

DESSULFURAÇÃO DE CONCENTRADO DE FLOTAÇÃO DE FINOS DE CARVÃO

Campos, A. R.¹, Chaves, A. P.².

¹CETEM – Centro de Tecnologia Mineral – Avenida Ipê, 900, 21941-590 Ilha da Cidade Universitária – Rio de Janeiro – RJ – Brasil – acampos@cetem.gov.br

²Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, Departamento de Engenharia de Minas – Av. Prof. Mello Moraes, 2373, 05508-900 – São Paulo – SP - Brasil

RESUMO

A amostra utilizada no presente trabalho consistiu de um concentrado de flotação, que foi coletado no lavador da Carbonífera Criciúma (Unidade Mineira II), localizado no município de Forquilha-SC. A amostra foi caracterizada, visando verificar a distribuição do enxofre nas diferentes frações granulométricas, a liberação da pirita em relação ao carvão e os tipos de associação existentes entre a pirita e o carvão.

Os estudos em mesa Mozley mostraram a existência de pirita de granulometria muito fina na amostra. Os resultados da análise granulométrica mostraram uma ocorrência significativa de enxofre pirítico e enxofre orgânico, em todas as frações granulométricas, com uma concentração maior de enxofre pirítico e enxofre total, nas frações granulométricas finas e ultrafinas, abaixo de 100 malhas (0,147 mm).

Os ensaios na mesa Mozley serviram, também, de balizamento para avaliação dos resultados experimentais a serem obtidos, posteriormente, no MGS (Multi-Gravity Separator). O MGS é um equipamento projetado para a concentração de finos de minerais pesados.

Os estudos de concentração no MGS, visaram a remoção da pirita de granulometria fina e ultrafina existente nos finos de carvão de Santa Catarina e, conseqüentemente, a redução do teor de enxofre nestes finos. Este tipo de equipamento não havia ainda sido testado no beneficiamento de finos de carvão de Santa Catarina.

Os ensaios no MGS foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios, da Escola Politécnica da USP-EPUSP. Para a realização destes ensaios, foi retirada a fração acima de 35 malhas (0,417 mm) do concentrado de flotação recebido. Estes ensaios foram realizados em escala semicontínua.

Os melhores resultados obtidos no MGS foram aqueles em que a polpa de alimentação do MGS continha 25,5% de sólidos. Partindo-se de uma

alimentação com 2,0% de enxofre total e 1,0% de enxofre pirítico, conseguiu-se concentrado de carvão com 1,08% de enxofre total e 0,48% de enxofre pirítico, com recuperação em massa da ordem de 90%, conseguindo-se, portanto, uma depirritização em torno de 50%.

Os estudos realizados no MGS mostraram que este equipamento é eficiente e bastante seletivo na separação pirita-carvão, sendo, portanto, uma opção técnica para dessulfuração de finos de carvão. Este equipamento pode se constituir, por exemplo, em uma etapa de purificação do concentrado de flotação, melhorando a qualidade deste produto para aplicações mais nobres.

INTRODUÇÃO

A separação da pirita de granulometria muito fina em finos de carvão tem sido uma tarefa muito difícil. Na separação por flotação, a pirita normalmente se oxida no meio, adquirindo propriedades hidrofóbicas enérgicas, próximas das do carvão, flotando junto com este. Por outro lado, o intercrescimento intenso da pirita nas partículas de carvão não altera o comportamento dessas partículas na flotação (Yoon et al., 1993a; Yoon et al., 1993b; Yoon et al., 1993c; Luttrell et al., 1993; Luttrell et al., 1994a; Luttrell et al., 1994b; Venkatraman et al., 1995).

Pelos métodos tradicionais de concentração gravítica, a separação da pirita de granulometria muito fina também não é fácil, pois à medida que as partículas vão se tornando muito finas, a densidade que seria a propriedade diferenciadora na separação já não tem mais o efeito esperado (Figueiredo e Chaves, 1998; Fonseca, 1995; Mining Magazine, Gravity Concentration, Março/1999).

Os finos de carvão gerados nos lavadores de carvão de Santa Catarina, são representados pela fração passante na peneira de 0,6 mm, obtida na etapa de desaguamento do concentrado de carvão produzido em jigues tipos Baum, Batac ou Harz, em lavadores

próximos das minas de carvão. Nestes lavadores, estes finos são beneficiados, basicamente, em maior ou menor grau, com a utilização dos seguintes equipamentos: peneiras de 100 malhas (0,147 mm); mesas vibratórias; células de flotação convencionais; espirais concentradoras; e ciclones autógenos.

