

## DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE EQUIPAMENTO PARA CONCENTRAÇÃO DE MINERAIS BASEADO EM PROPRIEDADES ÓPTICAS

*Marcus Vinicius Pelais Benoti e Homero Delboni Junior*

Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP -  
marcus.benoti@poli.usp.br e hdelboni@usp.br

### RESUMO

O trabalho descreve a concepção, o projeto e a construção de um equipamento protótipo de separação de minerais (*ore sorting*) com base em propriedades ópticas. O projeto eletro-mecânico envolveu o desenvolvimento de circuitos e dispositivos especialmente dedicados às fases de detecção e de separação, tendo por base componentes de baixo custo. O protótipo foi empregado em uma série de ensaios exploratórios, sendo acompanhados de adaptações e ajustes de forma a permitir adaptá-lo às operações específicas. O equipamento revelou excelente seletividade na separação entre fragmentos de carbonatito e jacupiranguito, respectivamente minério e estéril da jazida de fosfato da Serrana, localizada em Cajati, SP. O potencial de aplicação do equipamento é bastante grande em função da diminuição da diluição do minério e, consequentemente, do aumento de produção do circuito industrial de processamento de minério da empresa. O trabalho inclui a descrição detalhada da campanha de ensaios de laboratório executada, bem como a análise estatística dos resultados obtidos. A seletividade do processo é discutida em função da relação estéril/minério resultante dos ensaios. Os benefícios potenciais do método são avaliados, bem como sua aplicabilidade ao circuito da Serrana. Outras aplicações potenciais são também discutidas, uma vez que os circuitos de detecção instalados conferem ao equipamento flexibilidade relativamente ampla de operação. Trata-se portanto de um desenvolvimento relevante em função da sua aplicação a minérios brasileiros.

### INTRODUÇÃO

Métodos de concentração de minerais são baseados no aproveitamento de propriedades que diferencie as espécies presentes. Os principais métodos atualmente empregados em circuitos industriais de concentração de minerais, baseiam-se em propriedades físicas e/ou físico-químicas de superfície de uma ampla gama de minerais úteis e de ganga.

Embora usinas industriais utilizem circuitos sofisticados e equipamentos de grande capacidade, os principais métodos de concentração permanecem essencialmente os mesmos por séculos, exceção feita à flotação de minerais.

Esses métodos foram desenvolvidos a partir de respostas que fragmentos de minerais apresentavam ao aparelho sensorial humano. Dessa forma, um dos métodos de diferenciação de minerais, que muito provavelmente seja contemporâneo à própria humanidade, constitui-se na simples escolha (*sorting*) baseada em aspectos visuais de espécies presentes.

Para que possa haver a separação, o minério ou mineral útil deve reunir os requisitos de liberação, tamanho e detectabilidade. *Sorting* é aplicado desde que haja liberação prévia dos minerais.

Uma pessoa pode diferenciar simultaneamente cor, brilho, forma e textura, e assim distinguir minerais e/ou rochas. Por outro lado, detectores mecânicos só podem detectar uma propriedade distinta, a qual, para efeito de separação, deve estar uniformemente presente no minério, para o efeito da separação.

Uma grande evolução tecnológica encarregou-se de substituir olhos, cérebro e mãos na operação de escolha de minerais por equipamentos eletromecânicos que embora sofisticados, baseiam-se nas mesmas operações, quais sejam: preparação, distinção e separação propriamente dita.

As técnicas de concentração manual de minerais continuaram sendo bastante empregados até o começo deste século. Entretanto o crescente declínio da presença de minerais em faixas granulométricas grossas, assim como a elevação de custos de mão de obra, determinou o declínio no emprego dos métodos de escolha manual de minerais.

Como a recuperação do mineral útil é o fator preponderante para a aplicação de *sorting*, são poucas as aplicações industriais deste método atualmente.

O sonho de mecanizar a operação de *sorting* começou a tornar-se realidade com o equipamento

desenvolvido por Sweet<sup>1</sup> em 1928, ainda que era ineficiente comparado com a concentração manual.

O primeiro equipamento de sucesso foi desenvolvido por Lapointe Picker<sup>2</sup>, utilizado para concentrar minério de urânio na década de 40. A partir da década de 60 os métodos e equipamentos para *sorting* apresentaram uma grande evolução.

A partir da década de 60 a operação de equipamentos por *sorting* tornou-se possível graças ao advento de alguns meios que podiam executar algumas funções antes executadas somente pelo cérebro humano. Estes equipamentos eram providos de componentes eletrônicos sofisticados e por esta razão, equipamentos de *sorting* são também conhecidos por "sorting eletrônico".

