas características do carvão testado, utilizou-se no ensaio em questão amostra na faixa 6,3 mm x 2 mm, reconstituída a partir do intervalo original 50 mm x 16 mm, após descartada a fração passante nos crivos da base do jigue. Buscou-se avaliar na freqüência 88 pulsos por minuto o nível de estratificação do carvão. A massa de amostra foi distribuída em cinco níveis. Adotou-se a amplitude de 7,0 cm, a fim de se recuperar a mobilidade do primeiro nível que nos primeiros instantes apresentou-se inadequada. A tabela 56 apresenta o resultado do teste.

Constata-se na tabela que os valores ‘recuperação e teor de cinzas’ obtidos foram péssimos. As massas dos três primeiros níveis decrescem levemente de 16,86% (nível 1) para 14,72% (nível 3) e participam com 46,71% da massa total ensaiada, porém os teores de cinzas mantêm-se próximo a 50%, comprometendo o teor ponderado final até este nível (50,16%) que se distancia do valor-alvo. Mesmo que se analise apenas os dois primeiros níveis, como

até aqui considerado, o teor de cinzas permanece o mesmo. Tal fato motivou a redução da freqüência para os demais testes no intervalo 6,3 mm x 2 mm.

A tabela 55 a seguir apresenta os parâmetros aplicados no ensaio n° 11.

Tabela 55 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 11 para o intervalo 6,3 mm x 2 mm.

Parâmetros (unidades)		**Valores**
Freqüência	min^{-1}	88
Amplitude	medida no nível de água, cm	7,0
Altura total do leito	cm	12,5

Tabela 56 - Teste 11 realizado na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, a partir da utilização de amostra reconstituída do intervalo 50 mm x 16 mm, freqüência de 88 pulsos por minuto e amplitude de 7 cm.

Produtos	**Massa (%)**	**Massa acum. (%)**	**Teor de cinzas (%)**	**Cinzas acum. (%)**
Nível 1	16,86	16,86	49,59	49,59
Nível 2	15,13	31,99	50,05	49,81
Nível 3	14,72	46,71	50,92	50,16
Nível 4	14,46	61,17	56,28	51,61
Nível 5	30,08	91,25	70,68	57,89
Passante nos crivos	8,75	100,00	82,96	60,09
Massa ensaiada (kg)	19,60	Tela crivada de diâmetro 1 mm		

Teste 12 - Freqüência 72 pulsos por minuto – reutilização dos produtos do teste 11

Dando continuidade à investigação da freqüência mais adequada para teste no jigue fornecido pela *All Mineral*®, caracterizado por regime operacional contínuo (similar aos modelos industriais), estudou-se o comportamento dos produtos do teste 11, com o descarte da fração passante nos crivos do *Alljig*®, quando aplicada freqüência 72 pulsos por minuto (-10% da inicial) e amplitude 7 cm. A massa utilizada após o ensaio constituiu cinco níveis, conforme descrito na tabela 58.

O resultado alcançado neste ensaio apresentou progresso em relação ao do teste anterior, mas permaneceu ainda distante da meta no que tange ao teor de cinzas reduzido e

massa vultosa registrados. Obtém-se um produto com teor de 45% (acima da meta de 43%) e recuperação mássica de 28%. O resultado alcançado indica a aplicação nos ensaios seguintes de freqüências ainda menores.

A tabela 57 a seguir apresenta os parâmetros aplicados no referido ensaio.

Tabela 57 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 12 para o intervalo 6,3 mm x 2 mm.

Parâmetros (unidades)		**Valores**
Freqüência	min^{-1}	72
Amplitude	medida no nível de água, cm	7,0
Altura total do leito	cm	12,5

Tabela 58 - Teste 12 realizado a partir do reaproveitamento da amostra do ensaio 11, na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, freqüência de 72 pulsos por minuto e amplitude de 7 cm.

