

A INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE JIGAGEM NO DESEMPENHO DO BENEFICIAMENTO DE CARVÃO DA CAMADA BONITO – SANTA CATARINA, BRASIL.

Carlos H. Sampaio¹ & Norton F. Feil²

¹ Doutor e Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais/Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Laboratório de Processamento Mineral/Centro de Tecnologia. Av. Bento Gonçalves, 9500. Bairro Agronomia. Porto Alegre, RS. CEP 91501-970
Tel. 51 3308.7067, fax 51 3308.7116. e-mail: sampaio@ufrgs.br

² Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais/Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Laboratório de Processamento Mineral/Centro de Tecnologia. Av. Bento Gonçalves, 9500. Bairro Agronomia. Porto Alegre, RS. CEP 91501-970
Tel. 51 3308.7070, fax 51 3308.7116. e-mail: norton.feil@ufrgs.br

RESUMO

O carvão da camada Barro Branco, a mais utilizada e estudada, que se localiza na região sul do estado de Santa Catarina, está em processo de exaustão. 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. Poucas empresas carboníferas locais estudam outros processos para o beneficiamento deste carvão, porém, sua maioria que ainda mantém a jigagem como principal processo de tratamento não consegue concentrar o carvão exigido pelo mercado consumidor. Este produto deve ter teor de cinzas ≤ 43 % (base seca) a partir de ROM caracterizado pelo teor de cinzas entre 59 e 63 %.

Este trabalho apresenta estudo que investiga a influência da frequência de jigagem na separação das frações constituintes do carvão, buscando otimizar as operações de tratamento destas empresas. Os benefícios diretos deste estudo proporcionarão maior conhecimento tecnológico do carvão e melhor rendimento operacional nas respectivas plantas de beneficiamento. Outro relevante aspecto é a manutenção da atividade econômica da região e o abastecimento do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda que utiliza o carvão beneficiado como combustível.

Ao final, constata-se nos dois intervalos estudados que o processamento na frequência específica de jigagem deste carvão permite concentrar um produto adequado ao mercado com relevante recuperação mássica, ainda que os ensaios tenham sido realizados em laboratório.

PALAVRAS-CHAVE: Frequência de jigagem, beneficiamento de carvão, beneficiamento gravimétrico

1. INTRODUÇÃO

Entre os recursos energéticos não renováveis no mundo, o carvão mineral ocupa a primeira colocação em abundância quando comparado ao petróleo e o 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.

As reservas de carvão mineral no Brasil ocorrem basicamente em três estados: Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, como mostrado na Fig. 1.



Figura 1 - Localização das maiores jazidas de carvão mineral no sul do Brasil (Süffert, 1997).

Existem basicamente três camadas de carvões na região sul do estado de Santa Catarina, denominadas Irapuá, Barro Branco e Bonito. Os tipos de carvões existentes nas reservas carboníferas desta região possuem propriedades físico-químicas bem distintas (teor de umidade, teor de cinzas, teor de enxofre, poder calorífico, matéria volátil, entre outras), as quais estão relacionadas à localização geográfica. Até o momento, a maior parte do carvão extraído provém da camada Barro Branco, o qual tem suas características tecnológicas bem conhecidas, apesar de a camada Bonito apresentar em 1999 reservas 50% maiores que a camada anterior (SNIEC, 2005).

A quase totalidade da produção de carvão beneficiado é destinada à utilização na geração termelétrica no Complexo Jorge Lacerda, no município de Capivari de Baixo, sul do Estado de Santa Catarina.

O carvão da camada Barro Branco devido à grande extração desde então apresenta reduzidas reservas, obrigando 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.

As principais empresas carboníferas da região sul deste estado, através de testes em menor escala, buscam identificar as potencialidades tecnológicas do carvão da camada Bonito, a fim de pesquisar rotas alternativas de beneficiamento para sua aplicação no curto prazo como único combustível, e desta forma, atender as especificações técnicas exigidas pelo mercado consumidor. A Carbonífera Catarinense produz em seu processo de jigagem na Mina Bonito I, em média, um carvão com as seguintes características: intervalo granulométrico de processamento de 25,4 mm x 1,6 mm; teor de cinzas (base seca) de 48,5 % e recuperação mássica de 32,8 %, em relação ao total processado na planta de beneficiamento. Atualmente esta empresa abastece o mercado consumidor com carvão beneficiado a partir da blendagem das camadas Barro Branco e Bonito.

Este estudo foi dividido em duas partes: a caracterização do carvão e testes para análise do efeito da frequência de jigagem no desempenho de separação das frações mistas.

