

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMINERALÓGICA DO MINÉRIO DE CUTINGUTA

G.D.Barbosa¹, J. A. M. da Luz²

¹INB – Indústrias Nucleares Brasil – Unidade Buena
Praça Aníbal Abreu Viana, s/n, 28230-000-São Francisco Itabapoana, RJ.
e -mail:geverson@inb.gov.br.

J. A. M. da Luz², G.D.Barbosa²

¹Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Demin
Campus Universitário, s/n, 35400-000 - Ouro Preto, MG. E-mail: jaurelio@demin.ufop

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo caracterizar os minerais pesados que compõem o minério, antes de ser processado e após ser processado, na Unidade de Pré-beneficiamento a Úmido de Cutinguta, que utiliza métodos de separação gravítica, caracterizando também o rejeito e o pré-concentrado, para avaliar o desempenho da unidade, utilizando análise granulométrica e mineralógica. A caracterização dos minerais pesados nessas malhas granulométricas foi feita para avaliar as atuais rotas de beneficiamento adotadas, podendo até mesmo propiciar sugestões de mudança, estudando outros métodos de beneficiamento, em termos de custo operacional, otimização, eficiência do processo. De posse dos resultados brutos amostrais, foi aplicado o método de mínimos quadrados na minimização de erros de balanços de massas redundantes, utilizando a abordagem de minimização das somas de resíduos nos componentes para fechamento da equação, que utiliza os multiplicadores de Lagrange. A análise mineralógica identificou os seguintes componentes: quartzo, zirconita, rutilo, ilmenita, monazita, magnetita, limonita, sillimanita, cianita, leucóxênio, turmalina, estauroлита, espinélio, e fragmentos de conchas (bioclásticos). Os índices de seletividade globais para os principais minerais foram: 24,50 para o zircônio; 19,56 para o rutilo, 16,08 para a ilmenita e 18,77 para a monazita. Foram quantificados também os valores desse parâmetro para cada faixa granulométrica estudada, fornecendo preciosa informação sobre a resposta de cada mineral aos processos densitários de concentração industrial.

Palavras-chave: litoclásticos, minerais pesados; separação gravítica; multiplicador de Lagrange.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil existem, em operação, apenas duas jazidas de minerais pesados: Buena (da INB, no Estado do Rio de Janeiro), e Mataraca (da Milleniun, no Estado da Paraíba). O titânio, nono elemento mais abundante na crosta terrestre, possui as principais reservas localizadas na Austrália, África do Sul, Estados Unidos e Noruega (ilmenita), Austrália e África do Sul (rutilo) e Brasil (anastásio). No Brasil, as principais reservas estão localizadas na Paraíba (Mataraca) e ao longo da costa, principalmente nos estados da Bahia e Espírito Santo. (Souza e Figueiredo Filho, 1998; INB, 2006).

O método de beneficiamento atualmente em uso por empresas do setor, a cada dia, vem aumentando acentuadamente o custo devido à diminuição dos teores de minerais pesados úteis, isto é: as jazidas economicamente viáveis estão acabando, obrigando as empresas a buscar soluções para aumentar reservas (embora com teores abaixo do atual teor de corte), baixar custo e otimizar processo.

À medida que os depósitos mais ricos e de beneficiamento mais simples estão se esgotando, os minérios mais finos e mais complexos passaram a ser encarados com maior interesse. Assim, novas instalações de tratamento de minério têm que estar aptas a separar seletivamente minérios mais finos, permitindo a exploração de minérios que eram considerados não econômicos.

A lavra de uma mina de minerais pesados do tipo existente na região de São Francisco de Itabapoana é feita a céu aberto e pode ser sintetizada em três operações básicas: a decapagem, a extração do minério e a recuperação do terreno.

A decapagem ou decapeamento é a remoção e a estocagem (no próprio local da mina) da camada superficial do solo (rica em matéria orgânica). Assim que fica exposto o corpo mineralizado, o minério é extraído, geralmente por escavadeiras hidráulicas, e é conduzido por caminhões basculantes até a unidade de beneficiamento primário, onde é feita a separação da fração mais densa, referida aqui – por concisão – como “pesada” (útil), da fração menos densa, referida aqui como “leve” (ganga basicamente constituída de quartzo).

