

Flotação por ar dissolvido de ultrafinos de carvão

Elzivir Azevedo Guerra *
Jaime A. Solari, PhD **

1. INTRODUÇÃO
2. PARTE EXPERIMENTAL
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO
4. CONCLUSÕES
5. BIBLIOGRAFIA

* Aluno de mestrado - PPGEEMM/UFRGS

** Professor Adjunto do Depto. de
Metalurgia da UFRGS

Resumo

O beneficiamento de certos tipos de carvões brasileiros somente é possível em tamanhos de liberação extremamente finos devido à alta disseminação da matéria inorgânica. O uso de processos de flotação com microbolhas tem se mostrado eficiente para beneficiamento de partículas minerais finas.

Neste trabalho estuda-se a aplicação da flotação por ar dissolvido (FAD) ao beneficiamento de finos de carvão brasileiros (~37 microns). Apresentam-se resultados obtidos com amostras de carvão de Urussanga e Candiota através de testes em escala de bancada e em regime descontínuo.

Investiga-se a influência de parâmetros físico-químicos (pH, coletor, espumante,

modificadores, dispersibilidade) na recuperação de matéria carbonosa e na seletividade do processo, mantendo-se constantes os parâmetros operacionais. Os resultados são discutidos em termos dos fenômenos que ocorrem na interface carvão/solução e do potencial de aplicação desta técnica não convencional de beneficiamento na concentração de finos de carvões brasileiros.

Conclui-se que este processo é viável de ser aplicado tanto para a obtenção de frações de baixo teor de cinzas (~5%) em carvões de alto rank quanto para o beneficiamento das frações ultrafinas dos carvões de baixo rank.

O projeto foi realizado com auxílio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.

1. Introdução

O carvão brasileiro caracteriza-se pelo elevado teor de matéria mineral e pelo alto grau de disseminação desta na matriz orgânica. Sendo assim, a liberação da matéria mineral ocorre a tamanhos muito finos, certamente menores do que 400 malhas (0,037 mm). Por exemplo, os estudos de liberação da matéria mineral do carvão de Candiota realizados por SAMPAIO (1) indicaram que a presença de partículas com mais de 95% de matéria carbonosa aumenta de 10% para a fração - 28 + 65 malhas a 34% para a fração -270 malhas (0,053 mm). Outra característica importante em relação ao beneficiamento é o baixo grau de maturidade ("rank") do carvão brasileiro, principalmente do Rio Grande do Sul.

Os processos de beneficiamento de carvão utilizados atualmente no Brasil caracterizam-se pelo descarte de uma fração "fina" cuja granulometria varia em função do tipo de carvão processado e do fluxograma de beneficiamento. De modo geral, em Santa Catarina a fração rejeitada situa-se abaixo da malha 200 (0,074 mm) enquanto que no Rio Grande do Sul a fração fina é cortada na malha 28 (0,5 mm), exceto no caso do lavador de Leão I.

As características de liberação da matéria mineral no carvão e a inevitável presença de finos como produto da cominuição do carvão "r.o.m." tornam importante o estudo de processos de beneficiamento das frações finas e ultrafinas do carvão brasileiro. Um resumo dos estudos de beneficiamento de finos de carvões do RS, realizados na UFRGS, foi publicado recentemente (2). Nessa publicação conclui-se que a flotação, o processo convencional de beneficiamento da fração fina -28 + 200 malhas, somente seria aplicável no caso do carvão de Leão e que processos não convencionais, tais como aglomeração oleosa e floculação seletiva, têm sua aplicação restrita devido ao "rank", ao elevado teor de matéria mineral e de partículas "mistas" destes carvões.

O processo de flotação por ar dissolvido (FAD) baseia-se no uso de pequenas bolhas de ar (0,05-0,1 mm de diâmetro) como a fase gasosa, deste modo aumentando as probabilidades de colisão bolha/partícula no sistema e favorecendo a recuperação das partículas mais finas. A FAD tem sido usada tradicionalmente como processo de separação sólido/líquido no tratamento de efluentes industriais (3) e, só recentemente, sua aplicação ao

beneficiamento de minérios (4) e de ultrafinos de carvão (5) foi investigada.

