

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO DE UNIDADES INDUSTRIAIS

Maria Lúcia M. de Oliveira⁽¹⁾; José Aury de Aquino⁽¹⁾; Maurílio Dias Fernandes⁽¹⁾

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN/CNEN – mlmo@urano.cdtn.br

Luiz Antônio da Fonseca⁽²⁾

FOSFÉTIL – fosferti@zaz.com.br

RESUMO

A viabilização da indústria mineral brasileira, frente à globalização da economia mundial, está intimamente relacionada à otimização de seus processos produtivos visando a redução dos custos de investimento e operacionais e o melhor aproveitamento de suas reservas. Para otimização dos processos produtivos, é de fundamental importância a determinação do diagnóstico do desempenho das unidades industriais. Esse diagnóstico é realizado a partir de uma análise crítica do rendimento e da qualidade dos produtos em função das condições operacionais e de processo.

A primeira etapa dessa avaliação consiste na amostragem dos diversos fluxos que compõem o circuito seguida da caracterização química, granulométrica e mineralógica. O balanço de massa e metalúrgico é determinado a partir dos resultados das análises químicas dos diversos fluxos, utilizando a metodologia desenvolvida por *Smith e Ychiyen* (Smith e Ychiyen, 1973). Utilizando os resultados do balanço de massa são determinadas as eficiências das diferentes etapas do circuito. Com base nos resultados do diagnóstico são identificadas as etapas de maior importância no processo e indicados os pontos passíveis de modificações para se promover melhorias nos rendimentos e nos teores do produto final.

Utilizando essa metodologia foi realizado o diagnóstico da unidade industrial da ULTRAFÉRTIL em Catalão - GO. Esse diagnóstico permitiu identificar pontos críticos de recuperação e seletividade do processo indicando alterações nas condições operacionais dos circuitos que poderão levar a melhorias significativas nos seus rendimentos globais.

INTRODUÇÃO

A avaliação do desempenho operacional de toda unidade produtiva constitui instrumento gerencial básico para subsidiar ações que resultem em aumento de rendimentos, ajustes em parâmetros do processo e a

determinação de custos de produção, a serem permanentemente minimizados (Fernandes et al, 1995).

Neste contexto, a ULTRAFÉRTIL S.A., em parceria com o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN e a Moreira Fernandes Consultoria Ltda – MFC, desenvolveu um programa de avaliação aplicado à sua usina industrial de Catalão, Goiás, produtora de concentrados de rochas fosfáticas. Esta usina é constituída pelas etapas de britagem, homogeneização em pilhas, moagem, separação magnética, deslamagem e flotação em três circuitos distintos: grossos, finos e ultrafinos.

O programa de avaliação contemplou essencialmente o cálculo do balanço de massa e metalúrgico e a determinação de desempenho dos circuitos de flotação de grossos, finos e ultrafinos. Como base para este trabalho, foram efetuadas amostragens em diferentes pontos do circuito. As amostras obtidas foram caracterizadas granulométrica, química e mineralogicamente. Adicionalmente, foram determinados teores de P_2O_5 nas frações granulométricas das amostras de alimentação e dos produtos da flotação.

Este trabalho tem por objetivo apresentar a metodologia utilizada no diagnóstico da unidade industrial da ULTRAFÉRTIL incluindo as observações e recomendações para otimização dos rendimentos do processo.

METODOLOGIA

O planejamento da amostragem e o estabelecimento de critérios operacionais para a coleta das amostras visando garantir a confiabilidade dos resultados foram consolidados no *Plano de amostragem da unidade industrial de concentração de fosfato da Ultrafértil/Catalão*". Segundo esse plano foram amostrados 32 fluxos representados no fluxograma da Figura 1.

A metodologia adotada neste programa para a determinação do balanço de massa e metalúrgico baseia-se numa técnica proposta por **Smith & Ichiyen** (Smith e Ychiyen, 1973) que permite o ajuste de massas e teores a partir exclusivamente de análises químicas dos diversos fluxos.

A aplicação desta técnica requer o uso de programas de computador desenvolvidos especificamente para cada tipo de circuito e para cada conjunto de elementos de controle. Considerando as características do circuito da usina da ULTRAFÉRTIL, foram desenvolvidos os programas que permitiram a avaliação global da usina, com a compatibilização das massas de sólido em cada fluxo com os teores ajustados para 9 (nove) elementos de controle: P₂O₅ total, P₂O₅ apatítico, Fe₂O₃, Al₂O₃, MgO, SiO₂, CaO, BaO e TiO₂.