Produtos	**Massa (%)**	**Massa acum. (%)**	**Teor de cinzas (%)**	**Cinzas acum. (%)**
Nível 1	11,58	11,58	41,47	41,47
Nível 2	16,09	27,67	47,54	45,00
Nível 3	16,84	44,51	50,65	47,14
Nível 4	17,41	61,92	58,99	50,47
Nível 5	32,53	94,45	67,50	56,33
Passante nos crivos	5,55	100,00	83,90	57,86
Massa ensaiada (kg)	17,40	Tela crivada de diâmetro 1 mm		

Teste 13 - Freqüência 64 pulsos por minuto – reutilização dos produtos do teste 12

TABELA APRESENTADA NO CORPO DA TESE

Teste 14 - Freqüência 64 pulsos por minuto – reprocessamento da fração mista

A massa disponível da fração mista do teste 13 para o ensaio 14 sofreu uma redução significativa na altura total do leito, quando apenas dois níveis foram constituídos. Além deste parâmetro, alterou-se a 'amplitude' para ajustar a mobilidade do leito, conforme resultado mostrado na tabela 60 (Apêndice).

Considerando que o maior percentual da amostra ensaiada seja constituído pela fração mista e hajam apenas dois níveis para acomodar suas partículas, o resultado sugere certa ineficiência na separação e na obtenção de um produto com teor de cinzas próximo a 43%, uma vez que o subproduto atinge teor de cinzas de 48,3%.

A tabela 59 discrimina os parâmetros aplicados no estudo.

Tabela 59 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 14 para o intervalo 6,3 mm x 2 mm.

Parâmetros (unidades)		**Valores**
Freqüência	min^{-1}	64
Amplitude	medida no nível de água, cm	4,5
Altura total do leito	cm	5,0

Tabela 60 - Teste 14 realizado para simulação do reprocessamento da fração mista do teste 13, na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, freqüência de 64 pulsos por minuto e amplitude de 4,5 cm.

Produtos	**Massa (%)**	**Massa acum. (%)**	**Teor de cinzas (%)**	**Cinzas acum. (%)**
Nível 1	28,12	28,12	48,30	48,30
Nível 2	70,66	98,78	56,20	53,95
Passante nos crivos	1,22	100,00	77,42	54,23
Massa ensaiada (kg)	5,70	Tela crivada de diâmetro 1 mm		

Teste 15 - Freqüência 56 pulsos por minuto – reprocessamento da fração mista

Neste estudo a mesma amostra é submetida à freqüência de 56 pulsos por minuto para análise de sua estratificação, visando definir a freqüência mais adequada ao seu reprocessamento, cujo resultado é apresentado na tabela 62 (Apêndice).

O teor de cinzas no nível 1 deste ensaio aproxima-se muito do respectivo valor do teste 14, entretanto sua recuperação diminui pouco mais que 5 pontos percentuais, na mesma ordem. Conseqüentemente a massa do nível 2 é aumentada, porém seu teor de cinzas reduz-se de 56,20% para 54,59%, nesta seqüência.

A exemplo da simulação do reprocessamento estudado na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, supõe-se que o teor de cinzas próximo de 48%, possa ser reduzido, se a altura total do leito for acrescida de um ou dois níveis, onde se posicionariam as frações mistas mais densas, aumentando a eficiência de separação do processo.

A tabela 61 enumera os parâmetros aplicados no teste 15.

Tabela 61 - Resumo dos parâmetros aplicados no teste 15 para o intervalo 6,3 mm x 2 mm.

Parâmetros		**Valores**
Freqüência	min^{-1}	56
Amplitude	medida no nível de água, cm	5,0
	medida no nível de carvão, cm	3,5
Altura total do leito	cm	5,0

Tabela 62 - Teste 15 realizado para simulação do reprocessamento da fração mista reaproveitada do teste 14, na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, freqüência de 56 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm.

Produtos	**Massa (%)**	**Massa acum. (%)**	**Teor de cinzas (%)**	**Cinzas acum. (%)**
Nível 1	22,76	22,76	48,44	48,44
Nível 2	76,44	99,20	54,59	53,18
Passante nos crivos	0,80	100,00	78,99	53,39
Massa ensaiada (kg)	5,40	Tela crivada de diâmetro 1 mm		

Teste 16 - Freqüência 64 pulsos por minuto – leito do jigue formado por 5 níveis

Tabela 63 - Teste 16 realizado a partir da reutilização de amostra do ensaio 10, na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, freqüência de 64 pulsos por minuto e amplitude de 6 cm.