Os ditos minerais pesados correspondem tipicamente na faixa de 2 % a 10 % do volume total do minério. Esses são concentrados nas etapas posteriores do beneficiamento. O rejeito, que representa de 90 a 98 % do minério, é comumente conduzido de volta à mina, para que as cavas abertas na extração sejam recobertas.

Depois da recuperação dos terrenos, o solo retirado no início do processo é redistribuído sobre a superfície, ficando, portanto, recompostas as áreas alvo das atividades de mineração. Como essas áreas são ocupadas por pastagens, rapidamente voltam à sua utilização original. Quando há alguma mancha residual de vegetação de restinga na área de lavra, esta é preservada.

A Unidade de Buena (da INB – Indústrias Nucleares do Brasil) localiza-se no extremo litoral norte do estado do Rio de Janeiro, no município de São Francisco de Itabapoana, e se dedica à exploração e ao beneficiamento de litoclásticos, além da comercialização e transferência dos produtos gerados a partir desse tipo de minério sedimentar. As principais etapas de beneficiamento da usina de consistem de separação densitária, separação magnética, secagem e separação eletrostática (Vieira, 1997; INB, 2006; Sampaio e colaboradores, 2001).

No âmbito da INB – Unidade Buena, operava também uma unidade de beneficiamento primário, montada na Mina de Cutinguta, a aproximadamente 20 km de Buena, no distrito de Barra do Itabapoana. Em Cutinguta se produzia pré-concentrado, enviado para posterior beneficiamento em Buena. A análise da resposta do minério de Cutinguta ao beneficiamento físico será objeto deste trabalho.

2. OBJETIVO

Este trabalho teve por objetivo caracterizar os minerais pesados componentes do minério bruto (*run of mine* – r.o.m.) e de seu concentrado, após ser processado na Unidade de Pré-beneficiamento a úmido de Cutinguta. Com isso pôde-se avaliar o desempenho dessa unidade, utilizando análise granulométrica em peneiras diferentes. A caracterização dos minerais pesados nas diversas faixas granulométricas, sendo feita para avaliar os métodos clássicos de beneficiamento, pode propiciar sugestões de desenvolvimento de novas rotas, adotando outros métodos de beneficiamento, em termos de custo operacional e eficiência do processo.

3. ROTA DE PROCESSO DE CUTINGUTA

A avaliação do método clássico de beneficiamento de minerais pesados, usou, portanto, como cenário a planta de beneficiamento primário da INB – Unidade Buena de Cutinguta, que deixou de operar em 2006. Cutinguta era uma unidade com capacidade de processar 40 toneladas de minério bruto (areia), gerando um pré-concentrado com teor de 55 % minerais pesados, o qual era reprocessado na UBP – Unidade de beneficiamento primário. A figura 1, adiante, é um diagrama de blocos da rota de processo praticada em Cutinguta, a qual se acha descrita a seguir.

O minério bruto era alimentado por carregadora frontal numa grelha fixa de malha com 50 mm de abertura, sobre moega de alimentação, sob a qual uma esteira transportadora transportava o material para uma caixa, onde o material era transformado em polpa, e era direcionado para uma peneira vibratória de malha quadrada de 2,5 mm.

O retido da peneira, constituído praticamente de grânulos de quartzo, era encaminhado para o bota-fora. Já o passante caía numa caixa de bomba com variador de velocidade, e era bombeado para um ciclone deslamador, cujo *overflow* era direcionado ao decantador de lama, enquanto o *underflow* era bombeado para o circuito desbastador (*rougher*) de concentração.

O circuito de desbaste era constituído de doze concentradores tipo Humphrey (comumente – e de modo impróprio –, ditos *espirais*). O rejeito do desbaste (*rougher*) caía na caixa de bomba do rejeito, enquanto o médio caía por gravidade para o sistema esgotamento (*scavenger*) com quatro espirais de Humphrey. O concentrado caía por gravidade para o circuito de limpeza (*cleaner* 1), no qual havia quatro espirais de Humphrey.

O rejeito do sistema de esgotamento (*scavenger*), caía na caixa de bomba do rejeito, ao passo que o concentrado oriundo desse circuito se juntava ao médio do primeiro circuito de limpeza (*cleaner* 1) e era bombeado para o segundo circuito de limpeza (*cleaner* 2).