Atualmente emprega-se *sorting* na pré-concentração do minério R.O.M.<sup>3</sup> e na maioria, na concentração de minerais. Observa-se como benefícios o aumento na produção e melhoria no desempenho de processos físicos de concentração e metalúrgicos.

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A propriedade da reflexão de luz em superfícies de cores diferentes é uma das propriedades utilizadas para separar minério de estéril. Com base neste princípio foi desenvolvido um protótipo de *ore sorter* para separar mecanicamente fragmentos de minério e estéril.

A amostra escolhida foi coletada na jazida da Serrana S.A. Mineração em Cajati-SP; composta por carbonatito jacupiranga (minério) de coloração branca e o jacupiranguito (estéril) de coloração escura.

O processo de separação está, portanto, baseado na diferença de reflectividade das superfícies envolvidas. Assim carbonatito refletirá com maior intensidade a luz incidente em relação aos fragmentos de jacupiranguito.

O protótipo é composto basicamente por três etapas. A luz refletida pelo carbonatito é captada por uma célula fotoelétrica (detecção) que transmitirá um sinal (processamento de dados) a um solenóide que separará mecanicamente o minério do estéril (ejeção).

## Protótipo

O protótipo foi construído sobre um transportador de correia com 3,15 m de comprimento e 0,43 m de largura, que se encontra no Laboratório de Tratamento de Minerais e Resíduos Industriais do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP. A correia apresenta uma velocidade de 8,5 cm/s.

Sobre a correia foi fixado uma caixa de madeira com dois orifícios retangulares, sendo um de entrada e outro de saída dos fragmentos.

Na parte superior da caixa foi aberta uma fenda de modo que a luz refletida possa passar e seja captada pela célula fotoelétrica.

O interior da caixa é pintado de branco para propiciar uma melhor difusão da luz proveniente de uma lâmpada fluorescente de 9 W que foi fixada em uma das laterais da caixa.

A célula fotoelétrica foi enclausurada, sendo fixada na face superior de um prisma de base quadrada. Seu interior foi pintado na cor preta para inibir a reflexão da luz proveniente da fenda. Este prisma é blindado de modo a não permitir interferência de campos elétricos externos à célula fotoelétrica. A Figura 1 mostra o esboço do prisma, o posicionamento da célula fotoelétrica juntamente com a fenda que está na face superior da caixa.

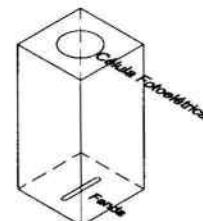


Figura 1 - Esquema do prisma onde se encontra a célula fotoelétrica

## Mecanismos usados no Protótipo

A singularização neste protótipo foi feita manualmente em linha, ou seja, os fragmentos foram dispostos aleatoriamente no transportador de correia em uma fila única, de modo que, ao penetrar na câmara a detecção seja feita. A detecção foi realizada por uma célula fotoelétrica. A luz que penetra na fenda sensibiliza a célula fotoelétrica e o sinal gerado é posteriormente amplificado e transformado em uma onda quadrada. A Figura 2 mostra o circuito projetado para amplificar o sinal.

<sup>1</sup> A. T. Sweet 1.928

<sup>2</sup> A. H. Betters and C. M. Lapointe 1.955

<sup>3</sup> Run of Mine, vindo da mina.

De acordo com o esquema mostrado na Figura 3, o sinal proveniente do circuito amplificador entra em um outro circuito onde há a comparação com um referencial. A sensibilidade pode ser ajustada através de um potenciômetro ( $P_1$ ).

O tempo de ação do solenóide, já que é necessário que haja um intervalo de tempo para que os fragmentos possam chegar ao solenóide, também é ajustado por um potenciômetro ( $P_2$ ).

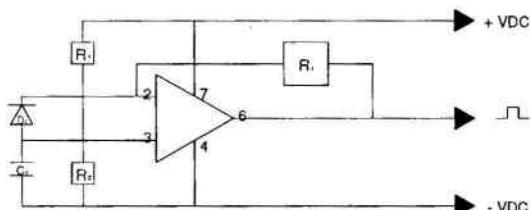


Figura 2: Circuito amplificador de sinal do protótipo

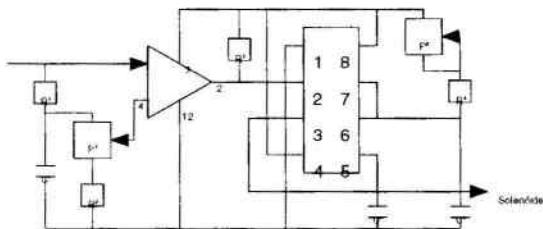


Figura 3: Circuito de processamento de dados e retardo do solenóide

O circuito projetado na Figura 4 mostra o sistema de ejeção do protótipo, que é feita por um solenóide rotacional provido de uma palheta. Um terceiro potenciômetro ( $P_3$ ) ajusta o tempo de atuação do solenóide.

