



**Centro de Tecnologia Mineral**  
**Ministério da Ciência e Tecnologia**  
**Coordenação de Inovação Tecnológica - CTEC**

**DESSULFURAÇÃO DE FINOS DE CARVÃO POR  
CONCENTRADOR CENTRÍFUGO**

Antônio Rodrigues de Campos  
Engº. Metalurgista, D.Sc.  
Arthur Pinto Chaves

**Rio de Janeiro**  
**Dezembro / 2002**

**CT2002-084-00 Comunicação Técnica elaborado para o XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa em Recife – Pernambuco, no período 26 a 29 de novembro de 2002.**

## **DESSULFURAÇÃO DE FINOS DE CARVÃO POR CONCENTRADOR CENTRÍFUGO**

A. R. de Campos<sup>1</sup>, A. P. Chaves<sup>2</sup>

1 - CETEM - Centro de Tecnologia Mineral - Avenida Ipê, 900, 21941-590 Ilha da Cidade Universitária - Rio de Janeiro – RJ

E-mail: [acampos@cetem.gov.br](mailto:acampos@cetem.gov.br)

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

E-mail: [apchaves@usp.br](mailto:apchaves@usp.br)

### **RESUMO**

A amostra utilizada no presente trabalho foi coletada no Lavador da Cooperminas, município de Criciúma. Os finos de carvão, neste Lavador, são representados pela fração passante na peneira de 0,6 mm, utilizada na etapa de desaguamento do carvão grosso produzido em jigue tipo Batac.

A amostra foi caracterizada, com vistas a verificar a distribuição do enxofre nas diferentes frações granulométricas, a liberação da pirita em relação ao carvão e os tipos de associações pirita/carvão existentes na amostra.

Nos últimos anos, as atenções têm sido voltadas para o uso dos concentradores centrífugos na concentração de finos de minerais pesados devido à eficiência que estes equipamentos têm demonstrado neste tipo de concentração.

O concentrador Knelson foi um dos tipos de concentradores centrífugos, usado pelo CETEM, no intuito de tentar superar tecnicamente o problema da remoção da pirita de granulometria muito fina dos finos de carvão de Santa Catarina. A mesa Mozley e a mesa vibratória foram utilizadas como equipamentos auxiliares neste trabalho.

Uma análise granulo-química mostrou que 60,8% do enxofre pirítico contido na amostra está entre as frações 65 e 400 malhas (0,147 e 0,037 mm)

Os melhores resultados obtidos no concentrador Knelson foram aqueles em que a polpa de alimentação continha 20 a 25% de sólidos e pressões de 4 a 12 psi. Partindo-se de uma alimentação contendo 1,83% de enxofre total, conseguiu-se concentrado de carvão variando entre 1,15 e 1,30% de enxofre total, com recuperação total em massa da ordem de 80%; conseguindo-se, portanto, uma dessulfuração total da ordem de 40%, no conjunto mesa vibratória e concentrador Knelson.

A remoção da pirita contida em finos de carvão por meio de concentradores centrífugos, além da eficiência do processo, tem a vantagem de não ser poluente, em comparação com os outros métodos de concentração de finos.

**PALAVRAS-CHAVE:** carvão, dessulfuração, pirita, concentrador centrífugo, enxofre pirítico.

## 1. INTRODUÇÃO

Um tipo de contaminante muito comum e muito prejudicial à qualidade dos carvões é o enxofre. A maior parte do enxofre contido nos carvões normalmente provém da pirita, a qual vem associada aos mesmos, dando origem ao chamado enxofre pirítico. Outras formas de enxofre também são encontradas no carvão, como o enxofre orgânico e o sulfático. Destas formas de enxofre, a que normalmente é considerada nos processos de concentração, para efeito de diminuição de teor de enxofre nos carvões, é o enxofre na forma pirítica.

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 et al., 1981; Lima et al., 1992).