O objetivo deste trabalho foi estudar as características de beneficiamento das frações ultrafinas (-400 malhas) de carvão brasileiro pelo processo de flotação por ar dissolvido em escala de bancada. Inicialmente, foram realizados estudos de FAD com carvão originário de Urussanga (SC) para verificar a viabilidade do processo para posterior aplicação ao beneficiamento de carvão de Candiota. Outrossim, apresentam-se também estudos de estabilidade de suspensões do carvão de Candiota na presença de vários reagentes comumente usados em flotação de carvão.

2. Parte experimental

2.1. Materiais

O carvão de Urussanga corresponde a "moinha metalúrgica" e foi moído e classificado a úmido em duas frações de tamanho, -74 + 37 μ m, (13,1% cinzas) e -37 μ m (12,1% cinzas). O carvão de Candiota, proveniente de amostragem de canal do banco superior e inferior da mina, em operação, foi moído a seco e classificado a úmido abaixo de -37 μ m (50,4 cinzas).

Os reagentes utilizados (querosene, óleo de pinho) foram de pureza comercial, à exceção dos reguladores de pH (NaOH e HCl), dos reagentes modificadores (silicato de sódio, hexametáfosfato de sódio), do álcool etílico e do tensoativo cetil trimetil brometo de amônio (CTAB), que correspondiam a reagentes de pureza p.a. . Em todos os casos foi utilizada água destilada simples.

2.2. Métodos

Os experimentos de FAD foram realizados em uma unidade de bancada já descrita anteriormente (3). Microbolhas são formadas mediante pressurização a 4,2 kg.cm⁻² (pressão manométrica) sob um fluxo de ar comprimido de 5,1.min⁻¹ durante 10 minutos, seguido de injeção de 150 ml na célula de flotação. Previamente à introdução das microbolhas, a suspensão de carvão era condicionada sob agitação rápida por 10 min para dispersão, ajuste de pH e adição dos reagentes na ordem: modificador, coletor, óleo e espumante, em volume total de 600ml. Após o período de flotação (4 min sob agitação lenta e 2 min de repouso) retirava-se a espuma por sucção para secagem a 60°C e análise de acordo com a norma ABNT-MB-15. De modo geral os testes de flotação foram feitos com densidade de polpa de 1% de sólido (p/v). Outrossim, verificou-se mediante testes triplicados de FAD que o erro relativo dos resultados (recuperação e teor de cinzas) era de aproximadamente 7%.

Os estudos de estabilidade foram realizados de acordo com um procedimento padronizado em uma célula cilíndrica de vidro dotada de 4 defletores, usando suspensões de 1% carvão (p/p) em volume total de 400 ml. Consistiu da dispersão e ajuste do pH da suspensão durante 5 min sob agitação

rápida, seguida de um período no qual se adicionou o reagente em estudo (3 min agit. rápida, 2 min agit. lenta) e, finalmente, de um período de repouso (2 min) após o qual retirou-se uma amostra de aproximadamente 100 ml através de uma abertura lateral na célula. Esta amostra era filtrada e secada para determinação do conteúdo de sólidos.

O nível relativo de estabilidade das suspensões foi avaliado mediante o parâmetro dispersibilidade (D) dada pela equação (I)