A caracterização foi conduzida no Brasil e os testes utilizando frequências de jigagem na Alemanha. O equipamento usado nos testes, denominado *Alljig*, é um jig tipo Baum com pulsação lateral e foi fornecido por empresa alemã (*All Mineral Aufbereitungstechnik GmbH & Co.*). O *Alljig* realiza testes por batelada e permite o controle da frequência de pulsação do leito de minério, bem como sua amplitude. Sua cuba operacional mede 400 mm x 400 mm x 425 mm (altura) e é constituída por 11 elementos (como gavetas) construídos em acrílico. Eles são similares a uma gaveta sem fundo, compreendendo 5 elementos medindo 400 mm x 400 mm x 50 mm e 6 elementos nas dimensões 400 mm x 400 mm x 25 mm que sobrepõem a tela crivada, conforme figura 2.

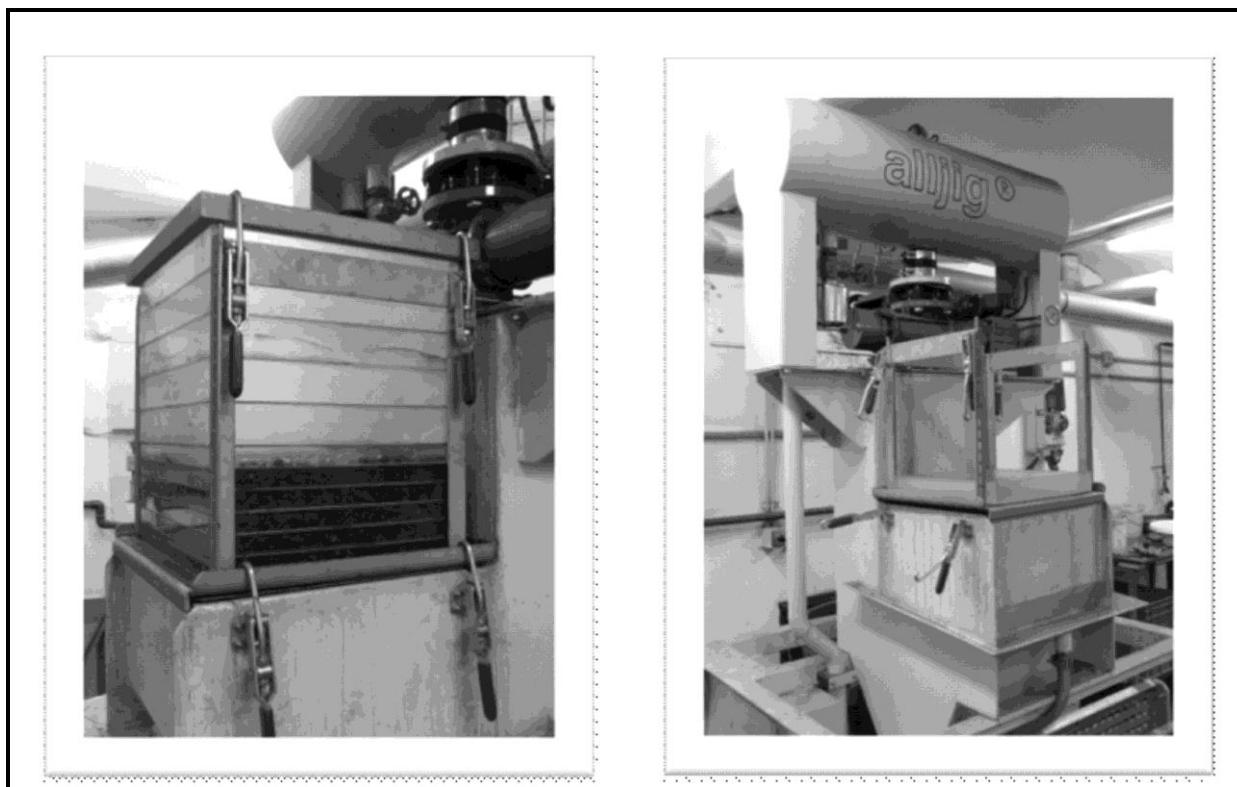


Figura 2 – Na esquerda são mostrados os 11 elementos que compõem a cuba operacional. Na direita vista da cuba sem os elementos.

Este trabalho visa avaliar a influência da frequência de jigagem na concentração gravimétrica do carvão da camada Bonito, a partir de testes realizados com amostras de carvão ROM, cujo teor médio de cinzas oscila entre 59 e 63%, a fim de produzir nas plantas de beneficiamento locais um carvão com teor de cinzas $\leq 43\%$ (base seca), para atender demanda do Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda.

2. MATERIAIS E METODOLOGIA

O presente estudo realizou a caracterização tecnológica do carvão e testes em laboratório para análise da influência da frequência de jigagem na separação de suas frações constituintes. As amostras do carvão estudado neste trabalho foram provenientes da Mina Bonito I e cedidas gentilmente pela Carbonífera Catarinense.