O solenóide foi acoplado na saída da caixa de detecção.

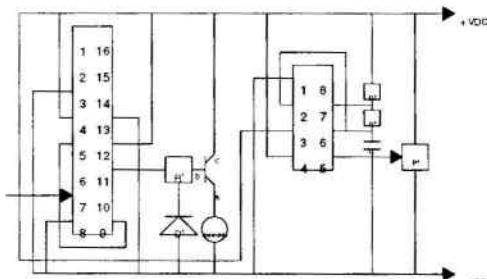


Figura 4: Circuito de ejeção do *ore sorter*

## Aplicação

A Serrana S.A. de Mineração está situada na localidade de Cajati, município de Jacupiranga, SP;

cerca de 230 km da capital. Pertence ao Grupo Bunge, e desde 1946 explora apatita nessa região.

Inicialmente era lavrada somente uma camada superficial de minério residual, decorrente da lixiviação natural dos carbonatos. Decorridos quinze anos de operação, as reservas do minério residual se aproximavam da exaustão. Em vista disso a Serrana tomou a decisão de investir no desenvolvimento de processo capaz de separar apatita das carbonatos, viabilizando o aproveitamento de um minério com apenas 5% de  $P_2O_5$ .

O complexo de Jacupiranga está localizado ao longo do vale do Rio Ribeira de Iguape em uma região de intensa atividade magnética alcalina que inclui diversas ocorrências de material carbonatítico.

A jazida constituída de carbonatitos é circundada por xenólitos de jacupiranguito. Os minerais essenciais que compõem os carbonatitos são calcita, dolomita, apatita e magnetita.

A amostra que foi utilizada no ensaio é proveniente desta jazida da Serrana.

## Metodologia.

Para a execução dos ensaios foram empregados fragmentos na faixa granulométrica de - 31,5 mm + 22,4 mm obtida através do peneiramento. Os fragmentos foram classificados em cinco classes, conforme a proporção de jacupiranguito/carbonatito, avaliada pelos volumes relativos. A Tabela abaixo apresenta a composição da amostra empregada para os testes, com as respectivas siglas.

Tabela I: Siglas dos fragmentos

Sigla	Composição	Nº de Fragmentos
J0C100	100% carbonatito	20
J25C75	25% de jacupiranguito e 75% de carbonatito	12
J50C50	50% de jacupiranguito e 50% de carbonatito	4
J75C25	75% de jacupiranguito e 25% de carbonatito	4
J100C0	100% de jacupiranguito	20

Na Tabela II encontram-se as massas total e unitária das classes de fragmentos.

**Tabela II: Massas dos fragmentos**

Sigla	Nº de Fragmentos	Massa total (g)	Massa unitária (g)
J0C100	20	513,50	25,68
J25C75	12	311,09	25,92
J50C50	4	104,49	26,12
J75C25	4	101,23	25,31
J100C0	20	624,40	31,22

### O ensaio

O objetivo do ensaio foi a separação do material em duas frações, uma contendo fragmentos com 75% de jacupiranguito ou mais (denominou-se de rejeito) e outra com os demais fragmentos (definiu-se como concentrado); por isso o *sorter* foi ajustado para esta condição.

O trabalho foi realizado em duas etapas de seis ensaios cada.

Os fragmentos foram lavados com água para a retirada de finos da superfície.

### RESULTADOS

Devido ao caráter exploratório dos testes, não houve qualquer preocupação em reproduzir na alimentação dos testes as proporções entre os diversos tipos de fragmentos, conforme observados na operação do circuito industrial selecionado.

O objetivo dos testes restringiu-se a examinar a seletividade do equipamento conforme a relação jacupiranguito/carbonatito. O número de fragmentos empregados foi condicionado, portanto, à disponibilidade dos mesmos. Os resultados obtidos dos ensaios estão descritos nas Tabelas III e IV que se seguem.