Utilizando as análises químicas e as relações estequiométricas dos diversos elementos nos minerais foi elaborado o balanço de massa e mineralógico do circuito de concentração de minério fosfático. Neste balanço foram contemplados todos os principais fluxos com indicações dos teores ajustados para os minerais apatita, barita, ilmenita, gorceixita, micas, quartzo e goethita/magnetita.

Para avaliação dos resultados obtidos nos balanços de massa, metalúrgico e mineralógico foram calculadas as principais variáveis operacionais e alguns índices de desempenho da flotação.

Variáveis Operacionais

O tempo de residência médio da fase líquida na coluna foi estimado pela seguinte expressão:

$$\tau_l = \frac{A_c \cdot H_c \cdot (1 - \epsilon_g)}{Q_t} \quad (1)$$

O tempo de residência das partículas sólidas na coluna foi calculado por:

$$\tau_p = \tau_l \cdot \left[\frac{\frac{J_{sf}}{(1 - \epsilon_g)}}{\frac{J_{sf}}{(1 - \epsilon_g)} + U_{SP}} \right] \quad (2)$$

$$J_{sf} = J_T = \frac{Q_{FW} + [(1 - R_{TOT}) \cdot Q_{FS}]}{A_c} + J_B \quad (3)$$

Os tempos de residência nas células mecânicas foram determinados pela seguinte equação:

$$\tau = 60 \cdot \frac{\text{Volume da célula (m}^3\text{)}}{\text{Vazão da polpa de alimentação (m}^3\text{/h)}} \quad (4)$$

Os valores de viés (*bias*) foram calculados considerando a relação entre a vazão volumétrica de polpa da fração não flotada (Q_T) e da alimentação das colunas (Q_F) pela expressão:

$$B = \frac{Q_T}{Q_F} \quad (5)$$

As velocidades superficiais dos diferentes fluxos do circuito foram calculadas considerando a relação entre a vazão volumétrica de determinada fase e a área da seção transversal da coluna, isto é, (cm³/s)/cm² ou cm/s.

Índices de Desempenho

A **Eficiência de Separação (ES)** da apatita com relação aos minerais de ganga foi determinada utilizando a seguinte equação:

$$ES = \frac{W \cdot M}{F \cdot f} \cdot \left(\frac{c - f}{M - f} \right) \quad (6)$$

O **índice de seletividade** da apatita em relação aos demais minerais foi calculado pela seguinte equação:

$$IS = \sqrt{\frac{R_{AP} \cdot R_{Mg}}{(100 - R_{AP}) \cdot (100 - R_{Mg})}} \quad (7)$$

A **constante cinética** de flotação para as colunas foi calculada através da equação:

$$R_c = 1 - \frac{4 \cdot a \cdot \exp\left(\frac{1}{2 \cdot N_d}\right)}{(1 + a)^2 \exp\left(\frac{a}{2 \cdot N_d}\right) - (1 - a)^2 \exp\left(\frac{-a}{2 \cdot N_d}\right)} \quad (8)$$

onde:

$$a = (1 + 4K \cdot \tau_p \cdot N_d)^{1/2} \quad (9)$$

$$N_d = \frac{0,063 \cdot d_c \cdot \left(\frac{J_g}{1,6}\right)^{0,3}}{\left[\left(\frac{J_{sf}}{(1 - \epsilon_g)}\right) + U_{SP}\right] \cdot H_c} \quad (10)$$