2.1. Caracterização do carvão

Na caracterização do carvão, buscou-se inicialmente conhecer o grau de liberação de seus constituintes e na sequência seu fracionamento densimétrico em testes de afunda-flutua para análise da qualidade e quantidade destas frações. Os ensaios foram realizados no laboratório de processamento mineral (LAPROM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

2.1.1. Investigação do grau de liberação

Para análise do grau de liberação separou-se parte da amostra para a cominuição em 3 frações granulométricas com 100% das massas passante nas peneiras de 50 mm; 9,5 mm e 2 mm. Cada fração, por sua vez, foi classificada nas telas 2,0 mm e 0,1 mm por se tratarem de intervalos desaconselháveis para tratamento em jigues.

Investigou-se a possibilidade de separação das frações, segundo o tamanho de suas partículas em ensaio granulométrico *versus* teor de cinzas somente na faixa -50 mm, cujas telas e demais resultados estão listados na tabela I.

Tabela I – Resultado do ensaio granulométrico *versus* teor de cinzas.

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

2.1.2. Ensaio de afunda-flutua

A fração -0,1 mm foi descartada das 3 faixas: -50 mm; -9,5 mm e -2 mm. Foram realizados os testes de afunda-flutua nestas frações e nas densidades 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,2 e 2,4 g/cm³, utilizando-se os seguintes líquidos orgânicos: Benzeno (C₆H₆ – 0,9 g/cm³), Tetracloretileno (C₂Cl₄ – 1,6 g/cm³) e Bromofórmio (CHBr₃ – 2,9 g/cm³).

2.2. Influência da frequência de jigagem na eficiência de separação do carvão

Os testes foram conduzidos no laboratório (Aufbereitung mineralischer Rohstoffe – AMR) da Universidade Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) em Aachen, Alemanha.

Devido à baixa liberação da matéria orgânica, optou-se por dividir a amostra remanescente em dois novos intervalos granulométricos com o fim de reduzir o formato lamelar das partículas, um dos fatores prejudiciais à estratificação do carvão na cuba do jig. A fração -2 mm foi descartada (tratada posteriormente em espirais) e os novos intervalos granulométricos ficaram assim distribuídos: -16 mm + 6,3 mm e -6,3 mm + 2,0 mm, conforme figura 3.

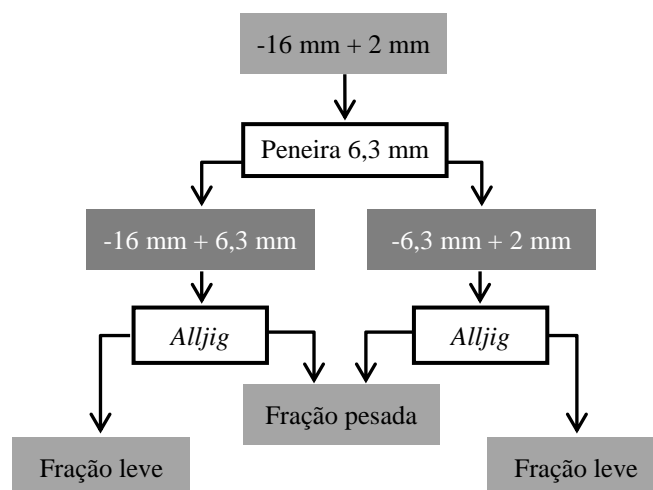


Figura 3 - Esquema de ensaios após a divisão do intervalo granulométrico estudado.

Buscou-se então estudar a influência da frequência de jigagem na eficiência de separação das frações constituintes do carvão. Para tanto, analisou-se separadamente as camadas formadas (níveis) após os testes, segundo suas densidades e a altura pré-estabelecida dos elementos de 25 mm. Após, foram calculados os teores de cinzas e recuperação mássica de cada nível (elemento). A figura 4 apresenta a disposição dos elementos na cuba operacional e seus respectivos produtos discriminados por níveis. Para a fração -16 mm + 6,3 mm utilizou-se chapa de base do leito com crivos de 2 mm de diâmetro, enquanto que na fração menor, -6,3 mm + 2 mm, diâmetro de 1 mm foi aplicado.