A separação de pirita em finos de carvão, por flotação, portanto, tem sido uma tarefa muito difícil; isto porque a pirita oxidada tem propriedades hidrofóbicas enérgicas, próximas das do carvão. Além disso, 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).

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 (Fonseca, 1995).

Por outro lado, 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. Isto acontece porque, 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, Março/1999).

Devido a esses problemas, nos últimos anos, as atenções têm sido voltadas para o uso dos concentradores centrífugos na concentração de finos de minerais pesados devido à eficiência que estes equipamentos têm demonstrado neste tipo de separação. 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 et al., 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, jigue centrífugo Kelsey e o concentrador Knelson, vêm sendo muito utilizados em pesquisas de laboratório e na indústria, na concentração de finos de minerais pesados.

Daí surgiu a idéia de verificar a possibilidade do uso de concentradores centrífugos na separação na separação pirita - carvão, nos finos de carvão de Santa Catarina.

Neste trabalho, estão relatados os resultados alcançados nos estudos realizados com o concentrador Knelson. Este equipamento foi desenvolvido em 1982 pelo engenheiro Byron Knelson. Até chegar ao estágio atual de desenvolvimento ele passou por diversas fases de aperfeiçoamento. Ele já é bem conhecido aqui no Brasil nos garimpos de ouro.

Este tipo de concentrador é usado, preferencialmente, para minérios com teor do mineral de interesse na ordem de ppm (partes por milhão) (Lins et al., 1992).

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, Harz ou Batac, em lavadores localizados 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 28 e 100 malhas (0,59 e 0,147 mm); mesas vibratórias; células de flotação convencionais; espirais concentradoras; e ciclones autógenos.

Os finos de carvão de Santa Catarina são utilizados, normalmente: como combustível em termoelétricas, 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 permanecer no coque produzido a partir desses finos, vai prejudicar a resistência mecânica do metal que for produzido com a utilização deste coque.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No caso deste trabalho, a amostra de finos de carvão foi coletada no Lavador da Cooperminas, município de Criciúma, sendo esta constituída do material passante na peneira desaguadora do concentrado de carvão grosso obtido no jigue Batac.

A amostra foi caracterizada, com vistas a verificar: a distribuição do enxofre nas diferentes frações granulométricas, a liberação da pirita em relação ao carvão e os tipos de associações existentes entre a pirita e o carvão.

No desenvolvimento dos estudos de separação pirita - carvão, além do concentrador centrífugo Knelson, foram ainda utilizadas a mesa Mozley e a mesa vibratória como equipamentos auxiliares.

Os ensaios na mesa Mozley serviram de balizamento para avaliação dos resultados experimentais a serem obtidos na mesa vibratória e no concentrador Knelson. Os ensaios na mesa vibratória foram realizados para a retirada da pirita de granulometria mais grosseira. A alimentação da mesa vibratória foi sempre constituída de material tal qual foi coletado no Lavador da Cooperminas, ou seja nominalmente abaixo de 28 malhas (0,59 mm).

Os ensaios no concentrador Knelson foram realizados com o objetivo de remover a pirita de granulometria fina e ultrafina nos concentrados de finos de carvão obtidos nos ensaios na mesa vibratória, tendo em vista que, tanto na mesa vibratória quanto em outros equipamentos de concentração gravítica, convencionais, não é possível separar a pirita que se apresenta em granulometria muito fina.

O equipamento consiste de uma cesta cônica perfurada, constituída de uma série de anéis ou septos horizontais, colocados, internamente, a igual distância um do outro, ao longo da parede da cesta, que gira em alta velocidade. Estes anéis ou ranhuras têm a finalidade de reter as partículas de minerais pesados. Os minerais leves, que não ficaram retidos nos anéis na cesta, saem pela parte superior da mesma e são descarregados. A figura 1 mostra o princípio de funcionamento do concentrador centrífugo Knelson, e a figura 2 mostra o efeito da água de contrapressão no funcionamento do mesmo.