Produtos	Massa (%)	Massa acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	Teor de enxofre (%)
Nível 1	10,70	10,70	30,84	30,84	2,43
Nível 2	16,02	26,72	42,76	37,99	2,00
Nível 3	15,81	42,53	50,43	42,61	2,05
Nível 4	18,75	61,28	62,09	48,57	1,69
Nível 5	30,82	92,10	72,01	56,42	10,68
Passante nos crivos	7,90	100,00	82,52	58,48	1,93
Massa ensaiada (kg)	16,80	Tela crivada de diâmetro 1 mm			

Estudos no intervalo 2 mm x 0,1 mm

Tabela 64 - Teste 17 realizado na faixa granulométrica 2 mm x 0,1 mm e mesa concentradora.

Produtos	Massa (%)	Massa acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)
Fração 1	1,51	1,51	55,24	55,24
Fração 2	7,69	9,20	57,32	56,98
Fração 3	16,11	25,31	57,30	57,18
Fração 4	20,75	46,06	42,55	50,59
Fração 5	15,34	61,40	52,70	51,12
Fração 6	38,60	100,00	76,46	60,90
Massa ensaiada (g)	300,00			

Tabela 65 - Teste 18 realizado na concentração 12% de sólidos em espirais.

Produtos	Massa (%)	Massa acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	Teor de enxofre (%)
Fração F	11,36	11,36	56,57	56,57	1,79
Fração E	13,88	25,24	37,95	46,33	2,13
Fração D	19,25	44,49	47,77	46,95	2,11
Fração C	10,39	54,88	56,60	48,78	1,97
Fração A+B	45,12	100,00	75,79	60,97	5,34

Tabela 66 - Teste 19 realizado na concentração 24% de sólidos em espirais.

Produtos	Massa (%)	Massa acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	Teor de enxofre (%)
Fração F	20,03	20,03	59,30	59,30	1,50
Fração E	16,74	36,77	39,67	50,36	2,06
Fração D	19,36	56,13	48,60	49,75	1,93
Fração C	9,91	66,04	55,24	50,58	1,91
Fração A+B	33,96	100,00	75,10	58,90	4,21

Estudos realizados com a 3ª amostra de carvão na RWTH

Estudo no intervalo 12,5 mm x 6,3 mm

Tabela 67 - Teste 20 realizado com amostra utilizada em teste no jigue da *All Mineral*®, na faixa granulométrica 12,5 mm x 6,3 mm, freqüência de 88 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm.

Produtos	Massa (%)	Massa acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	Teor de enxofre (%)
Nível 1	11,15	11,15	35,56	35,56	2,23
Nível 2	11,64	22,79	41,49	38,59	2,56
Nível 3	13,91	36,70	53,21	44,13	2,40
Nível 4	16,41	53,11	66,93	51,17	2,03
Nível 5	37,79	90,90	73,60	60,50	26,14
Passante nos crivos	9,10	100,00	73,27	61,66	2,21
Massa ensaiada (kg)	18,40	Tela crivada de diâmetro 2 mm			

Estudos no intervalo 16 mm x 6,3 mm

Tabela 68 - Teste 21 realizado com amostra anteriormente testada no jigue da *All Mineral*®, na faixa granulométrica original 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 88 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm.

Produtos	Massa (%)	Massa acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	Teor de enxofre (%)
Nível 1	12,27	12,27	35,78	35,78	2,48
Nível 2	12,22	24,49	41,14	38,45	2,63
Nível 3	14,25	38,74	51,56	43,28	2,01
Nível 4	16,40	55,14	65,33	49,84	2,06
Nível 5	37,56	92,70	73,20	59,30	26,07
Passante nos crivos	7,30	100,00	72,31	60,25	2,31
Massa ensaiada (kg)	17,60	Tela crivada de diâmetro 2 mm			

Tabela 69 - Teste 22 (1º teste) realizado no jigue da *All Mineral*®, na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 90 pulsos por minuto e amplitude de 1,5 a 2,0 cm.