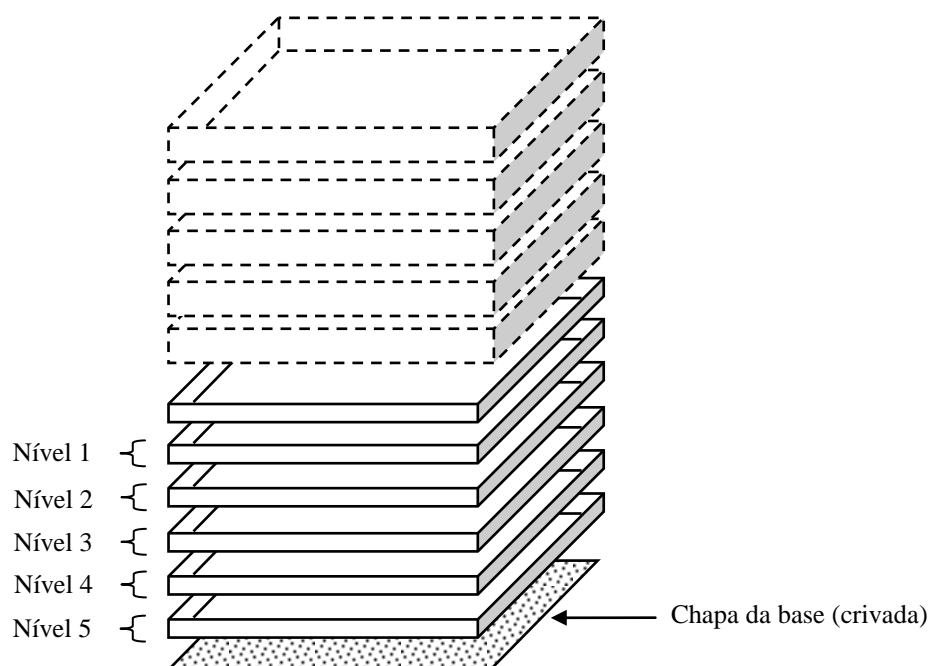


Figura 4 – Disposição dos níveis estudados na cuba do Alljig.

Iniciou-se a investigação das frequências de pulsação específicas para as frações -16 mm + 6,3 mm e -6,3 mm + 2 mm pelo valor de 80 pulsos por minuto. Adotou-se como critério de variação para o estudo nas demais frequências o percentual de 10%. Após testes preliminares sem a obtenção de resultados satisfatórios, fixou-se a pesquisa em duas frequências de pulsação para cada intervalo, cujos resultados foram promissores, alterando-se a altura de leito, quando necessário, a fim de se alcançar a melhor estratificação das frações mistas.

A figura 5 apresenta o fluxograma dos ensaios mais promissores realizados.

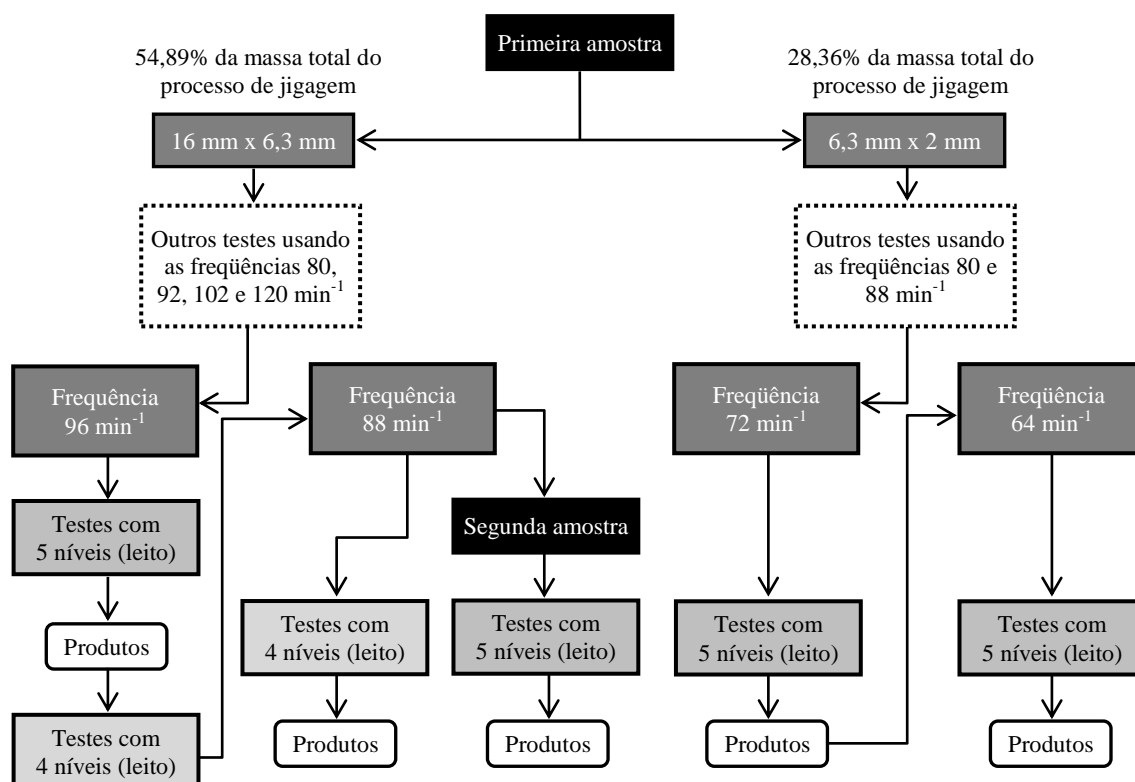


Figura 5 - Esquema de ensaios nas frequências de jigagem mais promissoras nos intervalos granulométricos estudados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1.1. Grau de liberação

Na tabela II encontra-se a distribuição granulométrica dos intervalos estudados em cada faixa granulométrica para análise do grau de liberação da matéria orgânica. Os teores de cinzas especificadamente no intervalo -50 mm + 0,1 mm oscilaram de 59 a 64 % sem redução significativa em alguma fração, conforme disposto na tabela I, já apresentada.