$$D = 100 \cdot \frac{C_f}{C_0} \quad (I)$$

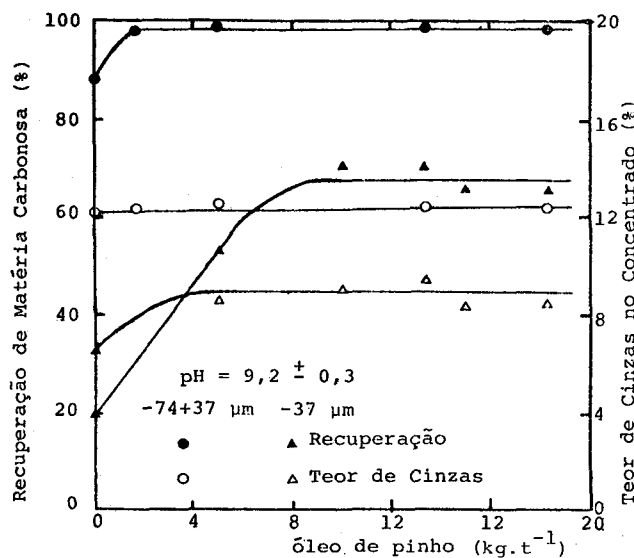
em que C_f é a concentração de sólidos em suspensão após o tempo de repouso, e C_0 é a concentração inicial de sólidos (1%). Desta forma um valor de D próximo de 100% corresponde a uma suspensão de alta estabilidade.

3. Resultados e discussão

3.1. FAD de carvão de Urussanga

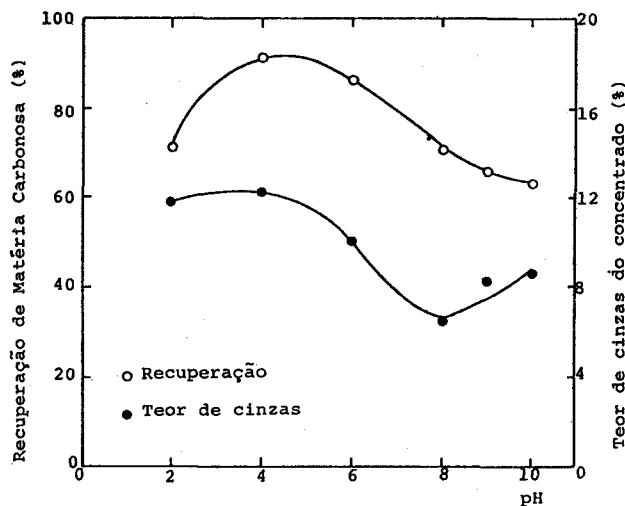
Na Figura 1 apresenta-se o efeito da concentração de coletor (óleo de pinho) sobre a recuperação de matéria carbonosa e o teor de cinzas no concentrado para as duas frações de tamanho. Os testes sem coletor foram realizados com 1%(v/v) álcool etílico como espumante e verificou-se que a adição deste espumante para concentrações de óleo de pinho acima de 6,0 kg.t⁻¹ não influenciava os resultados. Esta figura indica claramente que só houve beneficiamento no caso da fração mais fina (-37 μ m) e que o comportamento da fração -74 + 37 μ m é típico de um minério não liberado, constituído de partículas mistas. No caso da fração fina obteve-se um concentrado de 9,0% de cinzas com 70,0% recuperação da matéria combustível, com aproximadamente 8 kg.t⁻¹ de coletor.

FIGURA 1 - Efeito da concentração de óleo de pinho sobre a FAD de carvão de Urussanga para duas frações granulométricas, na presença de álcool etílico (1% v/v).



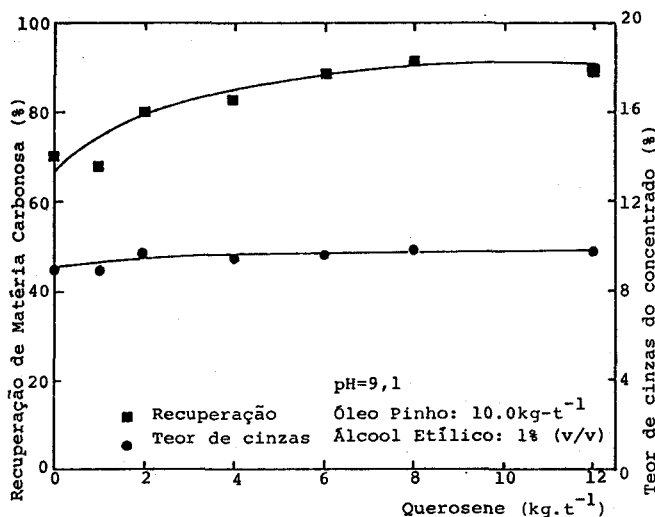
O efeito do pH sobre a FAD apresenta-se na Figura 2. Observa-se que a máxima recuperação (91%) e a menor seletividade ocorreu na faixa de pH ácido, onde provavelmente ocorre heterocoagulação entre partículas minerais e carbonáceas. Por outro lado, a maior seletividade (6,5% cinzas) obteve-se a pH 8,0, porém às custas de uma queda na recuperação (70,0%).