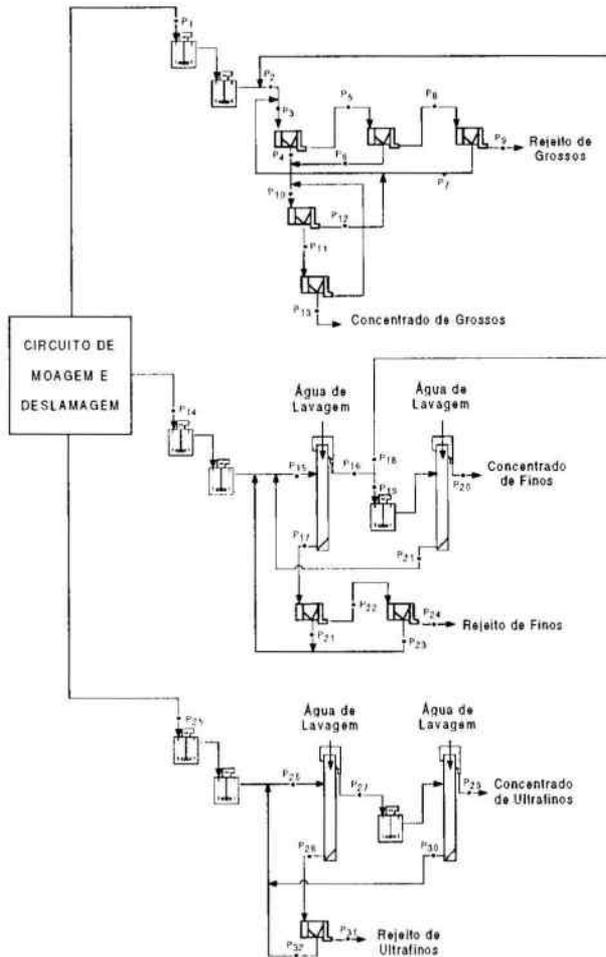


Figura 1 – Fluxograma com os pontos de amostragem da unidade industrial da Ultrafértil em Catalão

A constante cinética das células mecânicas foi calculada utilizando a seguinte equação:

$$R_c = \frac{k \cdot \lambda}{1 + k \cdot \lambda} \quad (12)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 1 estão apresentadas consolidações dos resultados obtidos. A seguir serão apresentados comentários sobre os parâmetros operacionais das colunas e células mecânicas obtidos a partir do balanço de massa e metalúrgico.

Os resultados do circuito de grossos demonstraram que foi obtido um concentrado com teor e recuperação de P_2O_5 , nesta etapa de 36,0 e 59,5%, respectivamente. As etapas *rougher* e *scavenger* apresentaram elevada

seletividade e baixa recuperação. Isso se deve provavelmente às baixas dosagens de reagentes coletores utilizadas. Em função do elevado teor de P_2O_5 do concentrado *rougher*, as etapas *cleaner* e *re-cleaner* estão operando com baixa eficiência de separação da apatita com relação aos minerais de ganga, principalmente a barita.

Os resultados do circuito de finos mostram que foi obtido um concentrado com teor de 34,6 % de P_2O_5 e recuperação nesta etapa de apenas 45,4 %. Isso se deve aos baixos níveis de recuperação das etapas *rougher* (51,9 %) e *scavenger* (58,8 %). Uma das alternativas para melhorar o desempenho destas etapas poderá ser aumentar a dosagem de coletor. Além disto, verifica-se também em todas as etapas do circuito uma baixa seletividade da flotação de apatita em relação à barita.

Os resultados do circuito de ultrafinos mostram que foi obtido um concentrado final com teor de 34,9 % de P_2O_5 e recuperação de apenas 52,4 %. Isso também se deve provavelmente aos baixos níveis de recuperação das etapas *rougher* (47,9 %) e *scavenger* (36,6 %). De maneira análoga ao circuito de finos, uma das alternativas para melhorar o desempenho destas etapas poderá ser aumentar a dosagem de coletor. Além disto, poderá ser estudada técnica e economicamente a substituição das células mecânicas por coluna na etapa *scavenger*.

Os **tempos de residência** obtidos nas etapas *cleaner* dos circuitos de grossos, finos e ultrafinos, são muito superiores aos usualmente utilizados nos circuitos de flotação. A utilização de tempos de residência elevados na etapa *cleaner* normalmente acarreta baixa seletividade no processo de flotação.

Os valores de viés (*bias*) obtidos nas colunas *rougher* dos circuitos de finos e ultrafinos foram inferiores a 1,0, indicando a possibilidade de utilização de água de lavagem. Nas colunas *cleaner* os valores de viés (*bias*) estão no limite inferior, podendo ser aumentadas as vazões de água de lavagem.

Os valores de **velocidade superficial de ar** obtidos nas colunas estão superiores aos usualmente utilizados em outras unidades industriais de flotação de fosfato. Entretanto, mesmo utilizando velocidades elevadas na etapa *rougher* dos circuitos de finos e ultrafinos, os níveis de recuperação de P_2O_5 foram significativamente baixos.

Nas etapas *rougher* e *scavenger* dos circuitos de grossos e de finos, foram obtidos valores médios da **eficiência de separação** da apatita com relação aos minerais de ganga variando de 0,3 a 0,4. Por outro lado, nas etapas *cleaner* e *re-cleaner* do circuito de grossos e *cleaner* do circuito de finos a eficiência de separação

foram baixas (de 0,04 a 0,19), indicando um menor grau de seletividade do processo de flotação nessas etapas. Com relação à flotação de ultrafinos, a eficiência de separação foi semelhante nas etapas *rougher*, *scavenger* e *cleaner* demonstrando a adequabilidade da coluna de flotação para concentração de materiais com granulometria ultrafina.