Tabela II - Distribuição granulométrica das 3 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

3.1.2. Fracionamento densimétrico

Conforme figura 6, verifica-se que não houve significativa liberação da matéria orgânica nas faixas estudadas, uma vez que as curvas quase se sobrepõem sem variação relevante. Com a finalidade de buscar nova rota de beneficiamento gravimétrico para otimizar o processo de jigagem, foi analisado o comportamento do carvão em testes no *Alljig*, utilizando-se várias frequências de pulsação para identificar a específica para cada intervalo granulométrico que possibilitasse melhorar a estratificação de suas frações mistas.

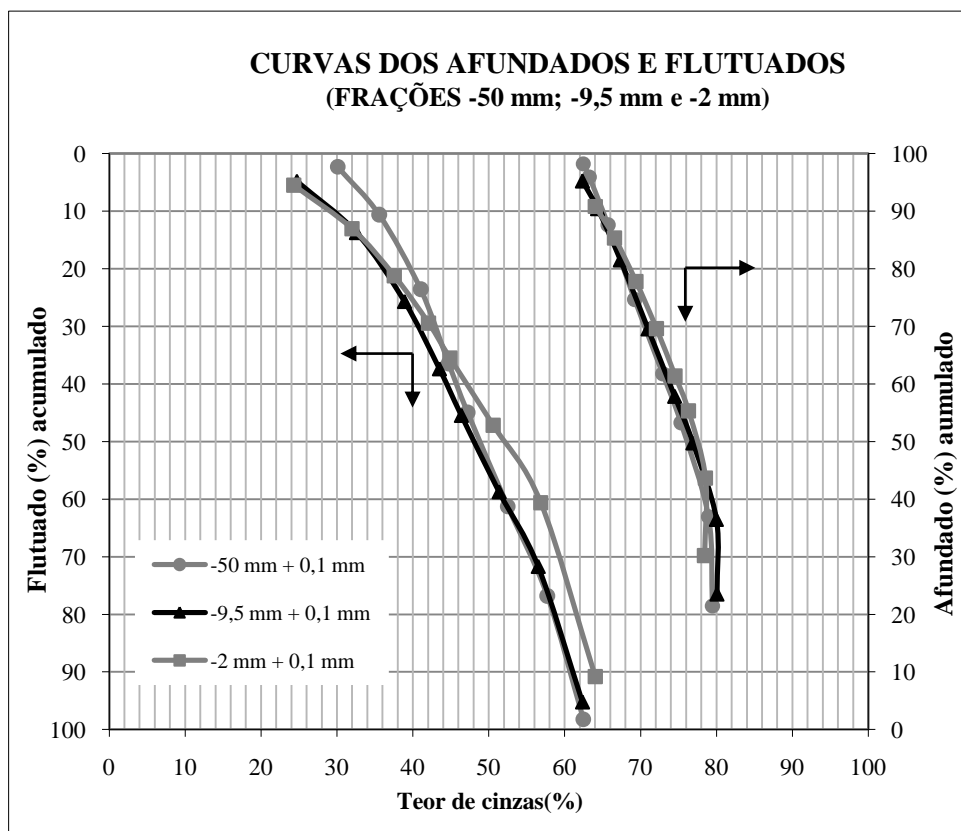


Figura 6 - Curvas de afundados e flutuados para os 3 intervalos estudados.

Near Gravity Material (NGM)

A figura 7 mostra a dificuldade de se obter um produto com significativa recuperação mássica nos 3 intervalos. Os altos percentuais observados (>20 %) no parâmetro NGM (Near Gravity Material) na densidade $1,9 \text{ g/cm}^3$ e faixas $-50 \text{ mm} + 0,1 \text{ mm}$ e $-9,5 \text{ mm} + 0,1 \text{ mm}$ comprovam este fato. Leonard (1979) em sua escala de dificuldade de separação em processos gravimétricos considera que carvões com percentuais mássicos entre 15 e 20 %, dentro de um intervalo densimétrico de $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ em relação à densidade de corte, apresenta separação “muito difícil” no processo de jigagem.