Produtos	Massa (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	% em 54,89%
Leve	18,02	40,71	40,71	9,89
Denso	81,98	67,30	62,51	45,00

Tabela 70 - Teste 23 (2º teste) realizado no jigue da *All Mineral*®, na faixa granulométrica 16 mm x 6,3 mm, freqüência de 90 pulsos por minuto e amplitude de 1,5 a 2,0 cm.

Produtos	Massa (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	% em 54,89%
Leve	78,31	60,43	60,43	42,99
Denso	21,69	73,50	63,27	11,90

Estudos no intervalo 6,3 mm x 2 mm

Tabela 71 - Teste 24 (1º teste) realizado no jigue da *All Mineral*®, na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, freqüência de 90 pulsos por minuto e amplitude de 1,5 a 2,0 cm.

Produtos	Massa (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	% em 28,36%
Leve	67,39	50,27	50,27	19,11
Denso	32,61	80,07	59,99	9,25

Tabela 72 - Teste 25 (2º teste) realizado no jigue da *All Mineral*®, na faixa granulométrica 6,3 mm x 2 mm, freqüência de 90 pulsações por minuto e amplitude de 1,5 a 2,0 cm.

Produtos	Massa (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	% em 28,36%
Leve	51,69	42,69	42,69	14,66
Denso	48,31	72,50	57,09	13,70

Estudo no intervalo 50 mm x 16 mm

Tabela 73 - Testes realizados no separador por sensor da *Titech* e na faixa granulométrica 50 mm x 16 mm.

PRODUTO	Leve		Pesado		Total	
EXPERIMENTO	Massa (%)	Teor de cinzas (%)	Massa (%)	Teor de cinzas (%)	Peso (kg)	Teor de cinzas (%)
Teste 1	47,37	52,67	52,63	66,13	32,3	59,75
Teste 2	65,87	59,60	34,13	68,08	33,4	62,49
Teste 3	57,63	54,32	42,37	66,00	32,1	59,27
Teste 4 A	20,40	47,86	--	--	--	--
Teste 4 B*	21,68	58,74	--	--	--	--
Teste 4	42,08	53,46	57,92	66,85	54,9	61,22

(*) Refere-se à fração denominada “mista”, procedente do reprocessamento do produto ‘leve’ do teste 4.

Estudo no intervalo 16 mm x 2 mm a partir da fração 50 mm x 16 mm

Tabela 74 - Teste 26 realizado com amostra do produto 'leve' procedente do separador baseado em sensor, na faixa granulométrica 16 mm x 2 mm, freqüência de 88 pulsos por minuto e amplitude de 5 cm.

Produtos	Massa (%)	Massa acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)
Nível 1	17,50	17,50	38,23	38,23
Nível 2	32,90	50,40	50,34	46,14
Nível 3	43,46	93,86	61,39	53,20
Passante nos crivos	6,14	100,00	69,26	54,19
Massa ensaiada (kg)	9,10	Tela crivada de diâmetro 2 mm		

Estudo no intervalo 2 mm x 0,1 mm

Tabela 75 - Teste 27 realizado no AKA-Flow com amostra classificada no intervalo 2 mm x 0,1 mm.

Produtos	Massa (%)	Massa acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Cinzas acum. (%)
Subproduto 1	10,74	10,74	67,18	67,18
Subproduto 2	10,90	21,64	65,97	66,57
Subproduto 3	11,32	32,96	64,56	65,88
Subproduto 4	9,57	42,53	63,67	65,39
Subproduto 5	9,70	52,23	63,18	64,98
Subproduto 6	8,20	60,43	62,11	64,59
Concentrado	39,57	100,00	55,58	61,02

Estudos realizados com a 1ª amostra de carvão no LAPROM

Estudo no intervalo 50 mm x 0,1 mm

Tabela 76 - Teste de afunda-flutua e teor de cinzas de amostra no intervalo 50 mm x 2 mm.