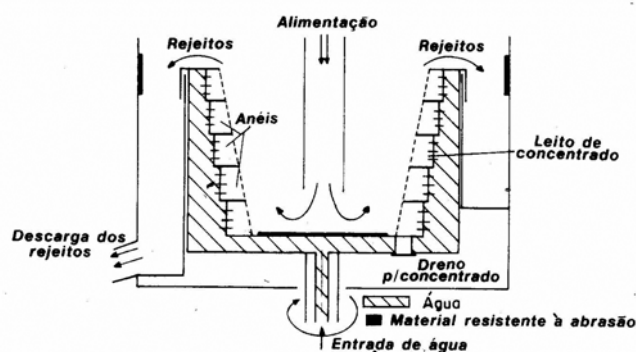
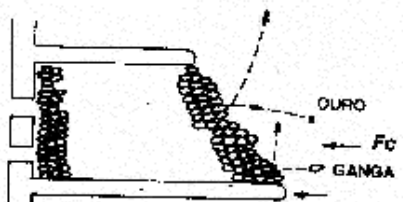


FIGURA 1 – Diagrama esquemático de funcionamento do concentrador Knelson.

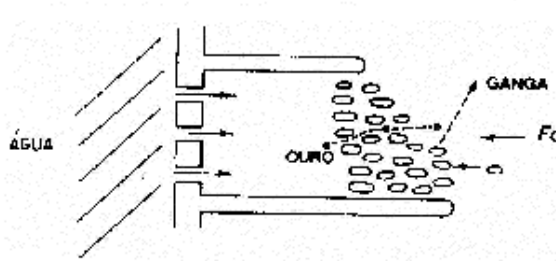
#### (A) Leito Não Fluidizado

Ausência de água de contrapressão



#### (B) Leito Fluidizado

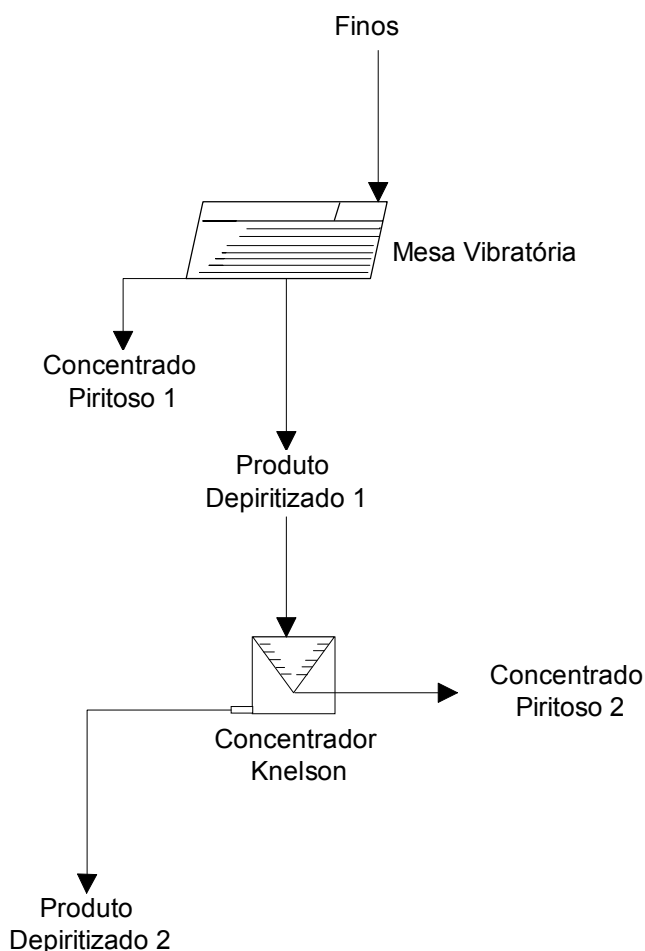
Com água de contrapressão



$F_c = \text{Força Centrífuga}$

FIGURA 2 – Efeito da água de contrapressão no funcionamento do concentrador Knelson.