O concentrado do primeiro circuito de limpeza (*cleaner* 1) se juntava com o concentrado do sistema (*cleaner* 2), e era bombeado para um ciclone desaguador, cujo *underflow* caía em cone desaguador (moega desaguadora) e cujo *overflow* se juntava (por gravidade) ao transbordado do cone desaguador e retornava para a unidade.

O material sedimentado no fundo da moega desaguadora gerava o chamado pré-concentrado (de minerais pesados), pois era direcionado para as instalações de Buena para a separação seletiva final dos minerais pesados. Esse pré-concentrado era estocado e enviado periodicamente em caminhões basculantes para Buena.

O rejeito do da primeira limpeza (*cleaner* 1) era bombeado para a alimentação do circuito de esgotamento (*scavenger*).

O rejeito do circuito de esgotamento (*scavenger*) se juntava ao rejeito do segundo circuito de limpeza (*cleaner* 2) e ao rejeito do circuito de desbaste (*rougher*) em uma caixa de bomba, de onde era bombeado para um hidrociclone desaguador. O *overflow* desse hidrociclone voltava para a unidade com água de processo e o *underflow* formava a pilha de rejeito, a qual era periodicamente retomada, sendo esse rejeito final reenviado, por caminhões basculantes, para a jazida para aterramento das cavas e recomposição do terreno lavrado.

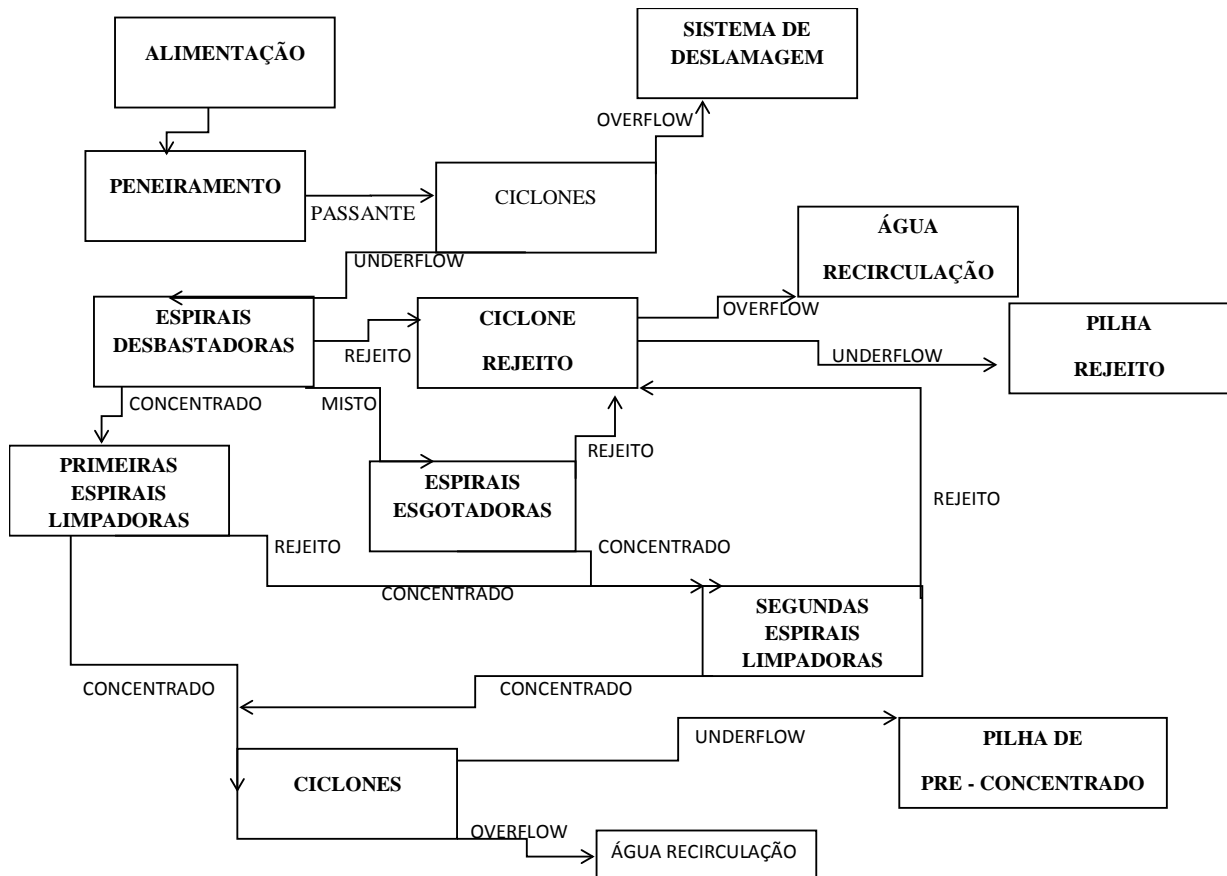


Figura 1: Fluxograma conceitual de Cutinguta.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Amostras