A redução dos teores de cinzas e enxofre em finos de carvão de Santa Catarina já foi objeto de vários estudos realizados no CETEM, nas décadas de 70 e 80. Estes estudos se basearam mais no processo de flotação, em escalas de bancada e piloto, os quais apresentaram bons resultados em relação à redução do teor de cinzas, porém em relação à redução do teor de enxofre, não foram muito satisfatórios (Campos e Almeida, 1977; Campos, Almeida e Chaves, 1981; Lima, Correia e Campos, 1992).

Apesar da flotação não ter se apresentado, até o momento, como um processo eficiente na redução do teor de enxofre em finos de carvão, é o processo mais utilizado mundialmente no beneficiamento desses finos, tanto para a redução do teor de cinzas, quanto para a redução do teor de enxofre (Mining Magazine - Gravity Concentration - Março, 1994).

A eficiência de separação dos equipamentos tradicionais de concentração gravítica (caso da mesa vibratória, ciclone autógeno e outros), cai bastante, quando a pirita existente nesses finos de carvão se apresenta em granulometrias muito finas, mesmo em se tratando de minerais de densidades bem diferentes, como no caso da pirita e do carvão.

O que se verifica na prática, é que, principalmente a pirita de granulometria muito fina ainda se encontra presente nos concentrados finais de flotação dos finos produzidos nos lavadores de Santa Catarina, contribuindo de forma decisiva para um teor elevado de enxofre que estes produtos normalmente apresentam.

No intuito de tentar superar tecnicamente o problema da remoção dessa pirita, de granulometria muito fina, dos finos de carvão de Santa Catarina, foram realizados, no presente trabalho, estudos para a redução do teor de enxofre nesses finos de carvão, com a utilização do MGS (*Multi-Gravity Separator*), que é um dos tipos de equipamento de concentração centrífuga. Este tipo de equipamento não havia ainda sido testado no beneficiamento de finos de carvão de Santa Catarina.

Nos últimos anos, as atenções têm sido voltadas para o uso dos concentradores centrífugos na concentração de finos de minerais pesados. Em um campo centrífugo de 22 g (aceleração da gravidade), por exemplo, partículas de 2 µm de diâmetro se comportam como se fossem partículas de 45 µm (Silva, Torres e Santos, 1998), tornando viável a separação, por densidade, de

duas espécies minerais de granulometria muito fina, o que seria difícil pelos métodos convencionais de concentração gravítica.

Os concentradores centrífugos tais como MGS, Falcon, jigge centrífugo Kelsey e o concentrador Knelson, vêm sendo muito utilizados em pesquisas de laboratório e na indústria, na concentração de finos de minerais pesados. O concentrador Knelson já é bem conhecido aqui no Brasil nos garimpos de ouro.

O MGS é um dos últimos desenvolvimentos de Richard Mozley; ele incorpora num único equipamento, os princípios de funcionamento de dois outros equipamentos, quais sejam: a mesa vibratória e a centrífuga (Fedotov et al., 1997) citados por Silva et al. (1998).

O equipamento consiste basicamente de um tambor horizontal (Figura 1), ao qual se aplica um movimento de rotação no sentido horário e um movimento de oscilação semelhante ao usado nas mesas vibratórias. Proporcionando um alto movimento de rotação do tambor, em torno do seu eixo, gera um campo centrífugo equivalente de até 22 g (força da gravidade).

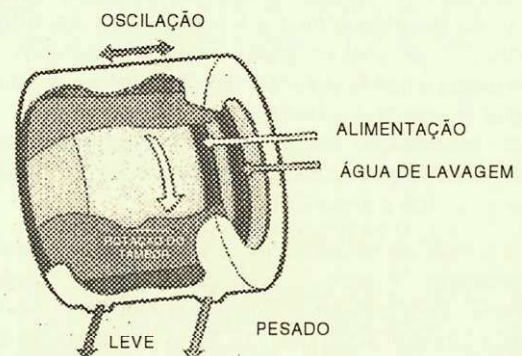


Figura 1 – Diagrama esquemático do MGS, modelo Mozley C902.