Através destes dados calculou-se a recuperação de carbonatito e do jacupiranguito. No cálculo da recuperação levou-se em conta a massa dos fragmentos, o número de fragmentos e a porcentagem do mesmo no misto, conforme mostra a fórmula (1) abaixo:

$$R_{\text{carbonatito}} = \frac{\sum (m_{\text{separada}} \cdot n^{\circ} \text{fragmentos} \cdot \% \text{fragmento})_{\text{carbonatito}}}{\sum m_{\text{total}} \cdot n^{\circ} \text{fragmentos} \cdot \% \text{fragmento}} \quad (1)$$

O cálculo da recuperação do jacupiranguito é análogo ao de carbonatito.

Calculou-se o teor do minério e do estéril. No cálculo do teor levou-se em conta a massa dos

fragmentos, o número de fragmentos e a porcentagem do mesmo no misto, como mostra a fórmula (2) abaixo:

$$t_{\text{carbonatito}} = \frac{\sum (m_{\text{separada}} \cdot n^{\circ} \text{fragmentos} \cdot \% \text{fragmento})_{\text{carbonatito}}}{\sum (m_{\text{total}} \cdot n^{\circ} \text{fragmentos})_{\text{carbonatito}}} \quad (2)$$

Os resultados demonstram que as separações executadas proporcionaram, em média, a geração de concentrados com teor de 85% de carbonatito, frente a 49% da alimentação, e recuperações em massa de 42,4% e metalúrgica de 94,2% de carbonatito. Os resultados estão apresentados na Tabela V.

### COMENTÁRIOS

Por tratar-se de ensaios exploratórios alguns aspectos não foram considerados no trabalho, tais como:

1. Forma de alimentação - a alimentação foi feita manualmente;
2. Taxa de alimentação;
3. Variados tamanhos de fragmentos;
4. Otimização do processo de separação;
5. Consumo de energia.

Testes iniciais indicaram a necessidade de lavagem prévia dos fragmentos, uma vez que a seletividade foi baixa com fragmentos tal como recebidos.

Com bases nos resultados, há uma aplicação potencial do *ore sorter* na operação da Serrana, e é discutido a seguir duas situações:

A primeira situação é devida a diluição do minério, na lavra há a inclusão de xenólitos de jacupiranguito que são, portanto, alimentados na usina. Uma proposta de aplicação do equipamento é colocá-lo na saída do britador cônico primário, onde o jacupiranguito seria retirado do minério antes mesmo de entrar na usina. Outra proposta, é na saída das peneiras vibratórias com fragmentos maiores que 100 mm, pois o jacupiranguito acumula-se nas frações mais grosseiras e portanto determina a carga circulante da britagem.

A segunda situação, é na britagem do estéril para brita; com a britagem há a liberação do carbonatito, portanto colocando-se um equipamento de *sorter* na saída do britador separaria o carbonatito do jacupiranguito e o carbonatito seria encaminhado para a usina de tratamento.

Este protótipo é um equipamento extremamente flexível a aplicações semelhantes, visto

que apresenta ajustes específicos por meio de potenciômetros.

## CONCLUSÕES

O presente trabalho descreve a concepção, o projeto e a construção de um equipamento protótipo de separação de minerais com base nas propriedades ópticas.

O projeto eletrônico razoavelmente complexo, conta com componentes de baixo custo, utilizados na fases de detecção a separação.

O protótipo foi empregado em uma série de testes exploratórios que revelaram excelente seletividade frente aos objetivos estabelecidos.

Embora os resultados obtidos indiquem seu emprego potencial no circuito industrial selecionado, o equipamento desenvolvido não se restringe à aplicação descrita, mas uma vez que o circuito eletrônico com ajustes capazes de adaptar o equipamento a minérios e processos distintos.

Trata-se portanto de um desenvolvimento relevante em função da sua aplicação em minérios brasileiros dada a escassez deste tipo de equipamento no Brasil, consequência direta dos altos custos de modelos comerciais.

## AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de expressar seus sinceros agradecimentos a todos que direta e indiretamente colaboraram na execução deste trabalho. Ao orientador e Professor Homero Delboni Júnior pelas sugestões e pela colaboração na exaustivo trabalho de revisão de texto. Aos funcionários do Laboratório de Tratamento de Minerais e Resíduos Industriais do Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP, que colaboraram na execução do protótipo. Ao Professor Guido Stolfi do Laboratório de Comunicação e Sinais do Departamento de Engenharia Elétrica da EPUSP, que colaborou no projeto eletrônico e na construção dos circuitos.