As amostras de alimentação e do rejeito da usina de Cutinguta foram amostradas durante uma semana, gerando uma amostra representativa para ser analisada. Do pré-concentrado foi retirada uma amostra representativa da produção de um mês. As amostras de alimentação, de rejeito e de pré-concentrado foram submetidas à análise granulométrica nas peneiras de malhas número: 35, 48, 65 e 100 da escala Tyler/ABNT.

Análise mineralógica semiquantitativa de cada uma das frações granulométricas foi feita para identificar os minerais existentes, possibilitando o cálculo dos teores medidos (dados brutos), os quais foram utilizados, após tratamento matemático, na elaboração do balanço de massas das operações de beneficiamento de Cutinguta.

As amostras foram obtidas por coleta sistemática na unidade de Cutinguta, via composição de incrementos periódicos, em um mês em que foram alimentados 7308 t de minério bruto, com teor de 4,6 % de minerais pesados, tendo gerado 6710 t de rejeito com 1,0 % de minerais pesados e 598 t de pré-concentrado com 53,99 % de minerais pesados.

4.2 Caracterização mineralógicas das amostras

A quantificação das diversas espécies mineralógicas foi feita, inicialmente, fracionando-se as amostras por separação densitária em líquido denso (bromofórmio), e por separação física em separador isodinâmico Franz, sob amperagem controlada, segundo prática usual na INB.

A seguir, as espécies mineralógicas foram quantificadas por microscopia ótica, com uso de microscópio petrográfico e lupa binocular, conforme procedimento padronizado para a caracterização da assembléia mineral típica de depósitos litoclásticos litorâneos.

4.3 Tratamentos dos Dados

A aplicação de algoritmos de minimização de erros no fechamento de balanços de massas com redundância de dados experimentais tem se tornado comum em processamento de minerais (Mular, 1976; Lynch, 1977; Frew, 1983; Maquin e colaboradores, 1988; Wills e Napier-Munn, 2006, Jefferson e Scott, 1989, entre outros). Redundância de dados significa existência de um conjunto de medidas em número superior àquele necessário à determinação do sistema de equações que expressam a conservação das massas em cada nó topológico do circuito (dadas por: soma das entradas igual à soma das saídas).

Decorrência dos erros e incertezas, para cada componente mineralógico, o cálculo da recuperação mássica de cada fração granulométrica resulta valores discrepantes. Usualmente, as técnicas de minimização desses erros utilizam os diversos teores de alimentação e dos produtos de mais de um componente, obtendo-se pelo algoritmo os teores ajustados (compatíveis com um único valor da recuperação mássica para cada uma das frações granulométricas).

A minimização de função $f(x,y,z)$ sob vínculo (ou restrição, ou condicionante) de função $g(x,y,z) = C$ (onde C é constante) é comum esbarrar em dificuldades algébricas. Lagrange usou um artifício interessante para resolver esse problema de modo simples, introduzindo incógnita adicional, a qual, adequadamente selecionada, permite fazer x , y e z “independentes”, permitindo a minimização de modo fácil.

O tratamento dos dados atinentes a este trabalho buscou seguir o ajuste de dados redundantes por multiplicadores de Lagrange. Para maiores referências ao método consultem-se, por exemplo, Riley (1987), que fornece um resumo do método de minimização sob vínculo via multiplicadores de Lagrange, e Luz (1999), que, por seu turno, apresenta uma aplicação simples desse método a balanço de massa de circuito de tratamento de minério.