Os finos de carvão de Santa Catarina são utilizados, normalmente : como combustível em termelétricas, onde entram com uma participação máxima de 10% da massa de carvão grosso que é fornecida para a Gerasul, na indústria cerâmica e na fabricação de coque de fundição. Esta última aplicação é considerada a mais nobre, porém o teor elevado de enxofre nesses finos é considerado um fator crítico, pois além do impacto ambiental causado no momento da coqueificação, o enxofre que ainda permanece no coque produzido a partir desses finos, vai prejudicar a resistência mecânica do metal que for produzido com a utilização deste coque.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A amostra utilizada no presente trabalho consistiu de um concentrado de flotação, que foi coletado no lavador da Carbonífera Criciúma (Unidade Mineira II), localizado no município de Forquilha – SC.

A amostra recebida foi analisada em termos de teores de enxofre total, pirítico e cinzas, e caracterizada, com vistas à verificar : a distribuição do enxofre nas diferentes frações granulométricas, a liberação da pirita em relação ao carvão e os tipos de associação existentes entre a pirita e o carvão.

Foram realizados ensaios de concentração em mesa Mozley e no MGS. Os ensaios na mesa Mozley mostraram a presença de uma boa quantidade de pirita de granulometria fina na amostra e serviram de balizamento para avaliação dos resultados experimentais a serem obtidos no MGS. Os ensaios no MGS foram realizados no LTM (Laboratório de Tratamento de Minérios), da Escola Politécnica da USP – EPUSP, com o equipamento MGS, modelo C 900, visando a remoção da pirita remanescente no concentrado de flotação da Carbonífera Criciúma. Os ensaios foram realizados em escala semicontínua.

A alimentação do MGS foi constituída da fração –35 malhas (410 μ m) do concentrado de flotação da Unidade Mineira II, da Carbonífera Criciúma, devido a especificações granulométricas de alimentação deste tipo de equipamento.

A preparação da alimentação do MGS, bem como as instalações utilizadas para a realização dos ensaios neste equipamento, são mostradas na Figura 2.

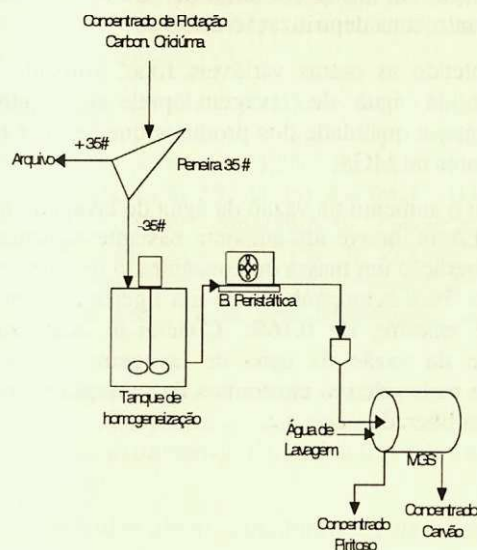


Figura 2 – Fluxograma de preparação da amostra e realização dos os ensaios no MGS.

O circuito utilizado (Figura 2) para a realização dos ensaios no MGS, constou :

- de um tanque de homogeneização, com capacidade para 315 L de polpa, provido com sistema de agitação, à base de hélice, e de bomba vertical para recirculação da polpa para o próprio tanque condicionador;
- de bomba peristáltica para transportar e controlar a alimentação de polpa no MGS, proveniente do tanque de homogeneização;
- bomba d'água para o suprimento da água de lavagem no MGS;
- rotâmetro, com escala de 0 a 10 L/min, para controle da vazão da água de lavagem no MGS; e
- do próprio MGS, que é o equipamento principal.

As variáveis operacionais e de processo estudadas, durante a realização dos ensaios, foram as seguintes:

- Vazão de alimentação de polpa: 2 a 5 L/min;
- Percentagem de sólidos da polpa: 12; 15; 20; 23; 25; e 30%;
- Velocidade de rotação do tambor: 150; 200; 220; e 240 rpm;
- Inclinação do tambor: 4,5; 5; e 6°; e
- Vazão de água de lavagem: 1; 1,5; 2; e 2,5 L/min.