INTERVALO -50 mm + 2 mm												
Faixa densimétrica	Densidade (g/cm³)	MASSA							TEOR DE CINZAS		
		100,00% da faixa granulométrica				88,29% da amostra total					
		FLUTUADO			AFUNDADO	FLUTUADO		AFUNDADO	FLUTUADO		AFUNDADO
		Massa (g)	Massa (%)	Massa acum. (%)	Massa acum. (%)	Massa (%)	Massa acum. (%)	Massa acum. (%)	Cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	Cinzas acum. (%)
-1,6	1,6	291,80	1,39	1,39	100,00	1,23	1,23	88,29	31,42	31,42	62,48
+1,6 -1,7	1,7	1.762,20	8,41	9,80	98,61	7,43	8,66	87,06	37,15	36,34	62,92
+1,7 -1,8	1,8	2.867,50	13,69	23,49	90,20	12,08	20,74	79,63	45,60	41,73	65,32
+1,8 -1,9	1,9	2.852,10	13,61	37,10	76,51	12,02	32,76	67,55	51,38	45,27	68,85
+1,9 -2,0	2,0	1.846,30	8,81	45,91	62,90	7,78	40,54	55,53	57,81	47,68	72,63
+2,0 -2,2	2,2	3.562,20	17,00	62,91	54,09	15,01	55,55	47,75	67,06	52,91	75,04
+2,2 -2,4	2,4	3.392,00	16,20	79,11	37,09	14,29	69,84	32,74	78,47	58,14	78,71
+2,4	--	4.376,70	20,89	100,00	20,89	18,45	88,29	18,45	78,89	62,48	78,89
TOTAL		20.950,80	100,00	--	--	88,29	--	--	--	--	--

Tabela 77 - Teste de afunda-flutua e teor de cinzas de amostra no intervalo 2 mm x 0,1 mm (Faixa 50 mm x 0,1 mm).

INTERVALO -2 mm + 0,1 mm											
Faixa densimétrica	Densidade (g/cm³)	**M A S S A**							**TEOR DE CINZAS**		
		100,00% da faixa granulométrica				9,94% da amostra total					
		FLUTUADO			AFUNDADO	FLUTUADO		AFUNDADO	FLUTUADO		AFUNDADO
		Massa (g)	Massa (%)	Massa acum. (%)	Massa acum. (%)	Massa (%)	Massa acum. (%)	Massa acum. (%)	Cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	Cinzas acum. (%)
-1,6	1,6	154,60	10,68	10,68	100,00	1,06	1,06	9,94	28,58	28,58	62,25
+1,6 -1,7	1,7	127,50	8,81	19,49	89,32	0,88	1,94	8,88	36,54	32,18	66,27
+1,7 -1,8	1,8	128,40	8,87	28,36	80,51	0,88	2,82	8,00	44,19	35,93	69,53
+1,8 -1,9	1,9	124,60	8,61	36,97	71,64	0,86	3,68	7,12	52,40	39,77	72,66
+1,9 -2,0	2,0	107,70	7,44	44,41	63,03	0,74	4,42	6,26	58,72	42,94	75,43
+2,0 -2,2	2,2	190,20	13,14	57,55	55,59	1,30	5,72	5,52	67,27	48,50	77,67
+2,2 -2,4	2,4	178,00	12,30	69,85	42,45	1,22	6,94	4,22	75,57	53,27	80,88
+2,4	--	436,40	30,15	100,00	30,15	3,00	9,94	3,00	83,05	62,25	83,05
TOTAL		1.447,40	100,00	--	--	9,94	--	--	--	--	--

Tabela 78 - Resultado final na faixa granulométrica 50 mm x 0,1 mm.