FIGURA 2 - Efeito do pH na FAD de carvão de Urussanga (-37 μ m) na presença de óleo de pinho (13,3 kg.t⁻¹) e álcool etílico (1% (v/v)).



A recuperação de partículas finas por flotação com microbolhas pode ser aumentada mediante uso de um óleo que se adsorva na superfície hidrofóbica do sólido (4). A Figura 3 mostra o efeito da adição de querosene emulsificado à FAD a pH 9,0 e para 10,0 kg.ton⁻¹ óleo de pinho. Nota-se que a recuperação de matéria combustível aumentou de 70,0% para 90,0% na presença de 7,0 kg.t⁻¹ de querosene, mantendo-se constante a seletividade da separação.

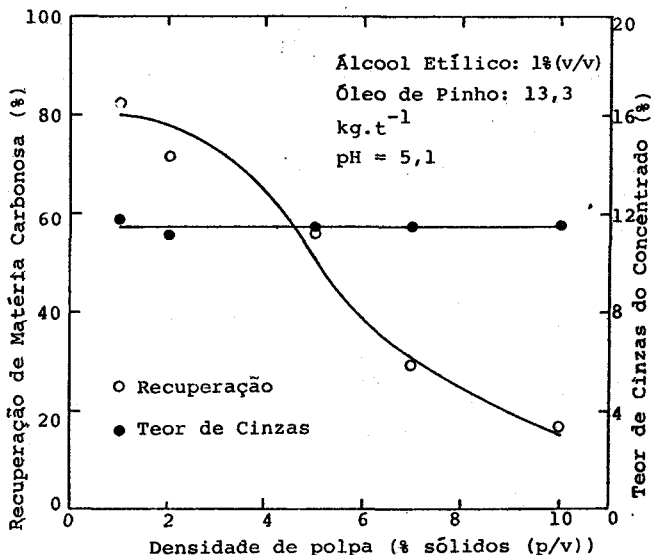
FIGURA 3 - Efeito da concentração de querosene sobre a FAD de carvão de Urussanga (-37 μ m).



O efeito da % de sólidos sobre a flotação de carvão com microbolhas mostra-se na Figura 4. Observa-se que até 5% de sólidos

a recuperação atinge valores aceitáveis (=60,0%) e a seletividade permanece constante. Considerando ainda que não foram usados óleos nestes estudos, estes resultados parecem ser bastante promissores, pois indicam a viabilidade de processar os efluentes de lavadores de carvão, que geralmente contêm 3-5% sólidos.

FIGURA 4 - Efeito da concentração de sólidos sobre a FAD de carvão de Urussanga (-37 μ m).



Outros estudos realizados com este carvão mostraram ainda que o regime de agitação durante o período de flotação exerce influência significativa sobre a eficiência do processo. Assim, um aumento da agitação leva a aumentar a seletividade, mas com um considerável decréscimo na recuperação de material combustível. Sendo um indicio, provavelmente, de que parte da cinza do concentrado seja devido ao arraste mecânico e aprisionamento físico de partículas liberadas de matéria mineral no produto flotado. Experimentos de adição de agentes modificadores à suspensão a pH 9,0 não tiveram qualquer influência sobre a eficiência do processo em termos de seletividade ou recuperação.