A oscilação do tambor foi mantida constante, em 4,8 cps (ciclos por segundo), durante a realização dos ensaios.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os resultados da análise granulométrica do concentrado de flotação dos finos de carvão da Carbonífera Criciúma, com os teores de enxofre total, pirítico e orgânico, por fração granulométrica.

Tabela 1 – Distribuição granulométrica e teor de enxofre da fração -35 malhas, do concentrado de flotação de finos de carvão da Carbonífera Criciúma.

Peneiras Malha Tyler	Abertura mm	Retido %	S _{TOTAL} %	S _{PIRÍTICO} %	S _{ORG.} %
35	0,417	1,9	1,64	0,72	0,90
48	0,295	8,1	1,38	0,52	0,85
65	0,208	3,1	1,42	0,55	0,85
100	0,147	15,5	1,67	0,74	0,92
150	0,104	10,8	1,92	0,95	0,96
200	0,074	9,1	2,73	1,86	0,85
270	0,053	7,6	3,12	1,97	1,13
325	0,044	3,3	2,80	1,87	0,90
400	0,037	3,1	3,34	2,32	1,00
-400	—	27,5	2,09	1,24	0,84
Alim. Calc.	—	100,0	2,05	1,08	0,90
Alim. Anal.	—	—	1,91	0,96	—

A amostra enviada pela Carbonífera Criciúma foi analisada em termos de teores de enxofre e de cinzas, apresentando os seguintes resultados : enxofre total 2,0%; enxofre pirítico 1,12%; enxofre orgânico 0,82%; e cinzas 25,1%.

A Tabela 1 mostra a ocorrência significativa de enxofre pirítico e enxofre orgânico, em todas as frações granulométricas. Mostra, ainda, que os teores de enxofre total e pirítico aumentam consideravelmente nas frações abaixo de 100 malhas (0,147 mm). Os teores de enxofre total nesta faixa granulométrica se apresentam com valores, praticamente entre 2,0 e 3,3%, enquanto que os teores de enxofre pirítico variam nesta mesma faixa granulométrica, entre 0,95 e 2,3%.

Um fato que chamou atenção, foi o teor relativamente elevado de enxofre orgânico em todas as frações granulométricas.

Estes altos teores de enxofre total e pirítico nas frações finas e ultra finas do concentrado de flotação da Carbonífera Criciúma, comprovam que os processos de concentração (ciclone autógeno e flotação), aos quais foram submetidos anteriormente esses finos, não são eficientes na remoção da pirita, principalmente quando esta se apresenta em granulometrias muito finas.

Os resultados dos ensaios realizados em mesa Mozley mostraram que seria possível, por métodos de concentração gravítica, conseguir uma depirritização em torno de 50%, ou seja, o teor de enxofre pirítico nos finos de carvão passaria de 1,12 para 0,53%. O teor de

enxofre total no concentrado de carvão deveria ser em torno de 1,3%, com uma recuperação mássica da ordem de 85%.

Como será visto posteriormente, os resultados alcançados nos ensaios de concentração realizados no MGS foram ligeiramente superiores aos acima mencionados. Isto é o que se esperava, por se tratar de um equipamento centrífugo, onde a eficiência de separação teria que ser realmente melhor. Os resultados alcançados em ensaios realizados na mesa Mozley são melhores do que aqueles, normalmente obtidos em equipamentos tradicionais de concentração gravítica.

De todos os ensaios realizados no MGS, em diferentes condições operacionais e de processo, os melhores resultados foram os obtidos nas seguintes condições :

- 25,5% de sólidos na polpa de alimentação;
- água de lavagem na faixa de 60 a 180 L/h;
- vazão de alimentação de polpa de 180 L/h;
- ângulo de inclinação do tambor de 5°;
- oscilação do tambor : 4,8 cps; e
- velocidade de rotação do tambor: 240 rpm.

Os melhores resultados obtidos com a polpa de alimentação do MGS contendo 25,5% de sólidos, podem vistos na Tabela 2.

Verifica-se, pela Tabela 2, que o concentrado de carvão obtido apresenta teor de enxofre total em torno de 1,1%, enxofre pirítico da ordem de 0,5% e recuperação em massa em torno de 90%, conseguindo-se, portanto, uma depirritização de 50%.

Mantendo as outras variáveis fixas, somente pelo controle da água de lavagem, pode-se, controlar, facilmente, a qualidade dos produtos que se quer obter nos ensaios no MGS.