Para aferição do desempenho da separação foi usado o clássico índice de seletividade de Gaudin, expresso por (Sampaio e Tavares, 2005):

Onde:

$$I.S. = \sqrt{\frac{C_{util}}{C_{ganga}} \times \frac{r_{ganga}}{r_{util}}}$$

- C_{util} – teor de útil no concentrado [-];
- C_{gangai} – teor de ganga no concentrado [-];
- r_{util} – teor de útil no rejeito [-];
- r_{gangai} – teor de ganga no rejeito [-];

5. RESULTADOS

A análise mineralógica identificou os seguintes componentes: quartzo, zirconita, rutilo, ilmenita, monazita, magnetita, limonita, sillimanita, cianita, leucoxênio, turmalina, estauroлита, espinélio, e fragmentos de conchas (bioclásticos).

A Tabela I, adiante, sistematiza os resultados da quantificação mineralógica, discriminada por faixa granulométrica, da alimentação, do concentrado (dito, no sítio, pré-concentrado, pela razão exposta) e do rejeito de Cutinguta. Todos os valores encontram-se ajustados pelo método dos polinômios de Lagrange, referidos, por convenção, teores corrigidos.

De posse dos valores ajustados dos teores dos minerais nos diversos fluxos calcularam-se as recuperações mássicas dos minerais pesados, em cada fração granulométrica e os consequentes valores do índice de seletividade, os quais se encontram ilustrados na figura 2, a seguir.

A tabela II sistematiza os valores numéricos do índice de seletividade de Gaudin para cada mineral pesado de interesse no minério.

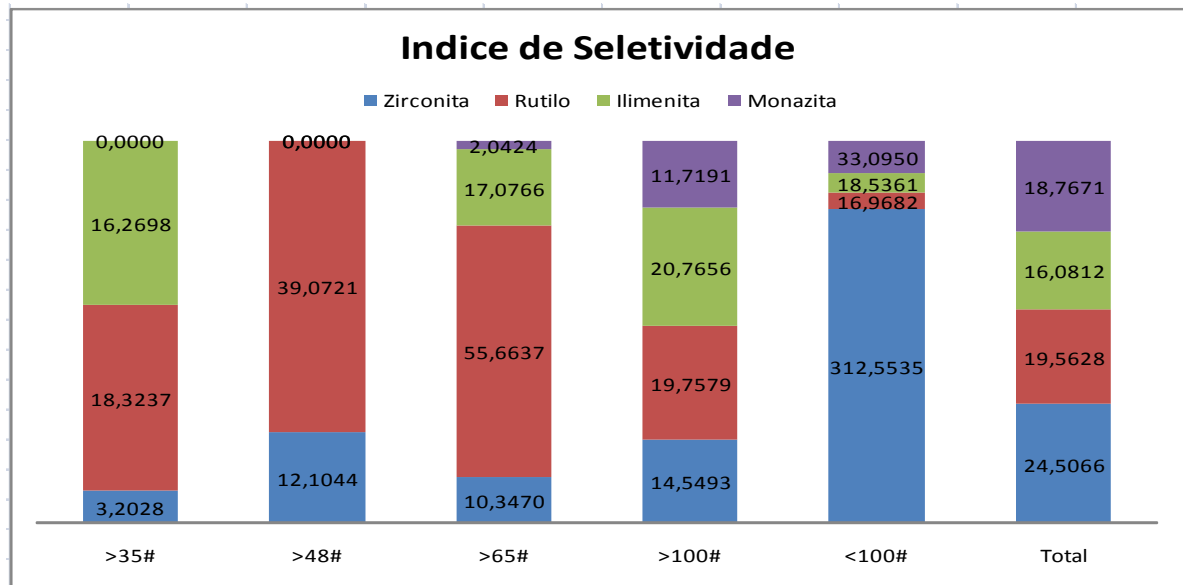


Figura 2: Índice de seletividade dos minerais pesados úteis.

Tabela I

– Teores ajustados (“corrigidos”)