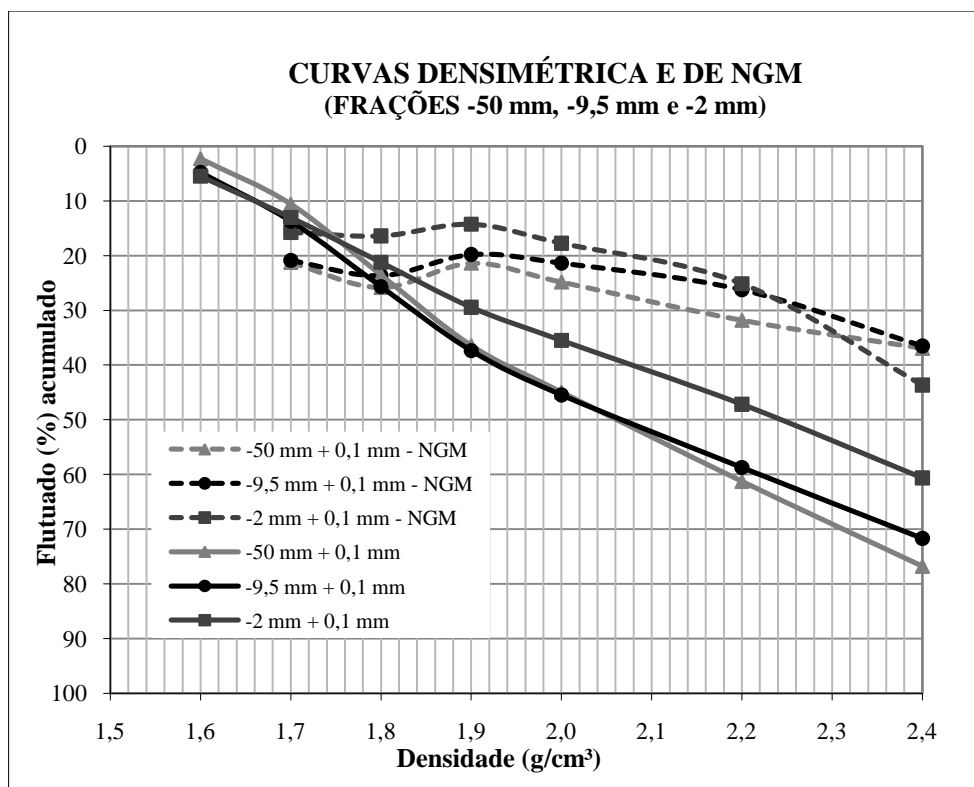


Figura 7 - Curvas densimétricas e de NGM para os 3 intervalos estudados.

3.1.3. Ensaios com frequências diferentes em jigue de laboratório

De acordo com Mukherjee e Mishra (2006), frequências de pulsação muito altas ou baixas podem não prover tempo e mobilidade suficientes para a separação. Em função disto, os ensaios foram conduzidos no intervalo de frequências de 64 a 120 pulsos por minuto. Além das frequências previamente escolhidas, os testes analisaram leitos constituídos por 5 e 4 níveis, a fim de se estudar a influência da altura do leito na performance da estratificação no processo de jigagem.

Intervalo -16 mm + 6,3 mm

Após testar o carvão nas frequências 80, 92, 104 e 120 min^{-1} sem concentrar o carvão desejado, obtêm-se resultados mais promissores nas frequências 96 min^{-1} , restrito ao processamento em leito constituído por 4 níveis, e 88 min^{-1} com leitos constituídos por 4 e

5 níveis, respectivamente. Convém ressaltar que este último resultado (5 níveis) foi obtido em ensaio utilizando carvão da 2ª amostra, cuja distribuição granulométrica assemelhou-se ao da primeira. A figura 8 apresenta os resultados obtidos nestas condições. Utilizou-se em média 19 kg de amostra para cinco níveis e para quatro, 16 kg em cada ensaio.