A introdução de uma segunda etapa de flotação (flotação de limpeza) foi estudada mediante reflotação do concentrado de FAD sob várias condições experimentais. De modo geral, adicionou-se o coletor somente na primeira etapa de FAD sendo que a reflotação do concentrado realizou-se somente na presença de espumante. Os resultados mostrados na Tabela I indicam que na presença de óleo de pinho obtem-se um concentrado de baixo teor de cinzas (5,0%), mas às expensas de um baixo rendimento de matéria combustível (33,9%). Já a adição de querosene em moderada quantidade (3,0kg.t⁻¹) aumentou a recuperação total a 66,3% produzindo um concentrado de 6,6% cinzas. Estes resultados são encorajadores do ponto de vista do consumo dos reagentes envolvidos para obter um carvão de baixo teor de cinzas, se comparados com resultados obtidos pelo processo de aglomeração oleosa (6). Outrossim, verificou-se que, ao nível de concentrações utilizadas, a combinação querosene/álcool apresentou uma

melhor eficiência de separação do que querosene/óleo de pinho, o que também foi encontrado nos estudos de FAD em um único estágio. Este efeito provavelmente deve-se ao caráter mais hidrofílico do óleo de pinho, conferido pelo seu grupo polar, que proporciona a formação de uma espuma menos seletiva.

TABELA I - FAD Descontínua de carvão de Urussanga (-400 malhas) em duplo estágio.

REAGENTES	pH	RECUPERAÇÃO 1ª ETAPA (%)	RECUPERAÇÃO TOTAL (%)	TEOR DE CINZAS (%)
O.P. (15,0)+A	8,2	58,4	20,0	6,3
O.P. (15,0)+A	8,2	72,7	29,6	7,2
O.P. (15,0)+A	9,0	57,4	33,9	5,0
Q (9,0) +A	9,1	90,8	83,2	8,1
Q (9,0) +A	9,1	90,7	89,4	9,1
Q (9,0)+O.P.(10,0)	9,0	90,6	84,5	8,5
Q (3,0)+A	9,0	83,6	66,3	6,6
Q (3,0)+O.P.(10,0)	9,2	90,9	59,8	7,0

ABREVIATURAS:

O.P. = óleo de pinho, Q = querosene, A = álcool etílico.

Os valores entre parenteses significam concentração dos reagentes em kg.t^{-1} .

CONDIÇÕES:

O querosene e óleo de pinho só foram adicionados na primeira etapa, enquanto que o álcool (1% v/v) foi usado nos dois estágios de FAD.

3.2. Estabilidade de suspensões de carvão Candiota

Estes estudos visaram caracterizar a estabilidade de suspensões de carvão de Candiota na presença de vários ambientes físico-químicos típicos de operações de flotação, com o fim de servir de subsídios para escolher as melhores condições, em termos de seletividade, para execução dos testes de FAD e para melhor compreensão e interpretação dos resultados obtidos nestes testes.

O efeito do pH e dos modificadores, silicato de sódio e hexametáfosfato de sódio, sobre a estabilidade da suspensão é mostrado na Figura 5. Observa-se que na ausência dos modificadores a suspensão é instável na faixa de pH ácida tornando-se estável a partir de pH 7,0. Quando os modificadores foram adicionados houve um aumento da dispersibilidade da suspensão sendo que o efeito foi mais pronunciado com hexametáfosfato de sódio. Medições preliminares de mobilidade eletroforética mostraram valores negativos do potencial eletrocinético na faixa de pH 2,5 - 11,0 aumentando para os valores alcalinos.

Este comportamento correlaciona com o efeito do pH sobre a estabilidade e a ação dos modificadores talvez possa ser atribuída a um aumento da carga superficial das partículas que provoca repulsão eletrostática.

Testou-se o efeito do álcool etílico, do óleo de pinho e do querosene, não mostrando qualquer influência sobre a estabilidade das suspensões. Já o CTAB atuou como desestabilizante para a suspensão a

FIGURA 5 - Efeito do pH, do hexametáfosfato de sódio ($10,0 \text{ kg.t}^{-1}$) e do metassilicato ($10,0 \text{ kg.t}^{-1}$) na estabilidade da suspensão de carvão de Candiota ($-37\mu\text{m}$)