A preparação da alimentação do concentrador centrífugo Knelson, bem como o esquema de realização dos ensaios neste equipamento, podem ser melhor visualizados no fluxograma da figura 3.



**FIGURA 3** – Esquema usado para a separação pirita – carvão no concentrador centrífugo Knelson

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

- Granulometria de alimentação;
- Vazão de alimentação de polpa;
- Percentagem de sólidos na polpa de alimentação da centrífuga;
- Pressão da água de contrapressão ou de fluidização.

A rotação da centrífuga foi mantida constante durante a realização de todos os ensaios.

As variáveis que se mostraram de maior efeito nos ensaios realizados foram a percentagem de sólidos na polpa, a pressão da água de contrapressão e o tempo de duração do ensaio.

As percentagens de sólidos na polpa de alimentação foram variadas na faixa 10 a 30%; e as pressões de água de contrapressão foram variadas na faixa de 4 a 12 psi (libra/polegada<sup>2</sup>).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Análise granuloquímica

A Tabela I mostra o resultado da análise granuloquímica realizada nos finos de carvão da Cooperminas, contendo a distribuição em peso das frações granulométricas, bem como os teores de enxofre total e pirítico nestas frações.

**Tabela I** - Distribuição granulométrica e teor de enxofre dos finos de carvão da Cooperminas.

Peneiras Malhas Tyler	Aberturas (mm)	Retido (%)	S <sub>TOTAL</sub> (%)	S <sub>PIRÍTICO</sub> (%)	Cinzas (%)	Acum. %	% Distribuição/ Fração	
							S <sub>TOTAL</sub>	S <sub>PIRÍTICO</sub>
28	0,589	7,92	1,1	0,59	32,2	7,92	4,7	4,1
35	0,417	7,38	1,4	0,65	46,41	15,30	5,6	4,2
48	0,295	6,21	1,7	0,77	34,71	21,51	5,7	4,2
65	0,208	9,05	2,2	1,08	39,8	30,56	10,9	8,5
100	0,147	9,03	2,4	1,37	42,46	39,59	11,8	10,8
150	0,104	5,50	2,8	1,88	47,48	45,09	8,4	9,1
200	0,074	5,18	3,3	1,96	51,38	50,27	9,4	8,9
270	0,053	5,82	3,4	2,25	56,64	56,09	10,8	11,5
325	0,044	3,83	3,0	2,15	61,32	59,92	6,3	7,2
400	0,037	3,30	2,4	1,67	70,04	63,22	4,3	4,8
-400	-0,037	36,78	1,1	0,83	72,83	100,00	22,1	26,7
Am. Calc.	-	100,00	1,83	1,14	55,58	—	100,0	100,0

Na tabela I observa-se que, à medida que diminui a granulometria, aumentam os teores de enxofre das frações. Verifica-se que o teor de enxofre pirítico é bem mais elevado nas frações granulométricas entre 0,147 e 0,037 mm (100 e 400 malhas), respectivamente, variando entre 1,37 e 2,25%. Os teores de enxofre total nesta faixa granulométrica variam entre 2,4 e 3,4%. Esta faixa granulométrica representa 32,66 % da massa total da amostra; e nela os métodos tradicionais de concentração gravítica já não mais respondem com a eficiência desejada. Observa-se também, nesta tabela, um teor muito elevado de cinzas distribuído por todas as frações granulométricas da amostra. Porém, abaixo de 400 malhas, este teor de cinzas chega a ser superior a 72%. A massa de material correspondente a esta faixa granulométrica é de cerca de 37% do total da amostra.