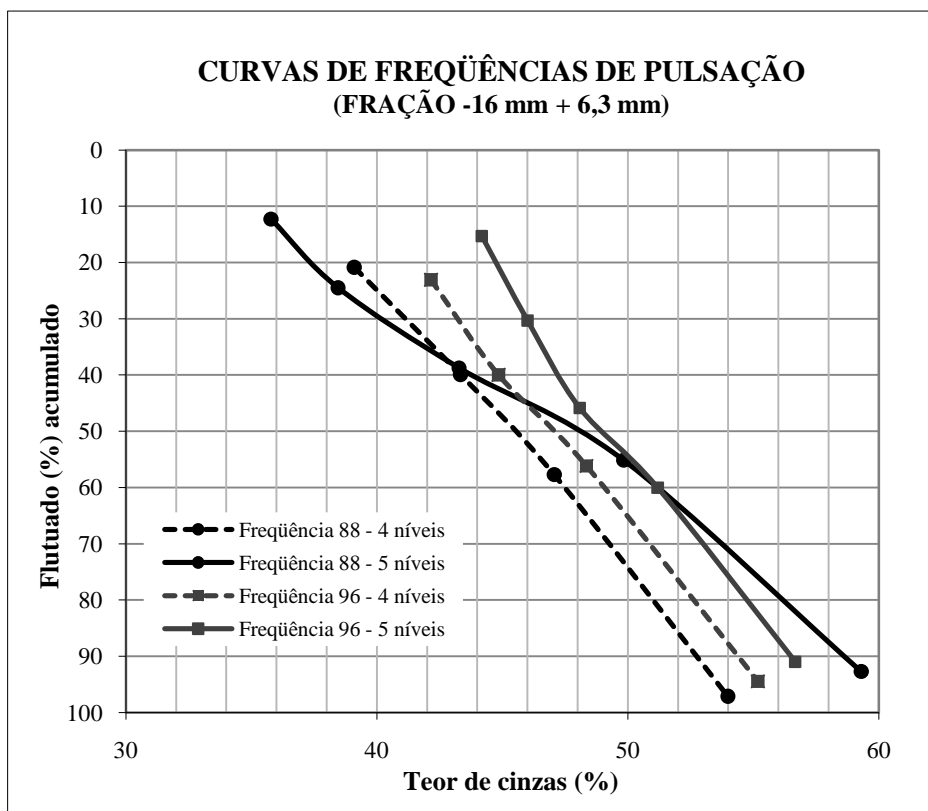


Figura 8 - Curvas de frequências para 88 e 96 min⁻¹ e leitos de 4 e 5 níveis.

Sugere-se que para se obter bom desempenho na separação do carvão deva-se utilizar no máximo 5 níveis (altura $\leq 12,5$ cm) para este intervalo, podendo, em determinadas situações, ser imperativa a redução para 10 cm (4 níveis) a altura do leito, quando houver aumento significativo no teor de minerais no ROM e alimentação da planta de beneficiamento. A amplitude utilizada nos testes foi a menor possível para não elevar a fração mista a níveis mais altos, porém mantendo a mobilidade do leito na etapa de expansão.

As tabelas III e IV apresentam a recuperação mássica e teor de cinzas dos testes aplicados na frequência 88 min⁻¹ em 4 e 5 níveis.

Tabela III - Resultado do teste na frequência 88 min⁻¹ e altura 10 cm (4 níveis).

Nível	Massa no nível (%)	Massa no nível acum. (%)	Massa na alimentação (%)	Massa na alim. acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Teor de cinzas acum. (%)
Nível 1	20,83	20,83	11,43	11,43	39,10	39,10
Nível 2	19,07	39,90	10,47	21,90	47,96	43,33
Nível 3	17,80	57,70	9,77	31,67	55,43	47,07
Nível 4	39,40	97,10	21,63	53,30	64,13	53,99
Passante na tela crivada do leito	2,90	100,00	1,59	54,89	74,93	54,60

Nesta fração granulométrica obteve-se um produto com teor de cinzas de 43,33 % e recuperação mássica em relação à alimentação total (54,89%) de 21,90 % para o ensaio com 4 níveis.

Tabela IV - Resultado do teste na frequência 88 min⁻¹ e altura 11,5 cm (5 níveis).

Nível	Massa no nível (%)	Massa no nível acum. (%)	Massa na alimentação (%)	Massa na alim. acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Teor de cinzas acum. (%)
Nível 1	12,27	12,27	6,74	6,74	35,78	35,78
Nível 2	12,22	24,49	6,71	13,45	41,14	38,45
Nível 3	14,25	38,74	7,82	21,27	51,56	43,28
Nível 4	16,40	55,14	9,00	30,27	65,33	49,84
Nível 5	37,56	92,70	20,62	50,89	73,20	59,30
Passante na tela crivada do leito	7,30	100,00	4,00	54,89	72,31	60,25

No ensaio com 5 níveis (11,5 cm) realizado a partir da 2ª amostra e na mesma frequência, o produto mais próximo da meta obteve teor médio de cinzas de 43,28 % e recuperação mássica com base no total alimentado de 21,27 %. A massa do nível 1 atingiu altura 1,5 cm, levemente aquém da altura do seu elemento (2,5 cm), em função de o peso da amostra para o teste ter sido insuficiente para preencher a plenitude de sua altura, possivelmente por esta razão sua recuperação mássica permaneceu abaixo de 10 %, fato que poderia aumentar a massa recuperada final.

Intervalo -6,3 mm + 2 mm

Neste intervalo, as frequências 72 e 64 min⁻¹ em leito constituído por 5 níveis apresentaram os melhores resultados para o carvão estudado, segundo figura 9. Observa-se que os ensaios nas frequências 80 e 88 min⁻¹ não produziram o carvão desejado.

Para 5 níveis utilizou-se em média 17 kg de amostra em ambos testes.