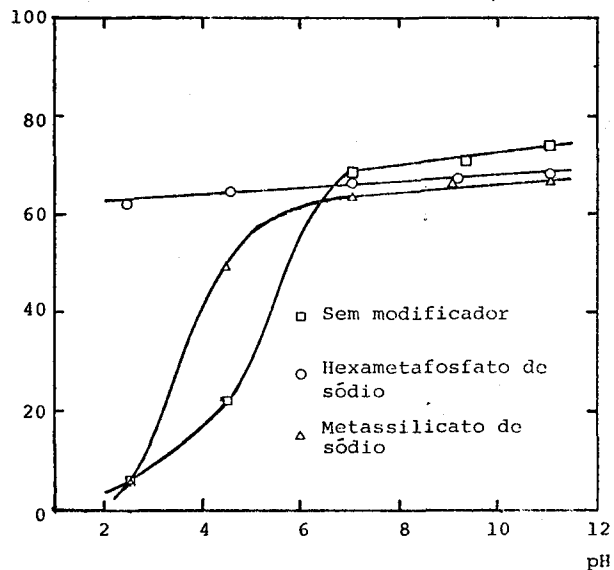
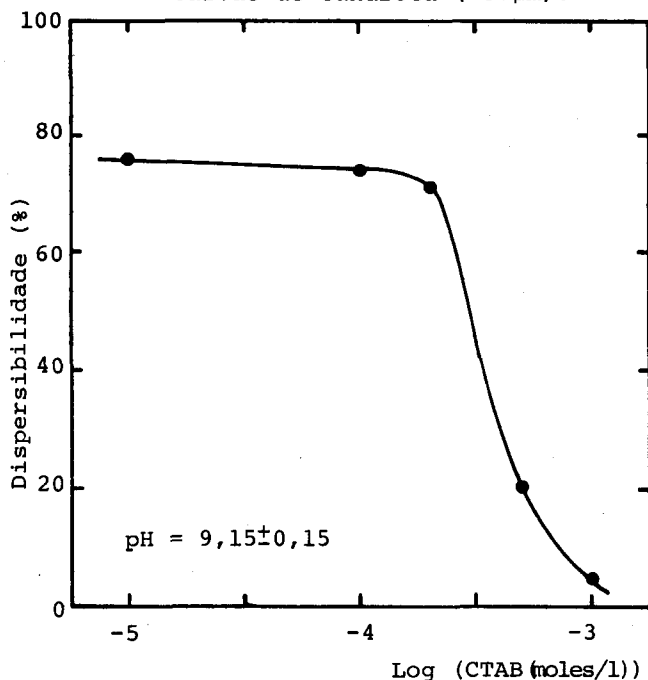


FIGURA 6 - Efeito da concentração do CTAB na estabilidade da suspensão de carvão de Candiota ($-37\mu\text{m}$).



concentrações superiores a 10^{-4} M a pH 9,0 (Figura 6). O fato do querosene não ter desestabilizado a suspensão, provavelmente indica que não há adsorção no carvão. Isto seria consequência de sua baixa hidrofobicidade e da provável existência de uma forte repulsão eletrostática entre gotículas de óleo e superfície carbonácea.

3.3. FAD de carvão de Candiota

Em função dos estudos de estabilidade foi escolhido o pH = 9,0 devido a suspensão se encontrar mais estável. Estudos preliminares de FAD foram realizados usando diferentes concentrações de óleo de pinho e querosene, separadamente, na presença de 1% v/v de álcool etílico. A flutuabilidade do carvão

foi praticamente nula nas condições experimentais utilizadas, o que é significativo das dificuldades registradas na literatura para beneficiar este carvão pelo processo de flotação (1), (7). Estes resultados de FAD correlacionam bem com os estudos de estabilidade mencionados na secção anterior no sentido de que, tanto óleo de pinho como o querosene, não desestabilizam a suspensão de carvão neste valor de pH. Cabem duas hipóteses para explicar a não flutuabilidade do carvão. Nestas condições: (a) uma baixa hidrofobicidade, decorrente do baixo "rank", que não permitiria a adsorção dos coletores que interagem na interface carvão/solução por meio de forças de Van der Waals, e (b) pode existir interferência no processo de colisão partícula/microbolhas devido a interação de repulsão eletrostática gerada pela alta carga superficial das partículas neste valor de pH. Para esclarecer estas hipóteses, estudos mais detalhados estão sendo desenvolvidos que serão relatados oportunamente (8).