Material	Alimentação corrigida						Rejeito corrigido						Pré - concentrado					
	>35#	>48#	>65#	>100#	<100#	Total	>35#	>48#	>65#	>100#	<100#	Total	>35#	>48#	>65#	>100#	<100#	Total
Zirconita	0,0022%	0,0164%	0,0238%	0,0772%	0,3466%	0,4662%	0,0013%	0,0028%	0,0043%	0,0074%	0,0001%	0,0159%	0,0217%	0,0865%	0,5358%	1,3467%	6,2048%	8,1954%
Rutilo	0,0034%	0,0134%	0,0252%	0,0622%	0,0389%	0,1431%	0,0003%	0,0003%	0,0003%	0,0036%	0,0031%	0,0075%	0,0205%	0,0720%	0,1737%	0,8539%	0,9082%	2,0283%
Ilmenita	0,0330%	0,0139%	0,3113%	0,9676%	0,6795%	2,0053%	0,0038%	0,0195%	0,0282%	0,0513%	0,0471%	0,1499%	0,1375%	0,5752%	2,2298%	11,9815%	9,7226%	24,6467%
Monazita	0,0002%	0,0000%	0,0011%	0,0057%	0,0657%	0,0727%	0,0002%	0,0007%	0,0007%	0,0007%	0,0015%	0,0040%	0,0000%	0,0021%	0,0603%	0,5138%	1,4627%	2,0389%
Magnetita	0,0035%	0,0055%	0,0070%	0,0123%	0,0153%	0,0436%	0,0043%	0,0051%	0,0044%	0,0023%	0,0016%	0,0178%	0,0090%	0,0085%	0,0432%	0,1655%	0,3304%	0,5567%
Limolita	0,0674%	0,0876%	0,1178%	0,3451%	0,0442%	0,6621%	0,0816%	0,0823%	0,0666%	0,0379%	0,0056%	0,2740%	0,0602%	0,1545%	1,2378%	4,8161%	1,4570%	7,7256%
Sillimalita	0,0229%	0,0455%	0,0671%	0,0705%	0,0159%	0,2220%	0,0091%	0,0157%	0,0233%	0,0114%	0,0064%	0,0659%	0,1065%	0,1585%	0,4163%	0,9379%	0,4385%	2,0576%
Cianita	0,0025%	0,0030%	0,0051%	0,0057%	0,0039%	0,0202%	0,0060%	0,0124%	0,0172%	0,0085%	0,0026%	0,0467%	0,0394%	0,0946%	0,1707%	0,4087%	0,1446%	0,8580%
Leucoxênio	0,0937%	0,1421%	0,2224%	0,1608%	0,1112%	0,7302%	0,0433%	0,0813%	0,1072%	0,0475%	0,0081%	0,2874%	0,1813%	0,4683%	0,9177%	1,9084%	1,4602%	4,9358%
F. de Con.	0,0005%	0,0013%	0,0007%	0,0003%	0,0004%	0,0032%	0,0035%	0,0154%	0,0140%	0,0090%	0,0009%	0,0428%	0,0000%	0,0041%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0041%
Turmalina	0,0057%	0,0086%	0,0106%	0,0072%	0,0031%	0,0352%	0,0040%	0,0068%	0,0035%	0,0010%	0,0001%	0,0155%	0,0042%	0,0364%	0,0516%	0,1361%	0,0294%	0,2577%
Estauroлита	0,0031%	0,0042%	0,0058%	0,0037%	0,0000%	0,0167%	0,0003%	0,0008%	0,0014%	0,0004%	0,0001%	0,0030%	0,0095%	0,0083%	0,0055%	0,0194%	0,0000%	0,0427%
Espinélio	0,0522%	0,0470%	0,0556%	0,0208%	0,0039%	0,1795%	0,0193%	0,0244%	0,0151%	0,0019%	0,0001%	0,0607%	0,1360%	0,1476%	0,1885%	0,1749%	0,0052%	0,6522%
Total	0,2903%	0,3885%	0,8534%	1,7390%	1,3288%	4,6000%	0,1769%	0,2675%	0,2863%	0,1830%	0,0772%	0,9909%	0,7258%	1,8165%	6,0310%	23,2628%	22,1637%	53,9998%

Tabela II – índice de seletividade de Gaudin por faixa granulométrica

ÍNDICE DE SELETIVIDADE						
Mineral\Malhas	>0,417 mm (35 #)	>0,29 mm (48 #)	>0,209 (65 #)	>0,149 mm (100 #)	<0,149 mm (Fundo)	Total
Zirconita	3,20	12, 10	10, 35	14, 55	312, 55	24, 50
Rutilo	18, 32	39, 07	55, 66	19, 76	16, 97	19, 56
Ilmenita	16, 27	0, 00	17, 08	20, 767	18, 54	16, 08
Monazita	Não se aplica	Não se aplica	2, 04	11, 72	33, 09	18, 77

6. CONCLUSÃO

De posse destes resultados, se pode concluir que a unidade de Cutinguta apresentava recuperação dos minerais úteis elevada.