Tabela III: Separação por fragmentos

SIGLA											
J100C0		J75C25		J50C50		J25C75		J0C100			
Dect. <sup>1</sup>	N.Dect. <sup>2</sup>										
0	20	1	3	2	2	12	0	20	0		
0	20	2	2	4	0	11	1	20	0		
0	20	2	2	3	1	12	0	20	0		
0	20	1	3	4	0	11	1	19	1		
0	20	0	4	3	1	11	1	20	0		
0	20	0	4	0	4	12	0	20	0		
0	20	0	4	2	2	10	2	19	1		
0	20	0	4	1	3	11	1	19	1		
0	20	0	4	2	2	10	2	20	0		
0	20	0	4	1	3	10	2	19	1		
0	20	0	4	1	3	10	2	19	1		
0	20	0	4	2	2	10	2	19	1		

Média dos fragmentos separados

0,0	20,0	0,5	3,5	2,1	1,9	10,8	1,2	19,5	0,5		
-----	------	-----	-----	-----	-----	------	-----	------	-----	--	--

1. Fragmento detectável - minério.

2. Fragmento não detectável - estéril.

Tabela IV: Separação por massa dos fragmentos

SIGLA											
J100C0		J75C25		J50C50		J25C75		J0C100			
Dect. <sup>1</sup>	N.Dect. <sup>2</sup>	Dect. <sup>1</sup>	N.Dect. <sup>2</sup>	Dect. <sup>1</sup>	N.Dect. <sup>2</sup>	Dect. <sup>1</sup>	N.Dect. <sup>2</sup>	Dect. <sup>1</sup>	N.Dect. <sup>2</sup>	Dect. <sup>1</sup>	N.Dect. <sup>2</sup>
0,00	624,40	25,92	77,77	52,25	52,25	303,69	0,00	513,50	0,00		
0,00	624,40	51,85	51,85	104,49	0,00	278,38	25,31	513,50	0,00		
0,00	624,40	51,85	51,85	78,37	26,12	303,69	0,00	513,50	0,00		
0,00	624,40	25,92	77,77	104,49	0,00	278,38	25,31	487,83	25,68		
0,00	624,40	0,00	103,70	78,37	26,12	278,38	25,31	513,50	0,00		
0,00	624,40	0,00	103,70	0,00	104,49	303,69	0,00	513,50	0,00		
0,00	624,40	0,00	103,70	52,25	52,25	253,08	50,62	487,83	25,68		
0,00	624,40	0,00	103,70	26,12	78,37	278,38	25,31	487,83	25,68		
0,00	624,40	0,00	103,70	52,25	52,25	253,08	50,62	513,50	0,00		
0,00	624,40	0,00	103,70	26,12	78,37	253,08	50,62	487,83	25,68		
0,00	624,40	0,00	103,70	52,25	52,25	253,08	50,62	487,83	25,68		
0,00	624,40	0,00	103,70	52,25	52,25	253,08	50,62	487,83	25,68		
<b>Média da massa separada (g)</b>											
0,00	624,40	12,96	90,73	54,42	50,07	274,16	29,53	500,66	12,84		

1. Fragmento detectável - minério.

2. Fragmento não detectável - estéril.

Tabela V: Teores e recuperações

Descrição	Alimentação	Concentrado	Rejeito
Teor do jacupiranguito (%)	51	15	77,5
Teor do carbonatito (%)	49	85	22,5
<b>Recuperação Metalúrgica (%)</b>			
Jacupiranguito	-	5,8	92,9
Carbonatito	-	94,2	7,1
<b>Recuperação em massa (%)</b>			
-	100	42,4	57,6

## REFERÊNCIAS

1. BETTERS, A.H.; LAPOINTE, C.M. **Electronic Concentration of Low Grade Ores with the Lapointe Picker.** S.l., Mines Branch/Canada, 1.955 ( Technical Paper,10)
2. KELLY, E.G.; SPOTTISWOOD, D. J. **Introduction to Mineral Processing.** New York, John Wiley, 1.982. Cap. 11, p. 237-42; Ore Sortimg.
3. LENHARO, S. L. R. **Caracterização mineralógica/tecnológica das apatitas de alguns depósitos brasileiros de fosfatos.** São Paulo, 1994. 196 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica de São Paulo.
4. POSSA, M.V. et al Usina de Concentração de fosfato da Serrana S.A. de Mineração. In: LUZ, A.B.; ALMEIDA, S.L.M. **Manual de usinas de beneficiamento.** Rio de Janeiro, CATEM, CNPq, 1.989. p. 67-82.
5. SWEET, A. T. Color and Luster as a Basis for Concentration. In: Lake Superior Mining Institute, 1.928. **Proceedings.** S.n.t.
6. WYMAN, R.A. Sorting by eletronic selection. In: WEISS, N.L. ed. **SME Mineral Processing Handbook.** New York, AIME 1.985. Pat 2, sect. 7-2, p. 7-57-29.