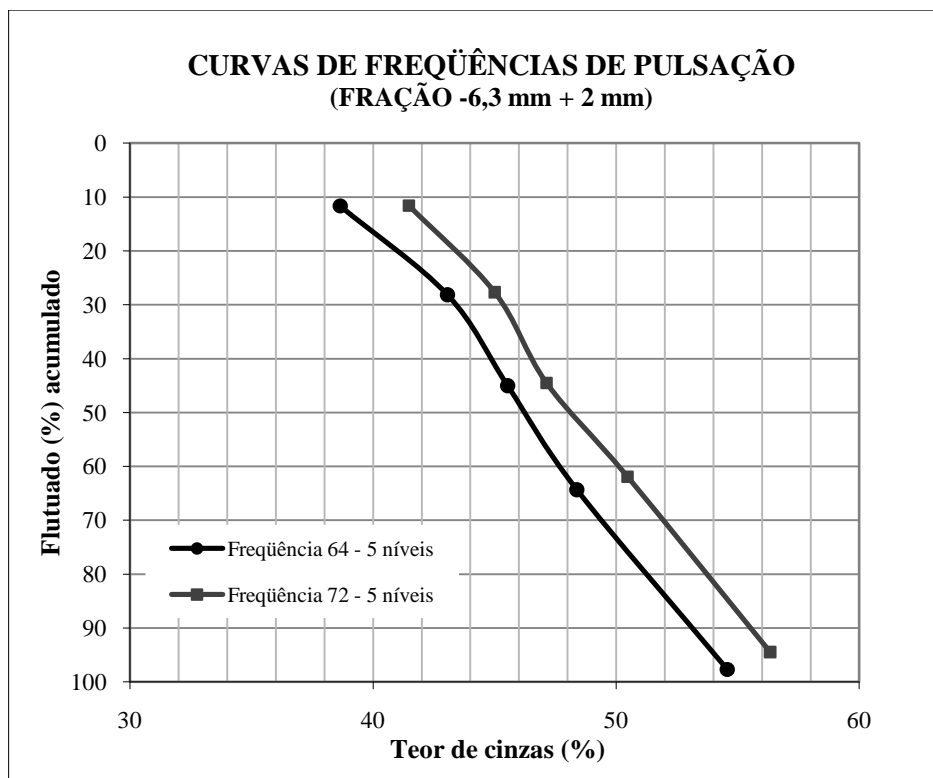


Figura 9 - Curvas de frequências para 64 e 72 min⁻¹ e leito de 5 níveis.

Esta fração granulométrica apresentou melhor resultado quando ensaiado na frequência 64 min⁻¹ e em leito constituído por 5 níveis, não sendo satisfatório em teste com 6 níveis. Este fato sugere seu processamento em 12,5 cm ou 5 níveis no máximo. O produto obtido nestas condições apresentou teor médio de cinzas de 43,06 % e recuperação em relação à alimentação (28,36 %) da planta de beneficiamento de 7,99 %, como discriminado na tabela V.

Tabela V - Resultado do teste na frequência 64 min⁻¹ e altura 12,5 cm (5 níveis).

Nível	Massa no nível (%)	Massa no nível acum. (%)	Massa na alimentação (%)	Massa na alim. acum. (%)	Teor de cinzas (%)	Teor de cinzas acum. (%)
Nível 1	11,66	11,66	3,31	3,31	38,64	38,64
Nível 2	16,49	28,15	4,68	7,99	46,18	43,06
Nível 3	16,88	45,03	4,79	12,78	49,67	45,54
Nível 4	19,28	64,31	5,47	18,25	55,03	48,38
Nível 5	33,37	97,68	9,47	27,72	66,50	54,57
Passante na tela crivada do leito	2,32	100,00	0,64	28,36	80,59	55,17

4. CONCLUSÃO

Após testar as amostras em várias frequências, um produto com teor de cinzas próximo a 43% e recuperações mássicas relevantes é obtido nos intervalos -16 mm + 6,3 mm

e -6,3 mm + 2 mm, quando ensaiadas nas frequências 88 min⁻¹ e 64 min⁻¹, respectivamente. As recuperações reportadas aqui podem diferir das reais, uma vez que eles referem-se a resultados de ensaios processados por batelada, diferentemente do sistema utilizado nas operações de processamento das mineradoras locais.

Acredita-se que a altura do leito (4 ou 5 níveis) pode impactar na performance do processo gravimétrico utilizado, principalmente na fração -16 mm + 6,3 mm, cujo grau de liberação é aparentemente menor que o do intervalo menor estudado.

Quando se comparam os resultados teóricos obtidos no Brasil (análise da liberação da matéria orgânica e fracionamento densimétrico) com os observados na Alemanha (testes no *Alljig*), constata-se que na fração -9,5 mm + 0,1 mm, a de melhor liberação, a massa teórica atinge 37,3%; em termos de recuperação mássica na alimentação da planta, e seu teor de cinzas 43,5%, enquanto que na fração -16 mm + 2 mm (união dos dois intervalos testados no *Alljig*) esses valores alcançam 29,2% e 43,2%, nesta mesma ordem. Acredita-se que a recuperação mássica obtida no ensaio do *Alljig* possa ser aumentada, se adicionarmos a massa recuperada na fração -2 mm + 0,1 mm, tratada em espirais.

5. REFERÊNCIAS

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

SNIEC - Sindicato Nacional da Indústria de Extração de Carvão Mineral: *Dados Estatísticos* - 2005.

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, 2005.

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, São Paulo, 2002.

Leonard, J.W. Coal Preparation, The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 4th edition, New York, p.4-27 - 4-33, 1979.

Mukherjee, A.K. & Mishra, B.K. An integral assessment of the role of critical process parameters on jigging, *International Journal of Mineral Processing*, p. 187-200, 2006.