### 3.2. Mesa Mozley

Os resultados dos ensaios realizados em mesa Mozley com os finos de carvão da Cooperminas mostraram que seria possível a obtenção de um produto com 0,5% de enxofre pirítico, através de métodos de concentração gravítica, com uma recuperação em massa de aproximadamente 80%, e que pode-se conseguir uma depirritização na amostra de até de 50%.

### 3.3. Mesa vibratória

Os ensaios em mesa vibratória, tal como já foi mencionado, tiveram por finalidade remover a maior quantidade possível de pirita existente nos finos de carvão, principalmente a de granulometria mais grossa, visando preparar a amostra para os ensaios no concentrador centrífugo Knelson, que devido às suas características, é indicado para tratar somente partículas finas com baixo teor do mineral pesado; no caso, a pirita. A cesta onde se concentram os minerais pesados é de volume relativamente pequeno, e por isto, enche-se rapidamente.

Os ensaios em mesa vibratória apresentaram um percentual de redução de enxofre total da ordem de 15%, passando de um teor de 1,83% na alimentação para um teor de cerca de 1,6% no produto depirritizado, com uma recuperação em massa da ordem de 90%. Este produto, em média, com 1,6% de enxofre total e 1,34% de enxofre pirítico, constituiu a alimentação do concentrador centrífugo Knelson, nos ensaios realizados no mesmo.

### 3.4. Concentrador centrífugo Knelson

A preparação da alimentação do concentrador centrífugo Knelson, na mesa vibratória, visando a retirada da pirita de granulometria mais grossa teve dois motivos: 1) possibilitar a realização dos ensaios de depirritização dos finos de carvão na centrífuga Knelson e 2) porque a pirita que saísse na mesa vibratória não deveria ser retirada no Knelson, pois a separação na mesa vibratória é mais simples e menos dispendiosa do que na centrífuga Knelson, além de ser um equipamento muito fácil de ser operado.

Os melhores resultados obtidos nos ensaios realizados no concentrador Knelson, são mostrados nas tabelas II e III.

**Tabela II** – Resultados de ensaios no concentrador Knelson com 20% de sólidos

KNELSON (20% SÓLIDOS)					
P (psi)	Duração Ensaio (seg)	Conc. carvão (leve)		Rejeito piritoso (pesado)	
		% Peso	% S <sub>T</sub>	% Peso	% S <sub>T</sub>
4	120	94,0	1,35	6,0	4,09
4	120	88,2	1,15	11,8	2,87
12	34,1	89,9	1,31	10,1	3,11

**Tabela III** – Resultados de ensaios no concentrador Knelson com 25% de sólidos

KNELSON (25% SÓLIDOS)					
P (psi)	Duração Ensaio (seg)	Conc. carvão (leve)		Rejeito piritoso (pesado)	
		% Peso	% S <sub>T</sub>	% Peso	% S <sub>T</sub>
8	15,5	78,6	1,28	21,4	2,30
12	26,8	80,6	1,33	19,4	2,98

Como se pode ver pelas tabelas II e III, os melhores resultados alcançados nos ensaios realizados com os finos de carvão no concentrador centrífugo Knelson foram com as pressões de água de contrapressão variando de 4 a 12 psi e com as percentagens de sólidos na alimentação de 20 e 25%.

Conseguiu-se, nestas condições, concentrados com teores de enxofre total variando entre 1,15 e 1,35%, com recuperações em massa variando entre 88 e 94%, em relação à alimentação da centrífuga.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados da caracterização mostraram que as percentagens de enxofre total e enxofre pirítico aumentavam bastante nas granulometrias mais baixas, e principalmente na faixa granulométrica entre as peneiras de 100 e 400 malhas 0,147 e 0,037 mm, respectivamente.

Os ensaios realizados na mesa Mozley foram muito importantes no que diz respeito aos resultados que poderiam ser alcançados nos ensaios subsequentes.

Os resultados dos estudos realizados mostraram que, tanto com o concentrador centrífugo Knelson, como o MGS (Multi-Gravity Separator) são efetivos na remoção da pirita fina, em finos de carvão.