TOTAL (*)							
Faixa densimétrica	Densidade (g/cm³)	FAIXA -50 mm + 0,1 mm			**TEOR DE CINZAS**		
		MASSA 98,23%					
		FLUTUADO		AFUNDADO	FLUTUADO		AFUNDADO
		Massa (%)	Massa acum. (%)	Massa acum. (%)	Cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	Cinzas acum. (%)
-1,6	1,6	2,29	2,29	98,23	30,10	30,10	62,45
+1,6 -1,7	1,7	8,30	10,59	95,94	37,09	35,58	63,23
+1,7 -1,8	1,8	12,97	23,56	87,64	45,50	41,04	65,70
+1,8 -1,9	1,9	12,87	36,43	74,67	51,45	44,72	69,21
+1,9 -2,0	2,0	8,52	44,95	61,80	57,89	47,21	72,91
+2,0 -2,2	2,2	16,32	61,27	53,28	67,07	52,50	75,32
+2,2 -2,4	2,4	15,52	76,79	36,96	78,24	57,70	78,96
+2,4	--	21,44	98,23	21,44	79,47	62,45	79,47
TOTAL		98,23	--	--	--	--	--

(*) A fração -0,1 mm contribuiu com 1,77% em massa e 63,62% no teor de cinzas.

Estudo no intervalo 9,5 mm x 0,1 mm

Tabela 79 - Teste de afunda-flutua e teor de cinzas de amostra no intervalo 9,5 mm x 2 mm.

INTERVALO -9,5 mm + 2 mm												
Faixa densimétrica	Densidade (g/cm³)	MASSA							TEOR DE CINZAS		
		100,00% da faixa granulométrica				55,01% da amostra total					
		FLUTUADO			AFUNDADO	FLUTUADO		AFUNDADO	FLUTUADO		AFUNDADO
		Massa (g)	Massa (%)	Massa acum. (%)	Massa acum. (%)	Massa (%)	Massa acum. (%)	Massa acum. (%)	Cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	Cinzas acum. (%)
-1,6	1,6	340,50	3,07	3,07	100,00	1,69	1,69	55,01	29,61	29,61	62,91
+1,6 -1,7	1,7	1.023,10	9,22	12,29	96,93	5,07	6,76	53,32	37,61	35,61	63,97
+1,7 -1,8	1,8	1.531,50	13,80	26,09	87,71	7,59	14,35	48,25	45,96	41,09	66,74
+1,8 -1,9	1,9	1.459,80	13,15	39,24	73,91	7,24	21,59	40,66	54,02	45,42	70,62
+1,9 -2,0	2,0	966,80	8,71	47,95	60,76	4,79	26,38	33,42	59,92	48,06	74,21
+2,0 -2,2	2,2	1.493,60	13,46	61,41	52,05	7,40	33,78	28,63	68,47	52,53	76,60
+2,2 -2,4	2,4	1.437,70	12,96	74,37	38,59	7,13	40,91	21,23	79,53	57,23	79,44
+2,4	--	2.844,20	25,63	100,00	25,63	14,10	55,01	14,10	79,39	62,91	79,39
TOTAL		11.097,20	100,00	--	--	55,01	--	--	--	--	--

Tabela 80 - Teste de afunda-flutua e teor de cinzas de amostra no intervalo 2 mm x 0,1 mm (Faixa 9,5 mm x 0,1 mm).

INTERVALO -2 mm + 0,1 mm											
Faixa densimétrica	Densidade (g/cm³)	**M A S S A**							**TEOR DE CINZAS**		
		100,00% da faixa granulométrica				40,22% da amostra total					
		FLUTUADO			AFUNDADO	FLUTUADO		AFUNDADO	FLUTUADO		AFUNDADO
		Massa (g)	Massa (%)	Massa acum. (%)	Massa acum. (%)	Massa (%)	Massa acum. (%)	Massa acum. (%)	Cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	Cinzas acum. (%)
-1,6	1,6	218,60	7,73	7,73	100,00	3,11	3,11	40,22	22,10	22,10	61,53
+1,6 -1,7	1,7	269,50	9,53	17,26	92,27	3,84	6,95	37,11	35,72	29,62	64,84
+1,7 -1,8	1,8	307,20	10,87	28,13	82,74	4,37	11,32	33,27	46,46	36,12	68,20
+1,8 -1,9	1,9	313,60	11,09	39,22	71,87	4,46	15,78	28,90	52,91	40,87	71,48
+1,9 -2,0	2,0	232,00	8,21	47,43	60,78	3,30	19,08	24,44	59,44	44,08	74,88
+2,0 -2,2	2,2	412,30	14,59	62,02	52,57	5,87	24,95	21,14	68,24	49,76	77,29
+2,2 -2,4	2,4	409,90	14,50	76,52	37,98	5,83	30,78	15,27	80,24	55,54	80,76
+2,4	--	663,60	23,48	100,00	23,48	9,44	40,22	9,44	81,08	61,53	81,08
TOTAL		2.826,70	100,00	--	--	40,22	--	--	--	--	--