Os **índices de seletividade** obtidos mostram que, de uma maneira geral, há uma maior seletividade da flotação de apatita em relação ao quartzo e à goethita/magnetita e menor em relação à barita.

Os valores de **constante cinética** de flotação da apatita, demonstram que há uma variação significativa nas diferentes etapas do processo de flotação sendo mais elevados no circuito de grossos e mais baixos no de ultrafinos. Entre os minerais de ganga, a barita apresenta valores de cinética de flotação mais elevados.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A avaliação de desempenho da unidade de concentração da rocha fosfática de Catalão permitiu identificar alguns pontos críticos para a eficiência do processo, especialmente por conduzir a recuperações inferiores às esperadas, com elevados teores de apatita nos rejeitos. Os pontos mais importantes em que foram sugeridas modificações são:

- Flotação *rougher* do circuito de grossos;
- Flotação *scavenger* do circuito de grossos;
- Flotação *cleaner* do circuito de grossos;
- Flotação *cleaner* (coluna 2) do circuito de ultrafinos;
- Flotação *cleaner* (coluna 2) do circuito de finos.
- Duas alternativas para melhorar a eficiência da etapa *rougher* do circuito de grossos, foram sugeridas:
- aumentar a recuperação da apatita na célula *rougher* através de modificações nas dosagens de coletores, com a produção de uma fração flotada de menor teor (28 a 30% em P_2O_5), que deverá ser processada em estágio *cleaner* e *re-cleaner* utilizando tempos de residência menores que os atuais. Para isto sugere-se estudar o uso de coluna de flotação para este estágio.
- efetuar a recirculação do concentrado da célula *scavenger* do circuito de finos na alimentação do circuito de grossos, em substituição a parcela do

flotado da coluna 1 do circuito de finos. Este procedimento poderá resultar num teor mais baixo na alimentação da célula *rougher* 1 e uma maior massa de recirculação no circuito de grossos. Esta operação poderá reduzir os teores no flotado do *rougher* 1, ajustando melhor os teores e as recuperações para os estágios subsequentes.

As seguintes alternativas foram sugeridas para reduzir o tempo de residência na flotação *cleaner* (colunas 2 dos circuitos de finos e ultrafinos):

- eliminar a recirculação da parcela do flotado da coluna 1 – circuito de finos – na flotação dos grossos, deixando todo o flotado da coluna 1 alimentar a coluna 2 (*cleaner*). Neste caso, torna-se necessária a recirculação do concentrado da célula *scavenger* do circuito de finos na alimentação do circuito de grossos, conforme procedimento descrito anteriormente.
- modificar condições operacionais da coluna 1 do circuito de ultrafinos, de forma a aumentar os rendimentos e reduzir os teores em P_2O_5 . A etapa *cleaner* poderia operar com maior eficiência, garantindo teores e recuperações mais adequadas.

O diagnóstico da unidade industrial da ULTRAFÉRTIL de Catalão permitiu identificar pontos críticos de recuperação e seletividade do processo indicando alterações nas condições operacionais dos circuitos que poderão levar a melhorias significativas nos seus rendimentos globais.

NOMENCLATURA

A_C = área da seção transversal da coluna

c = teor de P_2O_5 no concentrado

d_C = diâmetro da coluna

F = vazão de sólidos na alimentação

f = teor de P_2O_5 na alimentação

g = aceleração da gravidade

H_C = altura da zona de recuperação

J_B = velocidade superficial do Viés (*bias*)

J_g = velocidade superficial do ar

J_{S1} = velocidade superficial da polpa

J_T = velocidade superficial da fração não flotada

k = constante cinética de flotação

M = teor de P_2O_5 na apatita

N_d = número de dispersão

Q_{FS} = vazão de sólidos na alimentação

Q_{FW} = vazão de água na alimentação

Q_t = vazão volumétrica de polpa da fração não flotada

R_c = recuperação dos minerais na zona de recuperação

R_{TOT} = recuperação de massa na fração flotada

R_{MG} = recuperação do mineral de ganga no concentrado

R_{AP} = recuperação de apatita no concentrado

U_{SP} = velocidade relativa

W = vazão de sólidos no concentrado

τ_p = tempo de residência das partículas

τ_l = tempo de residência da fase líquida

ρ = densidade da polpa (g/cm^3)