Com um melhor controle da alimentação da centrífuga Knelson, acredita-se ser possível obter resultados ainda melhores em termos de depirritização da amostra, sem muita, ou nenhuma perda da recuperação em massa.

Os resultados obtidos na mesa Mozley serviram para um bom balizamento para avaliação dos resultados a serem obtidos nos ensaios realizados na mesa vibratória e no concentrador centrífugo Knelson.

Os melhores resultados obtidos no concentrador Knelson, foram aqueles em que a polpa de alimentação continha 20 e 25% de sólidos e a pressão da água de fluidização do leito entre 4 e 12 psi.

Os ensaios de depirritização de finos de carvão em concentrador centrífugo mostraram que esta técnica pode ser uma alternativa viável de remoção da 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 concentradores centrífugos.

Poderão ser testadas as seguintes alternativas de circuitos de beneficiamento para os finos de carvão:

1) Alimentação finos (-28 #) → mesa vibratória → flotação → centrífuga Knelson → concentrado de carvão.

2) Alimentação finos → peneira 100 # →

(+) 100 # → mesa vibratória → flotação → concentrado grosso de carvão

(-) 100 # → flotação → centrífuga Knelson → concentrado fino de carvão.

3) Alimentação finos → ciclone autógeno → *overflow* → flotação → centrífuga Knelson → concentrado de carvão.

4) Alimentação finos → Mesa vibratória → Flotação → concentrado de carvão → Peneira 100 # →  
 (+) 100 # → concentrado grosso de carvão.  
 (-) 100 # Centrífuga Knelson → concentrado fino de carvão.

## 5. REFERÊNCIAS

- Campos, A. R., Almeida, S. L. M. e Santos, A. T. Estudo tecnológico dos carvões do Brasil. Rio de Janeiro, CETEM/MME 124 p.(1977).
- Campos, A. R.; Almeida, S. L. M. Flotação de carvão de Santa Catarina em escala de bancada e piloto. In 8<sup>o</sup> Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, Porto Alegre, RS, p. 77 – 92 (1981).
- Figueiredo, P. C. e Chaves, A. P. Recuperação de partículas minerais finas e ultrafinas no âmbito da concentração gravítica. In : 17o Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa e 1o Seminário de Química e Colóides aplicada à Tecnologia Mineral, Águas de São Pedro - S P, p. 483 - 492 (1998).
- Fonseca, A. G. Challenges of coal preparation. In : Mining Engineering, vol. 47, no 9, p. 828 - 834 (1995).
- Lins, F. F.; Costa, L. S. N.; Delgado, O. C.; Gutierrez, J. M. A. Concentrador centrífugo: Revisão e aplicações potenciais. Série de Tecnologia Mineral, n. 55. Rio de Janeiro, CETEM/CNPq, 32 p., 1992.
- Lima, R. M. F., Correia, J. C. G. e Campos, A. R. Flotação em coluna de finos de carvão. In : 3o Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral e 15o Encontro Nacional de Tratamento de Minérios, São Lourenço - MG, p. 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, p. 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, p. 335 - 343 (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, p. 1273 - 1278 (1994b).
- Gravity concentration. In : Mining Magazine, p. 136 - 148 (March 1999).
- Silva, E. C. , Torres, V. M. e Santos, N. A. Concentradores centrífugos - Uma nova era na concentração gravítica. In : 17o Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e 1o Seminário de Química de Colóides aplicada à Tecnologia Mineral, Águas de São Pedro - SP, p 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, p. 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, p. 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, p. 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, Seoul, Korea, p. 1 - 9 (1993c).

Gildo de Araújo Sá C. de Albuquerque

Diretor

Fernando Freitas Lins

Chefe da Coordenação de Inovação Tecnológica

Adão Benvindo da Luz

Chefe do Serviço de Processamento Mineral