Tabela 81 - Resultado final na faixa granulométrica 9,5 mm x 0,1 mm.

TOTAL (*)							
Faixa densimétrica	Densidade (g/cm³)	FAIXA -9,5 mm + 0,1 mm			**TEOR DE CINZAS**		
		MASSA 95,23%					
		FLUTUADO		AFUNDADO	FLUTUADO		AFUNDADO
		Massa (%)	Massa acum. (%)	Massa acum. (%)	Cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	Cinzas acum. (%)
-1,6	1,6	4,80	4,80	95,23	24,74	24,74	62,33
+1,6 -1,7	1,7	8,91	13,71	90,43	36,80	32,57	64,33
+1,7 -1,8	1,8	11,96	25,67	81,52	46,14	38,90	67,33
+1,8 -1,9	1,9	11,70	37,37	69,56	53,60	43,50	70,98
+1,9 -2,0	2,0	8,09	45,46	57,86	59,72	46,39	74,49
+2,0 -2,2	2,2	13,27	58,73	49,77	68,37	51,36	76,89
+2,2 -2,4	2,4	12,96	71,69	36,50	79,85	56,51	79,99
+2,4	--	23,54	95,23	23,54	80,07	62,33	80,07
TOTAL		95,23	--	--	--	--	--

(*) A fração -0,1 mm contribuiu com 4,77% em massa e 61,73% no teor de cinzas.

Estudo no intervalo 2,0 mm x 0,1 mm

Tabela 82 - Resultado final do teste de afunda-flutua e teor de cinzas de amostra no intervalo 2,0 mm x 0,1 mm.

INTERVALO -2,0 mm + 0,1 mm (*)											
Faixa densimétrica	Densidade (g/cm³)	**M A S S A**							**TEOR DE CINZAS**		
		100,00% da faixa granulométrica				90,83% da amostra total					
		FLUTUADO			AFUNDADO	FLUTUADO		AFUNDADO	FLUTUADO		AFUNDADO
		Massa (g)	Massa (%)	Massa acum. (%)	Massa acum. (%)	Massa (%)	Massa acum. (%)	Massa acum. (%)	Cinzas (%)	Cinzas acum. (%)	Cinzas acum. (%)
-1,6	1,6	229,00	6,04	6,04	100,00	5,49	5,49	90,83	24,31	24,31	64,02
+1,6 -1,7	1,7	314,60	8,30	14,34	93,96	7,54	13,03	85,34	37,59	32,00	66,57
+1,7 -1,8	1,8	342,00	9,03	23,37	85,66	8,20	21,23	77,80	46,41	37,56	69,38
+1,8 -1,9	1,9	342,40	9,04	32,41	76,63	8,21	29,44	69,60	53,74	42,07	72,09
+1,9 -2,0	2,0	252,80	6,67	39,08	67,59	6,06	35,50	61,39	58,51	44,88	74,54
+2,0 -2,2	2,2	487,40	12,86	51,94	60,92	11,68	47,18	55,33	67,90	50,58	76,30
+2,2 -2,4	2,4	561,40	14,81	66,75	48,06	13,45	60,63	43,65	78,83	56,85	78,54
+2,4	--	1.260,10	33,25	100,00	33,25	30,20	90,83	30,20	78,42	64,02	78,42
TOTAL		3.789,70	100,00	--	--	90,83	--	--	--	--	--

(*) A fração -0,1 mm contribuiu com 9,17% em massa e 62,66% no teor de cinzas.