4. Conclusões

Os resultados obtidos mostram o potencial da aplicação da FAD para beneficiamento de ultrafinos de carvão (-37 µm) que são atualmente rejeitados nos circuitos convencionais de beneficiamento. Outros autores (5) têm demonstrado que para esta faixa de tamanho a eficiência da FAD é superior a flotação convencional.

Os estudos com Urussanga indicam que a FAD pode produzir um carvão de baixo teor de cinzas (=6,0%) e rendimento da ordem de 60-70% com baixo consumo de querosene, sendo este tipo de concentrado susceptível de ser empregado para processos especiais (liquefação, misturas combustíveis, etc). Demonstram também que a seletividade da FAD é fortemente influenciada pelo grau de liberação da matéria mineral e pela estabilidade da suspensão de carvão, sendo este último fator dependente do controle de parâmetros físico-químicos (pH, tipo e concentração do coletor e modificadores) e das propriedades da interface carvão/solução (carga de superfície e adsorção de coletores e modificadores).

Uma das desvantagens da FAD com relação ao processo convencional de flotação é o acréscimo no custo operacional devido à pressurização de grandes volumes de líquido. Provavelmente isto não deverá constituir-se em um problema, no caso de beneficiamento de partículas finas de minerais, pois a FAD é atualmente um processo competitivo em escala industrial no tratamento de efluentes, não obstante o produto fica flotado não apresentar retorno econômico (9).

A projeção destes resultados indicam que a FAD tem grande possibilidade de ser aplicada como um subprocesso em plantas de beneficiamento de carvão brasileiro, principalmente, na recuperação de partículas ultrafinas de matéria carbonosa contidas nos efluentes dos lavadores de carvão ou de carvoões que apresentam um tamanho de liberação da matéria mineral extremamente fino.

5. Bibliografia

- (1) SAMPAIO, C.H. Caracterização para o beneficiamento do carvão de Candiota, Porto Alegre, UFRGS, 1983. (Tese de Mestrado).
- (2) SOLARI, J.A. & RUBIO, J. Pesquisa em beneficiamento, aspectos ambientais, e utilização de finos de carvão do RS. Carvão, Informação e Pesquisa, 6(17);136-148, Jul./Set. 1983.
- (3) SOLARI, J.A. Avanços recentes no tratamento de efluentes por flotação por ar dissolvido. Eng. Sanitária, 20(3):332-335, 1981.
- (4) GOCHIN, R.J. & SOLARI, J.A. Dissolved air flotation for the recovery of fine cassiterite. Trans. Inst. Min. Metall. (Section C: Min. Process. Ext. Metall.), 92:C52-C58, March. 1983.
- (5) SHIMOIZAKA, I. & MATSUKA, I. Applicability of air dissolved flotation for separation of ultrafine mineral particles. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 14. Toronto, Oct. 1982. Paper IV-11, p.11.1 - 11.15.
- (6) SOLARI, J.A. & RUBIO, J. Treatment of Brazilian coal fines. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS. Toronto, Oct. 1982. Paper VI, p.1-23.
- (7) POSSA, M.V. & SEVERIN, P. Utilização do carvão de Candiota na indústria cimenteira. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 9. Anais ... Rio de Janeiro, CAPES/Fundação Djalma Guimarães, Nov. 1982. v.1.p.49-58.
- (8) GUERRA, E.A. Beneficiamento de ultrafinos de carvão por flotação por ar dissolvido. Porto Alegre, PPGEEMM/UFRGS. (em andamento) (Tese de Mestrado).
- (10) LUNDGREN, H. Theory and practice of dissolved air flotation. Filtration and Separation, 13:24-28, 1976.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq por auxílio concedido para a realização desta pesquisa, ao Departamento de Engenharia de Minas da UFMG pela permissão para utilização do Zetameter e a Ângela Beatriz I. Coelho, estagiária do Laboratório de Metalurgia Extrativa do PPGEEMM, pelas análises imediatas efetuadas.