λ = tempo de residência da polpa na célula

$\Delta\rho$ = diferença de densidade entre as fases polpa e ar

AGRADECIMENTOS

À FOSFÉRTIL pela autorização para publicação deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fernandes M.D., Yianatos, J.B., Oliveira, M.L.O., Aquino, J.A. **Avaliação de desempenho de circuitos de processamento mineral**. Belo Horizonte: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN NI CT5-01/95. 1995
- Smith, H.W., Ychiyen, N. Computer adjustments of metallurgical balances. **Canadian Mining and Metallurgical Bulletin**. September P 97-100, 1973
- Aquino, J.A., Oliveira, M.L.M., Fernandes, J.A. **Diagnóstico da PLANTA Industrial de Concentração de Fosfato da Ultrafertil de Catalão –GO**. Moreira Fernandes Consultoria Ltda – Rel MFC-UT-01/98. 1998

Tabela 1 – Consolidação dos resultados obtidos nos circuitos de flotação

VALORES CALCULADOS	ULTRAFINOS			FINOS				GROSSOS				
	R	C	S	R1	R2	C	S	R1	R2	S	C	RC
Tempo de residência médio (min)												
Polpa	34,50	266,25	19,00	35,70	36,01	90,66	7,80	9,90	10,90	15,20	42,20	16,70
Partículas	32,50	170,24	---	23,83	24,17	35,37	---	---	---	---	---	---
Viés (bias)												
	---	0,83	0,26	---	0,87	0,85	1,11	---	---	---	---	---
Velocidades superficiais (cm/s)												
Água de lavagem	0,054	0,060	---	0,000	0,000	0,085	---	---	---	---	---	---
Ar	---	1,340	1,031	---	1,480	1,473	1,226	---	---	---	---	---
Polpa	---	0,305	0,032	---	0,294	0,294	0,112	---	---	---	---	---
Teor de P₂O₅ apatítico (%)												
Alimentação	13,70	29,93	9,14	17,93	17,93	32,98	12,01	21,34	16,96	13,45	35,26	36,57
Concentrado	29,93	35,32	24,92	32,98	32,98	35,07	25,48	35,73	34,07	32,78	36,57	36,86
Recuperação de P₂O₅ (%)												
Concentrado	47,93	75,91	36,62	51,92		73,43	58,84	39,08	34,14	37,18	68,84	72,89
Eficiência de separação												
	0,39	0,40	0,30	0,41	0,41	0,20	0,44	0,32	0,29	0,32	0,15	0,04
Índice de seletividade da apatita em relação												
Barita	1,86	1,83	1,43	1,31	1,31	0,94	1,05	1,10	0,89	0,85	1,11	0,54
Ilmenita	3,33	4,19	2,61	3,98	3,98	2,47	2,91	3,63	3,35	3,17	1,27	1,19
Gorceixita	2,45	4,19	0,98	4,26	4,26	1,00	0,94	2,59	0,89	4,38	1,53	2,37
Micas	2,76	1,95	3,18	2,36	2,36	1,97	2,20	1,97	2,09	2,37	1,60	1,22
Quartzo	2,54	2,60	3,35	4,89	4,89	1,94	5,28	6,09	5,08	6,08	2,69	2,03
Goethita / magnetita	4,72	1,35	2,98	4,34	4,34	1,20	5,23	4,05	3,73	5,19	2,02	1,58
Constantes cinéticas (min⁻¹)												
Apatita	0,027	0,018	0,026	0,045	0,044	0,103	0,206	0,067	0,048	0,016	0,054	0,161
Barita	0,008	0,005	0,013	0,027	0,026	0,114	0,188	0,055	0,062	0,017	0,044	0,543
Ilmenita	0,003	0,002	0,004	0,003	0,003	0,019	0,024	0,005	0,004	0,004	0,034	0,114
Gorceixita	0,005	0,001	0,027	0,007	0,003	0,103	0,232	0,010	0,061	0,001	0,023	0,029
Micas	0,004	0,005	0,003	0,009	0,008	0,029	0,043	0,017	0,011	0,006	0,021	0,109
Quartzo	0,004	0,003	0,002	0,002	0,002	0,030	0,007	0,002	0,002	0,001	0,008	0,038
Goethita / magnetita	0,001	0,010	0,003	0,003	0,003	0,074	0,075	0,004	0,004	0,002	0,014	0,065

R = Rougher C = Cleaner S = Scavenger RC = Recleaner