Com o aumento da vazão da água de lavagem de 1,3 para 3 L/min, houve um aumento bastante significativo na recuperação em massa do concentrado de carvão (em torno de 5%), acompanhado de um ligeiro aumento do teor de enxofre, de 0,16%. Conclui-se, que com o aumento da vazão da água de lavagem, o processo torna-se mais seletivo em termos da remoção da pirita, na forma liberada.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios realizados no MGS, com alimentação contendo 25,5% de sólidos.

MGS (25,5% SÓLIDOS)							
Água de lavagem (L/min)		Concentrado de Carvão			Concentrado Pirítico		
Rotâmetro	Medida Direta	PESO (%)	S _T (%)	S _P (%)	PESO (%)	S _T (%)	S _P (%)
1,0	1,32	88,5	1,08	0,48	11,5	8,4	7,4
1,5	1,67	91,0	1,12	0,58	9,0	10,0	9,0
2,0	2,0	93,1	1,25	0,64	6,9	11,7	10,0
2,5	3,0	93,4	1,24	0,67	6,6	15,3	13,6

S_T – Enxofre total; S_P – Enxofre pirítico.

Alimentação analisada: S_T = 1,96%; S_P = 0,96%

CONCLUSÕES

O enxofre na forma pirítica se encontra distribuído por todas as frações granulométricas do concentrado de flotação da Carbonífera Criciúma, sendo que nas frações abaixo de 150 malhas (0,104 mm), há um aumento significativo do teor de enxofre pirítico, passando de 0,95% para a faixa de 1,86 a 2,32%.

O teor de enxofre orgânico apresentou-se bastante alto em todas as frações granulométricas, mantendo-se entre 0,85 e 1 %. A média do teor de enxofre orgânico na amostra foi de 0,9%.

Os resultados obtidos na mesa Mozley serviram para um bom balizamento para avaliação dos resultados a serem obtidos nos ensaios realizados no MGS. Os resultados obtidos na mesa Mozley e no MGS foram bem próximos, sendo melhores os alcançados no MGS, que era o esperado.

- Os melhores resultados no MGS foram obtidos com vazão de polpa de 193 kg/h e percentagem de sólidos na polpa de 25,5%. Partindo-se de uma alimentação com 2% de enxofre total e 0,96% de enxofre pirítico, conseguiu-se concentrado de carvão com cerca de 1,1% de enxofre total e recuperação em massa da ordem de 90%, conseguindo-se, assim, uma depirritização da ordem de 50%.

A realização do presente trabalho, permitiu desenvolver um processo de remoção de pirita de granulometria extremamente fina dos finos de carvão de Santa Catarina.

Os resultados abrem possibilidades de alternativas de beneficiamento para os finos de carvão de Santa Catarina, combinando processos gravíticos

convencionais, flotação e o MGS (Multi-Gravity Separator).

Desta forma, poderão ser testadas as seguintes alternativas de circuitos de beneficiamento para esses finos de carvão:

- 1) Alimentação finos (-28 #) → Mesa vibratória → Flotação → MGS → Conc. final carvão.
- 2) Alimentação Finos → Peneira 65 # → (+)65 # → Mesa vibratória → Flotação → Conc. grosso carvão (-) 65 # → Flotação → MGS → Conc. fino carvão.
- 3) Alimentação finos → Ciclone autógeno → overflow → Flotação → MGS → Conc. Carvão
- 4) Alimentação finos → Mesa vibratória → Flotação → Conc. carvão → Peneira 100 # → (+) 100 # → Concentrado grosso de carvão. (-)100 # → MGS → Conc. fino de carvão.

Nestas alternativas de circuitos de beneficiamento, a mesa vibratória ou o ciclone autógeno separa a pirita de granulometria mais grossa; a flotação remove os minerais formadores das cinzas; e o MGS remove a pirita de granulometria extremamente fina, a qual não seria removida pelas operações unitárias já citadas.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela concessão de uma bolsa PCI (Programa de Capacitação Institucional), para a realização dos ensaios no MGS, no Departamento de Engenharia de Minas, da Escola politécnica da USP-EPUSP.

Ao geol. Carlos Schneider e sua equipe da Unidade Mineira II, da Carbonífera Criciúma S.A. pelo apoio durante o período da amostragem dos finos de carvão e envio da amostra coletada ao LTM/EPUSP, em São Paulo.