A comparação granulométrica entre os minerais úteis e quartzo e o espinélio mostra bom potencial de corte, onde, ao contrário desses dois minerais, a maior parte dos minérios úteis é passante malha da peneira de 0,209 mm (número 65). Isto é: a zirconita (90,91 %), o rutilo (70,69 %), a monazita (98,24 %) e a ilmenita (75,93 %). Por seu turno, o espinélio tem 86,22 % e quartzo, 88,88 % retidos na malha 0,209 mm (número 65). Com estes resultados, pode-se concluir que o processo de beneficiamento usado me Cutinguta, apesar de seu bom desempenho, não seria o melhor possível, abrindo margem para que se faça estudo mais aprofundado, no sentido de achar melhor processo de beneficiamento que venha a abaixar o custo operacional de processo e o otimize.

Cumprir lembrar, a título de consideração final que a obtenção dos valores parâmetro índice de seletividade de Gaudin, para cada faixa granulométrica estudada, e para cada mineral de interesse vem contribuir ao acervo técnico do tratamento de minérios, fornecendo preciosa informação sobre a resposta de cada mineral aos processos densitários de concentração industrial. Tais idiossincrasias, expressas nas curvas de partição granulodensitária de cada um dos minerais pesados, estão sendo, no momento, estudadas e deverão ser objeto de publicações futuras.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FREW, J. A. Computer Aided Design of Sampling Schemes. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 11, nº 4, p. 255-265, Dec. 1983.
- JEFFERSON, T. R. & SCOTT, C. H. The Entropy Approach to Material Balancing in Mineral Processing. *International Journal of Mineral Processing*, v.18, p.251-261, 1986.
- LYNCH, A. *Mineral Crushing and Grinding Circuits*. New York: Elsevier, 1977.
- MAQUIN, D. *et alii*. Validation des Mesures par Équilibrage Hiérarchisé des Bilans-Matière. *International Journal of Mineral Processing*. Vol. 23, nº 3/4. p. 241-252, July, 1988.
- MULAR, A. L. Mass Balance of a Grinding Circuit. *The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*, December, 1976.
- INB, INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL –UNIDADE BUENA - Tratamento de Areias Monazíticas. Disponível em: <HTTP: \\www.inb.gov.br/ buena.asp>. Acessado em: outubro/ 2006.
- LUZ, J. A. M. da. Uso de vazões na compatibilização de teores via multiplicadores de Lagrange. *REM – Revista Escola de Minas*, Vol. 52, nº 4, p.269-274, 1999.
- OLIVEIRA, J.F; ADAMIAN, R. A Cinética do Processo de Flotação e sua Importância na Recuperação de Partículas Finas. Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais –
- RILEY, K. F. *et alii*. *Mathematical Methods for Physics and Engineering*. Cambridge: Cambridge University, 1997.
- SAMPAIO, J.A; LUZ, A. B.; LINS, F. F. Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil; Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2001.
- SAMPAIO, C.H & TAVARES, L. M. *Beneficiamento Gravimétrico*. Porto Alegre: EUFRGS, 2005.
- SOUZA, H.C; FIGUEIREDO FILHO, O.A. Aspectos Tecnológicos e Ambientais da Exploração de Minerais

Pesados na Mina do Guaju/Mataraca – PB: Um Estudo de Caso da Millenium Inorganic Chemicals. Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geociências – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Campus Universitário, Natal-RN

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. sistema de bibliotecas. Normas para Apresentação de Trabalhos Científicos 2 e 3. Editora UFPR. Curitiba, 2001.

VANUZZI, A L.; VASCONCELOS, D. P.; ABRAHÃO, J. R.; Jazidas de Minerais Pesados no Litoral Norte do Estado do Rio Janeiro e Sul do Estado Espírito do Santo e Bahia; In: ANAIS DO XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Rio de Janeiro, 1984.

VIEIRA, E.V; LINS, F. F. Concentração de Minérios de Terras Raras: Uma Revisão. CETEM/CNPq, 1997. Série Tecnologia Mineral, N° 73. 53 p.

WILLS, B. A. & NAPIER-MUNN. *T. Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery (7th ed.)*. Oxford: Butterworth-Heinemann – Elsevier, 2006. 444 p.