Ao Dr. Eldon Azevedo Masini, do Departamento de Engenharia de Minas, da EPUSP, pela disponibilização do LTM (Laboratório de Tratamento de Minérios e Materiais) e apoio durante a realização dos ensaios no MGS.

Ao Prof. Dr. Yoon, do CCMP, da Universidade do Estado da Virgínia, pelo envio de artigos de pesquisa, envolvendo o MGS (Multi - Gravity Separator).

Ao Dr. Adão Benvindo da Luz, do CETEM, pela ajuda na intermediação com o Prof. Yoon, na aquisição da bibliografia citada.

REFERÊNCIAS

- Almeida, S.L.M., Campos, A. R. e Chaves, A. P. Estudo de rebitagem do carvão vapor. Rio de Janeiro, CETEM/MME (1983).
- Campos, A. R., Almeida, S. L. M. e Santos, A. T. Estudo tecnológico dos carvões do Brasil. Rio de Janeiro, CETEM/MME (1977).
- Figueiredo, P. C. e Chaves, A. P. Recuperação de partículas minerais finas e ultrafinas no âmbito da concentração gravítica. In : 17^o Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa e 1^o Seminário de Química e Colóides aplicada à Tecnologia Mineral, Águas de São Pedro – S P, 483 – 492 (1998).
- Fonseca, A. G. Challenges of coal preparation. In : Mining Engineering, vol. 47, nº 9, 828 – 834 (1995).
- Lima, R. M. F., Correia, J. C. G. e Campos, A. R. Flotação em coluna de finos de carvão. In : 3^o Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral e 15^o Encontro Nacional de Tratamento de Minérios, São Lourenço – MG, 389 – 402 (1992).
- Luttrell, G. H., Mankosa, M. J. and Yoon, R. –H. Combining advanced flotation and centrifugal gravity separation for improved sulfur rejection. In : Proceedings of the 10th Annual Coal Preparation Exhibition and Conference, 73 – 81 (1993).
- Luttrell, G. H., Venkatraman, P. and Yoon, R. –H. Development of a combined flotation/gravity separation circuit for the fine coal cleaning. In : Proceedings of the 12th International Coal Preparation Congress, Krakov, Poland 335 – 43 (1994a).
- Luttrell, G. H., Venkatraman, P. and Yoon, R. –H. Combining flotation and enhanced gravity separation for improved ash and sulfur rejection. In : Proceedings for the Eleventh Annual International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, 1273 – 1278 (1994b).
- Mining Magazine. Gravity concentration, 136 – 148 (March 1999).
- Silva, E. C. , Torres, V. M. e Santos, N. A. Concentradores centrífugos – Uma nova era na concentração gravítica. In : 17^o Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e 1^o Seminário de Química de Colóides aplicada à Tecnologia Mineral, Águas de São Pedro – SP, 533 – 551 (1998).
- Venkatraman, P., Luttrell, G. H. and Yoon, R. –H. Fine coal cleaning using multi – gravity separator. In : SME Annual Meeting and Exhibit – High Efficiency Coal Preparation Conference, Denver, Colorado, 109 – 117 (1995).
- Yoon, R. –H., Luttrell, G. H. and Mankosa, M. J. Bench – scale testing of the multi – gravity separator in combination with microcel. In : Proceedings of Ninth Annual Coal Preparation, Utilization and Environmental Control Contractors Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, 23 – 30 (1993a).
- Yoon, R. –H., Luttrell, G. H., Adel, G. T. and Richardson, P. E. Development of enhanced sulfur rejection process. In : Proceedings of Ninth Annual Coal Preparation, Utilization and Environmental Control Contractors Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, 112 – 119 (1993b).
- Yoon, R. –H., Luttrell, G. H. and Mankosa, M. J. A method of improving sulfur rejection by combining flotation and fine gravity separation. : Proceedings of the 5th International Energy Conference, Seul, Korea, 1 – 9 (1993c).

VI SOUTHERN HEMISPHERE MEETING ON MINERAL TECHNOLOGY



3
VOLUME

XVIII ENCONTRO
NACIONAL DE
TRATAMENTO DE
MINÉRIOS E
METALURGIA
EXTRATIVA



Rio de Janeiro, May 2001
CETEM • PUC-RIO • UFRJ